



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO  
INSTITUTO DE FÍSICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA AMBIENTAL**

**DESENVOLVIMENTO DE  
ANEMÔMETRO DE FIO QUENTE PARA  
APLICAÇÕES EM ESTUDOS DE CIÊNCIAS  
ATMOSFÉRICAS**

**LUIZ EDUARDO BARROS DA GUIA**

**Orientador: Prof. Dr. João Basso Marques**

**Cuiabá, MT  
Fevereiro de 2019**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO  
INSTITUTO DE FÍSICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA AMBIENTAL**

**DESENVOLVIMENTO DE  
ANEMÔMETRO DE FIO QUENTE PARA  
APLICAÇÕES EM ESTUDOS DE CIÊNCIAS  
ATMOSFÉRICAS**

**LUIZ EDUARDO BARROS DA GUIA**

**Orientador: Prof. Dr. João Basso Marques**

**Cuiabá, MT  
Fevereiro de 2019**

### **Dados Internacionais de Catalogação na Fonte.**

B277d Barros da Guia, Luiz Eduardo.  
DESENVOLVIMENTO DE ANEMÔMETRO DE FIO QUENTE PARA  
APLICAÇÕES EM ESTUDOS DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS / Luiz Eduardo  
Barros da Guia. -- 2019  
56 f. : il. color. ; 30 cm.

Orientador: João Basso Marques.  
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Mato Grosso, Instituto de  
Física, Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental, Cuiabá, 2019.  
Inclui bibliografia.

1. Instrumentação meteorológica. 2. Anemometria. 3. velocidade do vento. I.  
Título.

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

**Permitida a reprodução parcial ou total, desde que citada a fonte.**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO**  
**INSTITUTO DE FÍSICA**  
**Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental**

**FOLHA DE APROVAÇÃO**

**TÍTULO:** DESENVOLVIMENTO DE ANEMÔMETRO DE FIO QUENTE  
PARA APLICAÇÕES EM ESTUDOS DE CIÊNCIAS  
ATMOSFÉRICAS

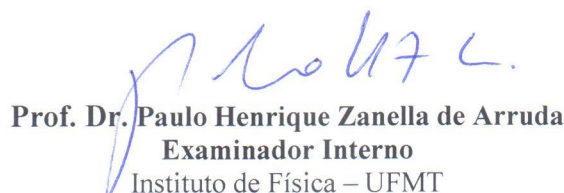
**AUTOR:** LUIZ EDUARDO BARROS DA GUIA

Dissertação de Mestrado defendida e aprovada em 26 de fevereiro de 2019, pela  
comissão julgadora:

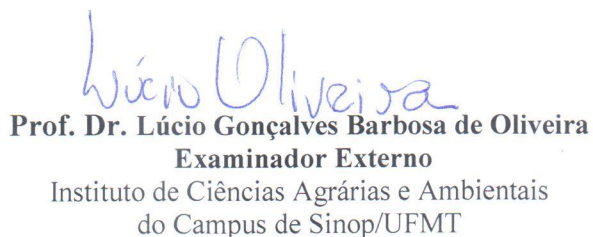


**Prof. Dr. João Basso Marques**  
**Orientador**

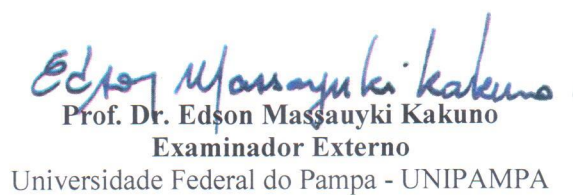
Programa Nacional de Pós-Doutorado – CAPES



**Prof. Dr. Paulo Henrique Zanella de Arruda**  
**Examinador Interno**  
Instituto de Física – UFMT



**Prof. Dr. Lúcio Gonçalves Barbosa de Oliveira**  
**Examinador Externo**  
Instituto de Ciências Agrárias e Ambientais  
do Campus de Sinop/UFMT



**Prof. Dr. Edson Massauyuki Kakuno**  
**Examinador Externo**  
Universidade Federal do Pampa - UNIPAMPA

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>v</b>
<b>LISTA DE TABELAS .....</b>	<b>vi</b>
<b>LISTA DE ABREVIACÕES E SÍMBOLOS .....</b>	<b>vii</b>
<b>RESUMO.....</b>	<b>1</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>2</b>
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>3</b>
1.2 Justificativa.....	4
1.3 Objetivo geral .....	5
1.3.1 Objetivos específicos .....	6
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>6</b>
2.1 Efeito Joule .....	7
2.2 Transferência de calor por condução .....	7
2.3 Transferência de calor por radiação .....	8
2.4 Transferência de calor por convecção .....	8
2.5 Lei de King.....	9
2.6 Princípios de funcionamento do anemômetro de fio quente.....	10
2.6.1 Troca de calor entre o filamento e o ar.....	10
2.7 Ambiente de simulação LTspice .....	14
<b>3 METODOLOGIA DA PESQUISA .....</b>	<b>14</b>
3.1 Circuito Eletrônico. ....	14
3.2 Desenvolvimento da sonda de fio quente .....	16
3.2.1 Etapas preliminares .....	16
3.2.2 Estudo da sensibilidade do filamento .....	17
3.3 Estudo dos efeitos das variáveis externas .....	19
3.3.1 Variação natural das variáveis externas .....	21
3.3.2 Variação forçada da pressão interna .....	21
3.3.3 Variação forçada da temperatura interna.....	22
3.3.4 Variação forçada da umidade interna .....	23
3.3.5 Design da estrutura de proteção da sonda.....	23
3.4 Desenvolvimento do circuito eletrônico .....	24
3.4.1 Ajuste da Ponte de Wheatstone .....	24
3.4.2 Estágio de Amplificação.....	28
3.4.3 Realimentação da Ponte de Wheatstone .....	29

3.4.4 Cálculos das componentes $u$ e $v$ .....	30
3.4.5 Testes junto ao anemômetro sônico comercial .....	32
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>33</b>
4.1 Sobre os testes de durabilidade e sensibilidade .....	33
4.2 Sobre os estudos das variáveis externas .....	35
4.2.1 Dados obtidos da variação natural .....	35
4.2.2 Dados obtidos da variação da pressão .....	36
4.2.3 Dados obtidos da variação da temperatura .....	37
4.2.4 Dados obtidos da variação da umidade .....	38
4.2.5 Considerações sobre os estudos das variáveis externas .....	38
4.2.6 Dados obtidos do teste junto ao anemômetro sônico .....	39
<b>5 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>40</b>
<b>7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>41</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação do filamento.....	11
Figura 2 - Circuito típico de anemômetro de fio quente de temperatura constante .....	14
Figura 3 - Imagem conceitual da sonda.....	18
Figura 4 - Sonda de 10mm (à esquerda) e 5mm (à direita).....	18
Figura 5 - Medidas de tensão e corrente.....	19
Figura 6 - Ambiente controlado para testes .....	20
Figura 7 - BMP-180 à esquerda, DHT-22 à direita. ....	20
Figura 8 - Sistema de aquisição de dados.....	20
Figura 9 - Condição natural das variáveis externas.....	21
Figura 10 - Simulação da pressão forçada .....	22
Figura 11 - Simulação forçada da temperatura. ....	22
Figura 12 - Simulação forçada da umidade. ....	23
Figura 13 - Estrutura conceitual .....	24
Figura 14 - Estrutura fabricada em PLA. ....	24
Figura 15 - Simulação no ambiente LTspice. ....	25
Figura 16 - Ponte de wheatstone em funcionamento .....	26
Figura 17 - ( $V_{ref}-V_{fil}$ ) para o filamento superior .....	26
Figura 18 - ( $V_{ref}-V_{fil}$ ) para o filamento inferior .....	27
Figura 19 - Filamento superior submetido ao fluxo de ar.....	27
Figura 20 - Filamento inferior submetido ao fluxo de ar.....	28
Figura 21 - Simulação do estágio de amplificação.....	29
Figura 22 - Forma final do circuito eletrônico.....	30
Figura 23 - Cálculo das componentes de velocidade.....	31
Figura 24 - Posicionamento correto em relação ao norte. ....	32
Figura 25 - Anemômetros instalados no telhado do PPGFA. ....	33
Figura 26 - Testes dos filamentos de 5mm e 10mm.....	33
Figura 27 - Resistências dos filamentos. ....	34
Figura 28 - Variação natural das variáveis externas.....	35
Figura 29 - Variação forçada da pressão .....	36
Figura 30 - Variação forçada da temperatura .....	37
Figura 31 - Variação forçada da umidade.....	38
Figura 32 - Comparação com anemômetro sônico .....	39

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dados obtidos da variação natural. ....	35
Tabela 2 – Dados obtidos da variação da pressão .....	36
Tabela 3 - Dados obtidos da variação de temperatura .....	37
Tabela 4 - Dados obtidos da variação da umidade .....	38



## LISTA DE ABREVIACÕES E SÍMBOLOS

3D - três dimensões  
 $A$  – Constante dependente das características do filamento e do fluido.  
 $B$  – Constante dependente das características do filamento e do fluido.  
 AD620 - amplificador de instrumentação  
 $A_{fil}$  – área da secção transversal do filamento  
 BMP 180 - sensor para medir a pressão atmosférica  
 CFM - pés cúbicos por minuto  
 $d$  - comprimento do filamento de tungstênio  
 $E$  – tensão no filamento  
 $E_{qi}$  - tensão de offset  
 DHT-22 sensor para medir a temperatura e umidade do ar  
 $F(U)$  - função da velocidade do fluido  
 $G$  - amplificação de ganho  
 $h$  – coeficiente de troca de calor por convecção  
 $I$  – Corrente elétrica no condutor  
 $I_{fil.}$  – corrente elétrica no filamento  
 $K$  – constante de condutividade térmica do filamento  
 $K$  - temperatura em Kelvin  
 kW – Kilo Watts  
 LM35 - sensor de temperatura  
 LM741 - amplificador operacional  
 $m$  - metro  
 $mA$  – miliampére  
 mils – milésimos de polegadas  
 $mm$  – milímetros  
 $P_{cond}$  - potência dissipada em forma de condução de calor  
 $P_{conv}$  - potência dissipada em forma de convecção de calor  
 $P_e$  – potência elétrica do condutor  
 $P_{rad}$  – potência dissipada em forma de radiação de calor  
 PLA - Ácido Polilático  
 PPGFA - Programa de Pós Graduação em Física Ambiental  
 $Q_{cond}$  - transferência de calor de um ponto a outro  
 $Q_{conv}$  - transferência de calor de um ponto a outro  
 $Q_{rad}$  - quantidade de calor emitida estimada para corpos reais  
 $R$  - resistência elétrica do filamento  
 $R^2$  - coeficiente de relação  
 $R_g$  - resistência do filamento à temperatura ambiente  
 $R_0$  – resistência elétrica inicial do filamento  
 $R_T$  – resistência elétrica da ponte na condição estática.  
 $R_{fil.}$  – resistência elétrica do filamento  
 SPICE - Simulated Program with Integrated Circuits Emphasis  
 $T_f$  – temperatura do fluido  
 $T_q$  – temperatura do corpo mais quente

$T_s$  – temperatura da superfície sólida  
 $U$  - velocidade do fluido  
 $\vec{u}$  - vetor de eixo de velocidade do vento  
 $\vec{v}$  - vetor de eixo de velocidade do vento  
 $V$  – volts  
 $V_{\text{entrada}}$  - voltagem de entrada  
 $V_{\text{ref}} - V_{\text{fil}}$  - sinal diferencial  
 $V_{\text{saída}}$  - voltagem de saída  
 $W$  - Watts  
 $X$  - constante dependente das características do filamento  
 $Y$  - constantes dependente das características do fluido  
 $\Delta\theta$  – variação de temperatura submetida ao filamento  
 $\mu\text{m}$  - micrometros  
 $\Omega$  - ohm, unidade de medida da resistência elétrica  
 $\alpha$  – coeficiente de temperatura do filamento  
 $\varepsilon$  – emissividade do corpo  
 $\sigma$  – constante de Stefan-Boltzmann  
 $\frac{d\theta}{dx}$  – variação da temperatura do corpo na direção longitudinal  
 $\theta_{fil}$  – temperatura do filamento  
 $\theta_{flu}$  – temperatura do fluido

## RESUMO

GUIA, L. E. B. **Desenvolvimento de anemômetro de fio quente para aplicações em estudos de ciências atmosféricas**. Cuiabá, 2019, 56f. Dissertação (Mestrado em Física Ambiental) - Instituto de Física, Universidade Federal de Mato Grosso.

O trabalho desenvolvido consiste no desenvolvimento de um Anemômetro de Fio Quente que opera à temperatura constante. Este instrumento constitui-se de dois filamentos de tungstênio com 20 $\mu$ m de diâmetro e 10mm de comprimento; circuito eletrônico de realimentação responsável por manter a operação em temperatura constante, e sensor de temperatura para monitoramento da temperatura do ar nas proximidades do instrumento. Os filamentos foram distribuídos espacialmente de maneira que seja possível decompor o vetor velocidade do vento em dois eixos ( $\vec{u}$ ,  $\vec{v}$ ). O dispositivo foi testado junto a um anemômetro sônico modelo WindSonic da marca Gill Instruments. Após a montagem do instrumento, verificou-se que se faz necessário um modelo de correção do sinal de tensão obtido pelos filamentos para que seja possível a calibração em relação ao sensor ultrasônico, pois a condição mais simples de correção não se verificou durante os testes de influências externas.

**Palavras-chave:** instrumentação meteorológica, anemometria, velocidade do vento.

## ABSTRACT

GUIA, L. E. B. **Development of hot wire anemometer for applications in atmospheric science studies..** Cuiabá, 2018, 56f. Dissertation (Master's degree in Environmental Physic) - Institute of Physics, Federal University of Mato Grosso.

This work consists of the development of a Hot Wire Anemometer that operates at constant temperature. The instrument was build up of two tungsten filaments with 20 $\mu$ m diameter and 10mm length; electronic feedback circuit responsible for keeping the operation at constant temperature, and temperature sensor for monitoring the air temperature in the vicinity of the instrument. The filaments were spatially distributed so that it is possible to decompose the wind velocity vector into two axes ( $\vec{u}, \vec{v}$ ). The device was tested against a WindSonic sonic anemometer of the Gill Instruments. After assembly of the instrument, it was verified that a model of correction of the tension signal obtained by the filaments is necessary so that the calibration with the ultrasonic sensor is possible, since the simplest correction condition was not verified during the tests of external influences.

**Keywords:** meteorological instrumentation, anemometry, wind speed.

## 1 INTRODUÇÃO

O atual contexto das discussões sobre as mudanças climáticas na Terra é alarmante, e suas consequências atingem direta e indiretamente a humanidade desde os recursos naturais disponíveis no meio ambiente até aspectos econômicos. No Brasil, por exemplo, há previsões segundo o Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas de que a região nordeste irá sofrer drásticas reduções na disponibilidade de recursos hídricos; aumentos de chuvas na região sudeste impactarão diretamente a agricultura, além do aumento da frequência e intensidade de inundações em cidades como Rio de Janeiro e São Paulo; espécies de plantas do cerrado correm risco de extinção caso a temperatura global média aumentar em  $1.7^{\circ}\text{C}$  quando comparada aos níveis da era pré-industrial, e sendo que hoje o planeta já está  $0,7^{\circ}\text{C}$  mais quente que na época.

Em todo o planeta há pesquisadores desenvolvendo trabalhos de coleta de dados de variáveis meteorológicas que possibilitam estudos para melhor compreender as dinâmicas climáticas. Dentro dessas variáveis tem-se como um dos elementos principais em várias áreas de pesquisa, o estudo da velocidade e direção do vento. Com base nesse estudo é possível: avaliação do potencial eólico de uma determinada região; análise do transporte e espalhamento da poluição atmosférica; estudo do processo de polinização de flores; melhorias da ventilação na construção civil prevendo melhores posições para portas e janelas; estudos da influência dos ventos sobre a evapotranspiração; transferência de calor e vapor d'água, entre outros.

Apesar da importância e de todas essas possibilidades de estudos que podem se abrir, este ainda é um assunto pouco estudado dentro da região do Estado de Mato Grosso, pois há um fator crítico que é a baixa frequência de ocorrência de ventos na região e na maior parte do tempo, os ventos não têm velocidades compatíveis com a sensibilidade dos anemômetros convencionais. Diante deste contexto, torna-se interessante que as pesquisas relacionadas à velocidade do vento sejam melhoradas no âmbito da coleta de dados através de um instrumento capaz de realizar medições com sensibilidade compatível desde os menores até os maiores níveis de velocidade; com precisão e confiabilidade de

modo a garantir o aprimoramento dos estudos envolvidos nessa área da meteorologia.

## **1.2 Justificativa**

Além de ser um assunto pouco difundido pelo estado de Mato Grosso, os equipamentos utilizados para realizar medições dentro desses níveis de velocidade, comumente são anemômetros ultrassônicos que podem ser bidirecionais ou tri direcionais; ambos são equipamentos que representam custos consideravelmente elevados no orçamento de um projeto de pesquisa.

O desenvolvimento desta dissertação visa facilitar o acesso aos instrumentos de medida de velocidade e direção do vento de alta sensibilidade para possibilitar o aumento dos estudos nas regiões onde há baixa periodicidade de ocorrência de ventos, e dificuldade de se obter medições de ventos de baixas velocidades.

Um benefício direto desta pesquisa não apenas para o PPGFA, mas também para todos os pesquisadores de áreas similares, é a possibilidade de suprir a subestimação das medidas de velocidade do vento dentro do cálculo da Razão de Bowen causadas pelos anemômetros do tipo concha; que são comumente mais utilizados, porém devido a sua baixa sensibilidade para baixas velocidades acaba mascarando seu resultado real.

### **1.3 Objetivo geral**

Este trabalho tem como objetivo geral o desenvolvimento de um anemômetro de fio quente, que terá como finalidade aplicações em estudos atmosféricos.

### **1.3.1 Objetivos específicos**

Os objetivos específicos que levam à conclusão do desenvolvimento do anemômetro proposto são:

1. Desenvolvimento de uma sonda específica para ser instalado o filamento de tungstênio.
2. Verificar as influências das variáveis físicas externas ao sinal de tensão produzido pelo filamento.
3. Desenvolvimento do circuito eletrônico responsável por fazer o controle da temperatura do filamento.
4. Fazer a comparação do anemômetro concluído com um anemômetro sônico, e verificar a viabilidade de utilização do modelo proposto em pesquisas de campo.

## **2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**



## 2.1 Efeito Joule

Quando um condutor metálico é percorrido por uma corrente elétrica, acontece o choque dos elétrons com as partículas deste condutor. Esses elétrons transportam consigo uma quantidade de energia cinética durante o seu deslocamento no sentido da corrente elétrica. Ao colidir com partículas no interior do condutor, esses elétrons transferem a energia cinética e transformam parte dela em energia térmica. Esse condutor metálico, que também pode ser representado em termos de sua resistência elétrica, converte a energia elétrica em energia térmica a cada segundo de acordo com a equação da Lei de Joule:

$$P_e = R.I^2$$

(Equação 1)

$P_e$  – Potência elétrica do condutor, [W].

$R$  – Resistência elétrica do condutor, [ $\Omega$ ].

$I$  – Corrente elétrica no condutor, [A].

## 2.2 Transferência de calor por condução

A partir do momento em que um determinado corpo começa a receber calor de alguma fonte externa, esta energia tende a se distribuir por este corpo de maneira gradativa, a partir da transferência de energia cinética de molécula a molécula vizinha. Ocorrendo necessariamente através de um meio material, ou seja, ponto a ponto dentro de um mesmo corpo, ou ainda através do contato direto entre dois corpos; este processo é conhecido por condução de calor, e é regido pela equação abaixo, também conhecida como Lei de Fourier da condução de calor:

$$Q_{cond} = -k.\frac{d\theta}{dx}$$

(Equação 2)

$k$  – Condutividade térmica do corpo, [ $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ ].

$\frac{d\theta}{dx}$  – Variação da temperatura do corpo na direção longitudinal, [K.m<sup>-1</sup>].

## 2.3 Transferência de calor por radiação

A radiação é o processo que acontece quando o calor é transmitido de um corpo que esteja a uma alta temperatura para outro corpo que esteja a uma temperatura menor, quando estes corpos estão separados no espaço mesmo que exista vácuo entre eles. Baseando-se nesta definição, verifica-se que não há necessidade do contato físico entre os corpos para que haja a troca de calor.

É conhecido que todo corpo que possui temperatura absoluta diferente de zero emite calor em forma de radiação, porém, dependendo de sua emissividade e superfície, esta quantidade será maior ou menor. Para os corpos reais, esta quantidade de calor emitida pode ser escrita como:

$$Q_{rad} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot (T_q^4 - T_f^4)$$

(Equação 3)

$\varepsilon$  – Emissividade do corpo, adimensional.

$\sigma$  – Constante de Stefan-Boltzmann, [5,67.10<sup>-8</sup> W.m<sup>-2</sup>.K<sup>-4</sup>].

$A$  – Área da superfície do corpo emissor, [m<sup>2</sup>].

$T_q$  – Temperatura do corpo mais quente, [K].

$T_f$  – Temperatura do corpo mais frio, [K].

## 2.4 Transferência de calor por convecção

A convecção é o processo de transferência de calor entre uma superfície sólida e um líquido ou gás. Em um fluido, onde há grande mobilidade das partículas, estas quando aquecidas pelo contato direto com a superfície sólida tendem a migrar para os pontos de temperaturas menores. Este movimento de partículas culmina na transferência de calor de um ponto a outro, caracterizando a transmissão de calor por convecção, também conhecida como Lei de Newton do Resfriamento.

$$Q_{conv} = h.A.(T_s - T_f)$$

(Equação 4)

$h$  – Coeficiente de troca de calor por convecção,  $[W.m^{-2}.K^{-1}]$ .

$A$  – Área da superfície sólida,  $[m^2]$ .

$T_s$  – Temperatura da superfície sólida,  $[K]$ .

$T_f$  – Temperatura do fluido,  $[K]$ .

## 2.5 Lei de King

Em 1914, Louis Vessot King, professor assistente de Física da universidade de McGill publicava o seu trabalho sobre convecção de calor em pequenos cilindros imersos em fluxo de fluidos. Especificamente, neste trabalho King procurava determinar as constantes de convecção para filamentos de platina que seriam aplicados na anemometria de fio quente.

O experimento consistia em amostras de filamentos entre 1 e 6 mils (25,4 e  $152,4\mu m$ ) alocados em um braço rotativo, junto com um circuito elétrico controlado por um reostato. A velocidade de rotação era controlada para que pudesse ser quantificada a corrente elétrica necessária para que o filamento atingisse temperaturas pré-determinadas. (KING, 1914)

Usualmente, a Lei de King quando aplicada na anemometria de fio quente é escrita segundo a forma que segue:

$$h = A + BU^{\frac{1}{2}}$$

$h$  – Coeficiente de troca de calor por convecção,  $[W.m^{-2}.K^{-1}]$ .

$A, B$  – Constantes que dependem das características do filamento e do fluido.

$U$  – Velocidade de deslocamento do fluido,  $[m.s^{-1}]$ .

(Equação 5)

## 2.6 Princípios de funcionamento do anemômetro de fio quente

### 2.6.1 Troca de calor entre o filamento e o ar

Em essência, a técnica consiste em aplicar uma corrente elétrica a um fino filamento de condutor elétrico, e o expor a um fluido em deslocamento. A resistência elétrica  $R$  do condutor varia diretamente em função de seu coeficiente de temperatura  $\alpha$  (Equação 1), ou seja, quanto mais calor dissipado pelo condutor, maior será a sua resistência elétrica. Em contrapartida, quando o condutor é resfriado, a sua resistência diminui. Essa variação da resistência elétrica devida à troca de calor é relacionada com a variação da velocidade do fluido em deslocamento que é responsável pelo resfriamento do condutor (NASA, 1994).

$$R_{fil} = R_0 \left( 1 + \alpha (\theta_{fil} - \theta_0) \right)$$

(Equação 6)

Onde:

$R_{fil}$  – Resistência do filamento após variação de temperatura,  $[\Omega]$ .

$R_0$  – Resistência inicial do filamento,  $[\Omega]$ .

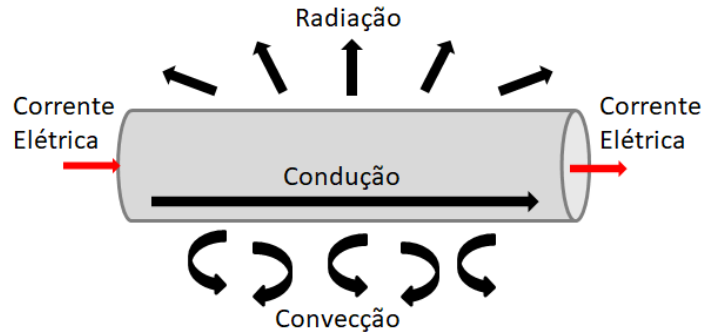
$\alpha$  – Coeficiente de temperatura do filamento,  $[K^{-1}]$ .

$\theta_{fil}$  – Temperatura final do filamento,  $[K]$ .

$\theta_0$  – Temperatura inicial do filamento,  $[K]$ .

Para quantificar a troca de calor entre o filamento e o fluido, deve se levar em consideração as formas e sentido de energia que estão presentes quando o filamento é aquecido ou resfriado. A origem do aquecimento é o efeito joule que acontece no filamento devido à passagem de corrente elétrica, o calor é então

dissipado de três formas: condução, radiação e convecção; conforme representação do filamento na Figura 1.



**Figura 1 - Representação do filamento**

O balanço de energia no filamento pode então ser escrito de forma que a potência elétrica ( $P_e$ ) gerada devido ao efeito joule é igual ao somatório das potências dissipadas nas formas de radiação ( $P_{rad}$ ), condução ( $P_{cond}$ ), e convecção ( $P_{conv}$ ) conforme Equação 7.

$$P_e = P_{rad} + P_{cond} + P_{conv}$$

(Equação 7)

A potência elétrica gerada devido ao efeito joule é calculada segundo a equação 8.

$$P_e = R_{fil} \cdot I_{fil}^2$$

(Equação 8)

Onde:

$R_{fil}$  – Resistência elétrica do filamento, [ $\Omega$ ].

$I_{fil}$  – Corrente elétrica no filamento, [A].

A potência dissipada em forma de radiação de calor é calculada segundo a equação 9.

$$P_{rad} = A_{fil} \cdot \sigma \cdot \varepsilon \cdot (\theta_{fil}^4 - \theta_{flu}^4)$$

(Equação 9)

Onde:

$A_{fil}$  – Área da secção transversal do filamento, [m<sup>2</sup>].

$\sigma$  – Constante de Stefan-Boltzmann , [5,67.10<sup>-8</sup> W.m<sup>-2</sup>.K<sup>-4</sup>].

$\varepsilon$  – Emissividade da superfície do filamento, adimensional.

$\theta_{fil}^4$  – Temperatura do filamento, [K].

$\theta_{flu}^4$  – Temperatura do fluido, [K].

A potência dissipada em forma de condução de calor é calculada segundo a equação 10.

$$P_{cond} = -K \cdot A_{fil} \cdot \frac{d\theta_{flu}}{dx}$$

(Equação 10)

Onde:

$K$  – Constante de condutividade térmica do filamento, [W.m<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>].

$A_{fil}$  – Área da secção transversal do filamento, [m<sup>2</sup>].

$\theta_{flu}$  – Temperatura do fluido, [K].

A potência dissipada em forma de convecção de calor é calculada segundo a equação 11.

$$P_{conv} = h \cdot A_{fil} \cdot (\theta_{fil} - \theta_{flu})$$

(Equação 11)

Onde:

$h$  – Coeficiente de troca de calor por convecção, [W.m<sup>-2</sup>.K<sup>-1</sup>].

$A_{fil}$  – Área da secção transversal do filamento, [m<sup>2</sup>].

$\theta_{fil}$  – Temperatura do filamento, [K].

$\theta_{flu}$  – Temperatura do fluido, [K].

Reescrevendo a Equação 7, temos a equação 12:

$$R_{fil.} \cdot I_{fil.}^2 = A_{fil.} \cdot \sigma \cdot \varepsilon \cdot (\theta_{fil}^4 - \theta_{flu}^4) - K \cdot A_{fil.} \cdot \frac{d\theta_{flu}}{dx} + h \cdot A_{fil.} \cdot (\theta_{fil} - \theta_{flu})$$

(Equação 12)

Levando em consideração as dimensões e massa reduzidas do filamento, observa-se que as parcelas de contribuição de perdas de calor por radiação e condução podem ser desconsideradas, pois mais adiante será abordado que há um circuito eletrônico responsável por forçar um regime permanente de troca de calor. E assim sendo, o termo da derivada da temperatura do filamento em relação à direção longitudinal do mesmo tende a ser muito pequeno; e o termo da diferença de temperatura entre o filamento e o fluido mesmo tendo o expoente de quarta potência, também torna-se muito pequeno quando comparado com a ordem de grandeza da constante de Stefan-Boltzmann ( $\sigma$ ). Tais considerações também foram observadas nos trabalhos de CHAMPAGNE ET AL. (1967), OWEER E PANKHURST (1977) e LOMAS (1986). A equação 7 então pode ser simplificada na forma da equação 13:

$$R_{fil.} \cdot I_{fil.}^2 = h \cdot A_{fil.} \cdot (\theta_{fil} - \theta_{flu})$$

(Equação 13)

Verifica-se então que a potência elétrica gerada no filamento será igual às perdas de calor por convecção. Reescrevendo então a equação 13 nos termos da lei de king, e das temperaturas envolvidas na troca de calor, obtém-se:

$$I_{fil.}^2 = \frac{\left(A + B \cdot U^{\frac{1}{2}}\right) \cdot A_{fil.} \cdot (\theta_{fil} - \theta_{flu})}{R_0 \left(1 + \alpha(\theta_{fil} - \theta_0)\right)}$$

(Equação 14)

A partir da equação 14, temos os parâmetros necessários para determinar se a operação do anemômetro será em corrente constante, ou temperatura

constante, e ambos os modos de operação dependem do esquemático do circuito elétrico responsável por amplificar o sinal proveniente do filamento.

## 2.7 Ambiente de simulação LTspice

O LTspice® é um software de simulação SPICE de alto desempenho, captura esquemática e visualizador de forma de onda com aprimoramentos e modelos para facilitar a simulação de circuitos analógicos. (ANALOG DEVICES). Neste trabalho as simulações de tensões e correntes de cada componente do circuito eletrônico são feitas a partir da linguagem SPICE.

## 3 METODOLOGIA DA PESQUISA

### 3.1 Circuito Eletrônico.

O circuito eletrônico adotado para reger o modo de operação do anemômetro proposto neste trabalho é em temperatura constante. E para essa configuração, o circuito é composto de dois estágios básicos (Figura 2): amplificação de tensão e amplificação de corrente; e possui um comportamento conforme demonstração de PERRY e MORRISON (1970):

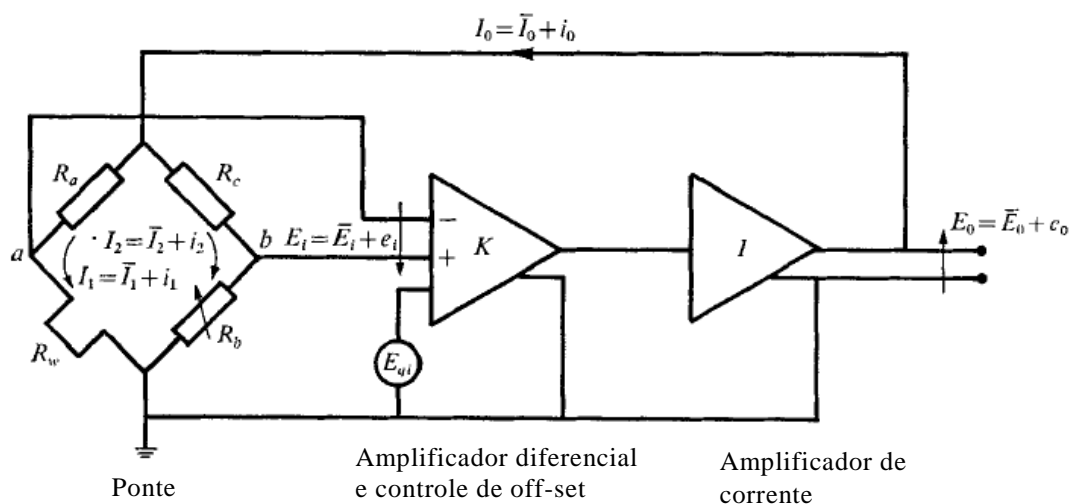


Figura 2 - Circuito típico de anemômetro de fio quente de temperatura constante



O primeiro estágio é a amplificação de tensão com ganho  $K$  e controle de tensão de offset. No segundo estágio, temos uma amplificação de corrente com ganho de tensão unitário para fazer a realimentação da ponte de wheatstone. O ganho final dos estágios de amplificação obedece o seguinte comportamento estático:

$$E_0 = K \cdot (E_i + E_{qi})$$

(Equação 15)

Sendo  $E_{qi}$  a tensão de offset necessária para iniciar a operação do sistema e também podendo ser utilizada para ajustar o equilíbrio da ponte para algum ponto específico de operação caso necessário. A corrente entregue pelos estágios de amplificação então é dada por:

$$I_0 = \frac{E_0}{R_T}$$

$R_T$  – Resistência elétrica da ponte na condição estática.

(Equação 16)

$I_1$  é calculada por:

$$I_1 = \frac{I_0(R_b + R_c)}{\sum R}$$

Sendo  $\sum R = R_a + R_b + R_c + R_w$

(Equação 17)

A tensão de entrada nos estágios de amplificação é:

$$E_i = I_1 \cdot R_a - I_2 \cdot R_c \quad (\text{Equação 18})$$

$$E_i = -I_0 \cdot R_\Delta$$

$$R_{\Delta} = R_w \cdot R_c - R_a \cdot R_b$$

Combinando as equações 16, 17 e 18:

$$I_1 = \frac{K \cdot E_{qi} \cdot (R_b + R_c)}{(R_b) \cdot (R_c) + K \cdot R_{\Delta}}$$

(Equação 19)

O comportamento estático do filamento é regido por:

$$I_1^2 = \frac{h \cdot (R_w - R_g)}{R_w}$$

(Equação 20)

Sendo  $R_g$  a resistência do filamento à temperatura ambiente e  $R_w$  a resistência do filamento à quente. O principal ponto de operação do circuito é quando se tem o equilíbrio da ponte, ou seja, teremos como condição de referência:

$$E_i = 0, R_{\Delta} = 0$$

## 3.2 Desenvolvimento da sonda de fio quente

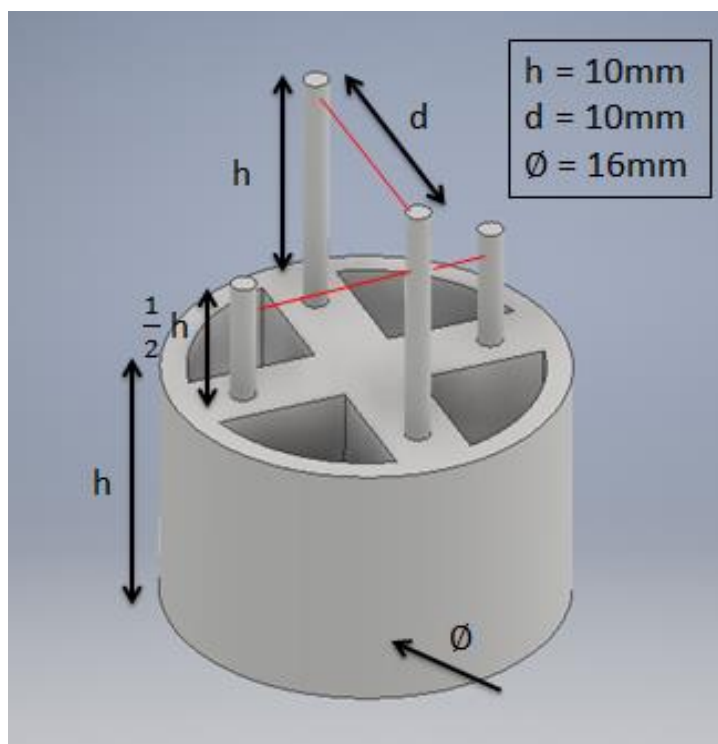
### 3.2.1 Etapas preliminares

A primeira etapa é a escolha do filamento a ser utilizado no anemômetro, e o filamento disponível para este trabalho é de tungstênio, com características de 20 $\mu$ m de diâmetro e banhada com revestimento de ouro para proteção do filamento contra oxidação. Após a definição do filamento foram realizados testes de durabilidade e sensibilidade a fim de se determinar a intensidade da corrente elétrica a ser aplicada, e consequentemente qual será a temperatura teórica de operação do filamento. Também devem ser medidos os efeitos de variáveis externas no comportamento do sinal de tensão elétrica obtido no filamento. Neste trabalho as considerações serão sobre a pressão atmosférica na altitude em que o

sensor será utilizado, a temperatura, e a umidade do ar nas proximidades do filamento. Essas medições permitem corrigir a resposta final do sensor, de forma que seja quantificada corretamente a grandeza em evidência a ser estudada, que é a velocidade do vento.

### **3.2.2 Estudo da sensibilidade do filamento**

Para a montagem da sonda foi fabricada no laboratório de instrumentação do PPGFA uma peça em filamento de PLA (Ácido Polilático) conforme exemplo na Figura 3. Esta peça tem a finalidade de sustentar dois pares de agulhas de aço inoxidável, e conforme o espaçamento entre as agulhas (que equivale ao comprimento do filamento de tungstênio soldado entre elas), será impactada diretamente a sensibilidade do sensor. Diante disto, deve ser determinado qual comprimento ( $d$ ) é melhor para se utilizar, e os testes foram aplicados para  $d$  igual a 5mm e 10mm de espaçamento conforme Figura 4.



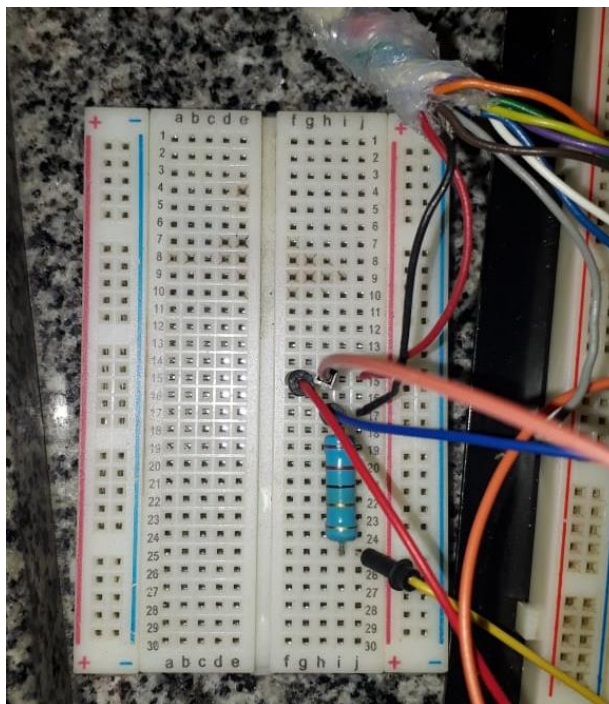
**Figura 3 - Imagem conceitual da sonda.**



**Figura 4 - Sonda de 10mm (à esquerda) e 5mm (à direita).**

No procedimento de teste realizado foram aplicadas diferentes intensidades de corrente elétrica nos filamentos desde 50 a 160mA com incrementos de 5mA. As diferentes sensibilidades podem ser observadas fazendo uma ligação em série com um resistor de valor fixo (conforme Figura 5), caracterizando um divisor de tensão; a partir desta ligação é possível monitorar simultaneamente os valores de corrente e máxima variação de tensão no filamento

quando exposto a uma variação de fluxo de ar de referência. Para cada intensidade de corrente elétrica foram feitas duas medidas de tensão, sendo a primeira na condição sem fluxo de ar e a segunda com máximo fluxo de ar.



**Figura 5 - Medidas de tensão e corrente.**

### **3.3 Estudo dos efeitos das variáveis externas**

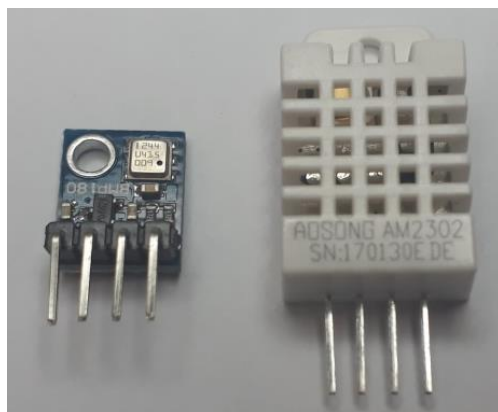
Nesta etapa do trabalho, leva-se em consideração que a sonda a ser desenvolvida tem como finalidade, aplicações em estudos atmosféricos. Portanto, durante a sua utilização, ficará exposta ao tempo e assim sendo, faz-se necessário um estudo prévio de como se comporta o filamento condutor para diferentes condições de pressão atmosférica, temperatura e umidade do ar. Para esse estudo, foi utilizado um recipiente de vidro em conjunto com uma placa de acrílico para servir de ambiente controlado (Figura 6); onde é possível forçar a variação de cada uma das variáveis a serem analisadas.

Junto à sonda foram acoplados dois sensores (Figura 7), sendo um para medir a pressão atmosférica (BMP 180 , Bosch Sensortec) e o outro para medir a temperatura e umidade do ar (DHT-22 , Aosong Electronics Co.). Ambos os

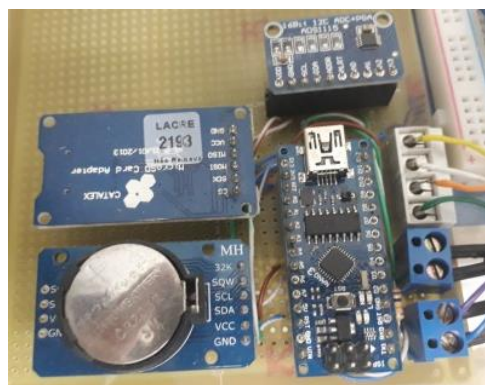
sensores e a sonda foram conectados a um sistema de aquisição de dados baseado numa placa Arduino Nano, gravador de cartão SD, e conversor analógico-digital (Figura 8), onde os valores eram registrados a cada 1 segundo. O objetivo dessas medições foi verificar a correlação de cada variável com o sinal de tensão da sonda de maneira isolada do fluxo de ar.



**Figura 6 - Ambiente controlado para testes**



**Figura 7 - BMP-180 à esquerda, DHT-22 à direita.**



**Figura 8 - Sistema de aquisição de dados**

### 3.1 Variação natural das variáveis externas

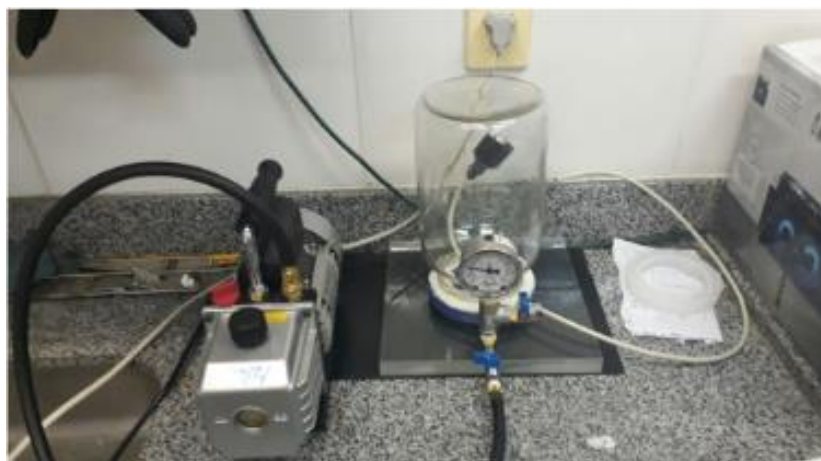
A primeira gravação de dados foi feita a partir de todo o sistema em condição natural, sem forçar nenhuma das variáveis externas, deixando ligada apenas a sonda e o sistema de aquisição de dados conforme a montagem da Figura 9.



Figura 9 - Condição natural das variáveis externas

#### 3.3.2 Variação forçada da pressão interna

A segunda gravação de dados foi feita a partir da variação da pressão interna ao recipiente de vidro. Este teste (Figura 10) teve o objetivo de simular diferentes valores de pressão atmosférica que podem representar também possíveis diferentes altitudes onde a sonda possa vir a ser utilizada. O efeito da variação de pressão foi simulado utilizando uma bomba de vácuo de duplo estágio com potência de 1.8 CFM.



**Figura 10 - Simulação da pressão forçada**

### **3.3.3 Variação forçada da temperatura interna**

A terceira gravação de dados foi feita a partir da variação da temperatura interna ao recipiente de vidro. Este teste (Figura 11) teve o objetivo de simular diferentes valores de temperatura do ar nas proximidades da sonda. O efeito da variação de temperatura foi simulada utilizando um soprador térmico de 2kW, em especial, é preciso observar que deve ser deixado um escape de ar para evitar o aumento da pressão interna por causa de um aumento da temperatura.



**Figura 11 - Simulação forçada da temperatura.**



### 3.3.4 Variação forçada da umidade interna

A quarta gravação de dados foi feita a partir da variação da umidade no interior do recipiente de vidro. Este teste (Figura 12) teve o objetivo de simular diferentes valores de umidade nas proximidades da sonda. O efeito da variação de umidade foi simulado colocando uma flanela úmida no interior do recipiente.

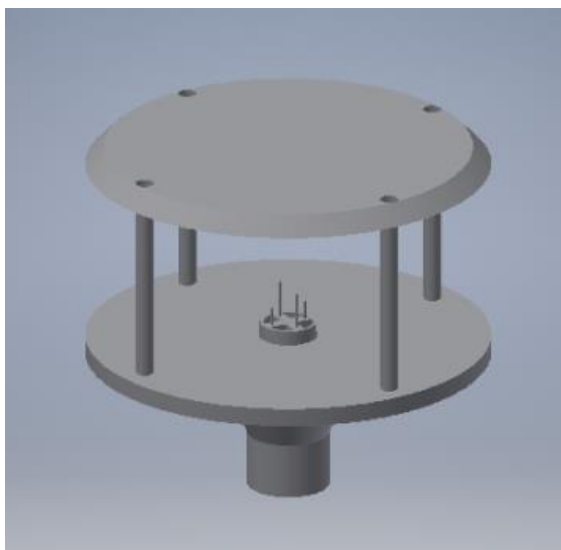


Figura 12 - Simulação forçada da umidade.

### 3.3.5 Design da estrutura de proteção da sonda

Ao se levar em consideração que após ser instalada, a sonda de fio quente ficará exposta diretamente às variações do tempo e eventualmente a fatores imprevisíveis como pássaros que podem tentar pousar sobre ela, deve ser elaborada uma estrutura de proteção que permita a passagem de vento e minimize as probabilidades de danos ao filamento. A estrutura desenvolvida tem como referência um anemômetro ultrassônico “Gill WindSonic”, e com pequenas

alterações no design, também foi fabricada em uma peça de PLA, conforme figura 13 e 14.



**Figura 13 - Estrutura conceitual**



**Figura 14 - Estrutura fabricada em PLA.**

### **3.4 Desenvolvimento do circuito eletrônico**

#### **3.4.1 Ajuste da Ponte de Wheatstone**

O circuito da ponte de wheatstone foi dimensionado de forma que a sua configuração resulte em uma corrente de 160mA no ramo onde se encontra o filamento de tungstênio. Além desse ajuste de corrente, no ramo oposto deve ser

dimensionado um divisor de tensão com resistor variável para que a tensão de referência possa ser ajustada de maneira a equilibrar a tensão da ponte no valor mais próximo possível de 0V. Para este trabalho, foi feita uma simulação computacional do funcionamento de um filamento com 10mm de comprimento no software LTspice. Abaixo na figura 15, está representado o esquemático da ponte e quais os valores de resistências necessários para que se mantenha a condição de equilíbrio. O filamento, representado pelo resistor  $R_4$ , mostra o valor de resistência à quente, ou seja, depois de ligado o circuito eletrônico.

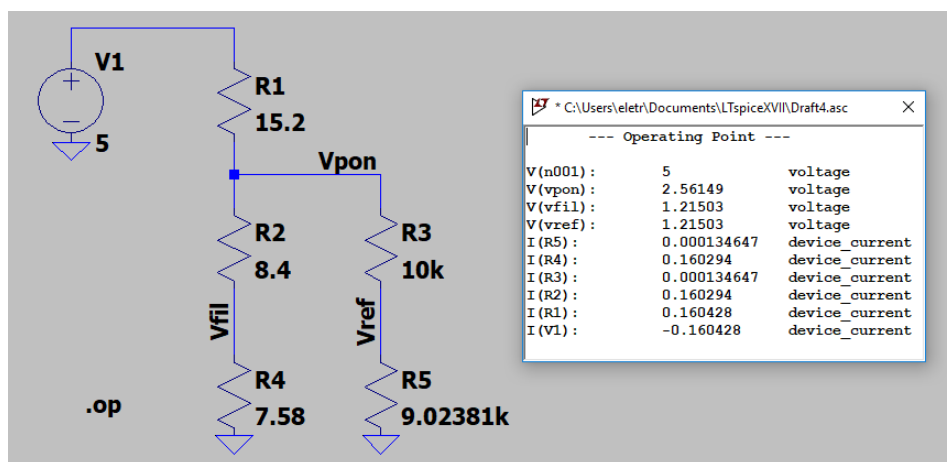
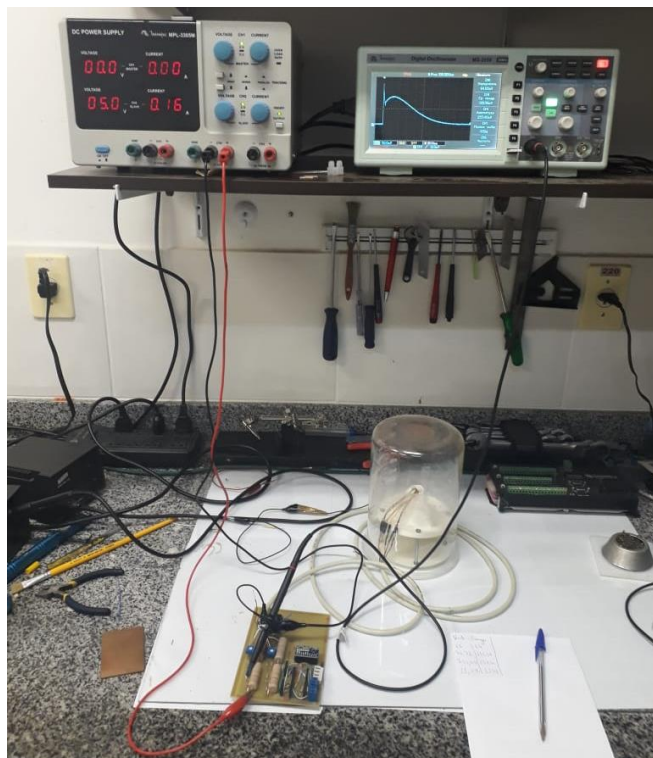


Figura 15 - Simulação no ambiente LTspice.

Nesta condição, temos que  $V_{fil}$  é igual  $V_{ref}$  e, portanto a tensão diferencial entre os resistores  $R_4$  e  $R_5$  é igual a zero. Abaixo segue o código SPICE para gerar a simulação:

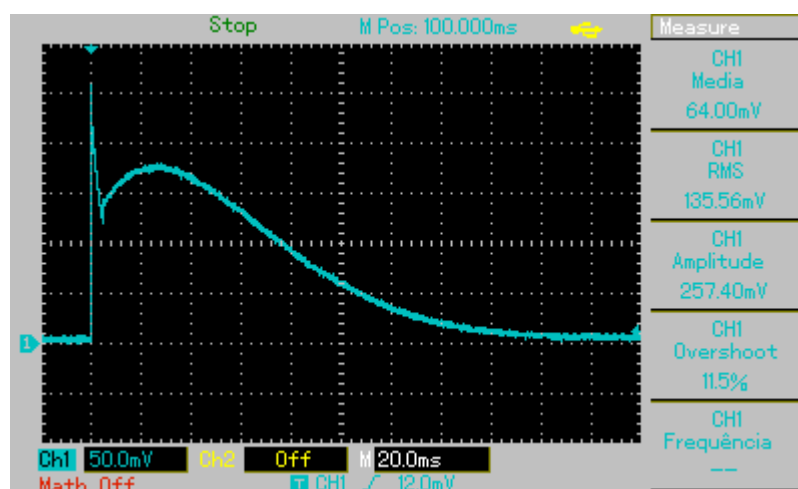
```
V1 N001 0 5
R1 N001 Vpon 15.2
R2 Vpon Vfil 8.4
R3 Vpon Vref 10k
R4 Vfil 0 7.58
R5 Vref 0 9.02381k
.op
.backanno
.end
```

O circuito simulado foi implementado e testado em bancada do laboratório de instrumentação do PPGFA, para os dois filamentos de 10 mm que serão utilizados na construção do anemômetro de fio quente. Na figura 16 verificam-se como foram montas as duas pontes de wheatstone que fazem parte do circuito eletrônico.



**Figura 16 - Ponte de wheatstone em funcionamento**

Nas figuras 17 e 18, temos o sinal diferencial ( $V_{ref} - V_{fil}$ ) da ponte de wheatstone que será aplicado ao circuito do primeiro estágio de amplificação. Para ambos os filamentos o tempo de aquecimento do filamento até atingir a temperatura necessária para equilibrar a ponte e fazer com que o sinal diferencial seja igual a zero é aproximadamente 200ms.



**Figura 17 - ( $V_{ref} - V_{fil}$ ) para o filamento superior**

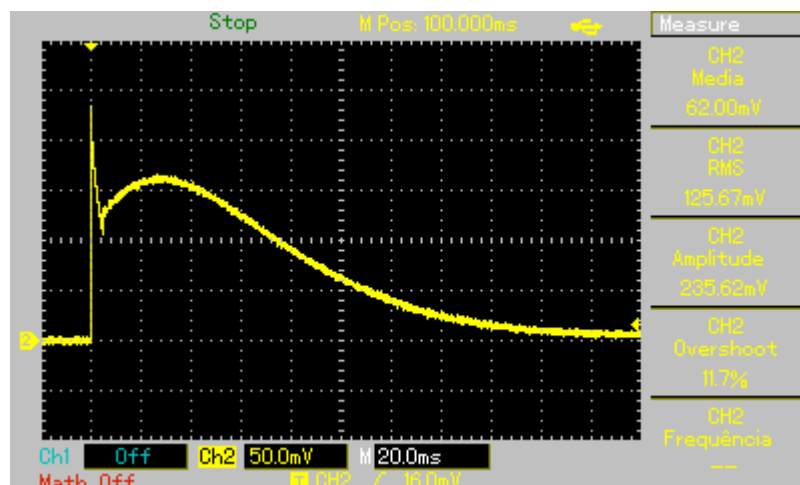


Figura 18 - ( $V_{ref}-V_{fil}$ ) para o filamento inferior

Para cada filamento, foi realizado também um teste preliminar para verificar qual o valor máximo de tensão diferencial pode ser obtido quando o filamento é submetido ao fluxo de ar. Esse teste foi verificado segundo as figuras 19 e 20, e está de acordo com os valores de máxima variação do sinal diferencial das figuras 17 e 18 pois respeita os limites de amplitudes encontrados.

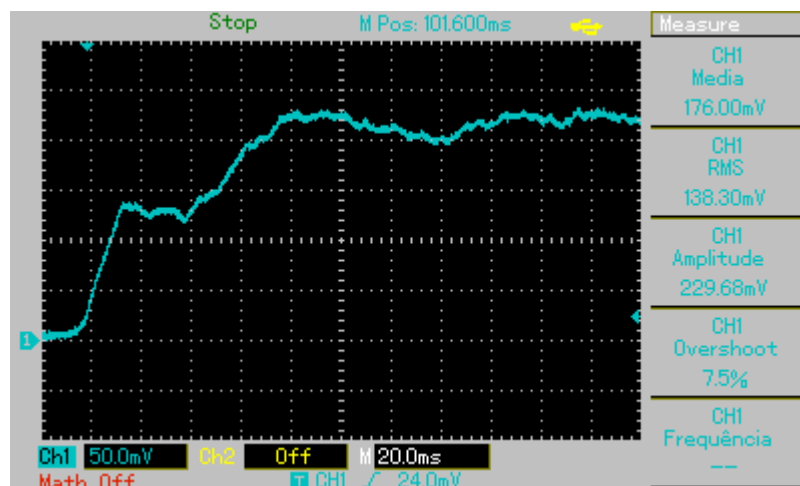


Figura 19 - Filamento superior submetido ao fluxo de ar

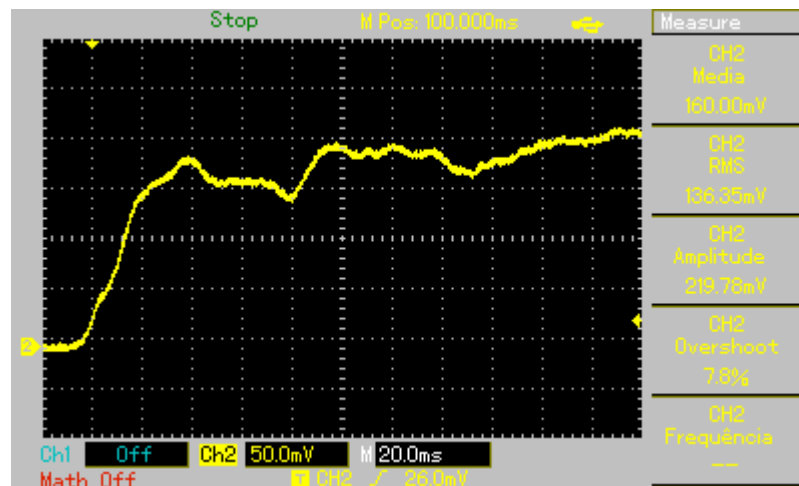


Figura 20 - Filamento inferior submetido ao fluxo de ar

### 3.4.2 Estágio de Amplificação

O sinal diferencial produzido pela variação da resistência do filamento conforme verificado anteriormente, possui uma pequena amplitude da ordem de poucas centenas de milivolts. Se faz necessário então a amplificação deste sinal de tensão para que seja possível realizar medições mais convenientes, e essa amplificação será de ganho  $G$  proporcional a elevar a máxima variação do sinal para um valor próximo do patamar de 5V, que é a tensão de referência do conversor analógico digital utilizado no experimento

$$G = \frac{V_{saída}}{V_{entrada}} \cong \frac{5V}{250mV} = 20$$

Sendo  $V_{entrada}$  aproximadamente 250mV, e  $V_{saída}$  desejada de 5V, tem-se que o ganho a ser aplicado deve ser próximo de 20. Primeiramente foi ajustado tal ganho para o amplificador de instrumentação, porém devido à saturação do ganho à tensão de entrada, o ganho total do circuito teve que ser dividido em dois estágios, sendo o primeiro feito pelo AD620 (ANALOG DEVICES) ajustado para um ganho próximo de 10 e o segundo estágio pelo amplificador operacional LM741 (NATIONAL SEMICONDUCTORS) ajustado para um ganho próximo de 2 conforme Figura 21.

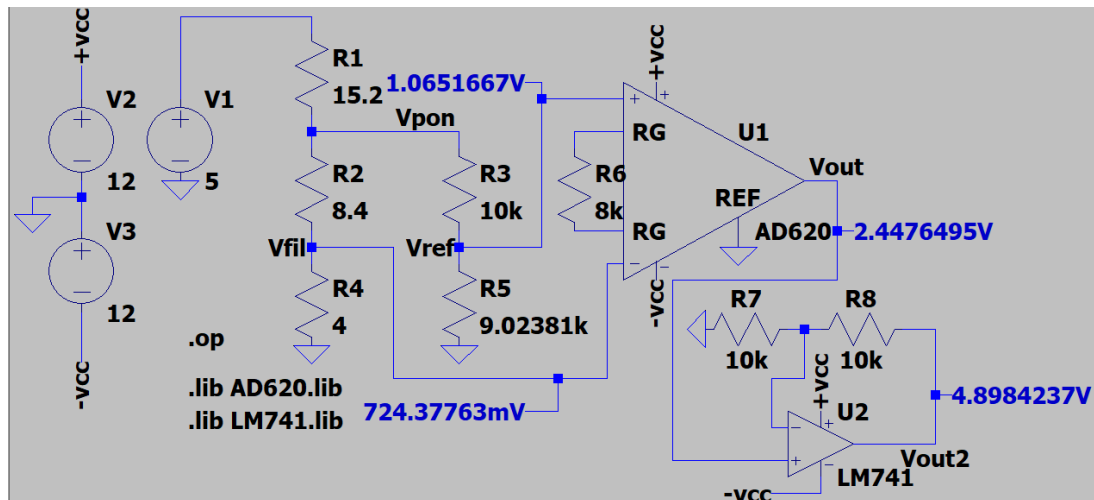


Figura 21 - Simulação do estágio de amplificação

Abaixo segue o código SPICE para gerar a simulação:

```
V1 N001 0 5
R1 N001 Vpon 15.2
R2 Vpon Vfil 8.4
R3 Vpon Vref 10k
R4 Vfil 0 4
R5 Vref 0 9.02381k
XU1 Vfil N002 N003 Vref -vcc 0 Vout +vcc AD8221
R6 N002 N003 8k
V2 +vcc 0 12
V3 0 -vcc 12
XU2 Vout N004 +vcc -vcc Vout2 LM741
R7 N004 0 10k
R8 Vout2 N004 10k
.op
.lib AD620.lib
.lib LM741.lib
.lib ADI1.lib
.backanno
.end
```

### 3.4.3 Realimentação da Ponte de Wheatstone

O circuito de realimentação foi feito a partir de um transistor bipolar de junção do tipo NPN 2N2222. Esta parte do circuito é responsável por fazer a alimentação em malha fechada da ponte de wheatstone, e desta forma, controlar a corrente aplicada no filamento, e consequentemente a sua temperatura. Na figura 22 temos o circuito eletrônico em sua forma final.

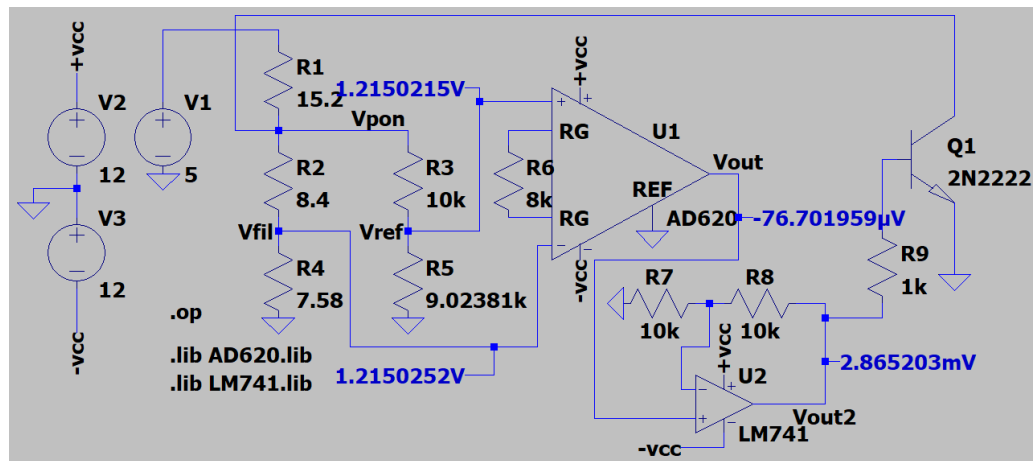


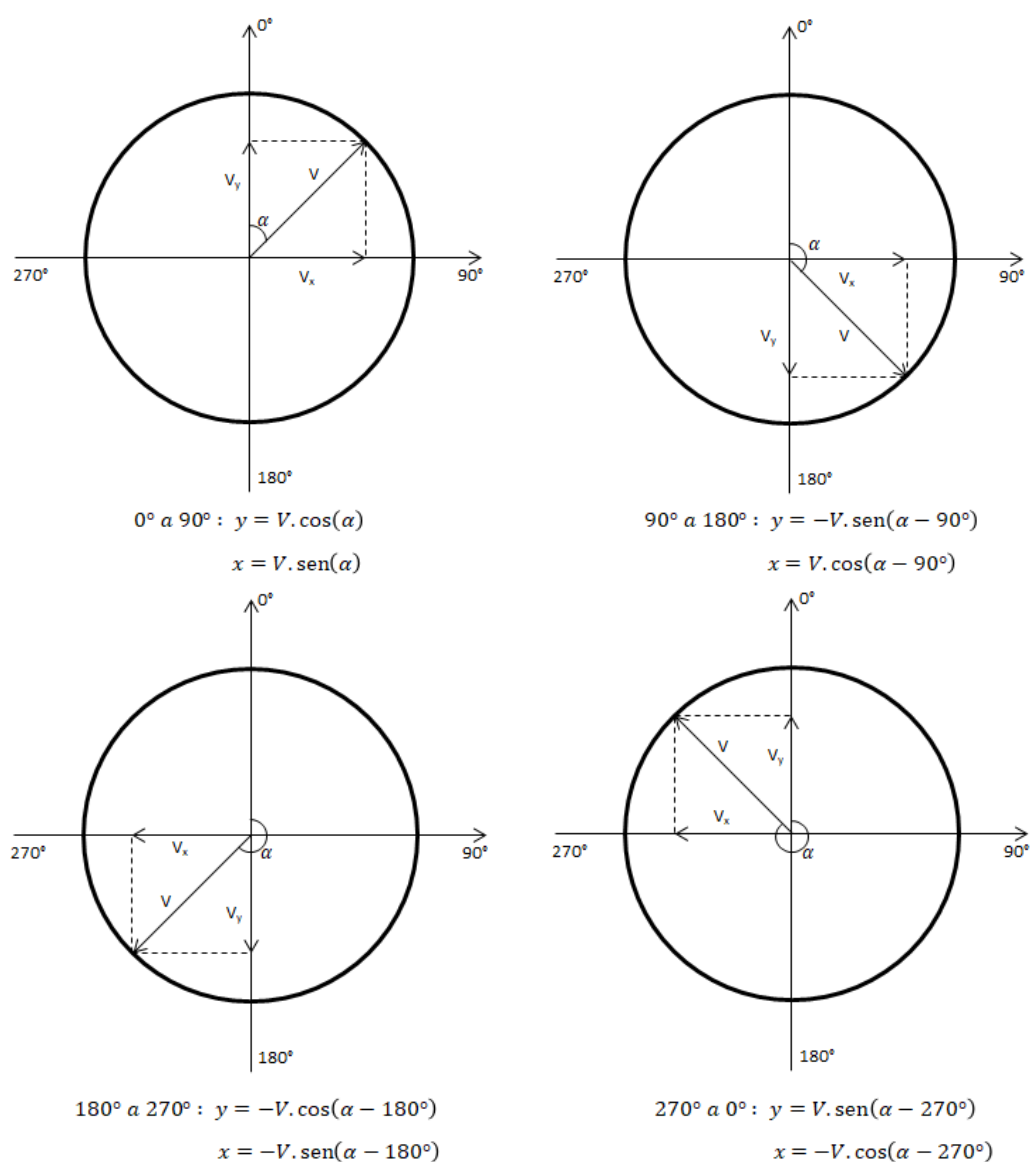
Figura 22 - Forma final do circuito eletrônico

A partir do estado normal de operação do circuito, que é o equilíbrio da ponte de wheatstone, mede-se o sinal  $V_{out2}$ , que será proporcional à velocidade do ar em deslocamento. Quando há incidência de fluxo de ar, consequentemente haverá o desequilíbrio da ponte gerando uma diferença entre  $V_{fil}$  e  $V_{ref}$ , essa diferença é aplicada nas entradas do amplificador de instrumentação AD620 passando pelo primeiro estágio de amplificação e após, aplicada nas entradas do amplificador LM741 para receber o segundo estágio de amplificação; na saída deste último estágio, o sinal é aplicado na base de um transistor 2N2222 de modo a operar na região ativa e fazer a sua tensão de coletor ( $V_{pon}$ ) ser re-aplicada à ponte fazendo a compensação de tensão necessária para o estado normal de operação.

### 3.4.4 Cálculos das componentes u e v

Para fazer o cálculo das componentes de velocidade do vento, foram utilizadas as componentes medidas pelo anemômetro sônico proposto para comparação com o anemômetro de fio quente desenvolvido. A resposta obtida pelo “Gill WindSonic” é composta de dois valores, sendo uma orientação medida em graus e um valor escalar de velocidade do vento medida em metros por segundo, conforme figura 23.





**Figura 23 - Cálculo das componentes de velocidade**

No anemômetro de fio quente, os eixos das agulhas são posicionados com inclinação de  $45^\circ$  em relação às direções norte e sul do anemômetro sônico de maneira que para se obter a direção norte, é feita uma soma do tipo vetorial com as magnitudes de tensões provenientes de cada filamento, e orientação dada a partir da mesma obtida pelo anemômetro sônico, conforme figura 24.

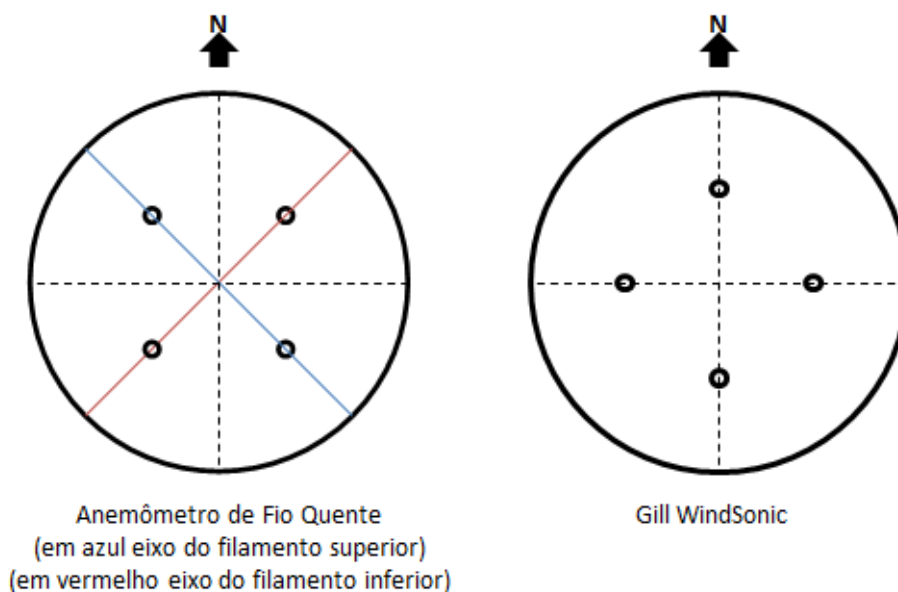


Figura 24 - Posicionamento correto em relação ao norte.

### 3.4.5 Testes junto ao anemômetro sônico comercial

O experimento de teste junto ao anemômetro sônico foi iniciado no dia 14/02/2019 às 18:03; para a realização desta etapa foi utilizado um datalogger fabricado pela Campbell Scientific modelo CR1000. À este, foram conectados os cabos do anemômetro de fio quente desenvolvido, que fornecem três sinais analógicos de tensão lidos em [mV], sendo dois sinais dos filamentos e um sinal do sensor de temperatura instalado junto à peça de sustentação das agulhas; e também foi conectado o WindSonic da Gill Instruments, que fornece dois sinais digitais sendo a velocidade do vento em metros por segundo e a direção em graus tendo como referência o norte e sentido horário.

Ambos anemômetros foram instalados no telhado do bloco do PPGFA (conforme figura XX) e o datalogger foi programado para realizar quatro gravações por segundo, conforme figura 25. Devido ao grande volume de dados gerados, os testes foram feitos utilizando dados desde as 0:00 até 23:59 horas do dia 15/02/2019.



Figura 25 - Anemômetros instalados no telhado do PPGFA.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 Sobre os testes de durabilidade e sensibilidade

O filamento teve sua durabilidade testada sendo percorrido por uma corrente de 160mA ininterruptamente durante 1464 horas, sem perder o valor característico de sua resistência, conforme figura 26.

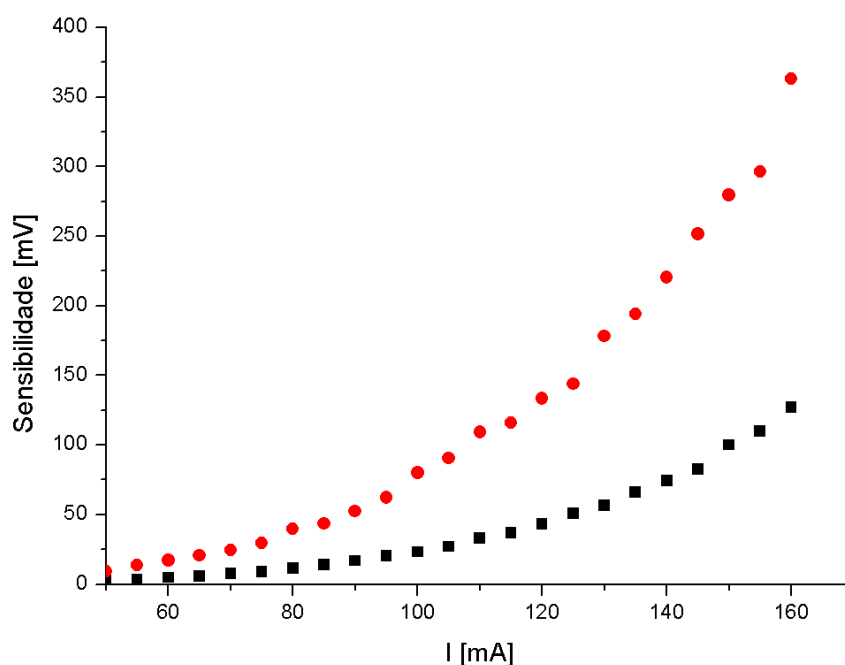


Figura 26 - Testes dos filamentos de 5mm e 10mm.

A partir das medidas de variação de tensão em função da corrente elétrica aplicada, percebe-se que o filamento com 10mm apresenta uma relação de maior

variação de tensão em função de uma menor corrente de excitação em relação ao filamento de 5mm, portanto este comprimento foi selecionado para se desenvolver a sonda de fio quente. Uma vez selecionado o comprimento a ser utilizado, repetiu-se o teste com incrementos de 1mA com a finalidade de se fazer um gráfico da variação da resistência elétrica de ambos filamentos da sonda em função da corrente elétrica aplicada (Figura 27), pois esses dados servem como base para se projetar o circuito eletrônico da sonda que será abordado mais adiante.

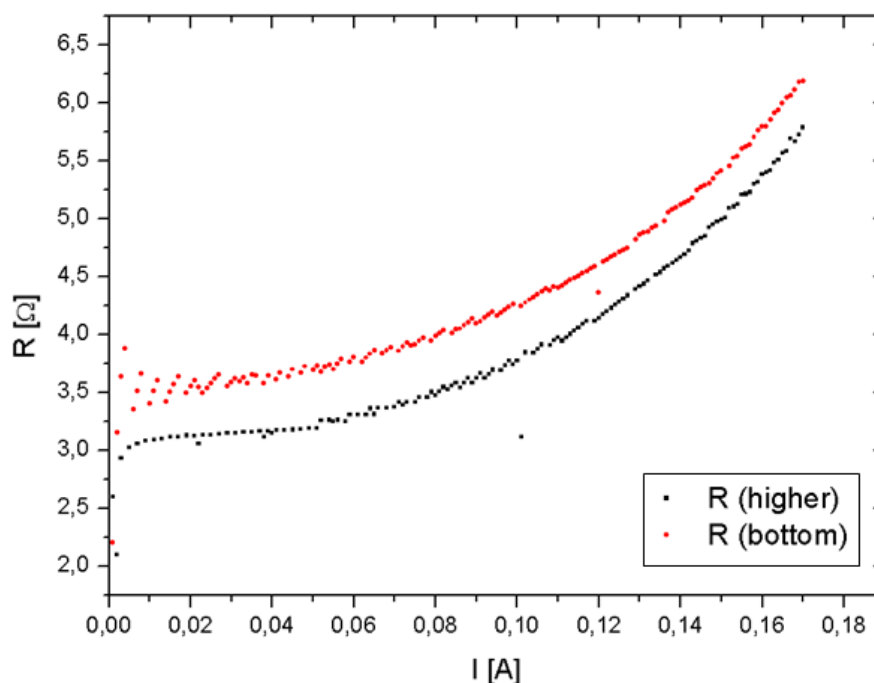


Figura 27 - Resistências dos filamentos.

## 4.2 Sobre os estudos das variáveis externas

Nesta seção, segue-se os gráficos e tabelas de correlações encontradas para cada teste de influências de variáveis externas. Tem-se em sincronia todas as variáveis envolvidas, estando nos eixos “y” suas magnitudes e no eixo “x” cada contagem do tempo em segundos.

### 4.2.1 Dados obtidos da variação natural

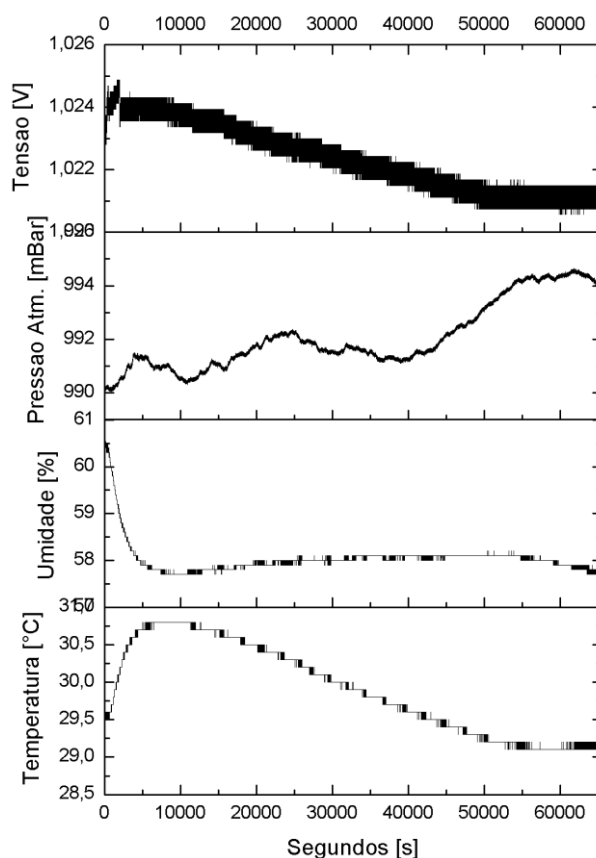


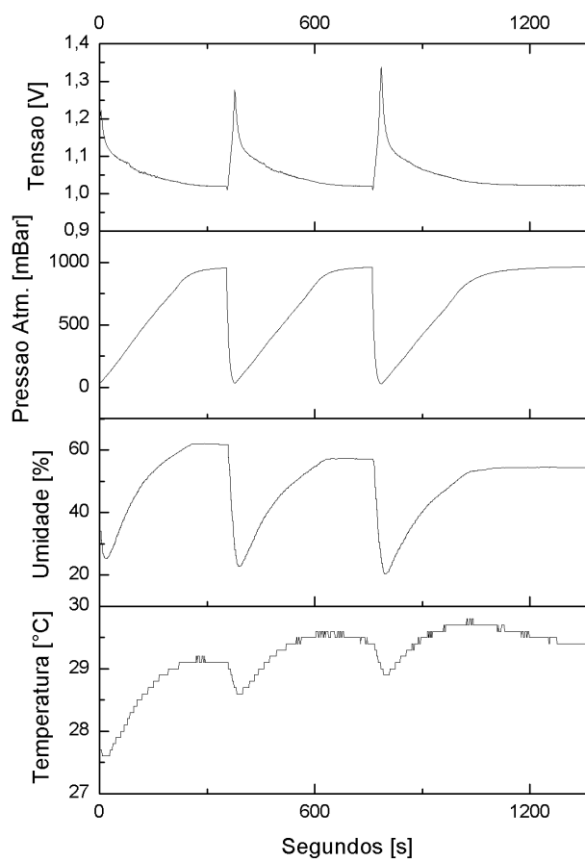
Figura 28 - Variação natural das variáveis externas

Correlação de Pearson			
	[mBar]	[%]	[°C]
[V]	-0,79131	0,12174	0,89136

Tabela 1 - Dados obtidos da variação natural.

Sobre as correlações encontradas no teste de variação natural, apenas a temperatura e pressão atmosférica apresentam forte correlação para se analisar as influências no sinal de tensão.

### 4.2.2 Dados obtidos da variação da pressão



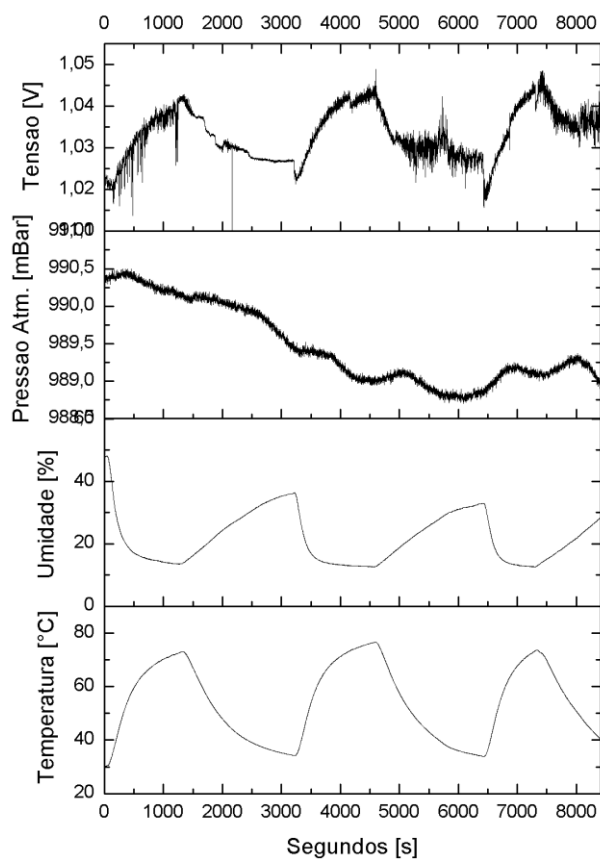
**Figura 29 - Variação forçada da pressão**

Correlação de Pearson			
	[mBar]	[%]	[°C]
[V]	-0,87454	-0,86513	-0,57039

**Tabela 2 – Dados obtidos da variação da pressão**

Sobre as correlações encontradas no teste de variação forçada da pressão atmosférica, os resultados da temperatura e umidade não permitem ainda que se tire conclusões pois seus efeitos estão sendo camuflados pela retirada do vapor de água presente no ar do recipiente do teste, e também pela variação de temperatura devido ao choque de moléculas de ar que é inversamente proporcional à pressão. Para esse teste observa-se que a pressão deve ser considerada para análises.

### 4.2.3 Dados obtidos da variação da temperatura



**Figura 30 - Variação forçada da temperatura**

Correlação de Pearson			
	[mBar]	[%]	[°C]
[V]	-0,12321	-0,6418	0,70054

**Tabela 3 - Dados obtidos da variação de temperatura**

Sobre as correlações encontradas no teste de variação forçada da temperatura interna do recipiente, os resultados da temperatura e umidade apresentam fortes correlações para serem analisadas, porém neste caso a umidade apenas acompanha de maneira inversamente proporcional a temperatura, enquanto os efeitos da pressão atmosférica apresentam correlação fraca.

#### 4.2.4 Dados obtidos da variação da umidade

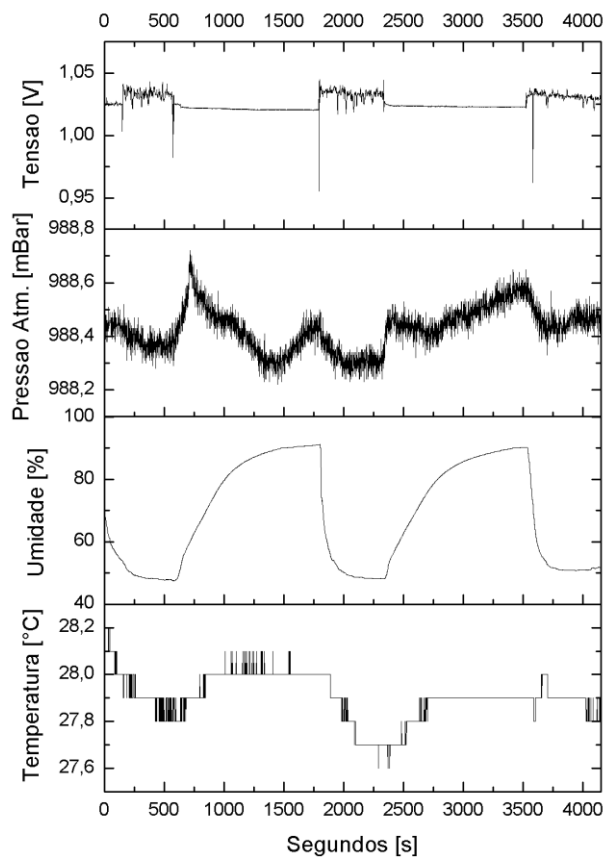


Figura 31 - Variação forçada da umidade

Correlação de Pearson			
	[mBar]	[%]	[°C]
[V]	-0,2586	-0,68861	-0,29841

Tabela 4 - Dados obtidos da variação da umidade

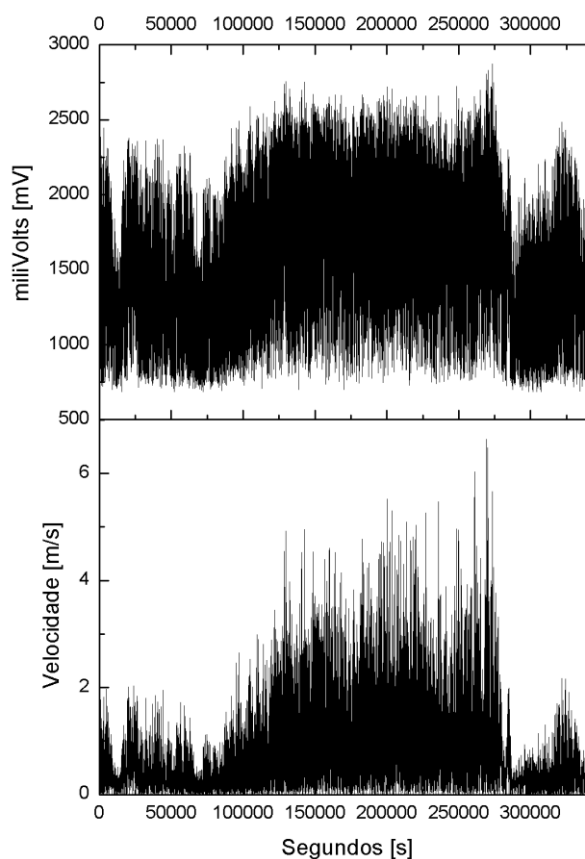
Sobre as correlações encontradas no teste de variação forçada da umidade interna do recipiente, os resultados da temperatura e pressão apresentam fraca correlação, porém neste caso a umidade apresentou forte correlação.

#### 4.2.5 Considerações sobre os estudos das variáveis externas



Com base nos resultados lidos nos gráficos e tabelas das condições testadas, verificou-se que a dependência do sinal de tensão não pode ser considerado apenas devido a uma das variáveis, que no caso, era se esperado que apenas a temperatura fosse suficiente para quantificar o quanto deve-se corrigir nos valores de tensão dos filamentos. Entretanto, deve-se elaborar um modelo de correção que envolva com maior complexidade as três variáveis analisadas em questão.

#### 4.2.6 Dados obtidos do teste junto ao anemômetro sônico



**Figura 32 – Teste junto ao anemômetro sônico**

Na figura 32, observa-se as curvas obtidas através do vetor velocidade do vento, ainda sem um modelo de maior complexidade que leva em consideração as variáveis físicas externas. No gráfico em [mV], já está calculada a resultante

das duas componentes de velocidade do vento, e foi levada em consideração a orientação medida no anemômetro sônico.

## **5 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Ao final do desenvolvimento, obteve-se uma sonda de fio quente com filamentos de resistência à frio de 3 e 3,5 ohms, e à quente de 5,5 e 6,5 ohms respectivamente.

Em relação às influências de variáveis físicas externas no sinal de tensão produzido pelo filamento, conclui-se que será necessário um modelo de maior complexidade do que o esperado para a correção do sinal.

O circuito eletrônico apresentou resultados coerentes nas simulações e na implementação física para fazer o controle da temperatura do filamento. Ainda é considerável verificar o desempenho de um tipo de controle proporcional-integral-derivativo.

Sobre o teste do anemômetro concluído junto ao anemômetro sônico, ainda é necessário o levantamento de um modelo de maior complexidade do que o esperado para a correção do sinal de tensão em função das variáveis externas.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CHAMPAGNE, F. H.; SLEICHER, C. A.; WEHRMANN, O. H. Turbulence measurements with inclined hot-wires Part 1. Heat transfer experiments with inclined hot-wire. **Journal of Fluid Mechanics**. Grã Bretanha, v.28, n. 1, p. 153-175, 1967.

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. **Proceedings of the royal society: A Mathematical, Physical and Engineering Sciences**. set. 1914

NASA. National Aeronautics and Space Administration. **A High-Performance Constant-Temperature Hot-Wire Anemometer – by Jonathan H. Watmuff**. 1, ed. Califórnia, EUA, 1994. 96 p.

PERRY, A. E.; MORRISON, G. L. A study of the constant-temperature hot-wire anemometer. **Journal of Fluid Mechanics**. Grã Bretanha, v.47, n.3, p. 577-599, 1971.

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**. Campina Grande, PB, v.2, n.2, p.229-234, 1998.

AHMED, Z. U.; AL-ABDELI Y. M.; GUZZOMI F. G. Corrections of dual-wire CTA data in turbulent swirling and non-swirling jets. *Experimental Thermal and Fluid Science*, v.70, p.166-175, set. 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2015.09.007>> Acesso em: 04 mai. 2018.

ALÉ, J. A. V.; SIMIONI, G. C. DA S.; HACK, P. DA S. **Aspectos da calibração de anemômetros nos empreendimentos eólicos**. In: I CIMMEC 1º Congresso Internacional De Metrologia Mecânica. Rio de Janeiro – Brasil. **Anais**. 2008 p. 1-8.

CHANDRASHEKAR, D.; LIVINGSTONE, M. D.; RAO, D. P. C.; VISWANATH, C. H. **Hot wire anemometer**. 2012. 54 f. Relatório de projeto apresentado como requisito parcial para a concessão de grau (Bacharel Em Tecnologia Engenharia Elétrica e Eletrônica) - Departamento de Engenharia Elétrica e Eletrônica Gokaraju Rangaraju, Instituto de Engenharia e Tecnologia, Bachupamente, Hyderabad, Índia, 2012.

DALLACORT, R.; MOREIRA, P. S. P.; INOUE, M. H.; SILVA, D. J.; CARVALHO, I. F.; SANTOS, C. Wind speed and direction characterization in Tangará Da Serra, Mato Grosso state, Brazil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.25, n.3, p.359 - 364, 2010.

DANTEC DYNAMICS. **Mini CTA and Multichannel CTA Systems - Compact CTA Systems for accurate flow investigations**. 1. ed. Skovlunde, Dinamarca, 2015. 5 p. (n. PI119v7).

DAVIES, T. W. The static and dynamic response of a hot wire anemometer. **International Journal of Heat and Fluid Flow**, v.6, n.3, p. 226-226. set. 1985.

DEACON, E. L.; SAMUEL, D. R. A linear, temperature compensated hot-wire anemometer. **Journal of Scientific Instruments**. v. 34, n. 24, p 24-26. jan. 1957.

ERGIN, G.; VELTE, C. Baseline measurements for testing of improved triple-sensor hot-wire anemometer probe in a momentum conserving turbulent round jet. **Dantec Dynamics**, p.1-5, jul. 2017. Disponível em: <<https://www.dantecdynamics.com/scientific-papers>>. Acesso em: 06 set. 2018.

EGUTI, C. C. A. **Desenvolvimento de um circuito eletrônico experimental de anemômetro de fio quente**. 2005. 204 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Ilha Solteira, 2005.

FELÍCIO, L. C. **Modelagem da dinâmica de sistemas e estudo da resposta**. 2 ed, RiMa Editora, São Carlos, SP, 2010. 568 p.

FOX, L. L.; PALMER, P. L.; WHITTAKER, D. A Compensating Circuit for the Simmons Shielded Hot-wire Anemometer. **Journal of Scientific Instruments**. v.27, p. 289-291. nov. 1950.

FREYMUTH, P. Frequency response and electronic testing for constant-temperature hot-wire anemometers. **Journal of Physics E: Scientific Instruments**. v.11, n. 3, p. 190-199. 1977.

HULTMARK, M.; SMITS, A. J. Temperature corrections for constant temperature and constant current hot-wire anemometers. **Measurement Science and Technology**, v.21, p.1-4, ago. 2010.

ITSWEIRE, E. C.; HELLAND, K. N. A high-performance low-cost constant temperature hot-wire anemometer. **Journal of Physics E: Scientific Instruments**. Grã-Bretanha, v.16, p. 549-553. 1983.

JORGENSEN, F. E. **How to measure turbulence with hot-wire anemometers - a practical guide**. 1 ed, Dantec Dynamics, Skovlunde, Dinamarca, 2002. 73 p.

LEKAKIS, L.; Calibration and signal interpretation for single and multiple hot-wire/hot-film probes. **Journal of Scientific Instruments**. Reino Unido, v.7, p. 1313-1333. 1996.

LEVITSKII, V. N.; REPIK, E. U.; SOSEDKO, Y. P. Influence of the temperature of a flow on the readings of a hot-wire anemometer. **Journal of Engineering Physics**, v.49, n.3, p.1013-1018, set. 1985.

MILLER, I. S.; SHAH, D. A.; ANTONIA, R. A. A constant temperature hot-wire Anemometer. **Journal of Physics E: Scientific Instruments**. Grã-Bretanha, v.20, p. 311-314. 1987.

MORRISON, G. L.; PERRY, A. E.; SAMUEL, A. E. Dynamic calibration of inclined and crossed hot wires. **Journal of Fluid Mechanics**. Grã Bretanha, v. 52, n. 3, p. 465-474, abr. 1972.

NASA. National Aeronautics and Space Administration. **Hot-Wire Anemometry In Hypersonic Helium Flow-by Richard D. Wagner and Leonard M. Weinstein**. 1, ed. Washington, D.C., EUA, 1974. 48 p.

NEKRASOV, Y. P.; SAVOSTENKO, P. I. Pressure Dependence Of Hot-Wire Anemometer Readings. **Measurement Science and Technology**, v. 34, n. 5, p. 21-23, mai. 1991.

OZAHİ, E.; ÇARPINLIOĞLU, M. Ö.; GÜNDOĞDU, M. Y. Simple methods for low speed calibration of hot-wire anemometers. **Flow Measurement and Instrumentation**, v.21, p.166-170, fev. 2010.

PAPADOPOULOS, K. H.; SOILEMES, A.T.; HELMIS C. G.; PAPAGEORGAS, P. G. A hot-wire based, research atmospheric turbulence probe: design analysis and performance. **Measurement**, v.25, p.53–69, ago. 1999.

PERRY, A. E.; MORRISON, G. L. Static and dynamic calibrations of constant temperature hot-wire systems. **Journal of Fluid Mechanics**. Grã Bretanha, v. 47, n. 4, p. 765-777, 1971.

FERREIRA, V. P.; PEPE, I. M. **Anemômetro De Fio Quente De Baixo Custo Para Medição De Vazão De Ar Condicionado**. In: CONEM 2010 - VI Congresso Nacional De Engenharia Mecânica. VI National Congress Of Mechanical Engineering. Paraíba – Brasil. **Anais**. 2010 p. 1-10.

SAMET, M.; EINAV, S. A hot-wire technique for simultaneous measurement of instantaneous velocities in 3D flows. **Journal of Scientific Instruments**. Reino Unido, v.20. p. 683-690.1987.

SINGHA, A.; SADR, R. In situ calibration of four-wire hot-wire probes for atmospheric measurement. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v. 44, p. 82–89. 2013.

SMITS, A. J.; PERRY, A. E. The effect of varying resistance ratio on the behaviour of constant temperature hot-wire anemometers. **Journal of Physics E: Scientific Instruments**. Grã-Bretanha, v.13, p. 452-456. 1980.

SMITS, A. J.; PERRY, A. E; HOFFMANN, P. H. The response to temperature fluctuations of a constant-current hot-wire anemometer. **Journal of Physics E: Scientific Instruments**. Grã-Bretanha, v.11, p. 909-914. 1978.

SMOL'YAKOV, A.V.; TKACHENKO, V. M. **The Measurement of Turbulent Fluctuations.** (An Introduction to Hot-Wire Anemometry and Related Transducers). 1. ed. Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1983. 308 p.

TAKAGI, S. A hot-wire anemometer compensated for ambient temperature variations. **Journal of Scientific Instruments.** Grã-Bretanha, v.19, p. 739-743. 1986.

TEXAS INSTRUMENTS. **PGA460 Ultrasonic Signal Processor and Transducer Driver.** 1. ed. Dallas, Texas, USA, 2017. 114 p.

THOMAS, J. S. G. XX. A Directional Hot- Wire Anemometer of High Sensitivity, especially applicable to the Investigation of Low Rates of flow of Gases. **Proceedings of the Physical Society of London .** Londres, v.32, p. 196-207. 1919

TORRES, F. T.P.; MARTINS, L. A. Fatores que influenciam na concentração do material particulado inalável na cidade de Juiz de Fora (MG). **Caminhos de geografia,** Uberlândia, MG, v.4, n.16, p.23-39, out. 2005. Disponível em: <<http://www.ig.ufu.br/revista/caminhos.html>>. Acesso em: 29 ago. 2018.

TRUMP, B. **The Signal - A compendium of blogs posts on op amp design topics.** 1 ed, Texas Instruments, Dallas, Texas, USA, 2017. 37 p.

VITKIN, L.; LIBERZON, D.; GRITS B.; KIT, E. Study of in situ calibration performance of co-located multi-sensor hot-film and sonic anemometers using a 'virtual probe' algorithm. **Measurement Science and Technology,** v.25, p.01-16, mai. 2014.

WEBSTER, J. G. **The measurement, instrumentation and sensor handbook.** 1 ed. Estados Unidos da América. CRC Press LLC, 1999. 2588 p.

WEIDMAN, P. D.; BROWAND, F. K. Analysis of a simple circuit for constant temperature anemometry. **Journal of Physics E: Scientific Instruments.** Grã-Bretanha, v.8 n.7, p. 553-560. fev. 2001.

WEISS, J. Effect of bridge imbalance on the estimation of sensitivity coefficients for constant-temperature hot-wire anemometers. **Measurement Science And Technology,** Reino Unido, v.14 p.1373–1380, jul. 2003.

WILLMARTH, W. W. Geometric interpretation of the possible velocity vectors obtained with multiple sensor probes. **Physics of Fluid.** v.28, n.2, p.462-465, fev. 1985.