



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E  
DE COMPUTAÇÃO



# **Projeto de um Anemômetro Térmico Baseado em Termistor NTC com Modelo Linearizado por Realimentação**

**Rafael Ferreira Alves de Assis**

Orientador: Prof. Dr. Sebastian Yuri Cavalcanti Catunda

**Dissertação de Mestrado** apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação da UFRN (área de concentração: Automação e Sistemas) como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências.

Natal, RN, Junho de 2018.  
Número de Ordem do PPgEEC:M523

Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN

Sistema de Bibliotecas - SISBI

Catálogo de Publicação na Fonte. UFRN - Biblioteca Central Zila Mamede.

Assis, Rafael Ferreira Alves de.

Projeto de um Anemômetro Térmico Baseado em Termistor NTC com Modelo Linearizado por Realimentação. / Rafael Ferreira Alves de Assis - Natal, RN - 2018

73 f.:il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação. Natal, RN, 2018. Orientador: Prof. Dr. Sebastian Yuri Cavalcanti Catunda.

Orientador: Sebastian Yuri Cavalcanti Catunda

1. 1. Anemômetro térmico - Dissertação. 2. Sensores termorresistivos - Dissertação. 3. Linearização por realimentação - Dissertação. I. Catunda, Sebastian Yuri Cavalcanti. II. Título.

/UF/BCZM

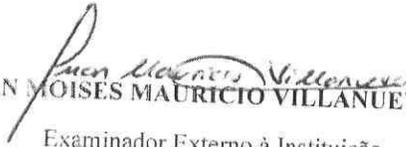
CDU 681.5:621.3



Universidade Federal do Rio Grande do Norte  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E DE  
COMPUTAÇÃO

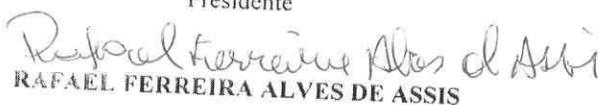
ATA Nº 523

Ao 1º dia do mês de junho do ano de dois mil e dezoito, foi realizada a 523ª sessão de defesa de dissertação de mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação da UFRN, na qual o mestrando Rafael Ferreira Alves de Assis apresentou o trabalho que tem como título: Projeto de um Anemômetro Térmico Baseado em Termistor NTC com Modelo Linearizado por Realimentação. A sessão teve início às 09h00min, tendo a banca examinadora sido constituída pelos seguintes participantes: Sebastian Yuri Cavalcanti Catunda (Dr. UFRN, Orientador), Diomadson Rodrigues Belfort (Dr. UFRN, Examinador Interno ao Programa), Juan Moises Mauricio Villanueva (Dr. UFPB, Examinador Externo à Instituição). Após a apresentação do trabalho e o exame pela banca, o mestrando foi considerado APROVADO, tendo sido lavrada a presente ata, que vai assinada pelos examinadores e pelo mestrando. A versão final da dissertação deverá ser entregue ao programa, no prazo máximo de 60 dias, contendo as modificações sugeridas pela banca examinadora e constante na folha de correção anexa. Conforme o Artigo 49 da Resolução 197/2013 - CONSEPE, o candidato não terá o título se não cumprir as exigências acima.

  
Dr. JUAN MOISES MAURICIO VILLANUEVA, UFPB  
Examinador Externo à Instituição

  
Dr. DIOMADSON RODRIGUES BELFORT, UFRN  
Examinador Interno

  
Dr. SEBASTIAN YURI CAVALCANTI CATUNDA, UFRN  
Presidente

  
RAFAEL FERREIRA ALVES DE ASSIS  
Mestrando

*Aos meus pais, Francineide e  
Walfredo, e minha noiva pela  
paciência durante a realização deste  
trabalho.*

---

# Agradecimentos

---

Ao meu orientador, professor Sebastian Yuri Cavalcanti Catunda, sou grato pela oportunidade e orientação.

Aos demais colegas de pós-graduação e da base de pesquisa, bem como os professores pelas críticas e sugestões.

À minha família pelo apoio durante esta jornada.

À CAPES, pelo apoio financeiro.

---

# Resumo

---

A medição de vazão volumétrica ou velocidade de escoamento de um fluido em regime laminar ou turbulento encontra várias aplicações na engenharia. Assim, pesquisas científicas para o desenvolvimento de arquiteturas e técnicas de medição para essas grandezas são de grande relevância e se encontram em constante expansão. Dentre as arquiteturas existentes para aplicações anemométricas em um regime de escoamento indistinto, a térmica denota diversas vantagens como excelente largura de banda, resolução espacial e baixo custo. Essa é formada basicamente por um termistor conectado em um dos braços de uma ponte de Whetstone modificada. Embora detenha simples configuração, ela possui algumas limitações impostas pela relação não linear entre a temperatura e a grandeza aplicada ao sensor. Além disso, contribuem como limitantes não idealidades do amplificador operacional que compõe a arquitetura. Diante disso, propõem-se o projeto e a implementação de uma arquitetura de anemômetro térmico com linearização por realimentação de tensão, empregando um sensor termorresistivo do tipo NTC. Essa técnica permite obter uma relação linear entre a temperatura e a grandeza utilizada como entrada. Promovem-se também comparações entre o clássico anemômetro e o preconizado neste trabalho. A validação da arquitetura proposta é conduzida através de simulações, bem como comparação experimental com a clássica e um instrumento comercial.

**Palavras-chave:** Anemômetro térmico, sensores termorresistivos, linearização por realimentação.

---

# Abstract

---

The velocity or volumetric flow measurement of laminar or turbulent flow flows meet various engineering applications. Thus, scientific research for the development of architectures and measurement techniques for these magnitudes is of great relevance and is constantly expanding. Among the existing architectures for anemometric applications in an indistinct flow regime, thermal denotes several advantages such as large bandwidth, spatial resolution and low cost. This is basically a thermistor connected to one of the arms of a modified Wheatstone bridge. Although it has a simple configuration, it has some limitations imposed by the non-linear relation between the temperature and the signal applied to the sensor. In addition, it contributes as a limitation the physical parameters of the operational amplifier that composes the architecture. Therefore, it is proposed the design and implementation of a thermal anemometer architecture with voltage feedback linearization, using a thermoresistive sensor of the NTC type. This technique allows to obtain a linear relation between the temperature and the quantity used as input. Comparisons between the classic anemometer and the one advocated in this work are also promoted. The validation of the proposed architecture is conducted through simulations, as well as experimental comparison with classic and commercial instrument.

**Keywords:** Thermal anemometer, thermo-resistive sensors, feedback linearization.

---

# Sumário

---

<b>Sumário</b>	<b>i</b>
<b>Lista de Figuras</b>	<b>iii</b>
<b>Lista de Tabelas</b>	<b>iv</b>
<b>Lista de Símbolos e Abreviaturas</b>	<b>v</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 Motivação . . . . .	1
1.2 Objetivos . . . . .	2
1.3 Contribuições . . . . .	3
1.4 Organização do trabalho . . . . .	3
<b>2 Revisão Bibliográfica</b>	<b>4</b>
2.1 Resistores Termicamente Sensíveis . . . . .	4
2.2 Anemômetro Térmico . . . . .	6
2.3 Técnica de Linearização Aplicada a um Anemômetro Térmico . . . . .	8
2.4 Resumo do Capítulo . . . . .	9
<b>3 Caracterização de Termistores</b>	<b>10</b>
3.1 Modelo Estático . . . . .	10
3.1.1 Termistor PTC . . . . .	10
3.1.2 Termistor NTC . . . . .	11
3.2 Modelo Dinâmico . . . . .	13
3.2.1 Modelo Comportamental para o Termistor NTC . . . . .	15
3.3 Caracterização do Termistor . . . . .	16
3.3.1 Determinação da Condutância e Capacitância Térmica . . . . .	17
3.4 Resumo do Capítulo . . . . .	25

<b>4</b>	<b>Arquiteturas de Anemômetro</b>	<b>26</b>
4.1	Anemômetro em Ponte de Wheatstone . . . . .	26
4.1.1	Estimação da velocidade para arquitetura WB-CTA . . . . .	29
4.1.2	Sensibilidade da Arquitetura WB-CTA . . . . .	30
4.2	Arquitetura com Linearização por Realimentação . . . . .	32
4.2.1	Estimação da velocidade para arquitetura com linearização . . . . .	33
4.2.2	Sensibilidade da Arquitetura com linearização . . . . .	34
4.3	Análise Dinâmica . . . . .	35
4.3.1	Estimação da Velocidade e Tempo de Estabilização . . . . .	36
4.3.2	Dinâmica da Temperatura . . . . .	38
4.4	Resumo do Capítulo . . . . .	41
<b>5</b>	<b>Resultados Experimentais</b>	<b>42</b>
5.1	Projeto do circuito . . . . .	42
5.1.1	Funcionamento do circuito . . . . .	42
5.1.2	Determinação dos parâmetros de projeto . . . . .	43
5.2	Simulações e Resultados Experimentais . . . . .	45
5.2.1	Controle de Temperatura . . . . .	45
5.2.2	Medição de Velocidade . . . . .	48
5.3	Resumo do Capítulo . . . . .	53
<b>6</b>	<b>Conclusões</b>	<b>54</b>
6.1	Conclusões Gerais . . . . .	54
6.2	Propostas de Trabalhos Futuros . . . . .	55
	<b>Referências bibliográficas</b>	<b>56</b>
<b>A</b>	<b>Informações adicionais</b>	<b>61</b>

---

# Lista de Figuras

---

3.1	Resistência como função da temperatura para termistores NTC. . . . .	12
3.2	Modelo comportamental para o termistores NTC (Araújo et al. 2015). . .	16
3.3	Circuito eletrônico proposto para o ensaio de caracterização. . . . .	18
3.4	Ambiente de ensaio na ausência de perda por convecção forçada. . . . .	18
3.5	Sinal de potência virtual aplicado como sinal de entrada. . . . .	19
3.6	Sinal de potência elétrica solicitada pelo termistor para entrada de potência virtual. . . . .	20
3.7	Tensão sobre o termistor para entrada de potência virtual. . . . .	20
3.8	Resposta do sistema para temperatura ambiente de 28 °C. . . . .	22
3.9	Proposta para o ensaio de um escoamento laminar. . . . .	22
3.10	Ajuste de curva para temperatura ambiente de 26,2 °C e de operação do termistor igual a 50 °C. . . . .	24
4.1	Esquema da arquitetura WB-CTA. . . . .	27
4.2	Tensão de saída como função da temperatura de operação para $\vartheta_f = 15$ m/s, $K = 2,0$ , $T_a = 25$ °C, $V_{os} = 1$ mV e $A \gg K$ . . . . .	28
4.3	Estimação de velocidade para a arquitetura WB-CTA e os parâmetros $\vartheta_f = 5$ m/s, $K = 2,0$ , $T_a = 25$ °C e $A \gg K$ . . . . .	30
4.4	Sensibilidade como função da velocidade para $T_s = 50$ °C, $T_a = 25$ °C e $K = 2$ . . . . .	31
4.5	Sensibilidade como função da temperatura de operação para $T_a = 25$ °C, $\vartheta_f = 20$ m/s e $K = 2$ . . . . .	31
4.6	Diagrama de blocos da malha de linearização por realimentação de tensão. . . . .	33
4.7	Estimação da velocidade do modelo em alto nível para a arquitetura com linearização e os parâmetros $\vartheta_f = 5$ m/s, aplicado no instante $t = 1,55$ s, $T_a = 25$ °C e $T_s = 50$ °C. . . . .	34
4.8	Esquemático da arquitetura com linearização por realimentação com uma malha para o controle de temperatura. . . . .	36
4.9	Esquema de simulação para arquitetura clássica. . . . .	37

4.10	Esboço do lugar das raízes para sistema de primeira ordem sem zeros. . .	38
4.11	Tensão sobre o sensor para a arquitetura clássica. . . . .	38
4.12	Tensão sobre o sensor para a arquitetura com linearização. . . . .	39
4.13	Resposta ao sinal tipo escada de temperatura aplicado no intervalo de $t_i = 0$ s a $t_f = 5$ s para $T_a = 25$ °C, $V_{os} = 1$ mV e $A = 100$ k V/V. . . . .	40
4.14	Estimação da velocidade para diferentes ganhos de um controlador proporcional. . . . .	40
5.1	Esquema simplificado do circuito proposto para a arquitetura com linearização. . . . .	43
5.2	Relação Resistência x Temperatura para o termistor NTC $R_{25} = 220\Omega$ . . .	44
5.3	Variação da faixa dinâmica de operação sem perda de energia por convecção forçada. . . . .	46
5.4	Variação da faixa dinâmica de operação sem perda de energia por convecção forçada. . . . .	46
5.5	Potência elétrica para variações da referência de temperatura do modelo e experimental na ausência de perda por convecção forçada. . . . .	47
5.6	Erro calculado entre o valor teórico da potência e experimental. . . . .	47
5.7	Simulando túnel de vento com tubos em PVC e compressor de ar. . . . .	48
5.8	Estimação de velocidade do modelo e do protótipo para a arquitetura com linearização. . . . .	49
5.9	Potência elétrica para arquitetura com linearização do protótipo e modelo. . . . .	50
5.10	Velocidade obtida com a arquitetura com linearização (LZ) e a clássica (WB-CTA) para o ganho do controlador $k_p = 1$ e $k = 2$ . . . . .	50
5.11	Velocidade obtida com a arquitetura com linearização (LZ) e a clássica (WB-CTA) para o ganho do controlador $k_p = 20$ e $k = 2$ . . . . .	51
5.12	Velocidade obtida com a arquitetura com linearização (LZ) e a clássica (WB-CTA) para $k = 2$ e $T_s = 50$ °C. . . . .	51
5.13	Velocidade obtida com a arquitetura com linearização (LZ) clássica (WB-CTA) e o instrumento comercial da MASTECH para o ganho do controlador $k_p = 20$ e $k = 2$ . . . . .	52

---

# Lista de Tabelas

---

3.1	Parâmetros dos termistores . . . . .	12
3.2	Parâmetros do circuito. . . . .	19
3.3	Dados experimentais do ensaio de caracterização. . . . .	21
3.4	Dados experimentais de potência elétrica e velocidade. . . . .	24
4.1	Parâmetros de simulação. . . . .	28
4.2	Dados da simulação do sistema em malha fechada. . . . .	39
5.1	Parâmetros de projeto. . . . .	44

---

# Capítulo 1

## Introdução

---

### 1.1 Motivação

O desenvolvimento de instrumentos e técnicas para o monitoramento de grandezas físicas são atividades primordiais em vários campos da engenharia, podendo citar como exemplo a medição de vazão volumétrica (Holbek et al. 2017) ou velocidade (Fernandes et al. 2017). Esta pode exigir tanto o perfil completo do campo de escoamento como apenas o valor pontual da velocidade. Quando somente este é necessário, as técnicas baseadas em trajetória de flutuadores, dispositivos rotativos, tubo de pitot estático ou métodos mais complexos podem ser empregados (DeGraaff & Eaton 2001)(Merrison et al. 2004). Embora difundidos, esses métodos não apresentam desempenho satisfatório sempre que aplicados em escoamentos turbulentos (Durbin & Reif 2011). Diferentemente, o sistema de medição para velocidade com perfil de caráter laminar ou turbulento largamente difundido utiliza como elemento sensor geralmente um fio fino aquecido, este mantido a uma temperatura constante. A arquitetura que emprega esse técnica é bem conhecida como WB-CTA (WB-CTA, *Wheatstone Bridge Constant Temperature Anemometer*) (Webster & Eren 2014).

Os estudos desenvolvidos a fim de otimizar o desempenho dessa arquitetura são baseados, em parte, na técnica de controle e propriedades do sensor, uma vez que esses exercem demasiada influência no desempenho global (Morris & Foss 2003). Apesar de algumas estratégias terem sido desenvolvidas levando em conta esses quesitos, a complexidade dos métodos tornam-os prescindíveis (Sousa et al. 2002). O avanço da engenharia de materiais e a capacidade de miniaturização dos sistemas de medição permitem também desenvolver novos dispositivos baseados nessa arquitetura de anemômetro térmico (Talbi et al. 2015). Os parâmetros que também detêm influência no comportamento dessa arquitetura são a temperatura do fluido e o amplificador operacional da ponte de Wheatstone (Ferreira et al. 2003). A dependência da temperatura e a limitação imposta

por não idealidades do amplificador são exaustivamente avaliadas na literatura (Freire et al. 1997)(Araujo et al. 2005)(Ferreira et al. 2003).

Algumas arquiteturas são sugeridas com o propósito de superar esses problemas, em especial, a que utiliza a técnica de linearização por realimentação de tensão (Araujo et al. 2014). É demonstrado através de simulações que esta apresenta melhor estabilidade, quando comparada à clássica WB-CTA, e com a possibilidade do ajuste da temperatura de operação (Araujo et al. 2014). Essa arquitetura é preferivelmente utilizada na medição da velocidade de escoamentos de fluidos que não alterem as características do sensor termorresistivo. Diante do exposto, torna-se indispensável um estudo que proponha a implementação dessa arquitetura e a realização de uma investigação, não apenas teórica, mas também experimental de forma que seja possível consolidar qual delas apresenta desempenho superior. Tal fato mostra-se como ponto de considerável motivação para produção deste trabalho.

## 1.2 Objetivos

O objetivo principal deste trabalho é projetar e implementar um sistema de medição para velocidade baseado em uma técnica de linearização por realimentação de tensão. Para tanto, realiza-se a caracterização de um termistor do tipo NTC a fim de se obter os parâmetros para simulação do modelo que representa o sistema físico. Além disso, a definição dos parâmetros de projeto para o circuito eletrônico que implementa a arquitetura. Inicialmente, obtêm-se os resultados das condições operativas por meio de simulações tanto para a arquitetura WB-CTA quanto para a que empregada a técnica de linearização. Secundariamente, confrontam-se os resultados teóricos com os dados experimentais. O projeto do circuito eletrônico que implementa cada arquitetura será desenvolvido por metodologia própria e considera as limitações impostas, sobretudo, pela fonte de alimentação, já que alguns ensaios serão conduzidos com baterias.

Essa análise numérica visa avaliar requisitos de desempenho de cada arquitetura como o tempo de resposta e a sensibilidade. Para validação da técnica de linearização para arquitetura de anemômetro, promove-se uma análise do tempo de resposta para um controle de temperatura. Por fim, o protótipo da arquitetura com linearização e o da clássica WB-CTA são empregadas na obtenção de dados experimentais em dois ambientes distintos. No primeiro, as arquiteturas são posicionadas em um túnel de vento cujo fluxo de ar é gerado por um compressor. No segundo caso, os sistemas de medição são dispostos em um recinto fechado sem influência da radiação solar e com um fluxo de ar proveniente apenas de um pequeno circulado axial de ar instalado no local.

## 1.3 Contribuições

Principais contribuições produzidas:

- Colaborar com uma técnica para caracterização de termistores em aplicações de anemometria;
- Contribuir com uma metodologia de projeto para anemômetros térmicos;
- Colaborar com o desenvolvimento de uma nova arquitetura de anemômetro.

## 1.4 Organização do trabalho

O trabalho está organizado da seguinte forma:

- Capítulo 1: Apresentação da motivação para o trabalho e os objetivos.
- Capítulo 2: Revisão bibliográfica sobre os termistores e as arquiteturas de anemômetros.
- Capítulo 3: Apresenta-se a fundamentação teórica para o modelo do termistor usado nas simulações, bem como a caracterização de um termistor NTC.
- Capítulo 4: Aborda-se as arquiteturas objetos do trabalho e apresentação dos resultados numéricos.
- Capítulo 5: Resultados experimentais.
- Capítulo 6: Por fim, as conclusões acerca dos resultados, atividades desenvolvidas e trabalhos futuros.

---

# Capítulo 2

## Revisão Bibliográfica

---

Neste capítulo, uma revisão teórica do assunto objeto do trabalho é apresentada. Ele está estruturado de forma a elencar as principais pesquisas científicas que relacionam os conceitos e definições acerca de resistores termicamente sensíveis, particularmente aqueles de coeficiente de temperatura positivo e negativo. Além da relação resistência temperatura, abordam-se as características dinâmicas pertencentes a esses componentes e que fundamentam a aplicação deles em diversos sistemas de medição, especialmente em anemometria. Apresenta-se também a arquitetura de anemômetro térmico baseada nesses dispositivos em diferentes modos de operação, bem como as diversas pesquisas presentes na literatura com vista a explorar o desempenho da arquitetura. Por fim, a técnica utilizada para o desenvolvimento de uma nova arquitetura é discutida, bem como os resultados comparativos presentes na literatura para os dois sistemas de medição.

### 2.1 Resistores Termicamente Sensíveis

O desenvolvimento teórico e o aprimoramento de técnicas para fabricação de dispositivos semicondutores contribuem decisivamente para concepção de componentes (Schroder 2006). Os resistores fabricados a partir de material semicondutor cujo valor da resistência é função da temperatura são um caso particular. É possível encontrar na literatura diversos trabalhos que pormenorizam as propriedades e aplicações para esses componentes (Freire et al. 2009)(Tkach et al. 2016), inclusive na medição de temperatura.

O elemento comumente empregado com essa finalidade é o detector de temperatura resistivo (RTD, *Resistance Temperature Detector*). Esse elemento fornece alta acurácia, sobretudo os construídos para operar em processos industriais. Essa característica explorada no RTD é baseada em algumas propriedades dos metais. Tal fato em virtude de alguns modificar de maneira previsível a resistência com a temperatura. O elemento sensível desse componente é um fio fino de pequeno diâmetro e alta pureza. Dentre as

configurações possíveis, encontra-se aquela em que ele é enrolada em torno de um núcleo com diâmetro diminuto. A platina é preferivelmente usada para construção do RTD porque ela é quimicamente inerte, resistente à oxidação e opera confiavelmente em altas temperaturas (Webster & Eren 2014). A medição de temperatura com esse elemento é realizada basicamente com a aplicação de uma corrente elétrica através dele e verificado a tensão sobre o componente quando ocorre uma mudança na temperatura (Webster & Eren 2014). O erro presente nas medições pode ser decorrente desde o voltímetro empregado na obtenção da tensão, a impurezas e deformação do fio.

Os resistores termicamente sensíveis construídos a partir de material semicondutor cerâmico são habitualmente denominados de termistores, tendo como matérias-primas misturas sintetizadas de óxidos, sulfetos e silicatos (Dyer 2004). Esses componentes apresentam coeficiente de temperatura relativamente superior ao RTD (Webster & Eren 2014), podendo ser negativo (NTC, *Negative Temperature Coefficient*) ou positivo (PTC, *Positive Temperature Coefficient*) conforme o tipo de material semicondutor usado na fabricação. No que diz respeito as propriedades, o termistor PTC pode ter a relação resistência-temperatura aproximada por um polinômio de grau 1, sendo, por exemplo, usado em circuitos para proteção de motores e limitadores de corrente.

O termistor NTC apresenta uma diminuição da resistência elétrica com o aumento da temperatura, isso governado por uma relação fortemente não linear. No entanto, em certas aplicações, como na medição de temperatura, é possível obter uma relação aproximadamente linear entre essa grandeza e a resistência elétrica (Sarkar et al. 2013). Esses dispositivos possuem uma vasta área de aplicação, destacando-se na medição de temperatura, controle e compensação (Webster & Eren 2014). Além da relação resistência-temperatura, outras propriedades como tensão-corrente e corrente-tempo permitem o emprego desses dispositivos, principalmente o NTC, em uma variedade de aplicações (Jagtap et al. 2011)(Webster & Eren 2014).

O efeito do autoaquecimento é observado sempre que ele recebe energia de uma fonte externa, sendo um comportamento bastante explorado. Ele é constatado logo que uma tensão suficientemente pequena é aplicada ao dispositivo, assim a energia dissipada pelo componente é desprezível e a lei de Ohm é respeitada. De outro modo, o efeito do autoaquecimento torna-se evidente e a relação tensão-corrente passa a ser não linear, conforme abordado por (Becker et al. 1946). Para a condição de equilíbrio térmico, a temperatura do termistor é diretamente proporcional potência entregue a ele. O termo que estabelece essa proporcionalidade depende da área do termistor e do escoamento através dele. Como a velocidade do fluido altera-se com o tempo e a perda por convecção livre depende da diferença entre a temperatura do termistor e a do fluido, então esse termo não é constante.

A partir da constante de tempo térmica, é possível descrever o comportamento da potência entregue ao termistor e a temperatura. No entanto, essa avaliação produz resultados coerentes desde que seja possível definir a resposta apenas por uma constante de tempo. Caso o termistor possui uma estrutura complexa, por exemplo, o elemento sensor envolvido por um encapsulamento, múltiplas exponenciais podem surgir (Webster & Eren 2014). Ademais, contribuem para a alteração da constante de tempo térmica fatores que elevam a dissipação de energia.

## 2.2 Anemômetro Térmico

O anemômetro térmico é um instrumento para medição de velocidade pontual em um campo de escoamento, sendo o fluido líquido ou gasoso. Ambos os termistores e o RTD podem ser utilizados como sensores para esse tipo de instrumento. Também é empregado como sensor nessa arquitetura um fio fino aquecido de tungstênio. Ela detém algumas vantagens e desvantagens quando comparada a outros sistemas de medição para velocidade pontual, por exemplo, o tubo de Pitot e o laser Doppler. Aquele apresenta melhor desempenho quando aplicado em um escoamento de baixa velocidade, porém tem um custo mais elevado. Já este possui medição não intrusiva, melhor relação sinal-ruído e resposta temporal, todavia um alto custo (Webster & Eren 2014). Alguns requisitos são exigidos quando a arquitetura de anemômetro térmico é utilizada em aplicações industriais, sobretudo em líquidos que podem alterar as características do sensor devido à contaminação. Apesar da restrição de uso em ambientes agressivos, essa arquitetura é crucial para pesquisas em laboratório, tais como escoamentos em múltiplas direções (Liu et al. 2013), micrometeorologia, fluidos turbulentos (Vallikivi et al. 2011), motores de combustão interna (Desantes et al. 2010) e transferência de calor.

O princípio de medição do anemômetro térmico exige que ele opera a uma temperatura superior a do fluido. Diante disso, alguns modos de funcionamento são tradicionalmente difundidos: a temperatura constante (CRAMER et al. 1962), tensão constante (Bergen 1971) e a corrente constante (Kidron 1967). O princípio de operação do anemômetro térmico explora a relação entre a potência elétrica entregue e a energia dissipada pelo termistor. Tal processo é descrito resumidamente da seguinte maneira: no equilíbrio térmico, o calor perdido pelo termistor é proporcional à potência entregue a ele e essa dependência é estabelecida por uma constante de proporcionalidade. Os parâmetros que definem essa constante são a área do elemento, temperatura circundante e o calor perdido por convenção (Freire et al. 2009).

Estudos como o apresentado por (Sanford 1951) propõem investigar as características

de sensores termorresistivos em aplicações anemométricas. No caso, o sensor é aplicado em um micro-anemômetro e o desempenho do sistema é avaliado segundo algumas condições de operação. Para tanto, a energia dissipada, sensibilidade, direção de escoamento e temperatura ambiente são objetos de avaliação. Embora não se tenha um modelo dinâmico bem definido, foi possível obter uma previsibilidade considerável da dinâmica do sistema, com pouca influência da temperatura ambiente. Posteriormente, o trabalho de (Martino & McNall Jr 1971) também avalia uma arquitetura de anemômetro usando um sensor termorresistivo para medição de baixas velocidades. Foi observado que o circuito exibe excelente sensibilidade, nenhuma interferência da direção de escoamento e elevada estabilidade. No entanto, notou-se considerável dependência da temperatura ambiente que posteriormente foi compensada por meio de calibração.

Uma análise mais detalhada da arquitetura de anemômetro térmico pressupõe-se uma representação matemática bem definida do modelo de forma a descrever adequadamente o sistema físico. Tal fato é abordado tanto por (Perry & Morrison 1971) quanto por (Morten et al. 1976) em seus trabalhos. Este último investiga os efeitos de não linearidades no modelo do sensor termorresistivo usado na arquitetura. Os resultados experimentais são comparados com a solução numérica, apresentando concordância satisfatória. O autor também observa que o comportamento do sistema altera consideravelmente com o ponto de operação. Em seu trabalho, (Lu 1979) analisa o desempenho dinâmico de um anemômetro a fio quente em ponte de Whetstone. Para tal, consideram-se o modelo linearizado do termistor, bem como a influência dos parâmetros do amplificador operacional que compõe a arquitetura. A partir de tais observações, o autor mostra que a frequência natural e a de amortecimento do sistema linearizado depende da capacitância térmica do termistor, ganho de malha aberta do amplificador operacional, resistências do braço em que se encontra o termistor e a corrente ou tensão de excitação. A investigação experimental é realizada através de dois métodos. O primeiro considera flutuações do fluxo de ar através de um cilindro no qual o sensor está inserido e o outro a aplicação de um degrau de tensão simulando flutuações da velocidade. Os resultados práticos obtidos revelam concordância aceitável com o modelo linearizado.

Nota-se que as investigações propostas anteriormente esbarram em algumas dificuldades provenientes de não linearidades do modelo, não idealidades do amplificador operacional e a perturbação devido à temperatura do fluido. O estudo realizado por (Freire et al. 1997) promove uma avaliação do comportamento dinâmico e estático da arquitetura de anemômetro térmico a fio quente. Ele considera as imperfeições do amplificador operacional da ponte e mostra que a tensão de *offset* de entrada desse componente ocasiona erros nas estimativas da velocidade, interfere na estabilidade e na resposta dinâmica do

circuito. No que se refere a compensação da temperatura do fluido, (Ferreira et al. 2001) em seu trabalho propõe uma técnica empregando um único sensor que exime o circuito dessa perturbação.

## 2.3 Técnica de Linearização Aplicada a um Anemômetro Térmico

A técnica de linearização por realimentação de tensão é um método que permite transformar um modelo não linear em um linear (Slotine et al. 1991). Isso é promovido através do cancelamento da não linearidade para que a dinâmica em malha fechada do sistema seja linear. As não linearidades do modelo dinâmico do termistor NTC dificultam uma análise global e a proposta de simples estratégias de controle para melhorar o desempenho desse sistema, particularmente, em aplicações de anemometria. Alguns estudos são desenvolvidos no sentido de contornar esse impedimento, tal como (Deep et al. 1992) que propõe um método para avaliação do desempenho dinâmico analisando a constante de tempo térmica do termistor. Ele também sugere que tal parâmetro sofre a influência do autoaquecimento. Diante disso, o autor preconiza a determinação de uma nova constante de tempo, agora denominada intrínseca, e definida através de excitações com sinal de corrente. O trabalho de (Freire et al. 1994) também sugere a definição desse parâmetro através de uma excitação PWM (PWM, *Pulse-Width Modulation*). Alternativamente, uma técnica é proposta por (Moreira et al. 2008) para caracterização de termistores, assim como a utilização dela em um controle de temperatura com um termistor tipo NTC. O autor também promove uma investigação teórico-experimental para computação dos parâmetros estáticos e dinâmicos a partir de um único ensaio, diferenciando-se das propostas feitas anteriormente por (Freire et al. 1994)(Deep et al. 1992). Com essa proposta, ele consegue obter uma previsibilidade da resposta do sistema por meio de um modelo linear e dos parâmetros obtidos na caracterização.

No trabalho proposto por (Araujo et al. 2014), investiga-se uma nova arquitetura de anemômetro térmico. No caso, o autor compara o desempenho dinâmico da clássica WB-CTA com essa nova arquitetura. A fim de melhorar a dinâmica da arquitetura proposta, o autor sugere a análise e verificação de diferentes controladores em uma malha de temperatura. Os resultados indicam que a arquitetura clássica não opera efetivamente a uma temperatura constante e que a dinâmica do sistema é fortemente dependente da tensão de *offset* de entrada do amplificador operacional. Embora também o tempo de resposta não seja inferior ao apresentado pela arquitetura clássica, o erro em regime alcançado pelo

sistema proposto é nulo.

## **2.4 Resumo do Capítulo**

Três tipos de resistores termicamente sensíveis foram apresentados, assim como os materiais comumente utilizados no processo de fabricação. As particularidades desses dispositivos também são elencadas e discutidas. A arquitetura de anemômetro, operando com sensor aquecido, e estudos acerca do desempenho do sistema são apresentados em um segundo momento. As não linearidades do modelo e imperfeições do amplificador foram apresentadas para o sistema de medição da arquitetura clássica. Mostra-se que a clássica arquitetura de anemômetro térmico em ponte de wheatstone guarda forte dependência com os parâmetro do amplificador operacional, temperatura do fluido e o ponto de operação. Por fim, uma técnica de linearização para o sistema de medição de temperatura e caracterização de termistores é abordada, assim como uma nova arquitetura para medição de velocidade implementando essa técnica.

---

# Capítulo 3

## Caracterização de Termistores

---

Um modelo matemático que represente adequadamente um sistema físico é indispensável quando se pretende extrair informações comportamentais através de simulação. Este capítulo elenca as principais equações que governam o comportamento estático e dinâmico dos termistores. De forma particular, aqueles resistores de coeficiente de temperatura negativo e positivo e propõe um modelo comportamental para o termistor NTC. Além disso, promove-se a caracterização deste para aplicações em anemometria.

### 3.1 Modelo Estático

#### 3.1.1 Termistor PTC

A relação estabelecida entre a resistência e a temperatura para os termistores é descrita por uma equação estática. No caso do PTC, o coeficiente de temperatura é positivo e alteração da resistência ocorre com a elevação da temperatura (Webster & Eren 2014). Essa relação é dada por uma série de potência

$$R_s = R_o (1 + \beta_1 T_s + \beta_2 T_s^2 + \dots + \beta_n T_s^n). \quad (3.1)$$

A expressão (3.1) define o valor da resistência para uma dada temperatura  $T_s$ , porém restrições impossibilitam a determinação de todos os coeficientes dessa expressão. Em termos práticos, exige-se o truncamento da equação (3.1) segundo o grau de exatidão desejado. Para o caso de uma aproximação por um polinômio de grau 1, (3.1) pode ser reescrita como

$$R_s = R_o (1 + \beta_1 T_s), \quad (3.2)$$

em que  $R_s$  é a resistência do termistor,  $R_o$  a resistência para uma dada temperatura de referência e  $\beta_1$  um escalar.

### 3.1.2 Termistor NTC

A característica resistência-temperatura para o termistor NTC é bem representada por uma equação polinomial do logaritmo natural da resistência versus temperatura. O grau do polinômio requerido depende da faixa de temperatura de operação desejada e o tipo de material usado (Webster & Eren 2014)

$$\ln R_s = A_0 + \frac{A_1}{T_s} + \frac{A_2}{T_s^2} + \frac{A_3}{T_s^3}. \quad (3.3)$$

A representação sugerida por Steinhart-Hart (Steinhart & Hart 1968) para relação  $R_s$  versus  $T_s$  do termistor NTC permite obter uma expressão simplificada para o cálculo da resistência desse elemento. Ela obtém bastante aceitação devido ao considerável grau de exatidão (Fraden 2004)

$$\frac{1}{T_s} = \frac{1}{T_o} + \frac{1}{B} \ln \left( \frac{R_s}{R_o} \right). \quad (3.4)$$

Nessa expressão,  $R_o$  é a resistência para uma dada temperatura de referência  $T_o$  e  $B$  um escalar que depende das características construtivas do termistor. Uma nova equação é obtida rearranjando os termos da expressão (3.4)

$$R_s = R_o \exp \left( \frac{B}{T_s} - \frac{B}{T_o} \right). \quad (3.5)$$

Uma outra representação para (3.5) pode ser preconizada quando a temperatura de referência tende ao infinito

$$R_s = R_\infty \exp \left( \frac{B}{T_s} \right). \quad (3.6)$$

Na Tabela (3.1) consta os valores de  $B$  para diversos termistores NTC e a Figura (3.1) ilustra a relação entre alguns deles para uma ampla gama de temperatura.

Tabela 3.1: Parâmetros dos termistores

$B$ (K)	$R_{25}(\Omega)$	$R_{\infty}$ (m $\Omega$ )
3550	100	0,67
3500	220	1,75
3500	330	2,63
3650	470	2,27
3650	1000	4,82

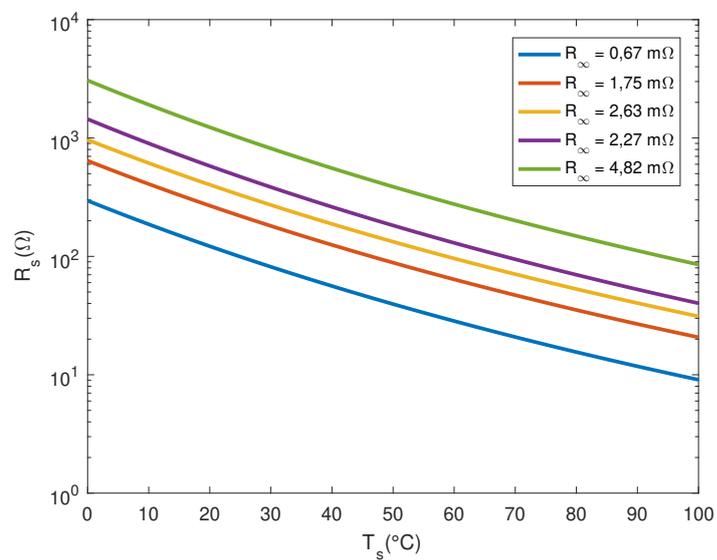


Figura 3.1: Resistência como função da temperatura para termistores NTC.

## 3.2 Modelo Dinâmico

A relação estática entre a resistência e a temperatura dos termistores é adequadamente estabelecida pelas equações (3.2)(3.6). A dinâmica entre essas grandezas considera a troca de energia promovida pelo termistor com o meio circundante. Esse comportamento é descrito pelo equilíbrio de energias (Freire et al. 2009) e embasado no princípio da conservação de energia da primeira lei da termodinâmica. A energia apresentada pelo termistor pode ser representada por duas componentes, uma devido as perdas e a outra proveniente de uma fonte externa

$$E_{int} = \sum E_{loss} + \sum E_{ext}, \quad (3.7)$$

em que a parcela referente ao ganho de energia pode ser subdivida em duas fontes externas. A primeira é resultante da radiação incidente sobre a superfície do termistor e a outra é devido à corrente elétrica através do elemento (Freire et al. 2009) que provoca uma dissipação de energia em virtude do efeito Joule. No caso da perda de energia, ela ocorre tanto devido à diferença de temperatura entre o termistor e o meio circundante quanto por convecção forçada. Sabendo disso, é possível obter uma expressão que relacione os parâmetros do termistor e outras grandezas conhecidas. Para tanto, toma-se a derivada em relação ao tempo de (3.7)

$$\frac{dE_{int}}{dt} = \sum \frac{dE_{loss}}{dt} + \sum \frac{dE_{ext}}{dt}, \quad (3.8)$$

As componentes de perda e fonte produzem as seguintes expressões

$$\sum \frac{dE_{loss}}{dt} = P_l, \quad (3.9)$$

$$\sum \frac{dE_{ext}}{dt} = P_s + P_r. \quad (3.10)$$

Desta forma, a equação (3.8) também pode ser reescrita como

$$P_i = P_s + P_r + P_l. \quad (3.11)$$

O termo  $P_i$  compoendo (3.11) é proveniente da energia armazenada pelo termistor. Já  $P_s$  e  $P_r$  representam a potência elétrica entregue a ele e a oriunda da radiação incidente, respectivamente. A componente de perda é simbolizada pelo último termo  $P_l$ . O termo referente à energia armazenada relaciona-se com a dinâmica da temperatura por meio de uma constante também denominada de capacitância térmico. Esta expressão é dada por

$$P_i = C_{th} \frac{dT_s}{dt}, \quad (3.12)$$

em que  $T_s$  é a temperatura do termistor. O termo relativo à potência elétrica em (3.11) garante que o termistor pode ser sensibilizado tanto através da corrente elétrica quanto por tensão. Ele também detém uma das não linearidades entre o sinal de excitação e a temperatura do elemento, conforme observado abaixo no caso do termistor usado ser um NTC

$$P_s = I_s^2 R_\infty e^{\frac{B}{T_s}}. \quad (3.13)$$

Quando a excitação ocorrer através de tensão, então (3.7) pode ser reescrita como

$$P_s = \frac{V_s^2}{R_\infty e^{\frac{B}{T_s}}}. \quad (3.14)$$

O termo relativo à energia perdida pelo termistor é dado por

$$P_l = G_{th}(T_s - T_a). \quad (3.15)$$

em que  $T_a$  é a temperatura ambiente e  $G_{th}$  é dado por  $Sh$ .

Rearranjando os termos da expressão (3.11) e substituindo-os adequadamente, chega-se a expressão que governa a dinâmica do termistor

$$\alpha SH + P_s = C_{th} \frac{dT_s}{dt} + G_{th}(T_s - T_a). \quad (3.16)$$

- $\alpha SH$  Termo referente a radiação incidente (W);
- $\alpha$  Coeficiente de transmissividade e absorvidade do termistor;
- $H$  Radiação incidente (W/m<sup>2</sup>);
- $P_s$  Potência elétrica (W);
- $C_{th}$  Capacitância térmica do termistor (W/ °C);
- $G_{th}$  Condutância térmica (W/ °C);
- $S$  Área da superfície do termistor (m<sup>2</sup>);
- $h$  Coeficiente de transferência de calor (W/ °C.m<sup>2</sup>).

Em (3.16), observam-se dois tipos possíveis de excitação com diferentes naturezas, sendo uma devido à radiação luminosa e a outra elétrica. No caso de aplicações em anemometria, o termo da radiação é desprezível, restando apenas a parcela fornecida por uma fonte elétrica. No caso que a temperatura ambiente varia lentamente com tempo e pode ser compensada, então é possível definir uma nova variável dada pela diferença entre

essa temperatura e a do termistor. Assim, o modelo dinâmico do sistema e então descrito a partir de (3.16) como

$$P_s = C_{th} \frac{dT_\delta}{dt} + G_{th} T_\delta, \quad (3.17)$$

em que a nova variável  $T_\delta$  é dada por  $T_s - T_a$ .

Uma escolha adequada para o sinal de entrada permite descrever essa dinâmica por meio de uma equação linear de primeira ordem. Essa expressão estabelece a relação entre a temperatura e a potência elétrica, esta posteriormente convertida em energia térmica devido ao efeito Joule. Em regime permanente, a energia entregue ao termistor é igual a dissipada para o meio. Assim, sabendo que a parcela referente à dinâmica da temperatura é nula, então (3.17) pode ser reescrita como

$$P_s = G_{th} T_\delta. \quad (3.18)$$

A constante de proporcionalidade entre a potência elétrica e a temperatura é denominada de condutância térmica. O trabalho proposto por (Moreira et al. 2008) explora tanto o cálculo desse parâmetro quanto o da capacitância térmica quando não ocorre perda de energia por convecção forçada. No entanto, sempre que está última esta presente, a condutância não é constante, mas sim uma função da velocidade do fluido. A expressão abaixo define essa dependência

$$h = a + b (\vartheta_f)^n, \quad (3.19)$$

em que  $a$ ,  $b$  e  $n$  são constantes estabelecidas experimentalmente. Essa relação é conhecida como equação de King para o estudo de fluidos com velocidade inferior a do som e densidade e viscosidade constantes (King 1914).

### 3.2.1 Modelo Comportamental para o Termistor NTC

Um modelo dinâmico que represente preponderantemente as características de um sistema físico é indispensável sempre que se requer resultados de alta qualidade. Diante disso, pesquisas são realizadas na literatura a fim de verificar um modelo adequado para representação do termistor. O trabalho apresentado por (Keskin 2005) sugere um modelo para o termistor de coeficiente de temperatura negativo. Nesse caso, apenas as características em regime podem ser analisadas, uma vez que a dinâmica da temperatura (3.17) não está presente. Para potencializar a investigação proposta, o modelo comportamental utilizado neste trabalho é baseado na proposta de (Araujo et al. 2015). Este apresenta,

além da dinâmica da temperatura, o efeito do autoaquecimento presente no sistema físico. Embora seja factível a implementação desse modelo em ambientes computacionais diversos, tal como *MATLAB®/SIMULINK*, optou-se por realizá-lo em SPICE devido a facilidade de incluir não idealidades dos componentes eletrônicos do circuito que implementa as arquiteturas de anemômetro. A Figura (3.2) ilustra um esquema do modelo em SPICE para simulações em alto nível empregando elementos de circuito. Nota-se que a dinâmica da temperatura é modelada por uma capacitor e a troca de energia térmica por fontes de correntes dependentes. Nesse caso, a excitação fornecida pela fonte elétrica é simbolizado por  $P_e$ , enquanto que o calor perdido por convecção livre e forçada é estabelecido por  $P_l$ . As simulações computacionais em alto nível são desenvolvidas usando diagramas de blocos para representar as operações matemáticas envolvidas, bem como o modelo do termistor. Já aquelas considerando os elementos de circuito como resistores, amplificadores e transistores foram realizadas após definição dos parâmetros de projeto.

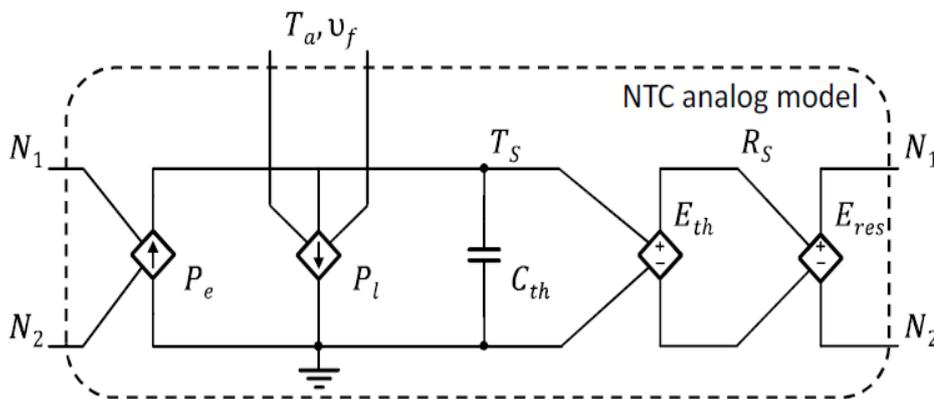


Figura 3.2: Modelo comportamental para o termistores NTC (Araújo et al. 2015).

### 3.3 Caracterização do Termistor

Para o emprego do termistor como elemento sensor de aplicações em anemometria, é necessário o conhecimento dos parâmetros que compõem a expressão (3.17). Para tanto, dois ambientes experimentais são propostos, sendo o primeiro para determinação da capacitância térmica e a condutância quando inexistente perda por convecção forçada. No segundo caso, determina-se a curva de calibração. Foram realizados ensaios preliminares com diversos termistores NTC, a fim de verificar as características mais adequadas, tais como o valor da resistência e o tamanho. Observou-se que para o valor de  $R_{25}$  menor que  $100 \Omega$ , ocorreu elevada dissipação de energia pelos componentes do circuito. Para o valor

de  $R_{25}$  maior ou igual a  $470 \Omega$ , há uma exigência de tensões de alimentação mais elevadas de forma a manter o sensor aquecido. Diante disso, optou-se por usar um termistor com  $R_{25}$  igual a  $220 \Omega$ . Para escolha do tamanho, ponderou-se entre a capacidade de dissipação de energia e o tempo de resposta. Isso porque o tempo para alcançar o equilíbrio térmico aumenta com a capacidade de dissipação de energia do termistor, já que eles são dependentes do tamanho e peso deste. Assim, define-se o termistor para este trabalho como sendo do tipo NTC e com encapsulamento SMD de tamanho 0603.

### 3.3.1 Determinação da Condutância e Capacitância Térmica

O método empregado para determinação da capacitância térmica e a constante de proporcionalidade em (3.18), quando não há perda de energia por convecção forçada, fundamenta-se na técnica de linearização por realimentação de tensão proposta por (Moreira et al. 2008). De maneira prática, o termistor é mantido em um ambiente de temperatura controlada e uma ampla variação da energia fornecida é promovida a fim de verificar a correspondente temperatura em regime do elemento. Para aplicação da técnica, exige-se a alteração do sinal de entrada em (3.17), haja vista a impossibilidade de gerar um sinal de potência elétrica. Essa nova entrada  $P_x$ , denominada de potência virtual, está indiretamente relacionada com potência elétrica e estabelece a linearidade entre a temperatura e a potência. Sabendo disso, a expressão (3.17) pode ser reescrita com essa nova variável

$$P_x = C_{th} \frac{dT_\delta}{dt} + G_{th} T_\delta. \quad (3.20)$$

O circuito eletrônico sugerido para implementação do sistema físico da expressão (3.20) é formado por um estágio de ganho e um amplificador de transresistência com um termistor do tipo NTC, conforme esboço da Figura (3.3). Inicialmente, as condições de projeto impostas para o cálculo dos componentes do circuito consideram apenas as limitações de corrente dos transistores e tensões de entrada e saída dos conversores ADC (*Analog-to-Digital Converter*) e DAC (*Digital-to-Analog Converter*). A corrente máxima através do termistor é limitada a aproximadamente  $I_{smax} = 50 \text{ mA}$ , sendo o limitante a resistência conectada à entrada inversora do segundo estágio. As tensões de alimentação  $V_{CC,EE}$  são definidas de forma a auxiliar como um limitador da corrente através do sensor.

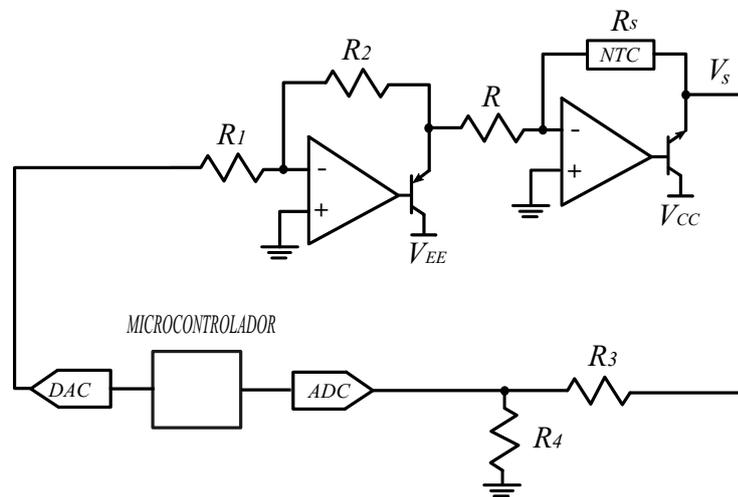


Figura 3.3: Circuito eletrônico proposto para o ensaio de caracterização.

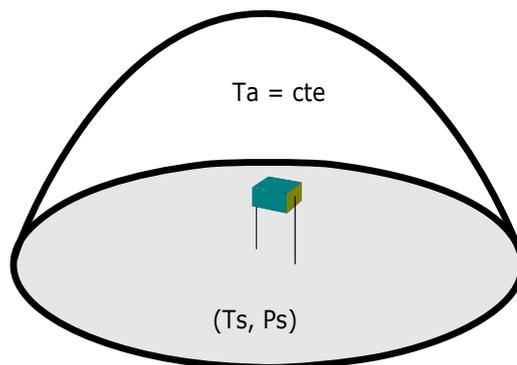


Figura 3.4: Ambiente de ensaio na ausência de perda por convecção forçada.

Tabela 3.2: Parâmetros do circuito.

$R_1$	10 k $\Omega$
$R_2$	56.0 k $\Omega$
$R$	150.0 $\Omega$
$R_{25}$	220.0 $\Omega$
$R_3$	56.0 k $\Omega$
$R_4$	100.0 k $\Omega$
$V_{CC,EE}$	$\pm 9.0$ V

O primeiro ambiente de ensaio é formado por uma cápsula de vidro cuja temperatura interna é monitorada. Um esquema básico é apresentado na Figura (3.4). Na ocasião, os valores da capacitância térmica e condutância são definidas para a condição em que  $\vartheta_f = 0$  e com o emprego da expressão (3.20). Para tanto, um sinal de entrada tipo escada é usado como excitação. Posteriormente, a tensão na saída é medida, e então se define a corrente e a temperatura em regime alcançada pelo sistema. De posse desses parâmetros, determina-se então a potência elétrica solicitada para cada temperatura. A Figura (3.5) ilustra o sinal aplicado como entrada, já a Figura (3.6) esboça a potência real fornecida ao termistor.

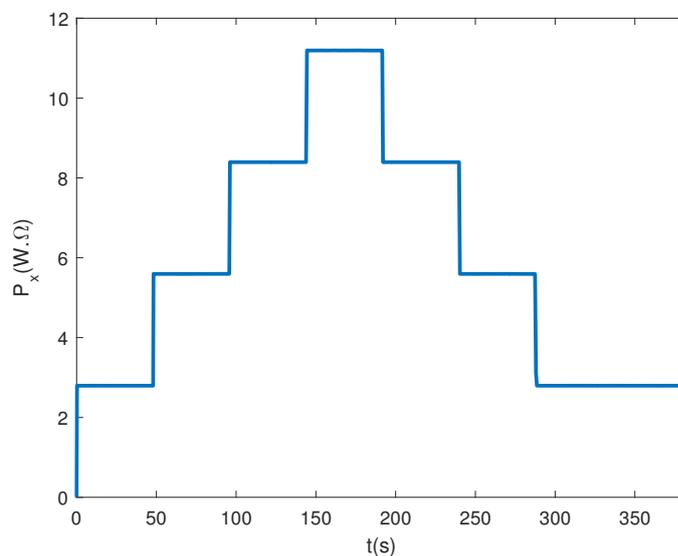


Figura 3.5: Sinal de potência virtual aplicado como sinal de entrada.

A Figura (3.7) ilustra a tensão sobre o termistor para o ensaio promovido anteriormente. Nota-se a típica característica do NTC de diminuição da resistência com o aumento da corrente. Tal efeito bem caracterizado pelo autoaquecimento. A Tabela (3.3) sintetiza os dados do ensaio conduzido a fim de determinar a condutância térmica cujo

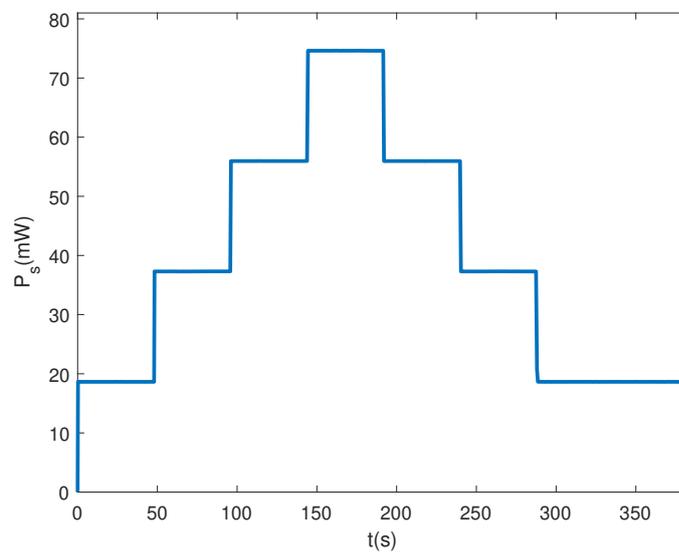


Figura 3.6: Sinal de potência elétrica solicitada pelo termistor para entrada de potência virtual.

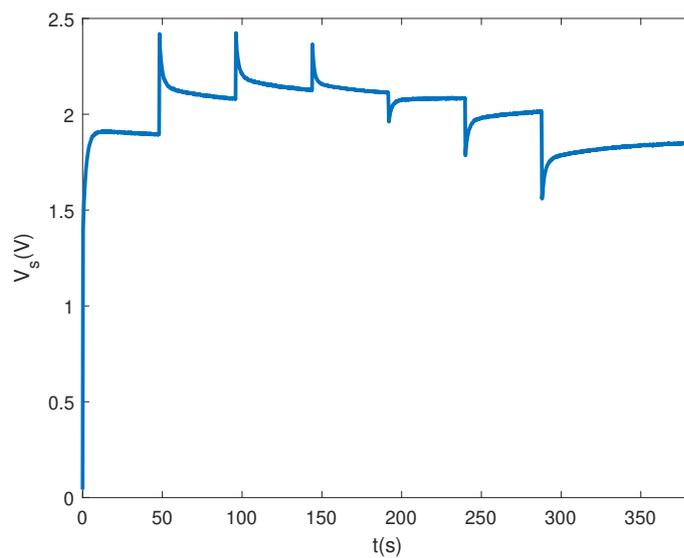


Figura 3.7: Tensão sobre o termistor para entrada de potência virtual.

valor médio encontrado foi de

$$G_{th} = 2.3 \text{ mW}/^{\circ}\text{C}.$$

Tabela 3.3: Dados experimentais do ensaio de caracterização.

Medição (N)	$P_s$ (mW)	$T_{\delta}$ ( $^{\circ}\text{C}$ )
1	56.0	24.0
2	75.0	34.0
3	56.0	26.1
4	37.3	16.0

A condutância é suficiente para descrever o comportamento do termistor após a temperatura alcança o regime permanente, segundo a expressão (3.20). Para descrever completamente o comportamento desse sistema é necessário também o conhecimento da capacitância térmica. Ela é obtida no mesmo ensaio conduzido anteriormente, conhecendo-se a dinâmica da temperatura. Destaca-se que para dinâmica de sistemas não lineares, esse parâmetro modifica-se para cada ponto de operação. No entanto, a técnica de linearização por realimentação de tensão aplicada permite definir uma única constante, também chamada de intrínseca, que é independente do ponto de operação (Moreira et al. 2008).

A solução da equação diferencial linear expressa (3.17) é dada por

$$T_{\delta}(t) = \frac{P_s}{G_{th}}(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}), \quad (3.21)$$

e  $\tau$  é igual a  $\frac{C_{th}}{G_{th}}$ . A partir do conhecimento da constante de tempo do sistema é possível determinar a capacitância térmica. A Figura (3.8) esboça a resposta desse sistema para o sinal de potência elétrica em (3.6) e gerado indiretamente pelo sinal em (3.5). O valor médio obtido para a constante de tempo intrínseca foi de 1,7 s e encontra-se alinhado a constante de tempo fornecida pelo fabricante (*ABRACON CORPORATION* n.d.). A partir desse valor e da condutância térmica, define-se a capacitância do termistor

$$C_{th} = \tau G_{th}. \quad (3.22)$$

$$C_{th} = 3.9 \text{ mW.s}/^{\circ}\text{C}$$

O ensaio conduzido anteriormente permite caracterizar o termistor para condição em que não há perda por convecção forçada, posto que em aplicações de anemometria é necessário o conhecimento completo das constantes que definem o termo da expressão (3.19). Diante disso, submete-se o termistor a um ensaio que simule um escoamento

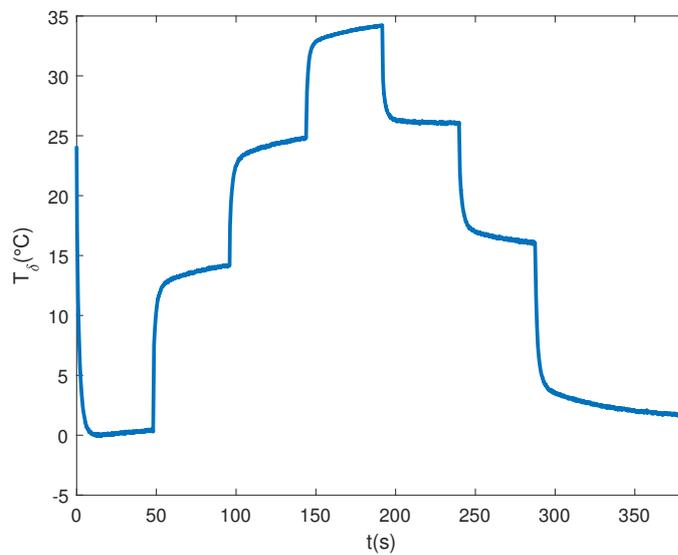


Figura 3.8: Resposta do sistema para temperatura ambiente de 28 °C.

laminar através dele, levando o termo (3.19) quando multiplicado pela área do sensor a ter agora uma dependência da velocidade

$$G_{th} = Sa + Sb (\vartheta_f)^n. \quad (3.23)$$

O método adotado para gerar esse campo de escoamento com velocidade conhecida busca explorar características do movimento circular uniforme, evitando os problemas decorrentes de turbulência provocada por túneis de vento. A Figura (3.9) ilustra o esquema simplificado do ambiente de ensaio proposto para determinação completa da condutância.

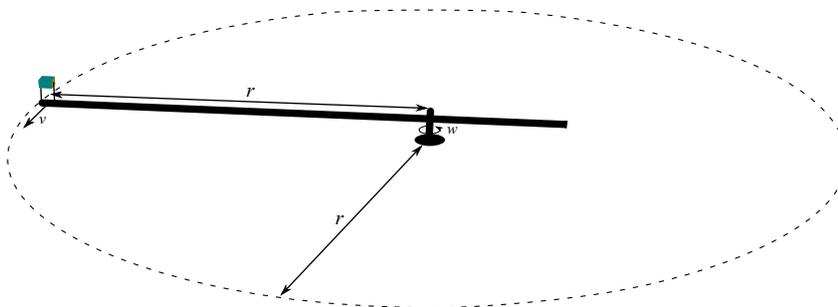


Figura 3.9: Proposta para o ensaio de um escoamento laminar.

Neste caso, o termistor é posto em um recinto com temperatura aproximadamente constante, sem influência da radiação solar e em movimento circular com velocidade

angular conhecida. A haste usada como suporte para o termistor é fixa em uma base, esta submetida ao torque promovido por um motor de indução trifásico. Para conduzir o sistema a uma velocidade conhecida, o motor é controlador por um inversor de frequência. Em virtude de problemas com turbulência e limitação mínima de velocidade, a faixa de variação imposta pelo inversor ao eixo do motor é de 4 a 85 rpm. A trajetória descrita pelo termistor é de uma circunferência de raio  $r$  igual a 1,7 m, conforme ilustra a Figura (3.9). Diante o exposto, a velocidade linear experimentada pelo termistor pode ser determinada pelas equações do movimento circular uniforme. Tomando a expressão que relaciona a velocidade linear com o raio descrito pelo objeto em movimento, chega-se a

$$v = \frac{Nr\pi}{30}, \quad (3.24)$$

em que  $r$  é comprimento da haste em metros e  $N$  a velocidade angular em rpm.

Considerando ainda o termistor operando a uma temperatura constante, então a velocidade experimentada por ele vai corresponder a uma determinada potência elétrica, calculada assim que é alcançado o regime permanente. A Tabela (3.4) ilustra dados obtidos no ensaio para temperatura de operação igual  $T_{sref} = 50$  °C e ambiente de  $T_a = 26,2$  °C. Esses pontos permitem definem os parâmetros desconhecidos da expressão (3.20) que estabelecem a relação entre a velocidade e a potência

$$\frac{P_s}{T_\delta} = Sa + Sb (\vartheta_f)^n. \quad (3.25)$$

A temperatura constante do termistor é obtida por um controle em malha fechada através com um controlador proporcional. A Tabela (3.4) ilustra a potência entregue ao termistor e a correspondente velocidade experimentada, enquanto que a Figura (3.10) apresenta o melhor ajuste para o pontos experimentais. É possível observar que o primeiro coeficiente do ajuste se aproxima do valor encontrado no ensaio realizado para determinação da condutância na ausência de perda por convecção forçada.

$$G_{th} = 0,002065 + 0,0005489 (\vartheta_f)^{0,515}.$$

Tabela 3.4: Dados experimentais de potência elétrica e velocidade.

Medição (N)	$PT$ (mW/°C)	$\vartheta_f$ (m/s)
1	2.10	0.0
2	2.50	0.71
3	2.60	1.06
4	2.70	1.42
5	2.80	1.78
6	2.90	2.14
7	2.90	2.49
8	3.00	2.85
9	3.10	3.20
10	3.10	3.56
11	3.30	4.45
12	3.40	5.33
13	3.60	6.23
14	3.70	7.11
15	3.80	8.00
16	3.90	8.90
18	4.00	10.67
19	4.20	14.23
20	4.30	15.12

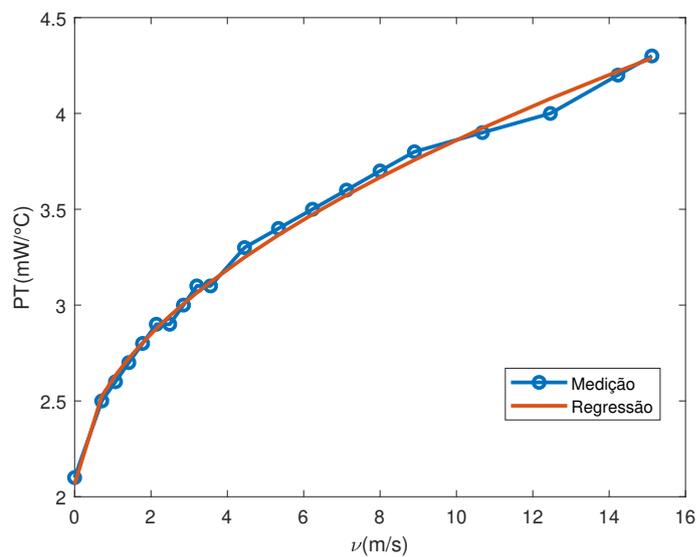


Figura 3.10: Ajuste de curva para temperatura ambiente de 26,2 °C e de operação do termistor igual a 50 °C.

### **3.4 Resumo do Capítulo**

Os conceitos a respeito do comportamento estático e dinâmico dos termistores são discutidos neste capítulo. Abordam-se as principais expressões que relacionam a resistência e a temperatura dos termistores NTC e PTC. Também é discutido o comportamento dinâmico desses elementos quando ocorrem perdas de energia para a temperatura ambiente e por convecção forçada, bem como considerações sobre sua operação. É apresentado o modelo de simulação que será utilizado na investigação proposta neste trabalho e também na validação dos resultados experimentais. Além disso, promove-se a caracterização de um termistor NTC para determinação de sua capacitância térmica. Por fim, propõe-se uma metodologia para determinação da condutância térmica quando o termistor é exposto a perda de energia para o fluido.

---

## Capítulo 4

# Arquiteturas de Anemômetro

---

Neste capítulo, é realizada uma descrição do modo de operação da arquitetura clássica WB-CTA, bem como as principais equações que regem a dinâmica da temperatura e tensão de saída, esta requerida para estimação da velocidade. Além disso, mostra-se a dependência existente entre os parâmetros do amplificador operacional e do termistor tanto para estimação de velocidade quanto para sensibilidade. Similarmente, os parâmetros da arquitetura com linearização também são definidos com objetivo de realizar uma análise comparativa. Define-se também a condição ótima de operação para esta última arquitetura. Por fim, uma análise dinâmica da arquitetura com linearização é realizada a fim de verificar a validade da técnica quando empregada para o controle de temperatura e para estimação de velocidade.

### 4.1 Anemômetro em Ponte de Wheatstone

A clássica arquitetura WB-CTA é ordinariamente usada devido ao seu desempenho dinâmico, sensibilidade e baixo custo (Lomas 2011)(Martins et al. 2012)(Itsweire & Helland 1983). Essa é basicamente formado por um termistor conectado em um dos braços de uma ponte de Wheatstone e um amplificador operacional. O circuito opera a uma temperatura aproximadamente constante de forma realimentado. Sempre que o termistor aquecido entra em contanto com o fluido, ocorre perda de energia por convecção forçada. Isso provoca um desequilíbrio momentâneo na ponte, corrigido posteriormente pelo processo de realimentação. No caso em que o elemento usado é um PTC, o ramo em que ele está conectado é o mesmo da entrada inversora do amplificador operacional. Como a tensão de *offset* de entrada detém bastante influência na resposta do circuito (Freire & Deep 1999), é necessário considerá-la no modelo do amplificar. Além desse parâmetro, a resposta do sistema também sofre forte dependência das resistências da ponte (Assis et al. 2017). O esquema da arquitetura clássica WB-CTA baseada em um termistor NTC

é apresentado na Figura (4.9).

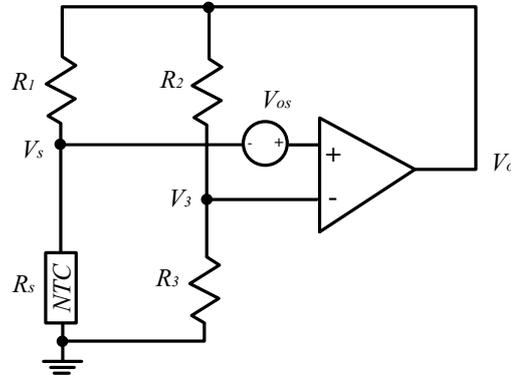


Figura 4.1: Esquema da arquitetura WB-CTA.

O modelo matemático que governa a dinâmica desse sistema é dado pela expressão em (3.16), sem o termo relativo à radiação incidente. Sabendo disso, ela pode ser reescrita como

$$P_s = C_{th} \frac{dT_s}{dt} + hS(T_s - T_a). \quad (4.1)$$

É importante a determinação da tensão de saída do amplificador, pois a partir dela é definida a temperatura do termistor. Então, podemos defini-la considerando as não idealidades do amplificador, bem como o ganho de malha aberta e tensão de *offset*

$$V_o = A(V_s + V_{os} - V_3), \quad (4.2)$$

em que  $A$  é o ganho de malha aberta,  $V_{os}$  é a tensão de *offset* de entrada e  $V_3$  a tensão na entrada inversora do amplificador. A relação entre as resistências da ponte e os parâmetros do amplificador com a operação do circuito é derivada da expressão em (4.2). De forma a simplificar os cálculos, define-se a constante

$$K = \frac{R_3 + R_2}{R_3}. \quad (4.3)$$

Quando o sistema alcançar o regime permanente, a dinâmica presente em (4.1) desaparece e (4.2) pode ser reescrita como

$$V_o = \frac{KA}{K+A} \left( \sqrt{R_s G_{th} (T_s - T_a)} + V_{os} \right). \quad (4.4)$$

É possível observar em (4.4) que a tensão aumenta à medida que a temperatura de operação também cresce. Diante disso, é importante avaliar qual impacto da escolha de

Tabela 4.1: Parâmetros de simulação.

Parâmetros	Valor
$R_{inf}$	1,8 m $\Omega$
$C_{th}$	3,9 mW/°C.s
$B$	3500 K
$Sa$	0,002065
$Sb$	0,0005489
$n$	0,515

uma determinada temperatura no funcionamento do circuito. Os parâmetros usados como entrada para o modelo são definidos na caracterização do termistor e apresentados na Tabela (4.1). A máxima velocidade considerada nas simulações corresponde ao maior valor alcançado na caracterização do termistor. A Figura (4.2) esboça a tensão de saída como função da temperatura de operação para máxima perda por convecção forçada. Nota-se que a tensão de operação aumenta rapidamente para temperaturas próximas a ambiente e sofre menores variações na faixa entre 50 °C a 60 °C. No caso de circuitos alimentados por bateria, o funcionamento da arquitetura em temperaturas elevadas pode torna-se proibitivo, já que se exige tensões elevadas.

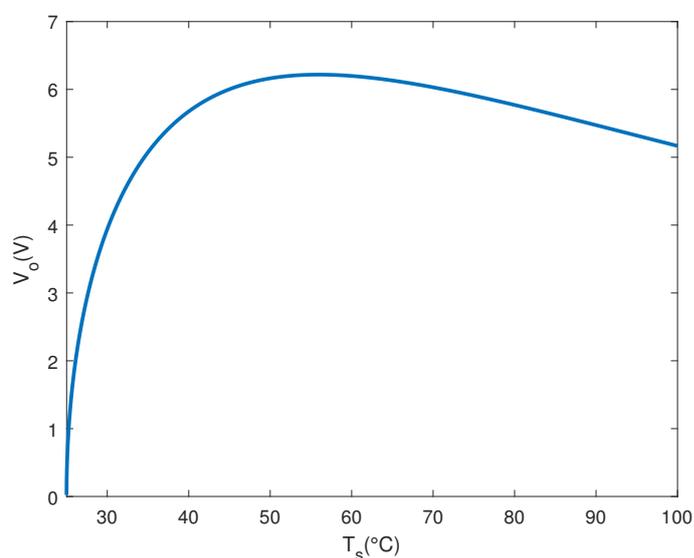


Figura 4.2: Tensão de saída como função da temperatura de operação para  $\vartheta_f = 15$  m/s,  $K = 2,0$ ,  $T_a = 25$  °C,  $V_{os} = 1$  mV e  $A \gg K$ .

### 4.1.1 Estimação da velocidade para arquitetura WB-CTA

O cálculo da velocidade é baseado na quantidade de energia perdida pelo termistor devido à convecção forçada. Esse acréscimo se reflete na intensidade da corrente elétrica solicitada pelo circuito (Freire et al. 2009). A partir dessa variação é possível calcular a velocidade do fluido experimentada pelo sensor com base na tensão de saída do amplificador quando o sistema (4.1) alcança o regime permanente. Sabendo que sob essa condição se tem a potência como

$$P_s = G_{th}(T_s - T_a). \quad (4.5)$$

Fazendo ela como função da tensão sobre o termistor

$$P_s = \frac{V_s^2}{R_s}. \quad (4.6)$$

Assim, a velocidade estimada pode ser derivada das expressões (4.2) e (4.6)

$$\hat{v}_f = \left[ \frac{\left[ \left( \frac{K+A}{KA} \right) V_o - V_{os} \right]^2}{SbR_s(T_s - T_a)} - \frac{Sa}{Sb} \right]^{\frac{1}{n}}. \quad (4.7)$$

Para o caso que  $A \gg K$ , a expressão (4.7) é reescrita como

$$\hat{v}_f = \left[ \frac{\left[ \frac{V_o}{K} - V_{os} \right]^2}{SbR_s(T_s - T_a)} - \frac{Sa}{Sb} \right]^{\frac{1}{n}}. \quad (4.8)$$

A expressão para estimação da velocidade depende tanto dos parâmetros do sensor quanto do amplificador operacional, sobretudo a tensão de *offset* de entrada. O numerador de (4.8) sugere que este parâmetro impõe certa dependência na estimação da velocidade, conforme exaustivamente explorado na literatura (Freire et al. 1997) (Araujo et al. 2014). A Figura (4.3) ilustra a simulação da resposta do circuito proposto para arquitetura WB-CTA para um aumento e redução do *offset* na estimação da velocidade. Nota-se que valores pequenos desse parâmetro tornam a arquitetura mais rápida, porém com resposta oscilatória.

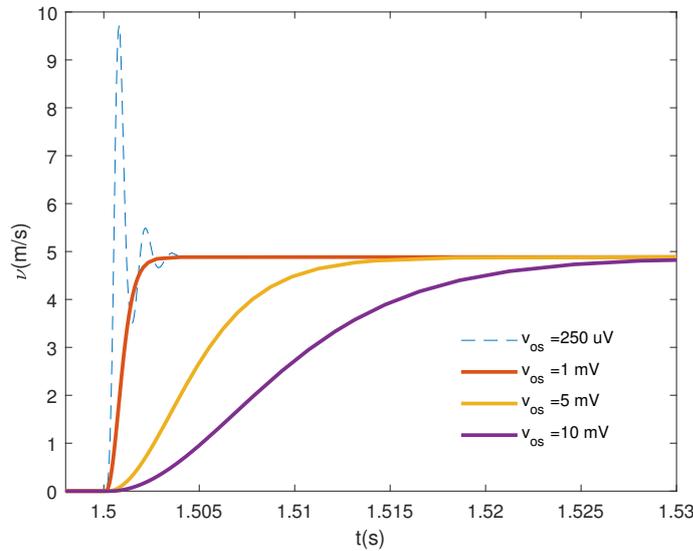


Figura 4.3: Estimação de velocidade para a arquitetura WB-CTA e os parâmetros  $\vartheta_f = 5$  m/s,  $K = 2,0$ ,  $T_a = 25$  °C e  $A \gg K$ .

#### 4.1.2 Sensibilidade da Arquitetura WB-CTA

A sensibilidade é obtida pela taxa de variação da grandeza de saída pela de entrada. No caso da arquitetura WB-CTA, esse parâmetro é definido pela derivada parcial da tensão na saída do amplificador operacional em relação a velocidade do fluido. O ponto de máxima sensibilidade fornece um parâmetro de comparação para determinação da condição ótima de operação do circuito. A partir da expressão (4.4), determina-se essa grandeza

$$\frac{\partial V_o}{\partial \vartheta_f} = \frac{KSb\sqrt{R_s(T_s - T_a)}}{4\vartheta_f^n(Sa + Sb\vartheta_f^n)^n}. \quad (4.9)$$

Nota-se que a sensibilidade para a arquitetura depende dos parâmetros do sensor, temperatura de operação e resistências da ponte. O fator  $K$  em (4.9) estabelece que é possível melhorar a sensibilidade alterando as resistências da ponte, no entanto isso pode modificar a dinâmica e aumentar o consumo de energia da arquitetura (Assis et al. 2017). A sensibilidade como função da velocidade do fluido, para os parâmetros da Tabela (4.1), é apresentada na Figura (4.4). O resultado indica que a arquitetura apresenta melhor desempenho em termos da sensibilidade em baixas velocidades. Observa-se na Figura (4.5) a sensibilidade agora como função da temperatura de operação, com o máximo valor ocorrendo em aproximadamente  $T_s = 55$  °C. Para esse valor, exige-se tensões de alimentação

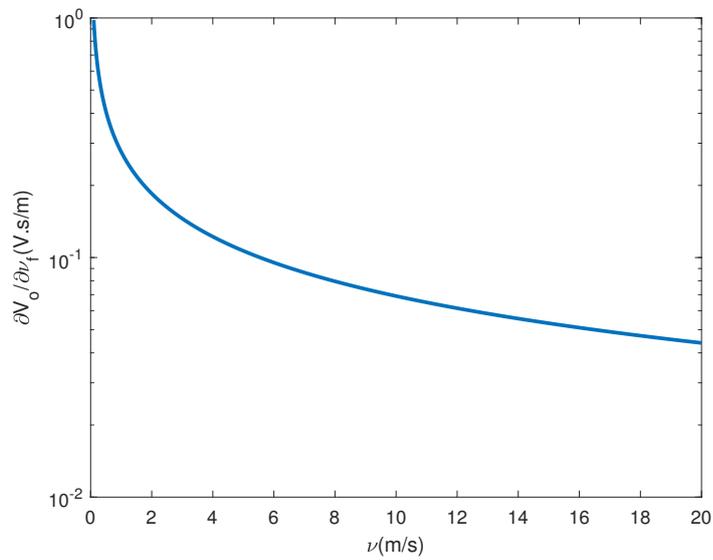


Figura 4.4: Sensibilidade como função da velocidade para  $T_s = 50$  °C,  $T_a = 25$  °C e  $K = 2$

mais elevadas, conforme é possível observar a partir da Figura (4.2). Além disso, ocorre pequenas variações de sensibilidade em uma ampla faixa de temperatura.

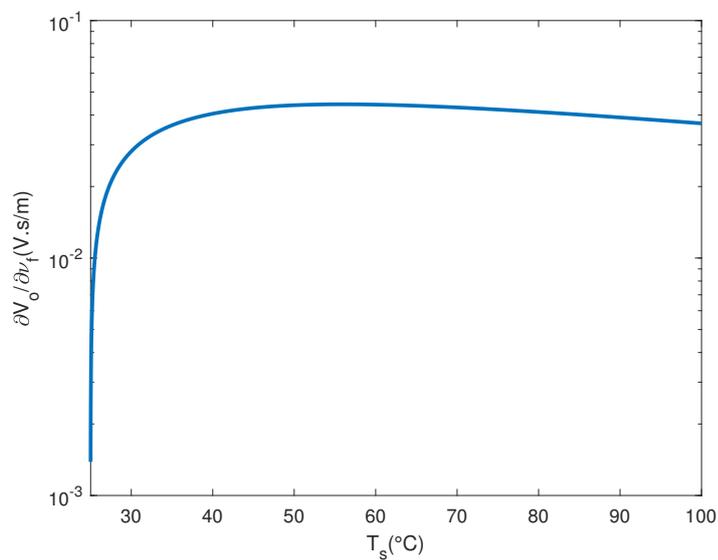


Figura 4.5: Sensibilidade como função da temperatura de operação para  $T_a = 25$  °C,  $v_f = 20$  m/s e  $K = 2$ .

## 4.2 Arquitetura com Linearização por Realimentação

A principal arquitetura objeto de investigação deste trabalho é baseada em uma técnica de linearização por realimentação de tensão. A relevância desse método está relacionada com a possibilidade de se obter uma relação linear entre o sinal de controle e a variável controlada, uma vez que o modelo do sistema físico empregado na arquitetura é não linear. A aplicação da técnica fornece maior flexibilidade em termos de desempenho para utilização de controladores lineares, assim como um ajuste dinâmico da temperatura de operação. Embora o modelo de simulação seja utilizado para o termistor NTC, ele pode ser adequadamente empregado com o PTC. A escolha daquele justifica-se devido ao desempenho em termos de sensibilidade quando operando em temperaturas mais baixas (Catunda et al. 2004).

Em aplicações anemométricas, o termo referente à radiação incidente é desprezado. Desta forma, a dinâmica do modelo é descrita por um sistema de primeira ordem e linear em relação à potência elétrica (3.16). Destaca-se que a linearidade estabelecida não é passível de implementação, haja vista a impossibilidade em gerar um sinal de potência como entrada. Para contornar tal fato, (Moreira et al. 2008) propõe a utilização de uma técnica de linearização por realimentação de tensão para cancelamento da não linearidade entre o sinal de entrada e a temperatura do sensor. Considerando que a potência entregue a ele pode ser escrita como

$$P_s = V_s I_s, \quad (4.10)$$

e substituindo esse termo em (3.16) e  $Sh$  por  $G_{th}$ , então chega-se

$$V_s I_s = C_{th} \frac{dT_s}{dt} + G_{th}(T_s - T_a). \quad (4.11)$$

A corrente elétrica através do sensor pode ser obtida pela divisão do sinal gerado pela ação de controle, ora denominada de  $P_x$ , e a tensão  $V_s$ , conforme Figura (4.6).

$$I_s = \frac{P_x}{V_s}. \quad (4.12)$$

Agora substituindo (4.12) em (4.11)

$$P_x = C_{th} \frac{dT_s}{dt} + G_{th}(T_s - T_a). \quad (4.13)$$

Essa expressão estabelece uma dependência linear entre a nova entrada  $P_x$  e a temperatura

$$P_x = C_{th} \frac{dT_s}{dt} + G_{th}(T_s - T_a), \quad (4.14)$$

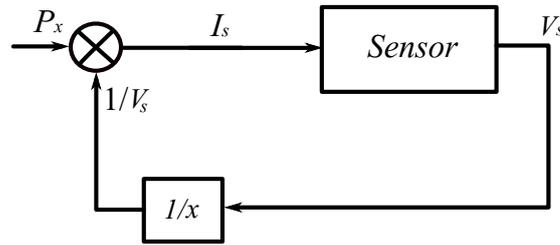


Figura 4.6: Diagrama de blocos da malha de linearização por realimentação de tensão.

e pode ser reescrita alternativamente a partir de (3.17) como

$$P_x = C_{th} \frac{dT_\delta}{dt} + G_{th} T_\delta. \quad (4.15)$$

#### 4.2.1 Estimação da velocidade para arquitetura com linearização

A determinação da velocidade para a arquitetura é derivada da expressão que governa a dinâmica do sensor em (4.15). Sabendo que a entrada  $P_x$  é um variável conhecida, haja vista que ela é fornecida pela ação de controle, e  $V_s$  é uma grandeza medida, então a velocidade pode ser estimada a partir de (3.19) quando multiplicada pela área do sensor e (4.15). Para o caso do sistema ter alcançado o regime

$$\hat{v}_f = \left[ \frac{P_x}{SbT_\delta} - \frac{Sa}{Sb} \right]^{\frac{1}{n}}, \quad (4.16)$$

A expressão de estimação da velocidade (4.16) é compacta quando comparada a da arquitetura clássica WB-CTA (4.8) e menos suscetível às variações dos componentes do circuito. Isso porque o termo presente no numerador de (4.16) é gerado pelo controlador, enquanto que em (4.8) a grandeza é medida e ainda há a influência da tensão de *offset* do amplificador operacional. A Figura (4.7) ilustra a resposta da simulação para arquitetura com linearização. Observa-se a tensão de saída sobre o sensor para perturbação de velocidade e diferentes valores de *offset*. Nota-se que essa arquitetura é insensível às variações deste parâmetro.

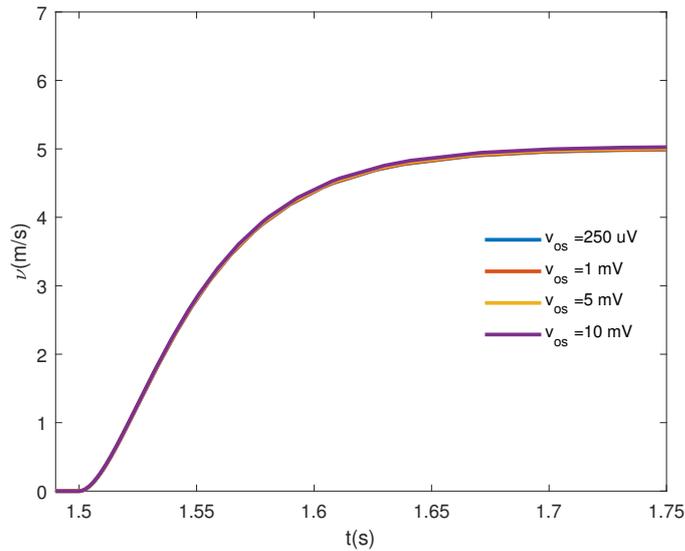


Figura 4.7: Estimação da velocidade do modelo em alto nível para a arquitetura com linearização e os parâmetros  $\vartheta_f = 5$  m/s, aplicado no instante  $t = 1,55$  s,  $T_a = 25$  °C e  $T_s = 50$  °C.

#### 4.2.2 Sensibilidade da Arquitetura com linearização

A sensibilidade da arquitetura é calculada a partir da derivada parcial da tensão de saída com relação à velocidade do fluido. Assim,

$$\phi = \frac{\partial V_s}{\partial \vartheta_f}. \quad (4.17)$$

A expressão (4.5) pode ser reescrita como

$$I_s^2 R_s = (Sa + Sb\sqrt{\vartheta_f})(T_s - T_a), \quad (4.18)$$

e a corrente  $I_s$  através do sensor definida como

$$I_s = \sqrt{\frac{(Sa + Sb\sqrt{\vartheta_f})(T_s - T_a)}{R_s}}. \quad (4.19)$$

Desta forma, a sensibilidade  $\phi$  pode ser calculada a partir da resistência do sensor e da corrente como

$$\phi = \frac{\partial I_s R_s}{\partial \vartheta_f}, \quad (4.20)$$

e, portanto, produzindo a seguinte expressão

$$\phi = \frac{Sb\sqrt{R_s(T_s - T_a)}}{4\vartheta_f^n \sqrt{(Sa + Sb\vartheta_f^n)}}. \quad (4.21)$$

Uma comparação entre (4.9) e (4.21) indica que tanto uma quanto outra depende dos mesmos parâmetros, divergindo apenas em termos de magnitude. Isso devido ao fator  $K$  da arquitetura clássica WB-CTA, isto é, quando  $K$  é maior que a unidade, então a arquitetura com linearização apresenta desempenho inferior em termos da sensibilidade. Caso contrário, é superior. Ambas teriam desempenho semelhante em relação a sensibilidade logo que  $K$  tende-se a unidade, algo proibitivo para operação da arquitetura clássica.

O ajuste automático da temperatura de operação permite que o circuito opere de forma otimizada. Para tanto, exige-se o conhecimento do valor ótimo da temperatura para a máxima sensibilidade. Isso é obtido a partir da derivada do termo (4.21) em relação a temperatura

$$\phi_{max} = \frac{SbR_s \left[ 1 + \frac{B(T_s - T_a)}{T_s^2} \right]}{8\vartheta_f^n \sqrt{R_s(T_s - T_a) (Sa + Sb\vartheta_f^n)}}. \quad (4.22)$$

O ponto de operação para temperatura que fornece a máxima sensibilidade é dado através da solução em  $T_s$  da expressão (4.22 )

$$T_{s\phi_{max}} = \frac{1 - \sqrt{1 - \frac{4T_a}{B}}}{\frac{2}{B}}. \quad (4.23)$$

Nota-se em (4.23) que a dependência para esse ponto é estabelecida unicamente pelo parâmetro  $B$  do termistor e a temperatura do fluido. Como aquela pode ser determinada, então o sistema pode operar de forma auto-regulado para máxima sensibilidade a partir da alteração do *setpoint*.

### 4.3 Análise Dinâmica

A exploração analítica de sistemas não lineares é, em geral, demasiadamente complexa. No entanto, modelos matemáticos bem elaborados podem ser utilizados para predição da resposta desses sistemas. No caso do termistor, o modelo detêm não linearidades tanto entre a temperatura e o sinal de entrada quanto entre esta e a velocidade. Alguns estudos foram desenvolvidos com objetivo de avaliar esse modelo quando empregado em uma arquitetura de anemômetro térmico (Lu 1979). A literatura também apresenta di-

versos trabalhos que relacionam o desempenho desse sistema com alguns parâmetros do circuito da arquitetura (Freire et al. 1997).

A arquitetura de anemômetro térmico com o modelo linearizado por realimentação emprega igualmente o modelo do termistor da WB-CTA. Aquela técnica contornar alguns inconvenientes desta arquitetura, como instabilidade devido à tensão de *offset* do amplificador operacional. Além disso, ela permite uma relação linear entre o sinal utilizado como entrada e a temperatura, conforme demonstra (Moreira et al. 2008). O ambiente de simulação usado integra o modelo de alto nível do termistor com o circuito eletrônico que implementa a arquitetura. Isso permite produzir resultados que levam em conta tanto o comportamento dinâmico quanto as incertezas dos componentes. Sabendo disso, considera-se também alguns parâmetros do amplificador operacional nas simulações, tais como o ganho de malha aberta e tensão de *offset* de entrada. As Figuras (4.8) e (4.9) ilustram o esquema da arquitetura com linearização e a clássica, respectivamente. O bloco *C* simboliza o controlador, enquanto que *DIV* realizar uma divisão entre o sinal  $P_x$  proveniente do controlador e a tensão realimentada. o bloco *EST* estima a variável temperatura para comparação com a referência.

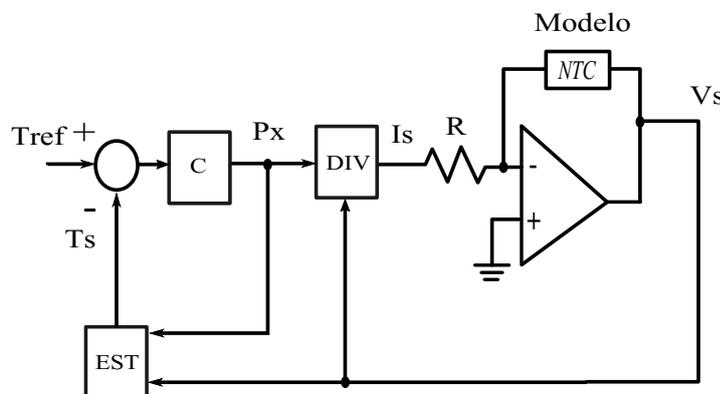


Figura 4.8: Esquemático da arquitetura com linearização por realimentação com uma malha para o controle de temperatura.

### 4.3.1 Estimação da Velocidade e Tempo de Estabilização

Uma das não linearidades pertencentes ao modelo ocorre entre a temperatura e o termo responsável pela perda de energia por convecção forçada. Quando este não exerce influência sobre a resposta do sistema, ou seja, na ausência de velocidade do fluido, a expressão (4.15) dita a dinâmica. Por outro lado, aplicando a transformada de Laplace a essa expressão e obtendo a função de transferência em malha fechada  $H(s)$ , é possível observa

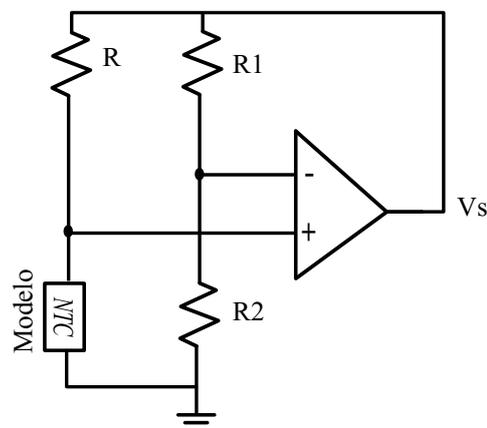


Figura 4.9: Esquema de simulação para arquitetura clássica.

como a velocidade influencia no tempo de estabilização. Sabendo que  $G(s)$  é a função de transferência em malha aberta obtida a partir de (4.15), então obtém-se  $H(s)$  como

$$H(s) = \frac{G(s)}{1 + G(s)}, \quad (4.24)$$

ou alternativamente como

$$H(s) = \frac{\frac{1}{C_{th}}}{s + \frac{G_{th} + 1}{C_{th}}}. \quad (4.25)$$

Nota-se que  $G_{th}$  desloca o lugar das raízes no sentido contrário a origem, tornando a resposta do sistema mais rápida. As Figuras (4.11) e (4.12) esboçam as tensões sobre os sensores para cada arquitetura e diferentes degraus de velocidade aplicados como entrada. Para o critério de 2% do valor final como ponto inicial do regime permanente e considerando a maior degrau de velocidade aplicado, a arquitetura proposta atinge esse estado em  $5\tau \approx 56.0$  ms, enquanto que a clássica em  $5\tau \approx 1.1$  ms. Embora o tempo de estabilização entre as arquiteturas para cada degrau de velocidade seja considerável, têm-se, em média, diferenças menores que 8% entre o maior e o menor tempo de regime para mesma arquitetura.

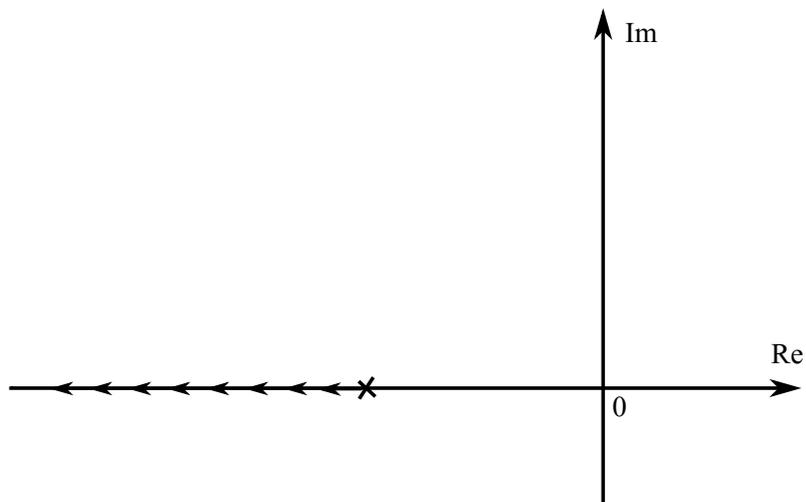


Figura 4.10: Esboço do lugar das raízes para sistema de primeira ordem sem zeros.

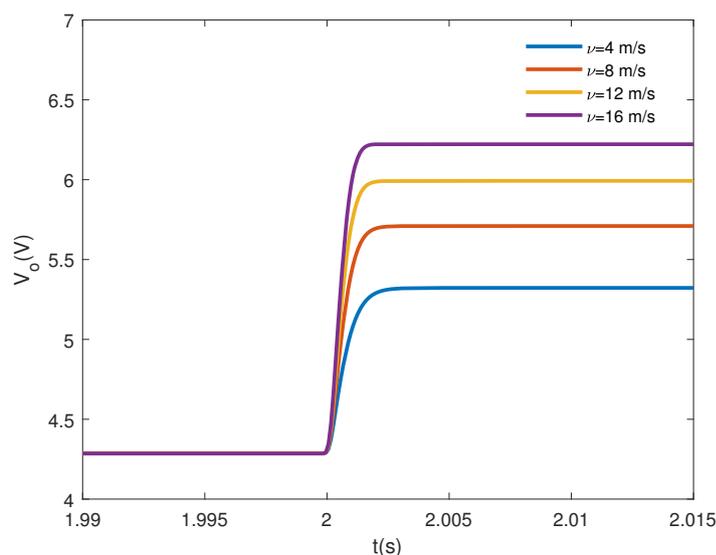


Figura 4.11: Tensão sobre o sensor para a arquitetura clássica.

### 4.3.2 Dinâmica da Temperatura

A arquitetura de anemômetro térmico com linearização por realimentação de tensão fornece maior flexibilidade para alteração dos parâmetros de operação. Esse diferencial propicia ao operador ajustar o circuito para uma nova condição de funcionamento, alterando, por exemplo, o ponto de operação ou tempo de resposta sem, no entanto, precisar modificar os componentes do circuito. Tal fato está totalmente alinhado aos sistemas mais robustos, principalmente aqueles que operam em condições adversas. Para verificar tais fatos, modifica-se o ponto de operação quando não ocorre perda por convecção forçada.

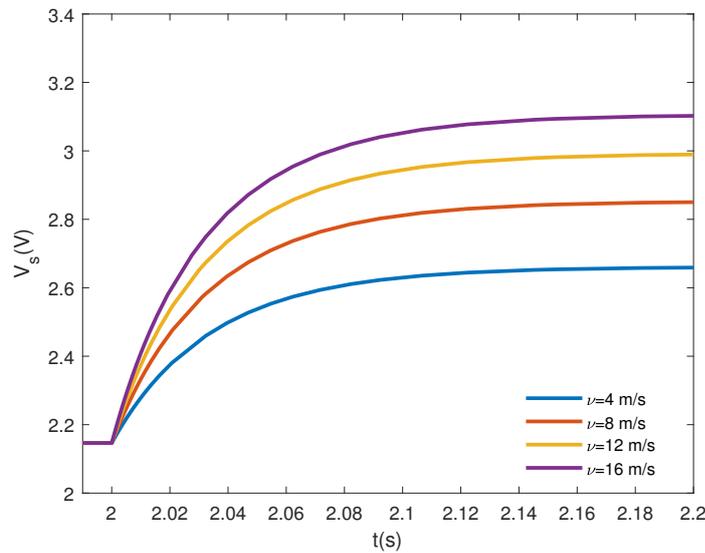


Figura 4.12: Tensão sobre o sensor para a arquitetura com linearização.

Em um segundo momento, realiza-se uma comparação do tempo de resposta da estimação de velocidade para duas arquitetura, agora considerando modificações no ganho controlador da arquitetura com linearização. As simulações conduzidas utilizam igualmente os parâmetros obtidos nos resultados das Figuras (4.11) e (4.12).

Tabela 4.2: Dados da simulação do sistema em malha fechada.

Constante de tempo $\tau$ (ms)	Temperatura $T_s$
36,4	34,8
34,4	39,7
37,0	44,6
37,1	49,5

Além da malha de linearização, a arquitetura também possui uma para o controle da temperatura. A fim de verificar o desempenho do sistema em malha fechada e a validação do método através da verificação do tempo de resposta apresentado pelo circuito, aplica-se um sinal tipo escada de temperatura como referência. Como o modelo linearizado por realimentação é de ordem zero, opta-se por um controlador proporcional com o objetivo de reduzir o erro regime permanente. A inclusão de outros tipos de controladores que incluam polos ao sistema podem criar comportamento imprevisíveis devido as não linearidades ainda presentes no modelo. A Figura (4.13) esboça a resposta do sistema para a excitação. Nota-se que a dinâmica da temperatura é adequadamente representada por um sistema de primeira ordem. A Tabela (4.2) corrobora com o método de linearização, uma

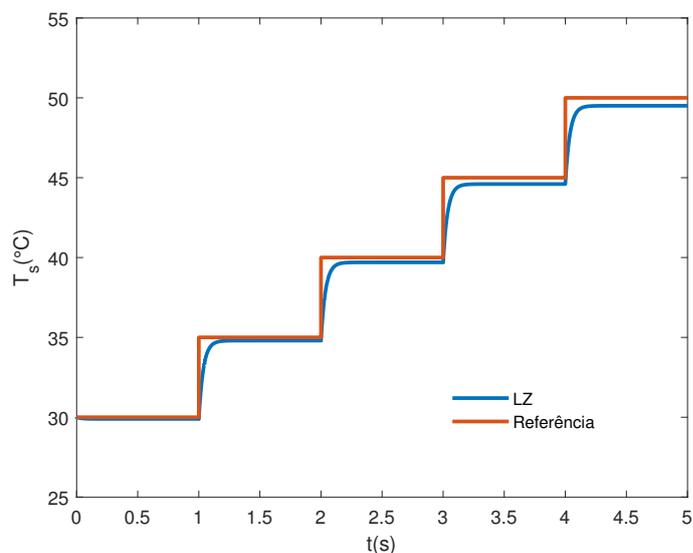


Figura 4.13: Resposta ao sinal tipo escada de temperatura aplicado no intervalo de  $t_i = 0$  s a  $t_f = 5$  s para  $T_a = 25$  °C,  $V_{os} = 1$  mV e  $A = 100$  k V/V.

vez que a constante de tempo sofre pequenas variações para os sinais aplicados.

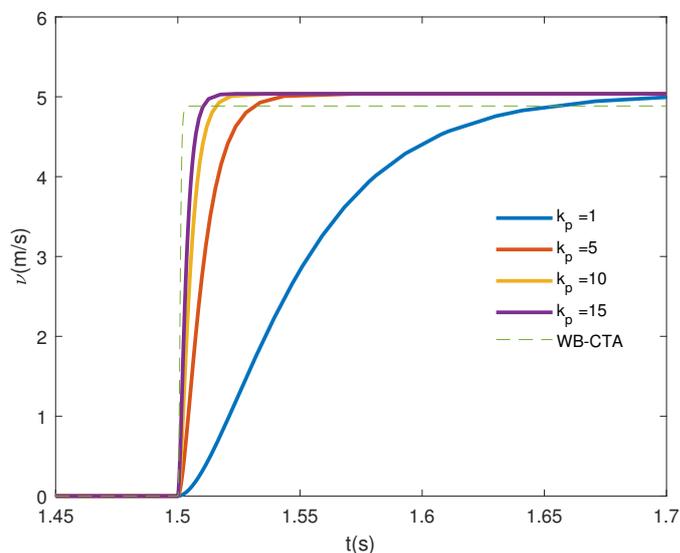


Figura 4.14: Estimação da velocidade para diferentes ganhos de um controlador proporcional.

Os resultados das Figuras (4.11) e (4.12) sugerem que a arquitetura clássica alcança o regime permanente em um tempo muito superior ao apresentado pela arquitetura com linearização, quando está operando com um controlador proporcional de ganho unitário. No entanto, a flexibilidade fornecida pela arquitetura proposta permite não só alterar o

ponto de operação, como também a dinâmica através de simples ajustes nos parâmetros do controlador e referência. Fato certamente menos dispendioso que na arquitetura clássica, já que a ponte é formada por uma rede de resistores fixos. A fim de verificar o desempenho dinâmico para estimação de velocidade entre as arquiteturas, empregam-se diferentes ganhos para o controlador proporcional. A Figura (4.14) ilustra como rapidamente a arquitetura proposta quase superou a dinâmica apresentada pela clássica.

## 4.4 Resumo do Capítulo

Os aspectos relevantes sobre a arquitetura de anemômetro WB-CTA, tais como equação dinâmica e de estimação da velocidade, foram abordados neste capítulo. Também foi mostrado a dependência existente entre as resistências da ponte, parâmetros do sensor com a sensibilidade do circuito. Além da WB-CTA, foi apresentado a arquitetura que utiliza a técnica de linearização por realimentação de tensão. Os principais tópicos explorados desta arquitetura foram a equação de estimação da velocidade, sensibilidade e o comportamento dinâmico. Os resultados demonstram que a arquitetura WB-CTA pode apresentar desempenho superior ou inferior em termos de sensibilidade, porém a equação de estimação é mais suscetível a ruídos e incertezas devido aos parâmetros do amplificador e medição da tensão. A linearização proposta para arquitetura demonstra resultados satisfatórios, uma vez que a constante de tempo do circuito apresentou pequenas variações e a estimação da velocidade robustez frente as mudanças da tensão de *offset*. Por fim, a dinâmica da estimação é avaliada para duas arquiteturas.

---

# Capítulo 5

## Resultados Experimentais

---

Os resultados experimentais para medição de velocidade e o controle da faixa dinâmica são apresentados neste capítulo. Para tanto, o protótipo da arquitetura com linearização é construído, bem como o circuito da arquitetura WB-CTA. Como forma de validar os dados de medição das duas arquiteturas, um outro instrumento comercial é utilizado. A descrição detalhada da metodologia empregada no projeto do protótipo e os requisitos de implementação também são elencados. Os dados experimentais são comparados com simulações do modelo proposto para a arquitetura com linearização.

### 5.1 Projeto do circuito

#### 5.1.1 Funcionamento do circuito

A arquitetura com linearização é composta por duas malhas de realimentação. Uma executa o processo de linearização, gerando o sinal em corrente aplicado ao termistor enquanto que a outra implementa o controle de temperatura. A arquitetura é formada basicamente por um amplificador de transresistência com um termistor na malha de realimentação. A corrente necessária para aquecer este elemento possui intensidade da ordem de centenas de miliampères e exige um estágio de potência, sendo, por exemplo, implementado através de amplificadores com alta corrente de saída. Neste trabalho, propõe-se a utilização de transistores como fonte de corrente para suprir essa demanda. No caso, é utilizado um BJT (BJT, *Bipolar Junction Transistor*) do tipo  $p-n-p$  no primeiro estágio de amplificação do sinal presente no DAC. Um segundo estágio com outro BJT do tipo  $n-p-n$  é implementado com um amplificador na configuração inversora. Por fim, um divisor resistivo é empregado para adequar o nível do sinal de tensão  $V_s$  a entrada do ADC. Um DAC completa o circuito para a arquitetura com linearização. Dentre as funções realizadas pelo microcontrolador, destaca-se a geração do sinal que deve cancelar a não

linearidade entre a temperatura e o sinal de entrada. A Figura (5.1) traz o esquema do circuito proposto. O esquema do circuito eletrônico idealizado para arquitetura clássica é o mesmo apresentado em (4.8).

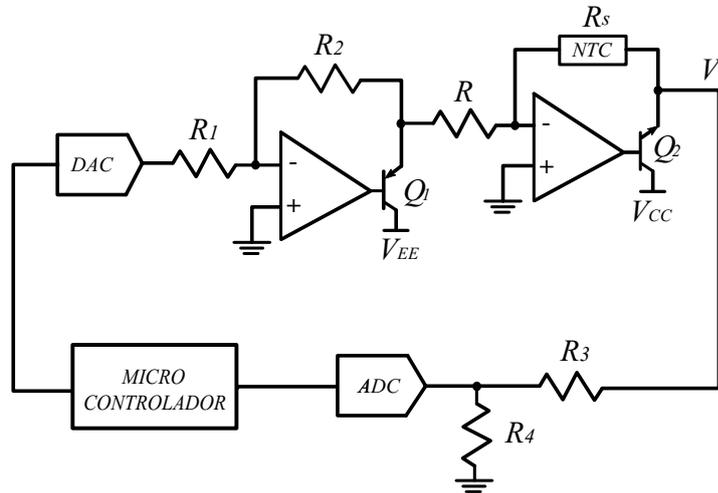


Figura 5.1: Esquema simplificado do circuito proposto para a arquitetura com linearização.

### 5.1.2 Determinação dos parâmetros de projeto

Os parâmetros de projeto são definidos a partir de critérios e condições de operação. A metodologia adotada exige inicialmente a definição de uma temperatura de operação. Conhecido esse parâmetro, fixa-se a máxima corrente através do termistor e a respectiva tensão sobre ele quando não ocorre perda por convecção. A Figura (5.2) ilustra a curva  $R_s \times T_s$  do termistor utilizado neste trabalho e o ponto de operação escolhido. O valor ótimo para temperatura é obtido como sendo aquele que fornece a máxima sensibilidade, segundo a expressão (4.23). No caso em estudo, a corrente máxima permissível leva em conta a limitação do sistema de alimentação, que, em alguns momentos, deve ser realizada por baterias de 9 V. Diante disso, o valor permissível será de 50 mA, para uma temperatura de  $T_s = 50^\circ \text{C}$  e ambiente em torno de  $T_a = 25^\circ$ . A máxima tensão na saída do conversor digital analógico é 2,2 V e o máximo nível de tensão na entrada do conversor analógico digital é 3,3 V. Esses valores juntamente com tensão para máxima corrente permitem definir o ganho do primeiro estágio de amplificação do circuito e o divisor resistor. A resolução dos conversores é de 12 bits e com taxa de leitura e escrita de 30 kSPS. O amplificador operacional usado para implementação da arquitetura foi um TL052. A Tabela (5.1) apresenta os parâmetros definidos para o projeto do circuito que implementa

a arquitetura com linearização, esta confeccionada em uma placa PCB. Os dados provenientes da medição são sempre adquiridos por um microcontrolador e posteriormente enviados via portal serial para armazenamento em um computador. Diferentemente do ensaio de caracterização, já que naquela ocasião não era possível uma conexão física com o computador devido ao movimento contínuo do circuito. Na ocasião, os dados foram obtidos pelo microcontrolador e escritos em uma cartão MicroSD através do protocolo SPI.

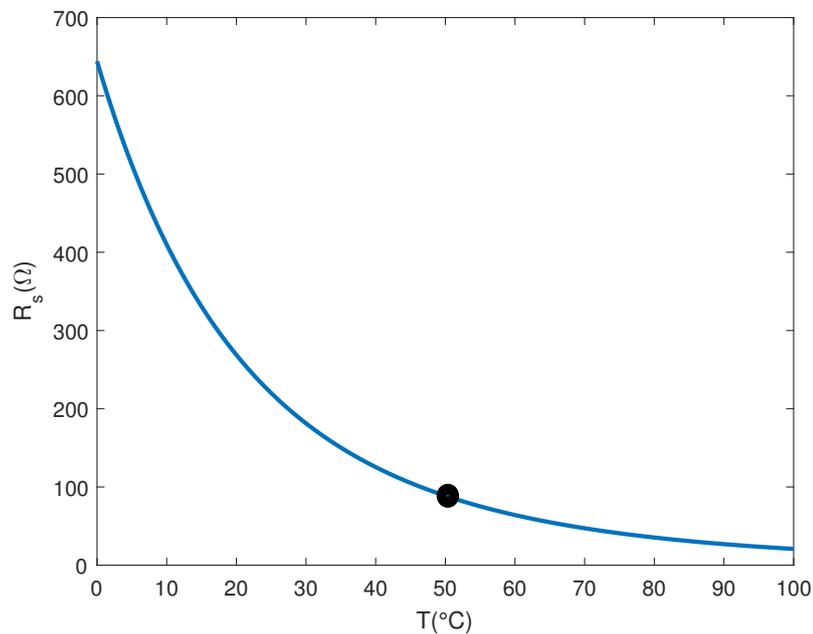


Figura 5.2: Relação Resistência x Temperatura para o termistor NTC  $R_{25} = 220\Omega$ .

Tabela 5.1: Parâmetros de projeto.

Parâmetro	Valor
$R_1$	10 k $\Omega$
$R_2$	56 k $\Omega$
$R$	150 $\Omega$
$R_{s,25}$	220 $\Omega$
$R_3$	100 k $\Omega$
$R_4$	56 k $\Omega$
$V_{CC,EE}$	$\pm 9$
$Q_1$	<i>p-n-p</i>
$Q_2$	<i>n-p-n</i>

## 5.2 Simulações e Resultados Experimentais

### 5.2.1 Controle de Temperatura

A fim de validar o circuito proposto para implementação da arquitetura com linearização por realimentação de tensão, realiza-se um comparativo entre os dados experimentais e os obtidos por simulação tanto para o controle de temperatura quanto para a medição de velocidade. O ensaio é iniciado fazendo o termistor operar em uma temperatura de  $50^{\circ}\text{C}$  e então a referência é alterada. Essa variação simula o rastreamento da temperatura do termistor em busca de um ponto ótimo de operação definido por um operador, por exemplo. O controle de temperatura em malha fechada considera um controlador proporcional com ganho unitário. Para simulação do modelo são utilizados os mesmos parâmetros da caracterização presentes na Tabela (4.1) e os definidos no momento do experimento.

As Figuras (5.3)(5.4) ilustram os resultados para variações da temperatura de referência. Nota-se o surgimento de um sobressinal nos dados experimentais com valor percentual de  $\%UP = 0,40$ , fato não observado no ensaio de caracterização. Esse comportamento não era previsto pelo modelo, uma vez que ele possui apenas um polo. Sugere-se que essa dinâmica outrora desprezível passa a dominar o comportamento em malha fechada e ocorre devido a dinâmicas não modeladas, sobretudo do encapsulamento. Observa-se que a constante de tempo intrínseca para os dados experimentais é de 650 ms, enquanto que a teórica é 37 ms.

Além da informação acerca da temperatura, é importante avaliar a potência elétrica solicitada. Isso porque o princípio usado para medição de velocidade exige o conhecimento da energia perdida por convecção forçada. A Figura (5.5) ilustra o comportamento da potência elétrica para as variações da referência discutidas anteriormente e a Figura (5.7) o erro percentual entre os dados simulados e experimentais. É possível observar que o maior erro foi de aproximadamente 5,5% e o menor de 0,7%. Tais valores correspondem aproximadamente a máxima e a mínima variação da temperatura de operação e, portanto, podem ser atribuídos ao aumento da temperatura circundante. Diante do exposto, é factível considerar que os resultados teóricos reproduzem adequadamente os dados experimentais dentro das limitações do modelo.

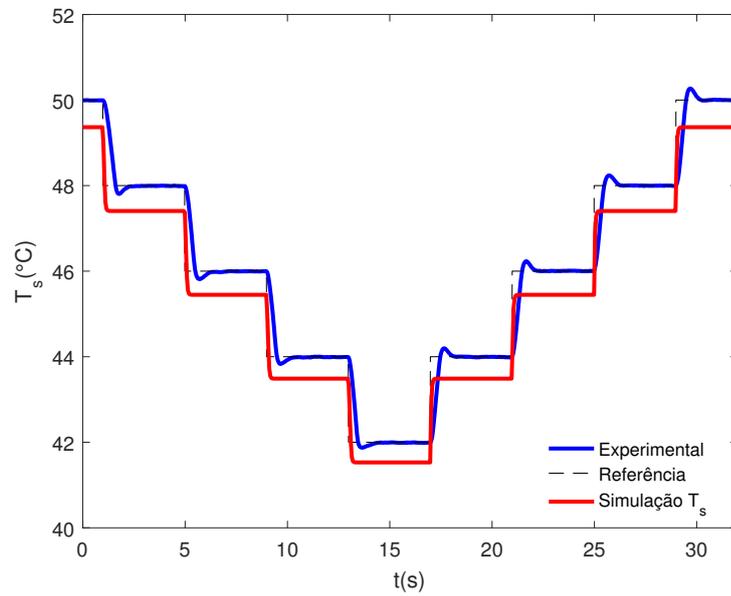


Figura 5.3: Variação da faixa dinâmica de operação sem perda de energia por convecção forçada.

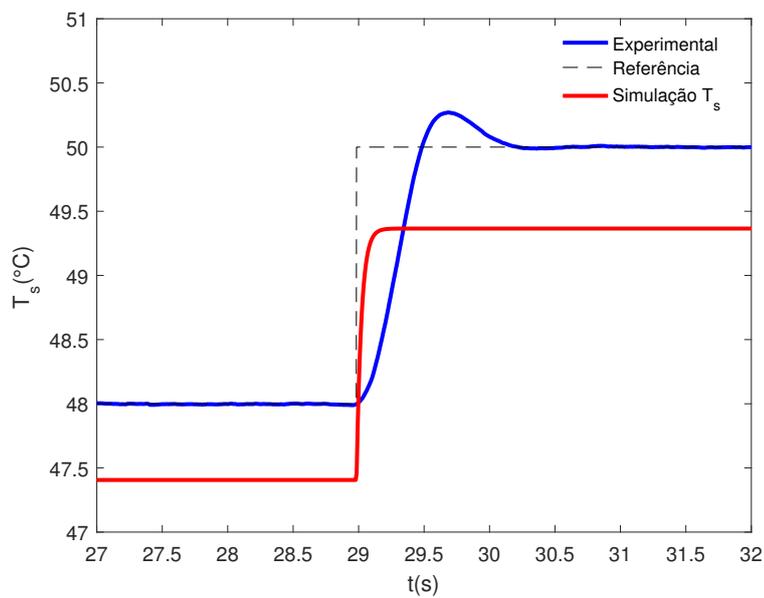


Figura 5.4: Variação da faixa dinâmica de operação sem perda de energia por convecção forçada.

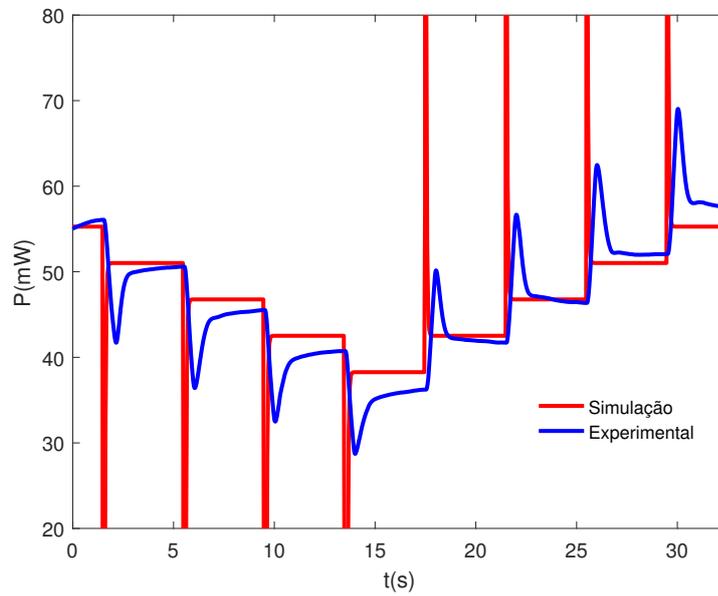


Figura 5.5: Potência elétrica para variações da referência de temperatura do modelo e experimental na ausência de perda por convecção forçada.

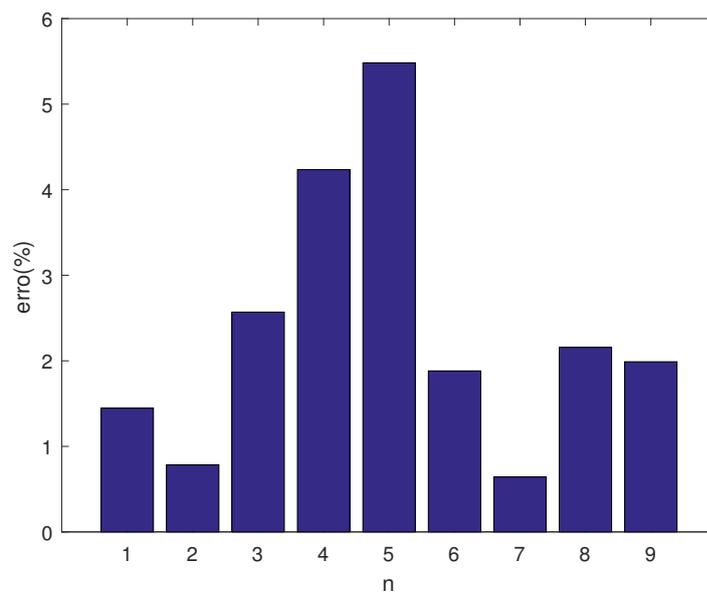


Figura 5.6: Erro calculado entre o valor teórico da potência e experimental.

## 5.2.2 Medição de Velocidade

A validação da arquitetura proposta foi realizada através de comparações com um instrumento comercial e a arquitetura clássica. Ademais, os resultados experimentais de velocidade são comparados com a estimativa do modelo de simulação. Devido a problemas decorrentes de turbulência, dois ambientes de ensaio são propostos para as medições. O primeiro simula um túnel de vento. Ele é formado por um tubo de PVC rígido de diâmetro igual a 19 mm e comprimento de 7 m. O fluxo de ar gerado é proveniente de um compressor conectador em uma das extremidades. A válvula de engate dele é rapidamente conectada objetivando simular um degrau velocidade aplicado ao sensor. Os sensores para medição de velocidade e compensação são postos respectivamente a 3 e 2 metro da outra extremidade. Foi definido um longo comprimento para contornar problemas de turbulência constatados em ensaios com tubos menores. As letras presentes na Figura (5.7) simbolizam os itens do ensaio. A letra S indica a extremidade onde os sensores estão instalados, D indica o tubo de PVC, EA a extremidade conectada ao compressor C. O segundo ambiente considera os termistores em um recinto sem a presença de radiação solar e com a temperatura ambiente aproximadamente constante.

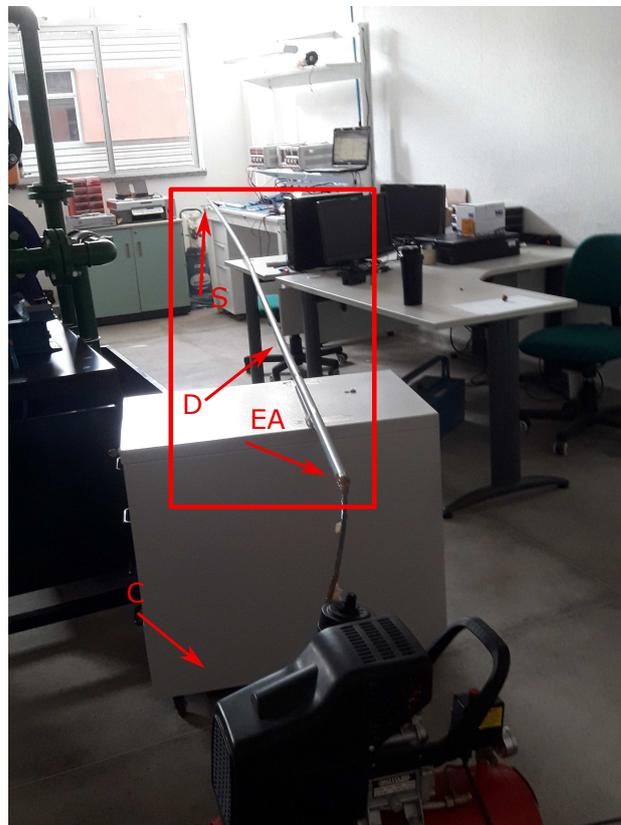


Figura 5.7: Simulando túnel de vento com tubos em PVC e compressor de ar.

A fim de comparar o resultado apresentado pelo protótipo com a da simulação, a velocidade utilizada como entrada para o modelo é definida a partir da medição realizada pela arquitetura. A Figura (5.8) ilustra uma comparação entre a simulação e a velocidade estimada pelo circuito da arquitetura com linearização. Observa-se que o modelo acompanha adequadamente a referência de velocidade e também sugere um sistema real com resposta mais lenta. A quantificação do tempo de resposta considera o critério de 2% do valor final. Nesse sentido, o tempo de resposta apresentado pelo modelo de simulação é de 0,18 s e o real é de 1,9 s. A Figura (5.9) esboça os sinais de potência elétrica simulado e o calculado a partir dos dados experimentais. Nota-se que a potência elétrica real se aproxima do modelo.

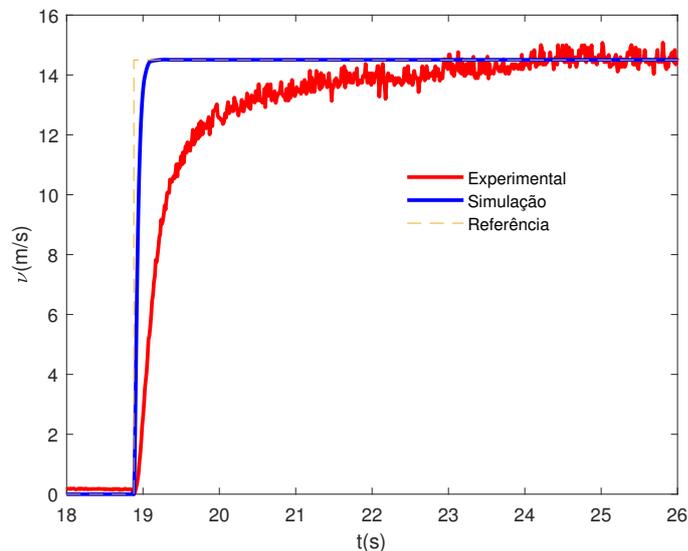


Figura 5.8: Estimação de velocidade do modelo e do protótipo para a arquitetura com linearização.

O ensaio para comparação de desempenho entre as duas arquiteturas considera o ambiente do túnel de vento comentando anteriormente. A comparação entre os modelos de simulação para ambas as arquiteturas feita no capítulo anterior sugere que a arquitetura clássica possui uma dinâmica mais rápida para um determinado ganho do controlador proporcional. A fim de validar esses dados, realiza-se a mesma comparação, agora de forma experimental com os circuitos das respectivas arquiteturas. A Figura (5.11) esboça as medições. Nesse caso, observa-se que arquitetura WB-CTA é ligeiramente mais rápida. Considerando o critério de 2% do valor final, tem-se um valor de 1,9 s para a arquitetura com linearização e 1,7 s para a arquitetura clássica.

A Figura (5.12) ilustra também a resposta da estimação para as duas arquiteturas,

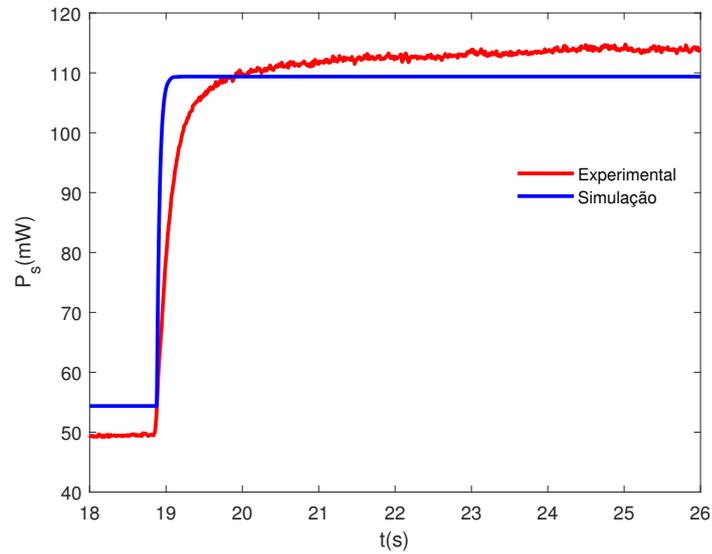


Figura 5.9: Potência elétrica para arquitetura com linearização do protótipo e modelo.

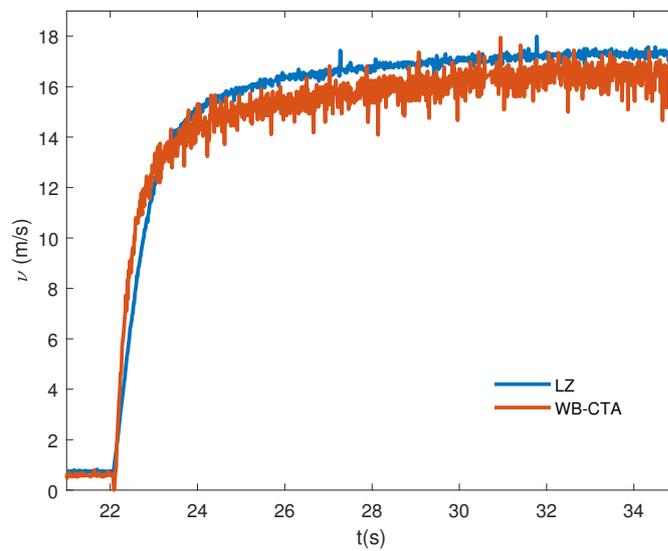


Figura 5.10: Velocidade obtida com a arquitetura com linearização (LZ) e a clássica (WB-CTA) para o ganho do controlador  $k_p = 1$  e  $k = 2$ .

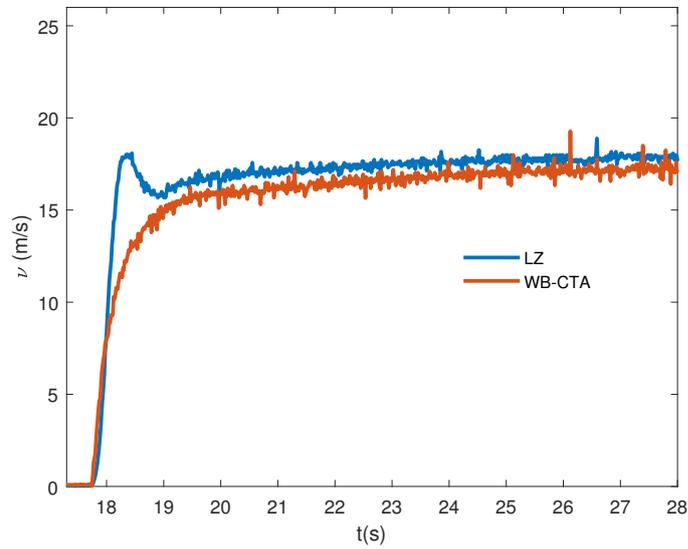


Figura 5.11: Velocidade obtida com a arquitetura com linearização (LZ) e a clássica (WB-CTA) para o ganho do controlador  $k_p = 20$  e  $k = 2$ .

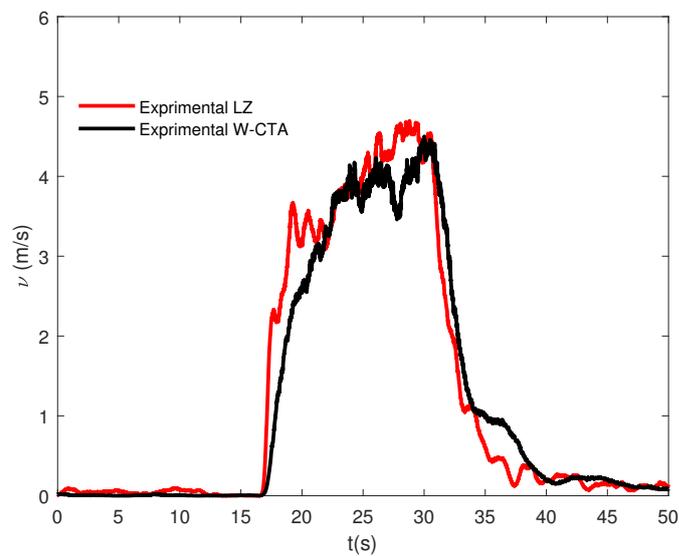


Figura 5.12: Velocidade obtida com a arquitetura com linearização (LZ) e a clássica (WB-CTA) para  $k = 2$  e  $T_s = 50$  °C.

gerado pelo mesmo circulador apresentado anteriormente no ensaio do fluxo de ar com caráter turbulento. Nessa ocasião, ele é posto a 2,5 m do ponto de medição e o ganho do controlador é alterado para  $k_p = 1$ . O circulador é posto em funcionamento e direcionado aos anemômetros, permanecendo em operação por aproximadamente 25 s. A Figura (5.13) ilustra os dados da estimação de velocidade fornecidos pelas duas arquiteturas e o instrumento da MASTECH. Observam-se que as medições fornecidas pelos anemômetros térmicos seguem o valor apresentado pelo instrumento comercial. Como elas são realizadas em um ambiente aberto e com possíveis zonas de turbulência, as curvas não coincidem ao ponto de sobreporem. Nota-se também que após a retirada da excitação, a medição fornecida pelo instrumento comercial leva um tempo para alcançar o valor nulo. Isso decorre do princípio de medição utilizado pelo aparelho.

### 5.3 Resumo do Capítulo

Neste capítulo foram discutidos aspectos importantes acerca do projeto da arquitetura com linearização por realimentação de tensão. Também foi proposta uma metodologia para determinação dos parâmetros de projeto do circuito sob condições de operação e particularidades do sistema de alimentação. Além disso, investigações com as arquiteturas com linearização e WB-CTA são promovidas e mostrado que é possível obter desempenho superior com a arquitetura com linearização. Para tal, dois ambientes distintos são criados. O primeiro é um túnel de vento com fluxo de ar gerado por um compressor e o outro um recinto onde os termistores são dispostos a uma certa distância um do outro e um fluxo de ar é imposto a eles por um circulador axial. Como forma de validar a caracterização e, portanto, a determinação da condutância térmica na presença de perda por convecção forçada, um outro ensaio é proposto com um instrumento comercial. Os resultados experimentais obtidos para a arquitetura com linearização validam o circuito proposto e mostram-se promissores quando comparados aos da arquitetura clássica.

no entanto, nessa oportunidade o ganho do controlador proporcional é alterado para 20. Nota-se que a arquitetura proposta agora possui um tempo de estabilização menor. Pelo mesmo critério anteriormente discutido, o tempo de estabilização agora para arquitetura com linearização é de 1,1 s, enquanto que para a clássica é de 1,7 s. Observa-se também o erro apresentado entre as duas estimações da velocidade. Esse fato foi observado nas simulações do modelo.

Com objetivo de verificar o comportamento das medições em uma ambiente menos restrito, propõe-se a realização dos testes agora em um ambiente aberto com fluxo de ar sendo gerado por um circulador axial e com ganho do controlador proporcional igual  $k_p = 20$ . Os termistores são dispostos a uma distância de 30 cm um do outro e a 1,5 m do ponto de medição onde está localizado o circulador. De forma a gerar variações abruptas da velocidade, o equipamento é posto a funcionar e repentinamente direcionado para os sensores de cada arquitetura. A Figura (5.12) ilustra a resposta para ambos as arquiteturas. Nota-se o carácter turbulento do escoamento gerado e não evidenciado nas medições no túnel de vento.

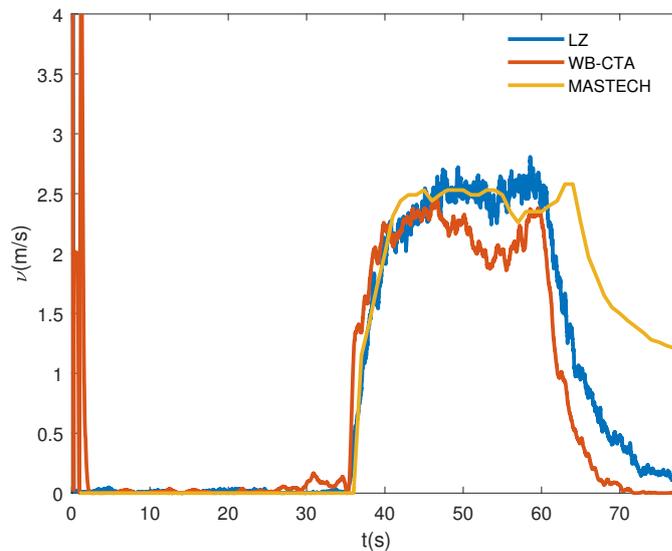


Figura 5.13: Velocidade obtida com a arquitetura com linearização (LZ) clássica (WB-CTA) e o instrumento comercial da MASTECH para o ganho do controlador  $k_p = 20$  e  $k = 2$ .

Embora não se disponha de um instrumento com mesmo princípio de medição, sugere-se uma análise qualitativa com outro equipamento. A comparação sugerida é realizada com um equipamento comercial e valida a caracterização do termistor. Esse equipamento é um anemômetro digital profissional da MASTECH, modelo MS6250. O fluxo de ar é

---

# Capítulo 6

## Conclusões

---

### 6.1 Conclusões Gerais

Este trabalho propôs a implementação de um circuito de anemômetro térmico empregando uma técnica de linearização por realimentação de tensão. Isso com o objetivo de obter uma relação linear entre o sinal utilizado como entrada e a temperatura. Uma pesquisa acerca dos tipos de sensores que poderiam ser utilizados para melhorar o desempenho em termos de sensibilidade também foi realizada. De forma a comparar o desempenho dessa arquitetura com uma já consolidada na literatura, foram realizadas simulações e comparações experimentais.

No que diz respeito aos sensores, o capítulo 1 traz um estudo sobre as características, detalhes construtivos e o comportamento da resistência versus a temperatura dos termistores. A arquitetura de anemômetro térmico consolidada, também conhecida com WB-CTA, é discutida neste capítulo. Por fim, a técnica de linearização por realimentação de tensão é apresentada como um método para caracterização de termistores e aplicado em um sistema de controle para temperatura. Também é apresentada a primeira intenção de aplicação dessa técnica em uma arquitetura de anemômetro térmico.

Antes de proceder com as comparações entre a arquitetura proposta e a consolidada, as expressões que governam o comportamento estático dos termistores são denotadas. A partir disso, deriva-se a equação dinâmica que relaciona radiação, potência elétrica, velocidade e a temperatura. A fim de validar os resultados, é proposta a utilização de um modelo comportamental para o termistor. Em um primeiro momento, inicia-se um processo de caracterização do termistor a partir da técnica de linearização. A condutância térmica proveniente desse ensaio não permite o emprego do termistor em aplicações anemométricas. Diante disso, propõe-se um segundo ensaio para definição das constantes da equação de estimação da velocidade.

Os parâmetros experimentais obtidos neste último ensaio são utilizados como dados

- mentation and Measurement Technology Conference, 2004. IMTC 04. Proceedings of the 21st IEEE', Vol. 2, IEEE, pp. 1048–1052.
- CRAMER, HARRISON E, FRANK A RECORD & James E Tillman (1962), Studies of the spectra of the vertical fluxes of momentum, heat, and moisture in the atmospheric boundary layer, Relatório técnico, MASSACHUSETTS INST OF TECH SOUTH DARTMOUTH ROUND HILL FIELD STATION.
- Deep, Gurdip S, RCS Freire, PC Lobo, JS Rocha Neto & AMN Lima (1992), 'Dynamic response of thermoresistive sensors', *IEEE transactions on instrumentation and measurement* **41**(6), 815–819.
- DeGraaff, DB & JK Eaton (2001), 'A high-resolution laser doppler anemometer: design, qualification, and uncertainty', *Experiments in fluids* **30**(5), 522–530.
- Desantes, JM, J Galindo, C Guardiola & V Dolz (2010), 'Air mass flow estimation in turbocharged diesel engines from in-cylinder pressure measurement', *Experimental Thermal and Fluid Science* **34**(1), 37–47.
- Durbin, Paul A & BA Pettersson Reif (2011), *Statistical theory and modeling for turbulent flows*, John Wiley & Sons.
- Dyer, Stephen A (2004), *Wiley survey of instrumentation and measurement*, John Wiley & Sons.
- Fernandes, David, Luís Gomes & Anikó Costa (2017), Wind speed and direction measurement based on time of flight ultrasonic anemometer, *em* 'Industrial Electronics (ISIE), 2017 IEEE 26th International Symposium on', IEEE, pp. 1417–1422.
- Ferreira, Romulo Pires Coelho, Raimundo Carlos Silvério Freire, CS Deep, Jose Sérgio de Rocha Neto & Amauri Oliveira (2001), 'Hot-wire anemometer with temperature compensation using only one sensor', *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* **50**(4), 954–958.
- Ferreira, Rômulo Pires Coelho, Raimundo Carlos Silvério Freire & Gurdip Singh Deep (2003), 'Performance evaluation of a fluid temperature-compensated single sensor constant temperature anemometer', *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* **52**(5), 1554–1558.
- Fraden, Jacob (2004), *Handbook of modern sensors: physics, designs, and applications*, Springer Science & Business Media.

de entrada para o modelo do termistor desenvolvido. Nesse momento, além da sensibilidade, analisa-se a equação de estimação da velocidade para cada arquitetura. Posteriormente, realizam-se comparações da dinâmica de estimação da velocidade.

A validação da arquitetura proposta é conduzida através de comparações com o modelo desenvolvido. Para isso, os resultados das simulações para um controle de temperatura são comparados aos resultados experimentais. Em relação a medição de velocidade, realizam-se comparações tanto com o modelo quanto com a arquitetura clássica. Por fim, as estimações de velocidade são comparadas as medições produzidas por um instrumento comercial.

Os resultados obtidos ratificam que a arquitetura proposta não é afetada pela tensão de *offset* do amplificador operacional, podendo, também, obter um tempo de resposta inferior ao apresentado pela arquitetura clássica. Isso confirma a consolidação de uma nova arquitetura de anemômetro térmico. Além disso, vale salientar os promissores métodos empregados na obtenção dos parâmetros da equação de estimação da velocidade e no projeto do circuito eletrônico que podem contribuir com vários outros estudos nessa linha de pesquisa. As desvantagens apresentadas por essa nova arquitetura dizem respeito ao aumento da complexidade do circuito eletrônico devido aos estágios de ganho.

As investigações desenvolvidas acerca da arquitetura clássica gerou um trabalho publicado no "*2017 2nd International Symposium on Instrumentation Systems, Circuits and Transducers (INSCIT)*" sob título "*Energy performance of NTC-based constant temperature anemometers*".

## 6.2 Propostas de Trabalhos Futuros

As propostas de trabalhos futuros são enumeradas abaixo:

1. Comparação entre as arquiteturas com linearização e a clássica WB-CTA usando termistores PTC;
2. Aplicação dessa arquitetura em outros sistemas de medição;
3. Criação de um modelo que inclua as dinâmicas não modeladas que surgiram nos dados experimentais;

---

# Referências Bibliográficas

---

ABRACON CORPORATION (n.d.), <https://br.mouser.com/datasheet/2/3/ABNTC-0603-253472.pdf>. Accessed: 2018-05-07.

Araujo, Guilherme AL, Raimundo CS Freire, José F da Silva, Sebastian YC Catunda & Glauco Fontgalland (2005), Dependence of a thermoresistive sensor-based constant temperature measurement instrument response on dc amplifier input offset voltage, *em* 'Instrumentation and Measurement Technology Conference, 2005. IMTC 2005. Proceedings of the IEEE', Vol. 2, IEEE, pp. 1561–1565.

Araujo, LV, Sebastian YC Catunda, D Belfort, Matthieu Denoual & Raimundo CS Freire (2015), Spice-based dynamical model of a ntc thermoresistive sensor for anemometer applications, *em* 'Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), 2015 IEEE International', IEEE, pp. 1682–1686.

Araujo, LV, SYC Catunda, CET Dorea & RCS Freire (2014), A controlled-temperature hot-wire anemometer with voltage feedback linearization, *em* 'Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC) Proceedings, 2014 IEEE International', IEEE, pp. 325–330.

Assis, R. F. A., S. Y. C. Catunda, D. R. Belfort & I. Muller (2017), Energy performance of ntc-based constant temperature anemometers, *em* '2017 2nd International Symposium on Instrumentation Systems, Circuits and Transducers (INSCIT)', pp. 1–6.

Becker, JA, CB Green & GLi Pearson (1946), 'Properties and uses of thermistors—thermally sensitive resistors', *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers* **65**(11), 711–725.

Bergen, James D (1971), 'An inexpensive heated thermistor anemometer', *Agricultural Meteorology* **8**, 395–405.

Catunda, SYC, MV Gabriel, FR Sousa, RCS Freire & JV FonsecaNeto (2004), Sensitivity evaluation of thermoresistive sensor constant temperature anemometers, *em* 'Instru-

- Freire, Raimundo Carlos SilvÉrio, Sebastian Yuri Cavalcanti Catunda & Benedito Antonio Luciano (2009), 'Applications of thermoresistive sensors using the electric equivalence principle', *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* **58**(6), 1823–1830.
- Freire, Raimundo CS, GS Deep & Amauri Oliveira (1997), Effect of operational amplifier parameters on the performance of feedback structures with thermoresistive sensors, *em* 'Instrumentation and Measurement Technology Conference, 1997. IMTC/97. Proceedings. Sensing, Processing, Networking., IEEE', Vol. 2, IEEE, pp. 898–903.
- Freire, RC Silverio & G Singh Deep (1999), 'Error in the thermoresistive sensor-based feedback measurement configuration due to dc amplifier offset voltage', *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* **48**(1), 50–54.
- Freire, RCS, JS Rocha Neto, GS Deep, AMN Lima & PC Lobo (1994), Experimental determination of the time constant of a thermoresistive sensor, *em* 'Instrumentation and Measurement Technology Conference, 1994. IMTC/94. Conference Proceedings. 10th Anniversary. Advanced Technologies in I & M., 1994 IEEE', IEEE, pp. 450–453.
- Holbek, Simon, Matthias Bo Stuart et al. (2017), Volumetric 3-d vector flow measurements using a 62+ 62 row-column addressed array, *em* 'Ultrasonics Symposium (IUS), 2017 IEEE International', IEEE, pp. 1–4.
- Itsweire, EC & KN Helland (1983), 'A high-performance low-cost constant-temperature hot-wire anemometer', *Journal of Physics E: Scientific Instruments* **16**(6), 549.
- Jagtap, Shweta, Sunit Rane, Suresh Gosavi & Dinesh Amalnerkar (2011), 'Study on i-v characteristics of lead free ntc thick film thermistor for self heating application', *Microelectronic Engineering* **88**(1), 82–86.
- Keskin, Ali Ümit (2005), 'A simple analog behavioural model for ntc thermistors including selfheating effect', *Sensors and Actuators A: Physical* **118**(2), 244–247.
- Kidron, Izhak (1967), 'The signal-to-noise ratios of constant-current and constant-temperature hot-wire anemometers', *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* **16**(1), 68–73.
- King, Louis Vessot (1914), 'On the convection of heat from small cylinders in a stream of fluid: determination of the convection constants of small platinum wires with

- Perry, AE & GL Morrison (1971), 'A study of the constant-temperature hot-wire anemometer', *Journal of Fluid Mechanics* **47**(3), 577–599.
- Sanford, Edward R (1951), 'A wind-tunnel investigation of the limitations of thermistor anemometry', *Journal of Meteorology* **8**(3), 182–190.
- Sarkar, Alope Raj, Debangshu Dey & Sugata Munshi (2013), 'Linearization of ntc thermistor characteristic using op-amp based inverting amplifier', *IEEE Sensors Journal* **13**(12), 4621–4626.
- Schroder, Dieter K (2006), *Semiconductor material and device characterization*, John Wiley & Sons.
- Slotine, Jean-Jacques E, Weiping Li et al. (1991), *Applied nonlinear control*, Vol. 199, Prentice hall Englewood Cliffs, NJ.
- Sousa, Fernando R, RCS Freire, GS Deep, EK Melcher & ISS Silva (2002), Response time evaluation of constant temperature circuits, *em 'Instrumentation and Measurement Technology Conference, 2002. IMTC/2002. Proceedings of the 19th IEEE'*, Vol. 2, IEEE, pp. 1187–1190.
- Steinhart, John S & Stanley R Hart (1968), Calibration curves for thermistors, *em 'Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts'*, Vol. 15, Elsevier, pp. 497–503.
- Talbi, A, L Gimeno, JC Gerbedoen, R Viard, A Soltani, V Mortet, V Preobrazhensky, A Merlen & P Pernod (2015), 'A micro-scale hot wire anemometer based on low stress (ni/w) multi-layers deposited on nano-crystalline diamond for air flow sensing', *Journal of Micromechanics and Microengineering* **25**(12), 125029.
- Tkach, OP, SO Volkov, LV Odnodvoretz, DV Poduremne & I Yu Protsenko (2016), Thermoresistive properties of nanodimensional film materials based on pd or au and fe or w as elements of integrated electronics, *em 'Nanomaterials: Application & Properties (NAP), International Conference on'*, IEEE, pp. 01NTF20–1.
- Vallikivi, M, M Hultmark, SCC Bailey & AJ Smits (2011), 'Turbulence measurements in pipe flow using a nano-scale thermal anemometry probe', *Experiments in fluids* **51**(6), 1521–1527.
- Webster, John G & Halit Eren (2014), *Measurement, instrumentation, and sensors handbook: spatial, mechanical, thermal, and radiation measurement*, Vol. 1, CRC press, pp. 976–982.

- applications to hot-wire anemometry’, *Philosophical transactions of the royal society of London. series A, containing papers of a mathematical or physical character* **214**, 373–432.
- Liu, Hao-Bing, Nay Lin, Shan-Shan Pan, Jianmin Miao & Leslie K Norford (2013), ‘High sensitivity, miniature, full 2-d anemometer based on mems hot-film sensors’, *IEEE Sensors Journal* **13**(5), 1914–1920.
- Lomas, Charles G (2011), *Fundamentals of hot wire anemometry*, Cambridge University Press.
- Lu, SS (1979), ‘Dynamic characteristics of a simple constant-temperature hot-wire anemometer’, *Review of Scientific Instruments* **50**(6), 772–775.
- Martino, Francisco S & Preston E McNall Jr (1971), ‘A thermistor anemometer for the measurement of very low air velocities’, *Review of Scientific Instruments* **42**(5), 606–609.
- Martins, Viviane SG, Raimundo CS Freire & Sebastian YC Catunda (2012), Sensitivity analysis and automatic adjustment of a controlled-temperature thermoresistive-based anemometer, *em ‘Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), 2012 IEEE International’*, IEEE, pp. 1876–1880.
- Merrison, Jonathan P, Haraldur Pall Gunnlaugsson, J Jensen, Kjartan Kinch, Per Nørnberg & Keld Rømer Rasmussen (2004), ‘A miniature laser anemometer for measurement of wind speed and dust suspension on mars’, *Planetary and Space Science* **52**(13), 1177–1186.
- Moreira, MA, A Oliveira, CET Dórea, PR Barros & JS da Rocha Neto (2008), Sensors characterization and control of measurement systems with thermoresistive sensors using feedback linearization, *em ‘Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings, 2008. IMTC 2008. IEEE’*, IEEE, pp. 2003–2008.
- Morris, SC & JF Foss (2003), ‘Transient thermal response of a hot-wire anemometer’, *Measurement science and technology* **14**(3), 251.
- Morten, Bruno, Maria Prudenziati, Andrea Taroni & Gianni Zanarini (1976), ‘Experimental results on dynamic behavior of thermistor flowmeters’, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* **1001**(3), 232–234.

---

# Apêndice A

## Informações adicionais

---

```
Código em SPICE para o modelo do NTC
\\
.subckt Modelo NTC N1 N2 Ta Ts Rs Vf

*Potência elétrica fornecida ao sensor.\\
Bep 0 Ts I={{(V(N1,N2))*I(Bvs)}}

*Potência térmica.\\
Btp Ts 0 I={s*V(Ts,Ta)*(a+b*(V(Vf)**c))}

*Dinâmica do sistema\\
Cts Ts 0 {Cth}\\
.ic V(Ts)={Ts0}

*Determinação de Rs\\
Brs Rs 0 V = {rinf*exp(beta/(V(Ts)+273.15))}

*Corrente de entrada (Tensão sobre Rs)\\
Bvs N1 N2 V={I(Bvs)*V(Rs)}
*Rser 1 N2 lu

*Determinação Vs\\
Bvs Vs 0 V=I(Bvis)*V(Rs)\\
.ends
```