

UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO

CENTRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE
ELETRICIDADE

**Análise de Sensibilidade de Anemômetros a Temperatura
Constante Baseados em Sensores Termo-resistivos**

Michel Valença Gabriel

São Luís
2004

Análise de Sensibilidade de Anemômetros a Temperatura Constante Baseados em Sensores Termo-resistivos

Dissertação de Mestrado submetido à
Coordenação do Programa de Pós-Graduação
em Engenharia de Eletricidade da UFMA
como parte dos requisitos para obtenção
do título de mestre em Engenharia Elétrica

Por

Michel Valença Gabriel

São Luís
2004

Gabriel, Michel Valença

Análise de Sensibilidade de Anemômetros a Temperatura Constante Baseados em Sensor Termo-resistivo / Michel Valença Gabriel. – São Luís, 2004.

121f.:il.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Maranhão, 2003.

1.

Análise de Sensibilidade de Anemômetros a Temperatura Constante Baseados em Sensor Termo-resistivo

Michel Valença Gabriel

Dissertação aprovada em 30 de janeiro de 2004

Prof. Dr. Sebastian Yuri Cavalcanti Catunda
(Orientador)

Prof. Dr. João Viana da Fonseca Neto
(Orientador)

Prof. Dr. Raimundo Carlos Silvério Freire
(Membro da Banca Examinadora)

Prof. PhD. Allan Kardek Dualibe Barros Filho
(Membro da Banca Examinadora)

Dedicatória

Este trabalho é dedicado a minha mãe Diva Valença Gabriel, ao meu pai João Gabriel Filho, ao meu irmão Eduardo José Valença Gabriel, a minha tia Dirce Valença Aquino e a minha vovó Maria Anunciada Matias Valença

Agradecimentos

A Deus por ter me dado forças para vencer todos os momentos difíceis ao longo desta jornada;

Aos Professores Sebastian Yuri Catunda e João Viana da Fonseca Neto, orientadores desta dissertação, pela orientação segura e precisa, e sobretudo pela amizade;

A Cia. Vale do Rio Doce, em especial Srs. Luís Gustavo Ragonezi e Franklin Rodrigues do O, pelo apoio e incentivo;

A sede de manutenção eletrônica de Carajás pelo apoio;

Ao Prof. Raimundo Carlos Silvério Freire pelo apoio e esclarecimento;

Ao Prof. Allan Kardec Dualibe Barros Filho pela participação como examinador;

Aos amigos Luciano e Vania Pontes e Juan Mauricio.

Resumo

Neste trabalho apresentamos um estudo sobre a sensibilidade de anemômetros baseados em sensores termo-resistivos aquecidos a temperatura constante. A configuração que faz com que o sensor termo-resistivo seja aquecido a uma temperatura constante é composta de uma ponte de Wheatstone realimentada usando um amplificador operacional [1]. O método de medição utilizado é o de substituição, em que uma grandeza elétrica, a tensão de saída do amplificador operacional, varia de acordo com a variação da grandeza de interesse, de forma a compensar seu efeito no sensor. Neste caso, a grandeza a ser medida é a velocidade do vento e a grandeza de substituição é a tensão de saída do amplificador operacional. Foram feitos estudos considerando dois tipos de sensores, o PTC metálico e o termistor NTC.

Faz-se uma análise dos circuitos de medição para cada tipo de sensor, levando em conta as constantes e as variáveis que interferem no processo de medição. Para tais circuitos são apresentados resultados de simulações em computador que nos possibilitaram avaliar o comportamento do sistema de medição. Para os circuitos de medição, faz-se uma análise da sensibilidade da tensão de saída do amplificador operacional com relação à velocidade do vento. Essa análise possibilitou desenvolvimento de um método para cálculo do ponto de maior sensibilidade e ponto de operação do circuito baseado no NTC.

Observou-se que a configuração com NTC apresenta uma maior sensibilidade do que a configuração com PTC para temperaturas de operação do sensor relativamente baixas, mas acima da temperatura ambiente. A sensibilidade equivalente da configuração com o PTC ocorre para temperaturas bem acima do ponto de máxima sensibilidade do NTC. Essa característica pode ser aproveitada para implementações de anemômetros aquecidos que operam com temperaturas mais próximas da temperatura ambiente.

Abstract

In this work we present a study on the sensitivity of anemometers based on thermoresistive sensors heated to a constant temperature. The configurations that makes the thermoresistive sensor heated to a constant temperature are composed of a Wheatstone bridge using a feedback operational amplifier. The substitution measurement method is used, where an electrical quantity, the operational amplifier output voltage, varies in accordance to the variation of the quantity of interest, in such a way that the electrical quantity compensates the effect of the former in the sensor. In our case, the quantity to be measured is the speed of the wind and the quantity of substitution is operational amplifier output voltage. Studies were carried out considering two types of sensors, the metallic PTC and the thermistor NTC.

An analysis of the measurement circuits was carried out for each sensor type, taking into account the constants and variables that influence the measurement process. For these circuits, simulation results are presented which make possible to evaluate the measurement system behavior. An analysis of the sensitivity of the measurement circuits output voltage with respect to the wind speed is also carried out. This analysis made possible the development of a procedure for determining the operation point for the NTC-based circuit that yields the maximum sensitivity.

From the analysis of the measurement configurations sensitivity, it was observed that the NTC-based configuration presents higher sensitivity compared to the PTC-based configuration, for relatively low operating temperatures, above the ambient temperature. The equivalent sensitivity for the PTC-based configuration occurs only for temperatures much higher than that for achieving the maximum sensitivity for the NTC. This characteristic can be used for implementing anemometers that operates at a temperature much closer to the ambient temperature.

Sumário

<i>Lista de Figuras</i>	<i>ix</i>
<i>Lista de Símbolos</i>	<i>x</i>
Capítulo 1 Introdução	1
1.1 Organização do trabalho	3
Capítulo 2 Estudo dos sensores termo-resistivos	5
2.1 Sensores termo-resistivos	5
2.1.1 Características dos sensores termo-resistivos	7
2.2 Coeficiente de transferência de calor	11
2.3 Caracterização dos sensores termo-resistivos	11
2.3.1 Caracterização estática	12
2.4 Aplicações	13
2.4.1 Medição de temperatura	14
2.4.2 Medição de radiação	14
2.4.3 Medição de velocidade de fluido	15
2.5 Métodos de medição	17
2.5.1 Corrente constante	18
2.5.2 Temperatura constante	19
2.5.3 Tensão constante	20
Capítulo 3 Análise do anemômetro a sensor aquecido a temperatura constante	22
3.1 Equação que estima a velocidade do fluido	22
3.2 Implementação do circuito	23
3.3 Análise do circuito	24
3.4 Simulações	27
3.4.1 Simulações na fase transitória das configurações	30
Capítulo 4 Sensibilidade	34
4.1 Sensibilidade dos sensores	34
4.1.2 PTC	35
4.1.3 NTC	35
4.2 Sensibilidade da Configuração	37
4.2.1 Cálculo da sensibilidade do circuito	37
4.3 Cálculo do ponto de maior sensibilidade para o NTC	40
4.4 Cálculo do valor do K “Ótimo” para o NTC	43
4.5 Considerações sobre a variação da temperatura ambiente	44
Capítulo 5 Reconstrução dos valores da velocidade do vento	48
Capítulo 6 Conclusões	50
6.1 Proposta de continuidade e sugestões	51
<i>Referências Bibliográficas</i>	<i>52</i>
<i>Apêndice A – Programas escritos em Matlab</i>	<i>55</i>
<i>Apêndice B – Modelos desenvolvido para o Simulink</i>	<i>58</i>

Lista de Figuras	
<i>Figura 1.1</i>	1
<i>Figura 1.2 – Princípio de funcionamento do anemômetro a fio quente</i>	2
<i>Figura 2.1: Características $R_s \times T_s$ do sensor</i>	9
<i>Figura 2.2: Características $R_s \times T_s$ do sensor.</i>	10
<i>Figura 2.3: Ensaio térmico para determinação dos parâmetros do sensor.</i>	12
<i>Figura 2.4: Ensaio para determinação de G_{th}</i>	13
<i>Figura 2.5: Diagrama esquemático do CTA: (A) NTC e (B) PTC</i>	20
<i>Figura 2.6: Anemômetro a tensão constante</i>	21
<i>Figura 3.1: Tensão de saída V_o do circuito utilizando PTC</i>	29
<i>Figura 3.2: Tensão de saída V_o do circuito utilizando NTC</i>	30
<i>Figura 3.3: Tensão de saída - V_o</i>	31
<i>Figura 3.4: Potência elétrica - P_e</i>	31
<i>Figura 3.5: Resistência do Sensor – R_s</i>	32
<i>Figura 3.6: Temperatura do sensor – T_s</i>	32
<i>Figura 4.1: Sensibilidade do sensor NTC</i>	36
<i>Figura 4.2: Sensibilidade do circuito utilizando PTC</i>	38
<i>Figura 4.3 : Sensibilidade do circuito utilizando NTC</i>	39
<i>Figura 4.4 : Comparação entre as sensibilidades – PTC e NTC</i>	40
<i>Figura 4.5 : Ponto de maior sensibilidade</i>	42
<i>Figura 4.6 : Tensão máxima de saída $V_{o\max}$</i>	44
<i>Figura 4.7 : Sensibilidade do circuito com a variação de T_a</i>	46

Lista de Símbolos

- a - Constante da lei de King
- α - Fator de variação da velocidade do fluido entre duas amostras consecutivas
- b - Constante da lei de King
- β - Coeficiente de temperatura do sensor
- c - Calor específico do sensor
- d - Diâmetro do sensor
- e^+ - Entrada não-inversora do amplificador operacional
- e^- - Entrada inversora do amplificador operacional
- f_c - Frequência de corte do amplificador operacional
- A - Ganho de malha aberta do amplificador operacional
- h - Coeficiente de transferência de calor na superfície do sensor
- l - Comprimento do sensor
- m - Massa do sensor
- Ma - Número de *Mach*
- n - Constante da lei de King
- Nu - Número de Nusselt
- ρ - Densidade do meio
- P_e - Potência elétrica dissipada pelo sensor
- Re - Número de Reynolds
- R_o - Resistência elétrica do sensor na temperatura T_o
- R_f - Resistência elétrica do sensor na temperatura T_f
- R_s - Resistência elétrica do sensor na temperatura T_s
- S - Área do sensor
- t - Tempo
- T_f - Temperatura do fluido
- T_s - Temperatura do sensor
- μ - Viscosidade do meio
- V_o - Tensão na saída do amplificador operacional
- V_{os} - Tensão de desvio na entrada do amplificador operacional
- V_s - Tensão sobre o sensor
- \mathcal{G} - Velocidade do fluido
- e_i - Energia entregue ao sensor,

e_o - Energia perdida do sensor para meio ambiente,

Δe_a - Variação de energia interna.

Capítulo 1

Introdução

Há um vasto campo de aplicações nas medições de grandezas físicas, utilizando-se os sensores termo-resistivos, tais como: radiação térmica, temperatura e velocidade de fluidos; em que a interação entre o sensor e a grandeza é feita através da troca de energia térmica.

Pode-se considerar uma medição como uma seqüência de operações, tais como: conversão de natureza física das grandezas; condicionamento de sinais; conversão A/D; processamento de resultados e estimação. Estas operações são executadas em um sistema de medição ou instrumento, constituído de blocos funcionais. De uma maneira geral os sistemas ou instrumentos de medição podem ser representados como na Figura 1.1, em que x , y e \hat{x} , representam respectivamente a grandeza a ser medida, o sinal de medição e o valor estimado de x ou resultado da medição.

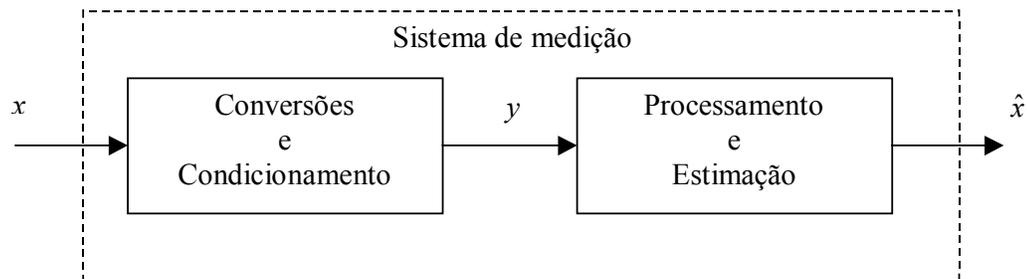


Figura 1.1 – Sistema de medição

Os sistemas que utilizam sensores termo-resistivos, executam as operações iniciais do processo de medição, isto é, convertem temperatura, velocidade de fluido ou radiação térmica em uma outra grandeza (tensão, corrente ou tempo), condicionando também o sinal elétrico.

A medição de velocidade de fluidos com anemômetros (instrumentos para medição de velocidade de vento) a sensor aquecido, baseia-se no fato de que a transferência de calor entre o sensor e o fluido, no qual está imerso, depende da diferença de temperatura e da velocidade relativa entre o sensor e o fluido. Assim, para um sensor termo-resistivo, ou seja, um resistor cuja resistência elétrica R_s varia com a sua temperatura T_s , aquecido eletricamente, a potência elétrica fornecida ao sensor, no estado estacionário, se iguala à potência térmica transferida ao

fluido, pela Primeira Lei da Termodinâmica. O princípio básico do funcionamento desse tipo de anemômetro é ilustrado na Figura 1.2.

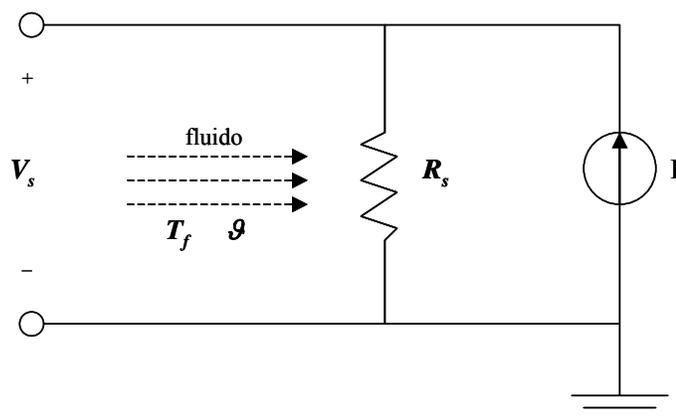


Figura 1.2 – Princípio de funcionamento do anemômetro a fio quente

O sensor utilizado nos anemômetros a sensor aquecido é normalmente um fio ou filme metálico (platina ou tungstênio) de pequena área transversal. Considerando-se o sensor aquecido pela passagem de uma corrente elétrica I e imerso em um fluido com velocidade g e temperatura T_f (Figura 1.2) na qual a temperatura de operação do sensor, T_s , é maior que o máximo valor da temperatura do fluido, T_f , então, devido à troca de calor entre o sensor e o fluido, há uma variação na temperatura do sensor e, conseqüentemente, de sua resistência R_s . Se a corrente, I , for constante, observa-se também uma variação na tensão sobre o sensor V_s , ou seja, uma variação na velocidade do fluido é refletida na tensão de saída do circuito, logo é possível relacionar a tensão V_s com a velocidade g (equação do equilíbrio termodinâmico). Contudo, a temperatura do sensor também é afetada pela temperatura do fluido, devido à variação resultante da transferência de calor. Portanto, a tensão de saída também varia com a temperatura do fluido, T_f , e o sinal de saída nos anemômetros a fio quente é função tanto da velocidade do fluido quanto de sua temperatura.

Os anemômetros utilizando sensores termo-resistivos aquecidos têm constante de tempo pequena e boa sensibilidade para pequenas velocidades. Eles apresentam estas vantagens em relação a outros tipos de anemômetros, porém apresentam dois problemas: o sinal elétrico de medição (tensão sobre ou corrente que passa através do sensor) é sensível às variações da temperatura do ar e tem relação não linear tanto com a velocidade que se quer medir quanto com essa temperatura. Para estes tipos de problemas (não linearidade e influência do meio), soluções com um sistema digital de processamento numérico, microcontrolador ou DSP (“Digital Signal Processing” – Processador digital de sinais) são mais indicadas.

Desenvolvimentos nas áreas de microeletrônica e processamento digital de sinais têm contribuído para melhoria da qualidade dos sistemas de medição. A qualidade de um instrumento é definida por características como: tempo de resposta, precisão, confiabilidade e sensibilidade. Trabalhos como os de Freire [14] e Rômulo [7] fazem análise de tempo de resposta e precisão de anemômetros a sensor aquecido. Neste trabalho, é mostrada a análise da sensibilidade do anemômetro a sensor aquecido à temperatura constante tanto para o circuito implementado com sensor PTC como para o NTC.

Na análise da sensibilidade do anemômetro a sensor aquecido a temperatura constante mostra-se que a sensibilidade do circuito implementado com sensor PTC é crescente com o aumento de temperatura de operação do sensor. Para o circuito implementado com sensor NTC há um ponto de máxima sensibilidade, ou seja, para uma determinada temperatura de operação do sensor terá uma máxima sensibilidade do circuito. A partir da análise da sensibilidade obteve-se critérios para escolha dos parâmetros do sensor e do circuito para que o anemômetro opere na máxima sensibilidade.

Da mesma forma que foi utilizado um modelo matemático do anemômetro a sensor aquecido a temperatura constante para implementar seu circuito, pode-se fazer um modelo matemático para a reconstrução dos valores da velocidade do vento. Neste trabalho fez-se o cálculo da equação que estima a velocidade do vento.

1.1 Organização do trabalho

Este trabalho organizado da seguinte forma:

No capítulo dois é apresentado, de maneira sucinta, um estudo sobre sensores termoresistivos, abordando-se temas como: características, caracterizações, aplicações e métodos de medição.

No capítulo três é desenvolve-se a equação que estima a velocidade do vento, análise do circuito correspondente ao anemômetro a sensor aquecido a temperatura constante com as simulações. Para iniciar o estudo da sensibilidade, no capítulo três também foi determinada a equação que fornece a resposta do circuito em relação a variação da velocidade do vento.

No capítulo quatro é feito estudo e comparação da sensibilidade do circuito em relação a velocidade do vento para os dois sensores citados acima. Com o circuito implementado com o

sensor NTC, mostra-se uma forma de calcular o ponto de operação do sensor, ou seja, a temperatura do sensor para que o circuito opera na máxima sensibilidade. Em seguida, mostra-se um critério de escolha de parâmetros do sensor e circuito para que o anemômetro funcione na máxima sensibilidade.

No capítulo cinco mostra-se a equação para estimação do valor da velocidade do vento.

No capítulo seis, são apresentados comentários e conclusões dos resultados obtidos com este trabalho de mestrado e as perspectivas de trabalhos futuros derivados dos temas estudados.

Capítulo 2

Estudo dos sensores termo-resistivos

Os sensores termo-resistivos ou elementos termo-resistivos são dispositivos que variam sua resistência elétrica com a variação de sua temperatura. Estes sensores são estudados em diversas áreas de conhecimento, tais como: termodinâmica; mecânica dos fluidos; instrumentação eletrônica; instrumentação biomédica; micro eletrônica e outras. Estes sensores são aplicados, basicamente, para medição de radiação térmica, medição de temperatura e no nosso caso, medição de velocidade do vento.

2.1 Sensores termo-resistivos

Os sensores termo-resistivos estudados e usados neste trabalho são dos tipos semicondutor que é o NTC, do inglês “Negative Temperature Coefficient”, que quer dizer coeficiente de temperatura negativo, ou seja a resistência decresce com a temperatura; e o metálico que é o PTC, do inglês “Positive Temperature Coefficient”, que quer dizer coeficiente de temperatura positivo, o qual sua resistência decresce com a temperatura.

O comportamento destes sensores é descrito por duas equações: uma expressa a primeira lei da termodinâmica aplicada ao sensor e a outra relaciona a sua resistência elétrica com a temperatura, que é representada de maneira genérica por:

$$R_s = f(T_s), \quad (2.1)$$

em que:

R_s é a resistência elétrica do sensor,

T_s é a sua temperatura.

A forma de expressar a equação (2.1) depende do tipo de sensor termo-resistivo, sendo apresentada de modo explícito, para cada sensor, na próxima seção.

Este comportamento descrito pela equação que define a primeira lei da termodinâmica, estabelece que: “A energia não pode ser destruída nem criada, mas apenas transformada de uma forma para outra”. Desta maneira, relaciona-se a energia entregue ao sensor com a energia perdida dele para o meio ambiente que o envolve mais a variação de sua energia interna, logo temos que:

$$e_i = e_o + \Delta e_a, \quad (2.2)$$

em que:

e_i é a energia entregue ao sensor,

e_o é a energia perdida do sensor para meio ambiente,

Δe_a , é a variação de energia interna.

O sensor perde ou recebe energia devido à diferença entre sua temperatura e a do meio que o envolve, podendo também receber energia por efeito Joule. A transferência de energia devido à diferença de temperatura é definida como transmissão de calor. Na transferência de calor por condução, a energia é transmitida por meio de comunicação molecular direta, sem envolver transporte de massa. Ela depende do meio físico e da diferença de temperatura.

A transferência de calor por radiação não depende da existência de um meio físico, ela se dá de um corpo de temperatura mais alta para outro de temperatura mais baixa, mesmo que estes se encontrem no vácuo.

No caso de transferência de calor por convecção, esta envolve condução de calor e movimento molecular, que pode ser forçado, ou livre, devido à diferença de densidade provocada pelo aquecimento. Quando este movimento se dá apenas por efeito de diferença de densidade e temperatura, a convecção é chamada livre ou natural. Quando a transferência de calor de um corpo para um fluido, ou do fluido para o corpo é decorrente também do movimento forçado do fluido ou do corpo, a convecção é chamada forçada.

Considerando-se um sensor aquecido por efeito Joule e submetido às três formas de transmissão de calor citadas acima, a equação (2.2), representada por potência (energia por unidade de tempo) é dada por:

$$\alpha SH + P_e = hS(T_s - T_a) + mc \frac{\partial T_s}{\partial t} \quad (2.3)$$

em que:

α é o coeficiente de transmissividade absorvida do sensor;

S é a área da superfície do sensor;

H é a radiação incidente;

P_e é a potência elétrica;

h é o coeficiente de transferência de calor na superfície do sensor;

T_s é a temperatura do sensor;

T_a é a temperatura ambiente;

m é a massa do sensor;

c é o calor específico do sensor;

αSH é a radiação absorvida pelo sensor, por unidade de tempo;

$hS(T_s - T_a)$ é a energia perdida pelo sensor para o meio ambiente por unidade de tempo;

$mc \frac{\partial T_s}{\partial t}$ é a variação de energia interna do sensor por unidade de tempo;

Em relação a equação (2.3), o produto hS pode ser definido como condutância térmica (G_{th}) e mc como capacitância térmica (C_{th}). Entretanto a definição da condutância térmica parece fazer referência apenas a transmissão de calor por condução, ela também se aplica a convecção e a radiação.

2.1.1 Características dos sensores termo-resistivos

A variação da resistência de um sensor termo-resistivo com a temperatura depende do seu tipo. Para os sensores do tipo PTC, cuja resistência é diretamente proporcional à temperatura, a variação de sua resistência com a temperatura é dada por:

$$R_s = R_0 \left[1 + \alpha_1 (T_s - T_0) + \alpha_2 (T_s - T_0)^2 + \dots + \alpha_n (T_s - T_0)^n \right] \quad (2.4)$$

em que:

R_s é a resistência elétrica do sensor,

T_s é sua temperatura

R_0 é a resistência do sensor a 0°C .

α_1 , α_2 e α_n são os coeficientes de variação da velocidade do fluido entre duas amostras consecutivas.

No nosso caso, pode-se fazer uma aproximação com um polinômio de segunda ordem sem perda de precisão [5]. A equação (2.4) é escrita então da seguinte maneira:

$$R_s = R_0 \left[1 + \alpha_1(T_s - T_0) + \alpha_2(T_s - T_0)^2 \right] \quad (2.5)$$

Os termos de potência elevados maior que um, da equação (2.5), podem ser desprezados [5,16], logo esta equação reduz-se a:

$$R_s = R_0(1 + \beta T_s) \quad (2.6)$$

em que:

β é o coeficiente de temperatura de sua resistência elétrica.

Os termistores do tipo NTC, cuja resistência é inversamente proporcional à temperatura, sua equação é definida (Steinhart-Hart) [19] por :

$$\frac{1}{T_s} = A + B \ln(R_s) + C \ln(R_s)^3 \quad (2.7)$$

em que:

T_s é a temperatura do sensor em K;

R_s é a resistência do sensor;

A , B e C são constantes a serem definidas experimentalmente;

Porém, a equação (2.7) pode ser definida por [3],[11] e [12]:

$$R_s = R_0 e^{\beta \left(\frac{1}{T_s} - \frac{1}{T_0} \right)} \quad (2.8)$$

Para $T_0 = \infty$ ($R_0 = R_\infty$), a equação (2.8) pode ser representada da seguinte forma [5]:

$$R_s = R_\infty e^{\frac{\beta}{T_s}} \quad (2.9)$$

Na Figura 2.1 apresentam-se diversos gráficos com as características de sensores NTC, referentes a equação (2.9), para vários valores de R_∞ e β encontrados no mercado. Estes valores são fornecidos pelo fabricante [4] e na Tabela 1 informamos os valores das constantes usadas para desenho dos gráficos. É importante informar que os fabricantes fornecem o valor de R_{25} , que é a resistência do sensor à 25 °C mas, para nossos estudos como trabalhamos com $T_0 = \infty$ que corresponde a R_∞ , então convertemos para este valor. Para os cálculos da resistência do sensor, sensibilidade e outros, a temperatura T_s é dado em K, porém para elaboração de gráficos mostramos a temperatura em °C. Para facilitar a visualização, o eixo vertical do gráfico abaixo está em escala logarítmica.

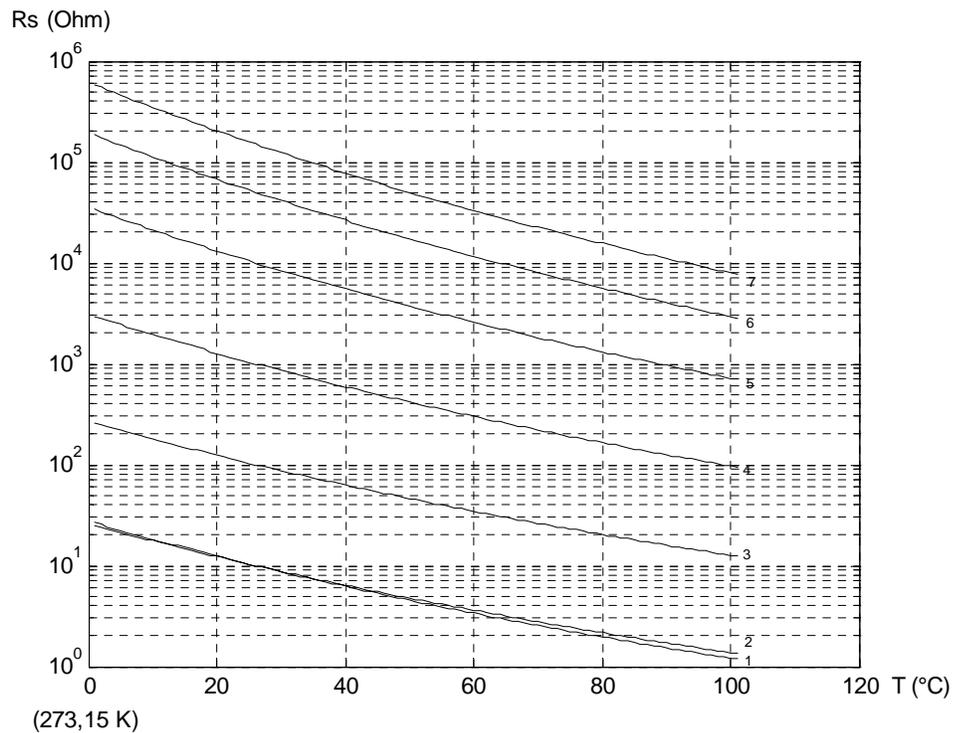


Figura 2.1: Características $R_s \times T_s$ do sensor

Na Figura 2.2 apresentam-se também os diversos gráficos com as características do sensor NTC, para os mesmos valores de R_∞ e β , como o gráfico da Figura 2.1, só que estes apresentam-se normalizados para o valor de R_{25} .

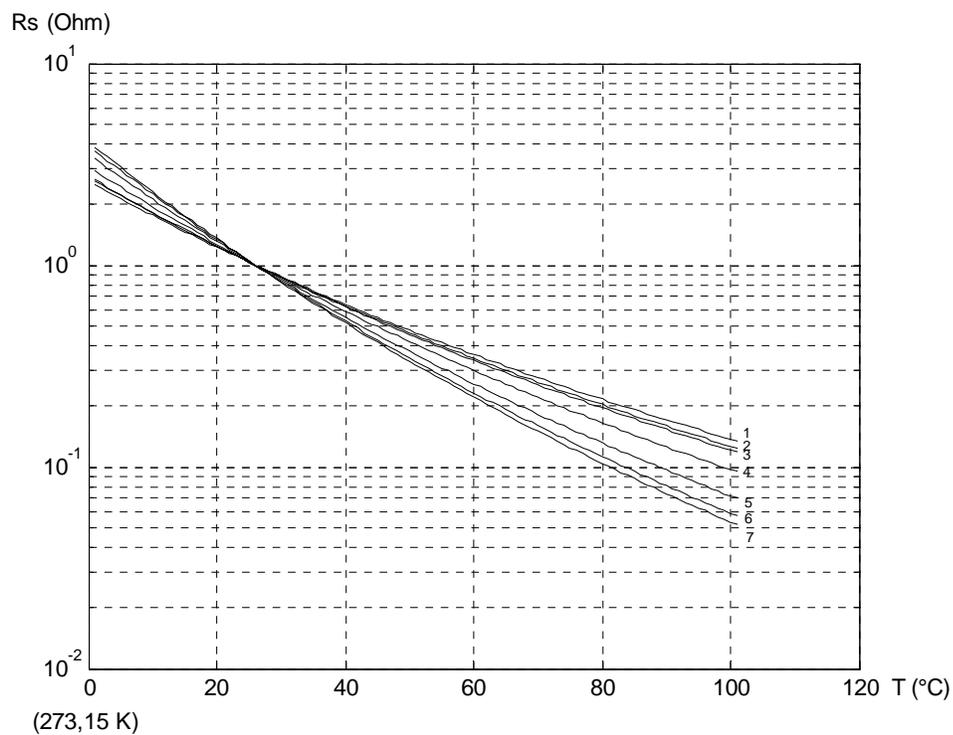


Figura 2.2: Características $R_s \times T_s$ do sensor.

Na tabela abaixo encontra-se os valores de R_∞ e β para o sensor termo-resistivo NTC fornecido pelo fabricante [11].

Tabela 1 – Valores das constantes do sensor NTC fornecidos pelo fabricante

Curva	R_∞ (m Ω)	β (K $^{-1}$)
1	0,4563	2980
2	0,2421	3169
3	3,0510	3100
4	7,9761	3500
5	17	3950
6	32	4250
7	58,4676	4400

2.2 Coeficiente de transferência de calor

A estimação da velocidade do fluido, \mathcal{G} , é feita a partir da equação do equilíbrio termodinâmico, na qual o coeficiente de transferência de calor (h) com o meio varia com \mathcal{G} . A equação de King [8] trata da relação da troca de calor entre o sensor e o meio. Para estudos de fluidos com baixos valores do número de *Mach* (relativa a velocidade do som), densidades e viscosidades constantes, o coeficiente é dado por:

$$h = a + b\mathcal{G}^n, \quad (2.10)$$

em que:

a , b e n são constantes determinadas experimentalmente,
 \mathcal{G} é a velocidade do fluido.

Quando os efeitos de outras grandezas físicas, além da velocidade, são importantes como densidade e viscosidade do meio, esse coeficiente é dado por: $Nu = a + bRe^n$, no qual $Re = \rho d\mathcal{G}/\mu$ (Nu é o número de Nusselt, Re é o número de Reynolds, d é o diâmetro do sensor, ρ é a densidade do meio e μ é sua viscosidade).

Considera-se, neste trabalho, que o coeficiente de transferência de calor entre o sensor e o meio é função apenas da velocidade do fluido, da mesma forma que em [6] [9] [10]. Essa consideração é válida para um fluido como o ar e com baixas velocidades ($Ma \ll 1$). Para outros tipos de fluidos utiliza-se a equação mais geral ($Nu = a + b(\rho d\mathcal{G}/\mu)^n$) que relaciona as grandezas físicas densidade e viscosidade do meio.

2.3 Caracterização dos sensores termo-resistivos

Para a análise e projeto dos circuitos elétricos que usam sensores termo-resistivos, é necessário que se conheça valores de constantes e parâmetros destes dispositivos, tais como: R_∞ e β do termistor NTC, R_o e β do sensor termo-resistivo PTC. Estes parâmetros são usados para determinação do ponto de operação do circuito e/ou tempo de resposta.

No caso particular dos sensores NTC, para que se tenha uma boa precisão nas aplicações é necessário que cada termistor seja caracterizado separadamente [27]. Geralmente, nesta caracterização são determinados constantes e parâmetros do sensor relacionados com o seu

comportamento estático, que pode ser chamada de caracterização estática, além da determinação da constante de tempo, que é um parâmetro de seu comportamento dinâmico.

2.3.1 Caracterização estática

Os parâmetros R_∞ , R_o e β dos termistores NTC e PTC são determinados na caracterização estática, além da condutância térmica, G_{th} , que é encontrada pra determinar condições de operação de sensor (normalmente o sensor no ar e sem convecção forçada, isto é , com ar parado [3]. Para isto são necessário dois testes: um para determinação dos parâmetro R_∞ e β (ou R_o e β) e outro para determinação de G_{th} .

Os parâmetros R_∞ e β (ou R_o e β) são determinados a partir de valores de R_s e T_s obtidos de um ensaio térmico, Figura 2.3, no qual a temperatura do meio que envolve o sensor é ajustada para diferentes valores, e para cada valor de T_s , o valor correspondente de R_s é medido. Outra alternativa é o uso de padrões primários de temperatura tais como: o ponto triplo e o ponto de ebulição da água, respectivamente 273,16 K(0,01°C) e 373,15 (100 °C), fusão de zinco (419.58 °C) e outros. Nestes ensaios, a potência elétrica em R_s , decorrente do processo de medição, deve ser bastante pequena, de tal forma que possa considerar $T_s = T_a$.

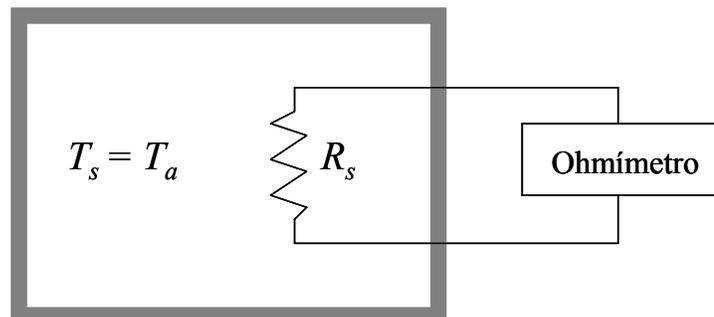


Figura 2.3: Ensaio térmico para determinação dos parâmetros do sensor.

Usando padrão secundário de boa precisão, a alternativa de determinar R_∞ e β (ou R_o e β) a partir de valores de R_s e T_s (em um ensaio térmico) produz melhores resultados, tomando-se uma quantidade maior de valores de R_s e T_s , e utilizando-se regressão linear (ou não Linear) para a determinação das constantes da equação que relaciona estas duas variáveis [12].

No caso da determinação de G_{th} , o sensor é aquecido por efeito Joule, Figura 2.4, e para cada par de valores corrente-tensão no sensor, é obtido o valor da potência elétrica, P_e , e o valor respectivo de R_s . A sua temperatura pode ser obtida destes valores de R_s e de dados do teste de sua resistência em função de sua temperatura na forma de tabela ou equação [29], ou medida por outro sensor de dimensões e capacitância térmica bem menores que o sensor sob teste [28]. Conhecido T_a e valores de T_s e P_e , pode-se então determinar G_{th} .

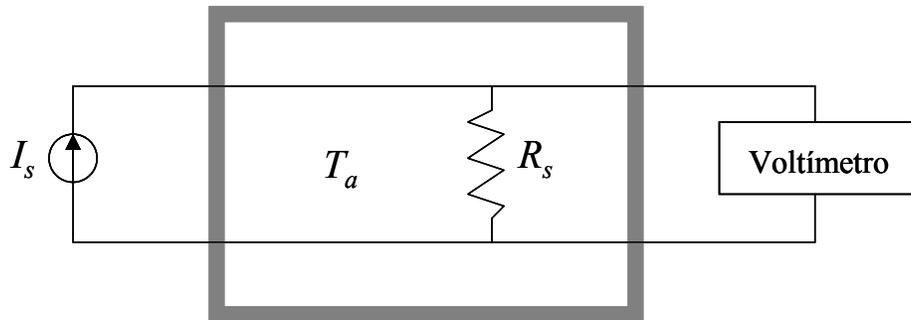


Figura 2.4: Ensaio para determinação de G_{th}

2.4 Aplicações

Nas medições de temperatura, velocidade do fluido, radiação térmica, etc, os sensores termo-resistivos são os mais usados. Eles encontram aplicações em áreas diversas tais como: condicionamento de ambiente, automobilismo, meteorologia, indústria e hospitais. Relacionado com estas aplicações, pode-se citar também: compensação de temperatura, medição de coeficiente de transferência de calor em uma superfície entre dois materiais e controle de temperatura.

Para diversas aplicações são usados os princípios de medição baseados na variação da resistência do sensor com a temperatura, na variação da potência elétrica entregue ao sensor com a radiação incidente e na variação do coeficiente de transferência de calor equação (2.3).

Para a medição da velocidade de fluido, o sensor é aquecido por efeito Joule e a tensão em seus terminais são usadas na medição desta velocidade. Já na medição de temperatura com os métodos convencionais, é explorada apenas a característica $R_s \times T_s$, e o sensor não aquecido por efeito Joule. Na medição de radiação pode-se usar qualquer uma das alternativas anteriores. A seguir são apresentados alguns métodos usados nas principais aplicações destes sensores.

2.4.1 Medição de temperatura

A grandeza física mais medida é a temperatura, pois a maioria dos processos sofrem influência desta grandeza. As aplicações envolvem objetivos, tais como: controle de temperatura, monitoração e compensação da variação de temperatura na medição das outras grandezas. Existem vários tipos de sensores de temperatura, baseados em diferentes princípios de operação, tais como: efeito termoelétrico, dilatação térmica e outros. Entretanto, devido à sua diversidade de forma, custo baixo, capacitância térmica pequena e principalmente, sensibilidade alta, o termistor é o sensor térmico mais usado, embora apresente uma variação não linear de sua resistência com a temperatura equação (2.9). Porém, os sensores termo-resistivos metálicos, embora apresentem uma sensibilidade menor, ou seja, menor variação de resistência com a temperatura, também são usados na medição de temperatura.

Para superar esse problema, existem diversas propostas de circuitos de linearização dessa curva de resposta, que associam o termistor a outros elementos, tais como: resistores e amplificadores operacionais, transformando a variação exponencial de resistência em uma variação linear de tensão, ambas em função da temperatura. Tais métodos podem ser: comparação da variação exponencial de resistência x temperatura com a variação exponencial da tensão de um capacitor em um circuito R-C, para gerar um sinal pulsado com frequência ou intervalo de tempo proporcional à temperatura.

Todos estes métodos de medição de temperatura citados exploram apenas a variação de resistência do termistor com a temperatura, desprezando a variação de resistência devido ao aquecimento por efeito Joule. Nos circuitos utilizados não existe realimentação e a resposta do circuito é mais lenta ou igual à do sensor.

2.4.2 Medição de radiação

Um sensor termo-resistivo pode ser aquecido pela temperatura ambiente, por efeito Joule e também por radiação térmica incidente, que fornece uma energia por unidade de tempo dada por αSH , conforme equação (2.3).

Quando o sensor é alimentado por uma corrente constante, a variação da radiação incidente provoca uma alteração das suas temperatura e resistência e, conseqüentemente, a tensão em seus terminais também varia. Esta tensão é então usada como sinal de medição, que é processado juntamente com um outro sinal equivalente a temperatura ambiente (sinal de compensação) para estimação da radiação. Neste método é usado um circuito não realimentado e conseqüentemente o tempo de resposta é maior que o tempo de resposta do sensor.

Para reduzir o tempo de resposta, existe um outro método que utiliza um circuito realimentado. Neste, o sensor é aquecido por efeito Joule e suas resistência e temperatura são mantidas constantes pela realimentação. Para este fim, quando há um aumento da radiação, a realimentação reduz a potência elétrica fornecida ao sensor, reduzindo a corrente e a tensão. Por outro lado, quando há redução de radiação, a realimentação funciona no sentido inverso. Neste caso, a corrente ou tensão são usadas como sinal de medição. O sensor termo-resistivo para medição de radiação é geralmente do tipo metálico na forma de filme depositado sobre um substrato.

2.4.3 Medição de velocidade de fluido

A energia perdida pelo sensor por convecção para um fluido em que está imerso depende da velocidade do fluido. Este comportamento é expresso por equações que relacionam o coeficiente de transferência de calor na superfície do sensor com a velocidade (o coeficiente aumenta com a velocidade do fluido, equação (2.12)). Os métodos para medição de velocidade de fluido são os mesmo já descrito para medição de radiação incidente e a tensão sobre o sensor é usada como sinal de medição.

O aumento da transferência de calor para o fluido com a velocidade, aumenta a perda de calor do sensor e tende a diminuir a sua temperatura e a sua resistência. Quando sensor é alimentado por corrente constante, um aumento de velocidade provoca uma redução das temperatura, resistência e tensão.

No método de medição com sensor a temperatura constante, o aumento da perda de calor provocado pelo aumento de velocidade, é compensado pelo aumento da potencia elétrica de forma a manter constantes as resistência e temperatura do sensor. A informação de velocidade é geralmente, retirada da tensão ou corrente elétrica.

Os instrumentos que usam esses dois métodos são denominados de anemômetros com excitação a corrente constante e a temperatura constante. De uma maneira mais genérica, eles são chamados anemômetro a fio quente, quando o sensor é na forma de fio.

Embora a palavra anemômetro se refira apenas à medição de velocidade de vento, os anemômetros a sensor aquecido (anemômetro a fio quente ou outro sensor termo-resistivo aquecido) recebem a definição de anemômetro, mesmo quando usados para medição de velocidade de outros fluidos. Esta nomenclatura foi adotada desde o surgimento destes instrumentos com sensor a fio quente, quando eram usados apenas para medição de velocidade de ar [10].

Além dos anemômetros a corrente constante e a temperatura constante, existe também os anemômetro a fio com excitação pulsada (do inglês “*pulsed-wire*”) e anemômetro a tensão constante.

Os anemômetros a fio com excitação pulsada operam por aquecimento de uma porção do fluido e medição do tempo de deslocamento desta porção. O fluido é aquecido por um fio que recebe um pulso de tensão e, um outro fio localizado bem próximo é usado para medir a temperatura do fluido em movimento e detecção do pico de temperatura. O tempo entre geração do pulso e tensão e detecção do pulso de temperatura é invertida proporcional à velocidade do fluido [10] [30].

Nos anemômetro a tensão constante, a tensão do sensor é mantida constante por um circuito realimentado e, o valor da velocidade pode ser obtida da tensão de saída do circuito [2].

Uma comparação dos anemômetro a corrente constante, temperatura constante e tensão constante foi feita por SARMA [2] tomando como referência a sensibilidade e constante de tempo. Ele mostra que o anemômetro a corrente constante apresenta uma boa sensibilidade e uma constante de tempo igual a constante de tempo aparente do sensor. O anemômetro a temperatura constante, usa um circuito realimentado e com isto, consegue-se uma constante de tempo bem menor que a do sensor.

Para esses anemômetros, os sensores mais usados são fios metálicos, usualmente de tungstênio ou platina com diâmetro de até 5 μ m, mas também são usados filmes metálicos e

termistores. Este último, devido às suas dimensões e massa, que são bem maiores que as de um fio, apresentam uma constante de tempo maior.

Os anemômetros a sensor aquecido, diferentemente de alguns tipos, podem ser usados para medição da componente média de velocidade e também de flutuações rápidas de velocidade, tal como medição de turbulência.

Estudos sobre resposta em frequência deste anemômetro são apresentados em [31],[10],[32] e [33]. Neste trabalho, esta análise é apresentada no capítulo 3, no qual é feita uma comparação dos métodos de medição, sendo a resposta em frequência um dos parâmetros de comparação.

2.5 Métodos de medição

A partir da equação que expressa a primeira lei da termodinâmica, equação (2.3), para sistemas de medição de velocidade de fluido, considerando radiação térmica incidente nula, ou seja, o termo αSH é nulo, podemos re-escrever a equação (2.3) como [13] e [16]:

$$P_e = hS(T_s - T_a) + mc \frac{\partial T_s}{\partial t}, \quad (2.13)$$

e as grandezas elétrica do sensor (corrente, tensão e potência elétrica) dependem da radiação térmica incidente, da velocidade do fluido e da temperatura ambiente.

Definem-se então três métodos de medição que usam sensor aquecido, nos quais uma grandeza elétrica do sensor é mantida constante e a informação é retirada (ou estimada) da tensão sobre este ou da sua corrente. Cada um destes métodos apresenta vantagens e desvantagens que dependem do tipo de sensor (metálico ou termistor NTC) e da grandeza estimada, e que estão relacionadas com sensibilidade, constante de tempo e linearidade.

No caso particular dos anemômetros que usam esses métodos, eles recebem os nomes de anemômetros a corrente constante, a tensão constante e a temperatura constante (resistência constante). Neste tópico, como é feito um estudo unificado de medição de temperatura, radiação térmica e velocidade do fluido, faz-se referência aos métodos sem particularizar uma destas três grandezas nas suas medições.

2.5.1 Corrente constante

No método de medição a corrente constante, o sensor é alimentado por uma fonte de corrente constante. Logo, substituindo-se $P_e = I_s^2 R_s$ na equação (2.13) tem-se:

$$I_s^2 R_s = hS(T_s - T_a) - \alpha SH. \quad (2.14)$$

Para um sensor termo-resistivo metálico, a resistência em função da temperatura é dada pela equação (2.9), a temperatura em função da resistência é dada por:

$$T_s = \frac{R_s}{R_0 \beta} - \frac{1}{\beta} \quad (2.15)$$

Substituindo T_s na equação (2.14), tem-se:

$$I_s^2 R_s = hS \left(\frac{R_s}{R_0 \beta} - \frac{1}{\beta} - T_a \right) - \alpha SH \quad (2.16)$$

Re-escrevendo esta equação temos que:

$$R_s = \frac{R_0 \beta \left(hS \left(\frac{1}{\beta} + T_a \right) + \alpha SH \right)}{hS - I_s^2 R_0 \beta} \quad (2.17)$$

A tensão sobre o sensor é dada por:

$$V_s = \frac{R_0 \beta \left(hS \left(\frac{1}{\beta} + T_a \right) + \alpha SH \right)}{hS - I_s^2 R_0 \beta} I_s \quad (2.18)$$

Algumas propriedades de um sensor termo-resistivo alimentado com uma corrente constante, para condição de equilíbrio estático, podem ser interpretadas da equação (2.18). São elas:

- A tensão V_s é função da temperatura ambiente, T_a , da radiação térmica incidente H e da velocidade do fluido. Conseqüentemente, cada uma destas três grandezas pode ser estimada da tensão V_s quando as outras são nulas ou conhecidas;
- Na medição de radiação térmica incidente, não deve existir convecção forçada (h deve ser mantido constante), é necessário compensação de variação da temperatura ambiente;
- No método de medição a temperatura constante, a sensibilidade da tensão em relação à temperatura ambiente $\left(\frac{\partial V_s}{\partial T_a}\right)$ e em relação à radiação térmica incidente $\left(\frac{\partial V_s}{\partial H}\right)$ aumentam quando I_s aumenta;
- A relação entre a variação de tensão e a variação de velocidade é não linear, mas este mesmo problema aparece nos outros métodos com sensor aquecido, pois a variação de h com a velocidade é não linear;
- De forma semelhante à medição de radiação térmica incidente, na medição de velocidade também é necessário compensação de variação de temperatura ambiente.

Com um termistor NTC, devido a sua característica exponencial, não existe relação linear entre a tensão sobre o sensor e nenhuma das grandezas a serem estimadas. Considerando-se apenas esta característica, os sensores termo-resistivos metálicos são mais indicados.

2.5.2 Temperatura constante

No método de medição a temperatura constante, em condições ideais, a resistência e a temperatura do sensor são mantidas constantes, então, substituindo $P_e = \frac{V_s^2}{R_s}$ na equação (2.13) tem-se:

$$V_s^2 = R_s h S (T_s - T_a) - R_s \alpha S H \quad (2.19)$$

Pode-se verificar por esta equação que não existe relação linear entre a tensão V_s e qualquer uma das grandezas a serem estimadas. Mesmo assim, o método de medição a temperatura constante é o mais usado, pois é ele que apresenta menor constante de tempo.

Como a resistência e a temperatura do sensor são mantidas constantes, a relação entre a tensão e as variáveis a serem estimadas independe do tipo de sensor. Os circuitos que são geralmente usados na implementação deste método, com sensor metálico ou termistor NTC são mostrados na Figura 3.1. Considerando-se amplificadores como ideais, temos que $V_s = V_2$ que através desta relação obteremos equações que definem o ponto de operação do circuito. Na seção 3 mostraremos como obter esta equação que tornará possível o estudo da sensibilidade do circuito, que é objetivo deste trabalho.

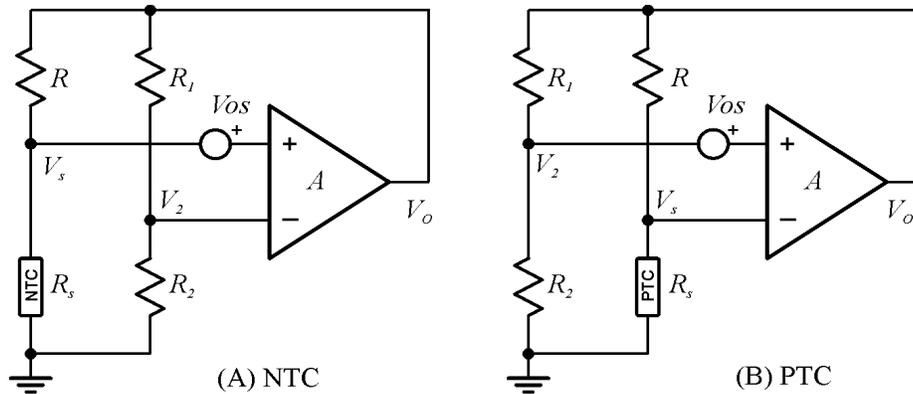


Figura 2.5: Diagrama esquemático do CTA: (A) NTC e (B) PTC

2.5.3 Tensão constante

No método de medição a tensão constante, a tensão sobre o sensor é mantido constante, então substituído-se $P_e = V_s I_s$ na equação (2.13), tem-se:

$$V_s I_s = hS(T_s - T_a) - \alpha SH . \quad (2.20)$$

Nesta equação, com V_s constante, uma variação na velocidade do fluido, na temperatura ambiente T_a ou na radiação térmica incidente, implica em variação de I_s , T_s e R_s . A relação entre I_s e qualquer uma das grandezas a ser estimada é não linear, tanto para um sensor termo-resistivo metálico quanto para um termistor NTC. Por exemplo, para um sensor termo-resistivo metálico, substituído-se $R_s = V_s/I_s$ na equação (2.15),

$$T_s = \frac{V_s}{R_0 I_s \beta} - \frac{1}{\beta}, \quad (2.21)$$

e substituído esta expressão de T_s na equação (2.20), tem –se:

$$V_s I_s^2 = hS \left(\frac{V_s}{R_0 \beta} - \frac{1}{\beta} - T_a \right) - \alpha S H I_s. \quad (2.22)$$

Esta equação é de Segunda ordem para a corrente I_s e seus coeficientes dependem da velocidade do fluido, da temperatura ambiente e da radiação térmica incidente.

Na Figura 3.3 é mostrado o circuito usado para implementar método, sugerido por SARMA [2]. A tensão V_o depende da corrente que passa pelo sensor e a tensão V_s sobre o mesmo é dada por $V_s = \frac{-V_i R_f}{R_1}$.

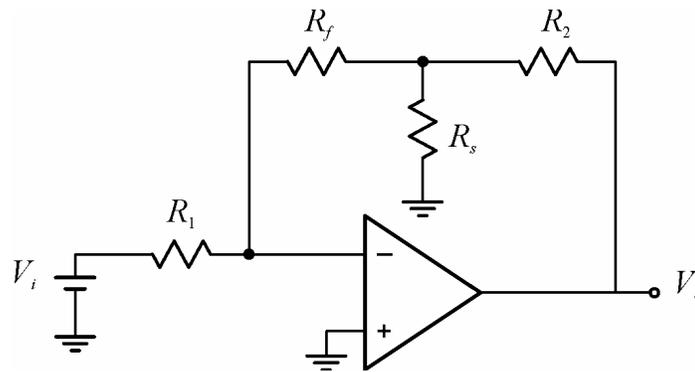


Figura 2.6: Anemômetro a tensão constante.

Devido às relação não lineares, para este método de medição e para os outros apresentados, a análise de sensibilidade à partir das equações (2.18), (2.19) e (2.22) é complexa e pode ser simplificada quando é utilizada o modelo de pequenos sinais para o sensor. Este modelo e a análise de sensibilidade são apresentados nos próximos itens.

Capítulo 3

Análise do anemômetro a sensor aquecido a temperatura constante

Neste capítulo faz-se a análise do circuito do anemômetro na configuração a sensor aquecido a temperatura constante a partir da teoria de sua construção (descrita no Capítulo 2), usando sensores termo-resistivos. Para esta análise implementamos o modelo do circuito correspondente da Figura 2.5 na ferramenta MATLAB – SIMULINK, que possibilitou obter os gráficos da tensão de saída do circuito, V_o , potência elétrica, P_e , temperatura e resistência do sensor, T_s e R_s . Com estes gráficos verificamos a influência da tensão de desvio, V_{os} , e ganho do amplificador operacional, A , na fase transitória do circuito. Já com a implementação do circuito faz-se sua análise, tornando possível discutir seu comportamento, ou seja, como as constantes e as variáveis interferem no circuito. Neste tópico, também mostramos a equação que estima a velocidade do fluido com as variáveis e parâmetros do sensor termo-resistivo e do circuito. Para dar início a análise da sensibilidade, que é o objetivo deste trabalho, mostramos como obter a equação que descreve o comportamento da resposta do circuito com a variação do fluido (V_o). É a partir da equação da tensão de saída do anemômetro que é feita toda a análise de sensibilidade o qual é mostrada no Capítulo seguinte.

3.1 Equação que estima a velocidade do fluido

Para obtermos a equação que estima a velocidade do fluido partimos da Primeira Lei da Termodinâmica estudada no capítulo anterior. Considerando a temperatura ambiente constante, ou variando lentamente, e na condição de equilíbrio estático, ou seja, $\frac{\partial T_s}{\partial t}$ é nulo, a equação (2.13) reduz-se a:

$$P_e = hS(T_s - T_a) \quad (3.1)$$

Conforme abordado no Capítulo 2 e observando a equação (3.1), o coeficiente de transferência de calor na superfície do sensor (equação de King), h , tem-se o valor típico de n igual a 0,5 (para baixas velocidades) [6]. FREYMUTH e TAKAGI usam a equação (2.12) para

representar o coeficiente de transferência de calor entre o sensor e o fluido. Nesse trabalho, considera-se que o fluido em estudo é o ar, com baixa velocidade e viscosidade e densidade constantes, o que permite o uso da equação (2.12) [7].

Voltando a equação (3.1), a potência elétrica, P_e , aplicada ao sensor pode ser escrita como [15] e [16]:

$$P_e = \frac{V_s^2}{R_s} \quad (3.2)$$

em que:

V_s é a tensão e R_s é a resistência no sensor termo-resistivo.

Substituindo as equações (2.12), (3.2) na (3.1) chegamos a equação (3.3) :

$$\mathcal{G} = \left(\frac{V_s^2}{bSR_s(T_s - T_a)} - \frac{a}{b} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (3.3)$$

A equação (3.3) relaciona a velocidade do vento com as variáveis e parâmetros do sensor termo-resistivo. Com essa equação temos a base teórica para implementação do circuito de um anemômetro a fio quente. Temos que a , b , n e S são constantes, R_s e T_s ficará constante após a fase transitória do circuito e nossa única variável V_s (tensão no sensor), que através desta chegaremos a V_o que nos dará a velocidade do vento.

3.2 Implementação do circuito

Para que possamos utilizar um sensor termo-resistivo como sensor de medição de velocidade do vento e implementarmos o método à temperatura constante, temos que utilizar um controlador para manter a temperatura do sensor constante.

Para este estudo, usaremos a configuração em ponte de Wheatstone, no anemômetro a sensor aquecido à temperatura constante, em conjunto com um amplificador operacional que tem a função de um controlador de tensão, cujo objetivo é de manter a temperatura do sensor constante através do aumento ou diminuição da corrente no sensor, mantendo a ponte equilibrada. Para isso é desenvolvido um modelo matemático que represente o anemômetro a

sensor aquecido a temperatura constante. Através deste modelo, pode-se determinar expressões para a estimação da velocidade do fluido, que neste caso é o ar. As configurações do anemômetro à temperatura constante foram mostradas na Figura 2.5, tanto utilizando o sensor termo-resistivo NTC como o sensor PTC. Para o estudo desse anemômetro, considerou-se inicialmente, a presença da tensão de desvio, V_{os} , de entrada do amplificador operacional, como também seu ganho em malha aberta, A [15] e [20].

3.3 *Análise do circuito*

Na Figura 2.5 mostra-se uma estrutura que possibilita a implementação do anemômetro a temperatura constante. Essa configuração é composta principalmente de uma ponte de Wheatstone, um sensor termo-resistivo (NTC ou PTC) e um amplificador operacional. Com o termistor NTC, que é o foco deste trabalho, este conjunto utiliza realimentação negativa. É importante mostrar que, até que o sistema atinja sua estabilidade (antes da fase transitória) não é possível medirmos a velocidade do vento. Esta fase transitória durará até a chegada da temperatura do sensor em seu ponto de operação, que será determinado pelo valor de R_1 , R_2 e R . No próximo capítulo mostraremos como definir estes valores.

Analisando o circuito da Figura 2.5 (A) o sensor termo-resistivo é aquecido por uma corrente elétrica fornecida pela realimentação do circuito até que a ponte de Wheatstone atinja o regime permanente que é quando a temperatura de operação do sensor atinge seu valor de regime.

Quando o sensor aquecido é inserido em uma corrente de ar, sua temperatura tende a diminuir e sua resistência tende a aumentar, então a ponte é desequilibrada momentaneamente, havendo uma variação na tensão sobre o sensor que é percebido pelo amplificador operacional, que realimenta negativamente o circuito, diminuindo a tensão na sua saída. Conseqüentemente, a corrente através do sensor diminui de modo a manter sua resistência e sua temperatura constantes, então a ponte volta a se equilibrar e o novo valor da tensão V_s é associado ao valor atual de \mathcal{A} .

Analisando os circuito das Figuras 2.5 (A) e (B), após o regime transitório temos respectivamente que [14]:

$$\begin{aligned} \text{A) } V_0 &= A(V_s - V_2 + V_{os}) \\ \text{B) } V_0 &= A(V_2 - V_s + V_{os}) \end{aligned} \quad (3.4)$$

Definindo-se

$$K = \frac{R_1 + R_2}{R_2}, \quad (3.5)$$

podemos escrever:

$$V_2 = \frac{V_0}{K} \quad (3.6)$$

e

$$V_s = \frac{R_s}{R + R_s} V_o. \quad (3.7)$$

Re-escrevendo a equação (3.4), tanto para o NTC quanto para o PTC, temos:

$$\begin{aligned} \text{A) } V_0 &= A \left(V_s - \frac{V_o}{K} + V_{os} \right) \\ \text{B) } V_0 &= A \left(\frac{V_o}{K} - V_s + V_{os} \right) \end{aligned} \quad (3.8)$$

A equação (3.8) relaciona a tensão de saída do amplificador operacional, V_o , com a tensão de desvio, V_{os} , e a tensão sobre o sensor, V_s , que é função da velocidade e temperatura do fluido.

A partir da equação (3.8), pode-se escrever V_s em função de V_o como:

$$\begin{aligned} \text{A) } V_s &= \left(\frac{A+K}{AK} \right) V_o - V_{os} \\ \text{B) } V_s &= \left(\frac{A-K}{AK} \right) V_o + V_{os} \end{aligned} \quad (3.9)$$

Para o cálculo da equação que define o sinal de saída do amplificador operacional, V_o , partimos das equações (3.1), (2.12) e (3.2), e temos que:

$$\frac{V_s^2}{R_s} = S(a + b\mathcal{G}^n)(T_s - T_a). \quad (3.10)$$

Substituindo a equação (3.9) na equação (3.10), para o NTC e PTC respectivamente, temos:

$$\begin{aligned} \text{A)} \left(\left(\frac{A+K}{AK} \right) V_o - V_{os} \right)^2 &= R_s S(a + b\mathcal{G}^n)(T_s - T_a) \\ \text{B)} \left(\left(\frac{A-K}{AK} \right) V_o + V_{os} \right)^2 &= R_s S(a + b\mathcal{G}^n)(T_s - T_a) \end{aligned} \quad (3.11)$$

As equações (3.11) têm duas soluções para V_o que resultam em valores de tensão positivos e negativos. Assumindo apenas os valores de tensão positivos, tem-se como solução para V_o

$$\begin{aligned} \text{A)} V_o &= \frac{AK}{A+K} \left(V_{os} + \sqrt{R_s S(a + b\mathcal{G}^n)(T_s - T_a)} \right) \\ \text{B)} V_o &= \frac{AK}{A-K} \left(-V_{os} + \sqrt{R_s S(a + b\mathcal{G}^n)(T_s - T_a)} \right) \end{aligned} \quad (3.12)$$

Assumindo um amplificador operacional ideal, isto é, com um ganho de malha aberta infinito, $A = \infty$, e uma tensão de desvio de entrada nula, $V_{os} = 0$ [6], as expressões para determinação de V_o para o NTC e o PTC se tornam equivalentes, dadas por:

$$V_o = K \sqrt{R_s S(a + b\mathcal{G}^n)(T_s - T_a)}. \quad (3.13)$$

Considerando ainda um amplificador operacional ideal, as tensões de entrada do amplificador são iguais, ou seja $V_s = V_2$ [15]. Para tal, a partir das equações (3.6) e (3.7), pode-se escrever:

$$\frac{R_s}{R + R_s} V_o = \frac{V_o}{K}, \quad (3.14)$$

que nos fornece, uma vez que a resistência do sensor é mantida constante juntamente com sua temperatura, uma relação entre resistores para a implementação do circuito:

$$R = R_s (K - 1). \quad (3.15)$$

3.4 Simulações

Foram realizadas simulações a partir de um modelo do circuito e dos sensores implementado em SIMULINK (apresentado no Apêndice - C) de forma a criar-se um ambiente de simulações desse anemômetro com a finalidade de verificar o comportamento das estruturas com o PTC e NTC e as influências das grandezas físicas e elétricas, associadas ao sistema. Os parâmetros das simulações foram: $K = 2$, ou seja, $R_1 = R_2$ e os valores dos parâmetros dos sensores usados nas simulações encontram-se apresentados na Tabela 2 [17] e [18]. Para ambos os sensores, os valores de seus parâmetros foram escolhidos como próximos a valores de sensores reais. Considerou-se a velocidade do ar variando de 0 a 25 m/s.

Tabela 2 – Parâmetros de simulação

Sensores	S	$89,17 \times 10^{-9} \text{ m}^2$
	mc	$7 \times 10^{-5} \text{ J } ^\circ\text{C}^{-1}$
	$\beta_{(PTC)}$	$0,00385 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
	$R_{o(PTC)}$	$100 \ \Omega$
	$\beta_{(NTC)}$	$4000 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
	$R_{o(NTC)}$	$3,3 \text{ m}\Omega$
	a	$2375 \text{ W/m}^2\text{ } ^\circ\text{C}$
	b	$976 \text{ Ws}^{0,5}/\text{m}^{2,5}\text{ } ^\circ\text{C}$
	N	$0,459$
	T_a	$25 \text{ } ^\circ\text{C}$
	T_s	$59,18 \text{ } ^\circ\text{C}$
	$R_{(PTC)}$	$227,95 \ \Omega$
	$R_{(NTC)}$	$560 \ \Omega$
Amplificador Operacional	A	10^6
	f_c	100 Hz
	V_{os}	$0,5 \text{ mV}$

Na Figura 3.1 mostra-se o gráfico de V_o x \mathcal{G} para o PTC, utilizando como modelo para o sensor a equação (3.13). Para essa simulação o valor de R foi calculado a partir da equação (3.15) como $R = 227,497 \ \Omega$.

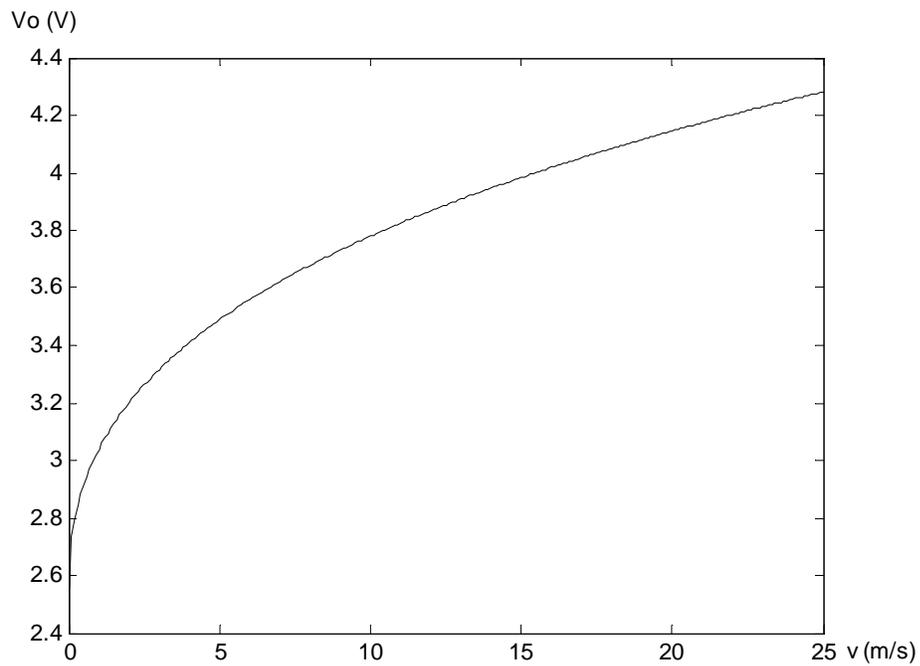


Figura 3.1: Tensão de saída V_o do circuito utilizando PTC

No Apêndice – A mostramos o programa em MATLAB para obtenção do gráfico anterior.

Na Figura 3.5 mostra-se o gráfico $V_o \times \mathcal{I}$ para o NTC, utilizando como modelo para o sensor a equação (3.13). Para esta simulação o valor de R foi calculado da equação (3.15) como $R = 560 \Omega$. No Apêndice – B mostramos o programa em MATLAB para obtenção do gráfico a seguir .

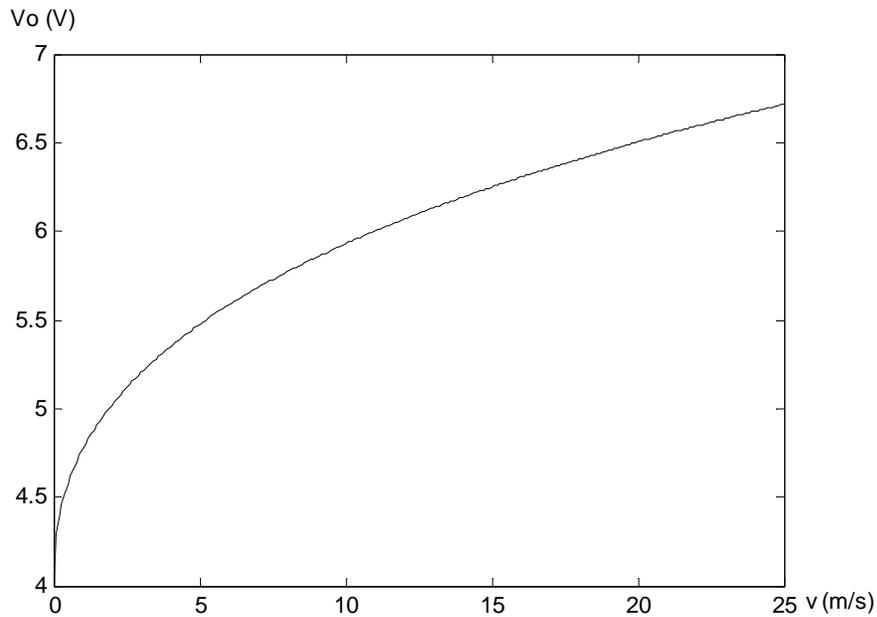


Figura 3.2: Tensão de saída V_o do circuito utilizando NTC

Conforme mostrado nos gráficos das Figuras 3.1 e 3.2 a tensão de saída no amplificador operacional foi crescente devido a “rampa” de vento aplicada no sensor, ou seja, o sinal de entrada, \mathcal{G} , vai de 0 a 25 m/s. Observa-se também a não linearidade da tensão V_o com \mathcal{G} assim como a variação de sensibilidade, sendo que para valores pequenos de velocidade de vento tem-se uma maior variação de V_o do que para valores maiores.

3.4.1 Simulações na fase transitória das configurações

Com os parâmetros da Tabela 2 e com o programa SIMULINK, é realizada uma simulação para se observar a variação da tensão de saída do amplificador operacional V_o , da potência elétrica P_e , da resistência do sensor R_s e da temperatura no sensor termo-resistivo T_s , em relação à variação de velocidade do fluido.

Para se observar a resposta do sistema, utilizando sensor NTC, às variações de velocidade do fluido, foi realizada uma simulação, com o sensor submetido a aplicação de um “degrau de vento”. O degrau de vento aplicado ao sensor, vai de 0 m/s a 1 m/s no instante 0,5 s. Para essa simulação, considera-se que a temperatura ambiente, T_a , é constante e igual a 25 °C e a tensão de desvio do amplificador, V_{os} , é de 0,5 mV e o ganho do amplificador operacional, A , é

de 10^6 . Os resultados dessa simulação são mostrados nas Figuras 3.3, 3.4, 3.5 e 3.6. No Apêndice – C encontra-se o programa e diagrama em blocos escrito em SIMULINK utilizado para elaboração dos gráficos.

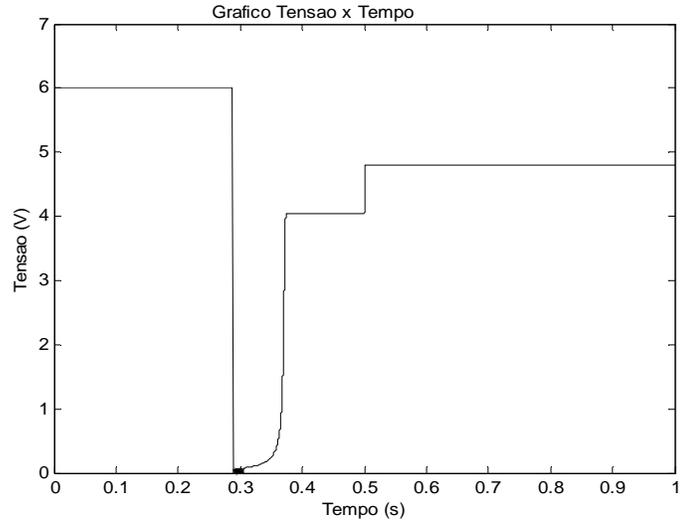


Figura 3.3: Tensão de saída - V_o

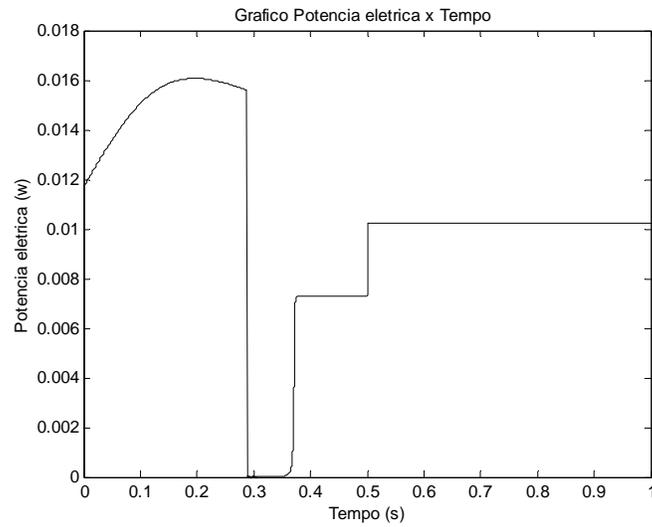


Figura 3.4: Potência elétrica - P_e

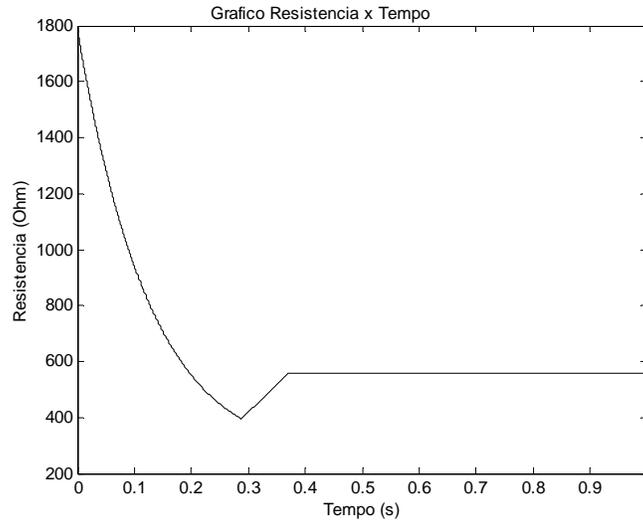


Figura 3.5: Resistência do Sensor – R_s

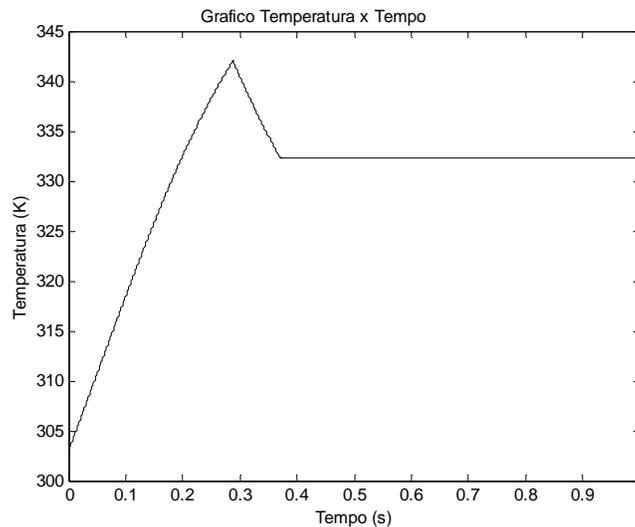


Figura 3.6: Temperatura do sensor – T_s

Observando os gráficos das Figuras 3.5 e 3.6 temos que após a fase transitória 0,365 s a temperatura e a resistência do sensor matem-se constante conforme projeto do anemômetro a fio quente a temperatura constante. Nos gráficos das Figuras 3.3 e 3.4 também após a fase transitória foi observado o degrau de vento aplicado na entrada do circuito, conforme projetado.

Ao ser feita outra análise, alterando-se o valor de V_{os} e A , ou seja, aumentando o valor da tensão de desvio e diminuindo o ganho do amplificador operacional, foi observado um aumento no tempo da fase transitória em V_o e P_e , devido às alterações decorrentes desta mudança. Já em relação a resistência e temperatura do sensor, foi observado que não houve alteração. Conforme

citado acima, quanto maior o ganho, A , e menor a tensão de desvio, V_{os} , teremos menor oscilação e menor tempo de fase transitória, que é após esta fase que poderemos trabalhar com o anemômetro. Estes dois parâmetros são de grande importância para a construção do anemômetro, pois são eles que irão definir o tempo inicial da resposta do circuito.

Capítulo 4

Sensibilidade

Sensibilidade é a taxa de variação do sinal de entrada pelo sinal de saída. Em termos matemáticos a equação da sensibilidade é dada por:

$$\text{Sensibilidade} = \phi = \frac{\partial x}{\partial y} = \text{Sensibilidade de } x \text{ em relação a } y.$$

Neste capítulo iremos calcular a sensibilidade dos dois sensores termo-resistivos o PTC e o NTC e a sensibilidade do circuito em relação a velocidade do vento, para os dois sensores, como também fazemos sua comparação. Como o circuito é na configuração à temperatura constante, mostraremos uma forma de calcular o ponto de maior sensibilidade, ou seja, qual deverá ser a temperatura do sensor para que tenhamos maior sensibilidade (para este caso consideramos a temperatura ambiente T_a constante), considerando um circuito com os valores de resistores iguais de um mesmo braço da ponte, ou seja, $K = 2$. Essa relação entre resistores é comumente utilizada na literatura para a configuração de CTA. Equivalentemente, dado uma temperatura de operação do sensor, poderemos calcular o valor do parâmetro K “ótimo” para que tenhamos uma maior sensibilidade, e a partir destes valores chegaremos ao valor do resistor R , que co-relaciona com a temperatura do sensor conforme equação (2.9) e (3.15). Neste caso, consideraremos a temperatura de operação que nos deu maior sensibilidade para o caso anterior de $K = 2$. Já na seção seguinte faz-se análise do circuito com a temperatura ambiente variando. Porém, para o cálculo do ponto de maior sensibilidade só será possível para o circuito implementado com o sensor NTC, pois a curva de sensibilidade do circuito, com o PTC, apresenta curva crescente. Neste capítulo também mostraremos uma forma de se escolher os parâmetros do termistor, R_∞ e β para que o circuito opere com a maior sensibilidade, considerando T_a variável.

4.1 Sensibilidade dos sensores

Neste tópico através da definição de sensibilidade e das equações (2.6) e (2.9) calcularemos a sensibilidade dos dois sensores.

4.1.2 PTC

Conforme visto no capítulo 2, a equação (2.6) define o comportamento do sensor termorresistivo PTC, em relação a variação da temperatura. Para calcularmos a sensibilidade do sensor em relação a sua temperatura temos que:

$$\phi = \frac{\partial R_s}{\partial T_s} = R_0 \beta \quad (4.1)$$

A equação (4.1) nos fornece a sensibilidade do sensor PTC. Sua sensibilidade é dependente apenas das constantes R_0 e β , o que torna seu gráfico uma reta constante.

4.1.3 NTC

Como também foi visto no capítulo 2, a equação (2.9) define o comportamento do termistor NTC, em relação a variação da temperatura. Para cálculo da sensibilidade temos que:

$$\phi = \frac{\partial R_s}{\partial T_s} = -R_\infty e^{\frac{\beta}{T_s}} \frac{\beta}{T_s^2} \quad (4.2)$$

Através da equação (4.2) podemos afirmar que a sensibilidade do sensor NTC depende das constantes R_∞ e β e que seu gráfico é decrescente. Podemos destacar também, que o sensor NTC apresenta alta sensibilidade em comparação com o PTC, para temperaturas de operação do sensor relativamente baixas. A seguir, apresentam-se gráficos referente a sensibilidade do sensor NTC, usando os valores das constantes R_∞ e β da Tabela 1. Para facilitar a visualização, o gráfico abaixo está em escala logarítmica.

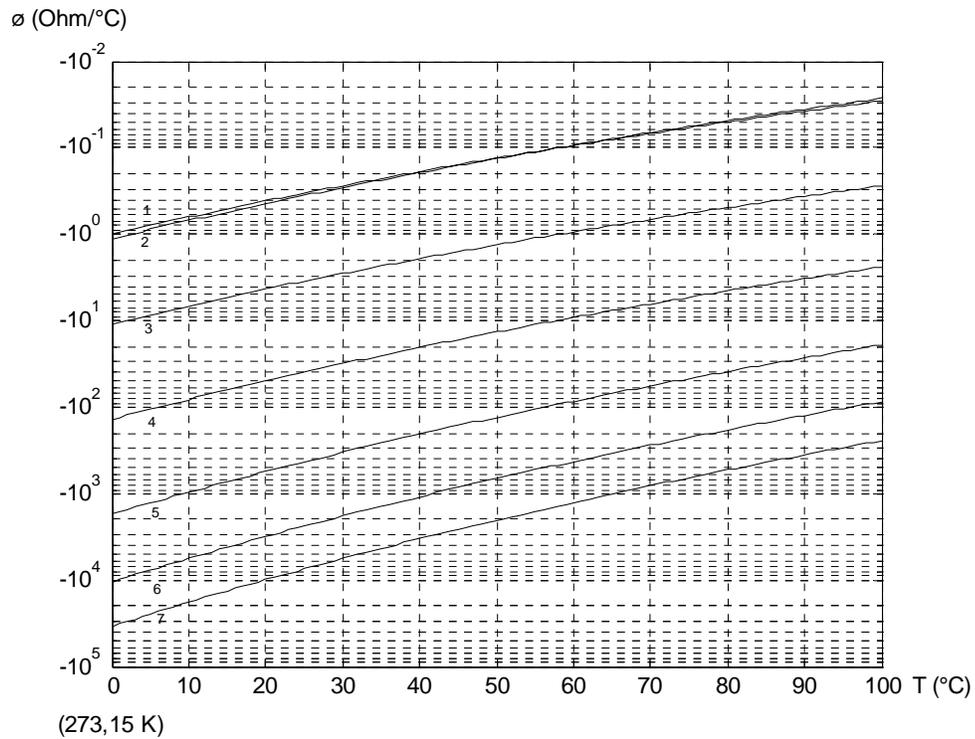


Figura 4.1: Sensibilidade do sensor NTC

Para compararmos, em valores reais, a sensibilidade dos sensores, substituímos os valores das constantes R_0 e β por valores fornecidos pelo fabricante para análise de maior sensibilidade.

Para o sensor PTC temos que, $\beta = 0,00385$ e $R_0 = 100 \Omega$, dado pelo fornecedor [12], são os parâmetros utilizados na simulação. Logo sua sensibilidade será

$$\phi = \frac{\partial R_s}{\partial T_s} = R_0 \beta = 0,385.$$

Já para o termistor NTC temos que, $\beta = 2980$ e $R_\infty = 0,4563 \Omega$, dados fornecidos pelo fabricante [12], são os parâmetros utilizados nesta simulação. Logo a sensibilidade do NTC será

$$\frac{\partial R_s}{\partial T_s} = -R_\infty e^{\frac{\beta}{T_s}} \frac{\beta}{T_s^2} = -0,4563 e^{\frac{2980}{T_s}} \frac{2980}{T_s^2},$$

que corresponde a curva “um” do gráficos da Figura 4.1. Analisando os dados acima e o gráfico da Figura 4.1, podemos ver que o sensor termo-resistivo NTC apresenta uma região de maior

sensibilidade comparado com o PTC, que corresponde a valores de temperatura relativamente baixas, acima da temperatura ambiente.

4.2 Sensibilidade da Configuração

Nesta seção fazemos a comparação entre a sensibilidade do circuito na configuração à temperatura constante utilizando os termistores NTC e PTC, para análise de qual dos sensores torna o circuito com maior sensibilidade com os valores de resistores iguais num mesmo braço da ponte de Wheatstone. A sensibilidade que medimos foi da resposta do circuito, ou seja, sua tensão de saída, V_o , em relação a velocidade do vento \mathcal{G} .

Para obter-se a equação que define a sensibilidade do circuito, partimos da equação (3.13) que fornece, V_o , para depois calcularmos a equação da derivada de V_o em relação a velocidade do vento, \mathcal{G} , ou seja, $\frac{\partial V_o}{\partial \mathcal{G}}$.

4.2.1 Cálculo da sensibilidade do circuito

Nesta seção iremos obter a equação que fornece a sensibilidade do circuito em relação a velocidade do vento. Conforme abordado na introdução deste item, para cálculo da sensibilidade, temos que obter $\frac{\partial V_o}{\partial \mathcal{G}}$, logo derivando a equação (3.13) temos que:

$$\phi = \frac{\partial V_o}{\partial \mathcal{G}} = \frac{Kbn\mathcal{G}^{n-1}\sqrt{SR_s(T_s - T_a)}}{2\sqrt{a + b\mathcal{G}^n}} \quad (4.3)$$

A equação (4.3) define a sensibilidade do circuito à temperatura constante. Esta equação é usada tanto para o sensor PTC como para o termistor NTC.

Com o programa em MATLAB, implementamos a equação (4.3). O gráfico abaixo mostra a curva da sensibilidade do circuito utilizando o sensor termo-resistivo PTC na configuração à temperatura constante. Neste caso, o valor de $K = 2$, ou seja, $R_1 = R_2$, já o valor das outras constantes apresentam-se na Tabela 2, e o valor de R_s é obtido a partir da equação

(2.6). Foi aplicado quatro valores (constantes) de velocidade do vento, $\mathcal{G} = 5, 10, 15$ e 20 m/s na entrada do circuito. Para análise do comportamento da sensibilidade variamos o valor da temperatura do sensor, T_s , ou seja, o gráfico da Figura 4.2 mostra a sensibilidade do circuito em relação a variação da temperatura de operação do sensor.

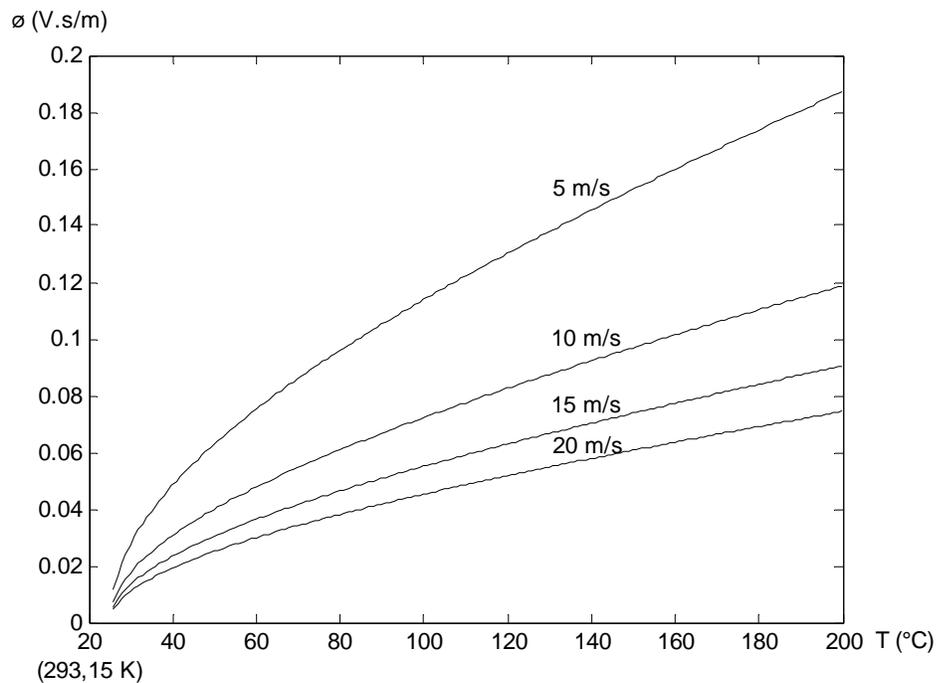


Figura 4.2: Sensibilidade do circuito utilizando PTC

O gráfico acima mostra que a curva de sensibilidade do circuito implementado com o sensor PTC é crescente, ou seja, quanto maior a temperatura de operação do sensor o circuito terá maior sensibilidade. No Apêndice – A| mostramos o programa em MATLAB para obtenção do gráfico anterior.

Da mesma forma que foi abordado para o sensor PTC, temos que a equação (4.3) pode ser usada também para o termistor NTC, apenas o que difere é o valor de R_s e conseqüentemente R_o e β .

Com a ferramenta MATLAB foi feito o gráfico a partir da equação (4.3) o qual mostra a curva da sensibilidade do circuito utilizando o termistor NTC na configuração a temperatura constante. Para elaboração do gráfico, também utilizamos os dados da Tabela 2, o valor de $K = 2$ ($R_1 = R_2$), já o valor de R_s foi obtido a partir da equação (2.9). Também aplicamos quatro

valores de velocidade do vento, $\mathcal{G} = 5, 10, 15$ e 20 m/s no sensor termo-resistivo. O gráfico da Figura 4.3 mostra a curva da sensibilidade do circuito com o termistor NTC.

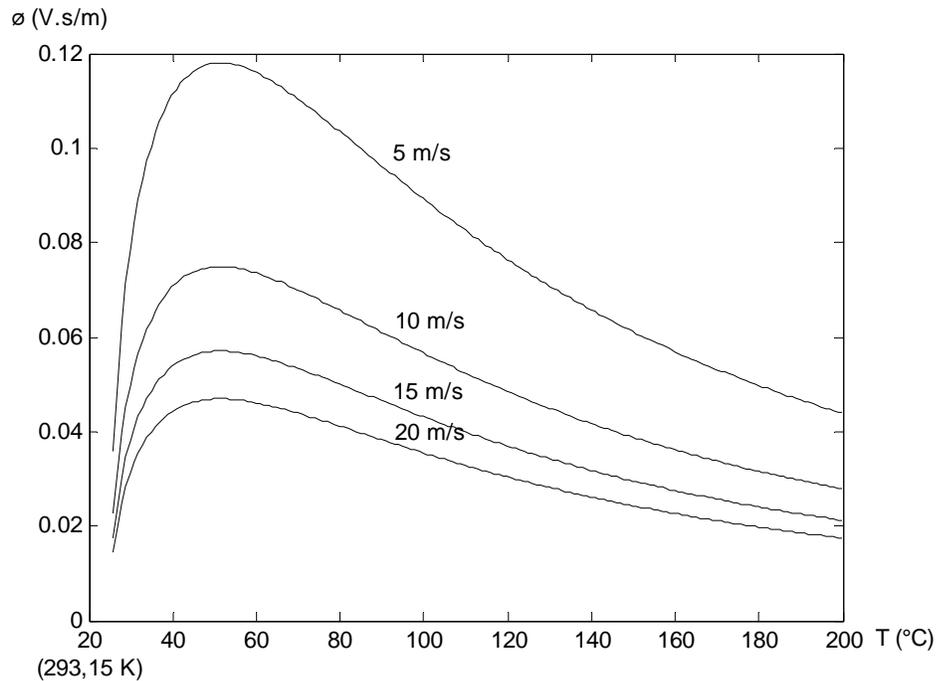


Figura 4.3 : Sensibilidade do circuito utilizando NTC

Pode-se observar a partir do gráfico da Figura 4.3 que a curva da sensibilidade do circuito em relação a velocidade do vento é crescente no início, atinge um valor máximo e em seguida decresce. Para uma análise comparativa, e com os circuitos com as mesmas configurações, fizemos a comparação entre as duas sensibilidades. Para facilitar a análise traçamos os gráficos das sensibilidades do circuito, com o PTC e o NTC na mesma figura.

O gráfico abaixo, mostra as duas curvas de sensibilidade com a variação das temperaturas nos termistores. No Apêndice – A encontra-se o programa escrito em MATLAB utilizado pela elaboração do gráfico referente a Figura 4.3.

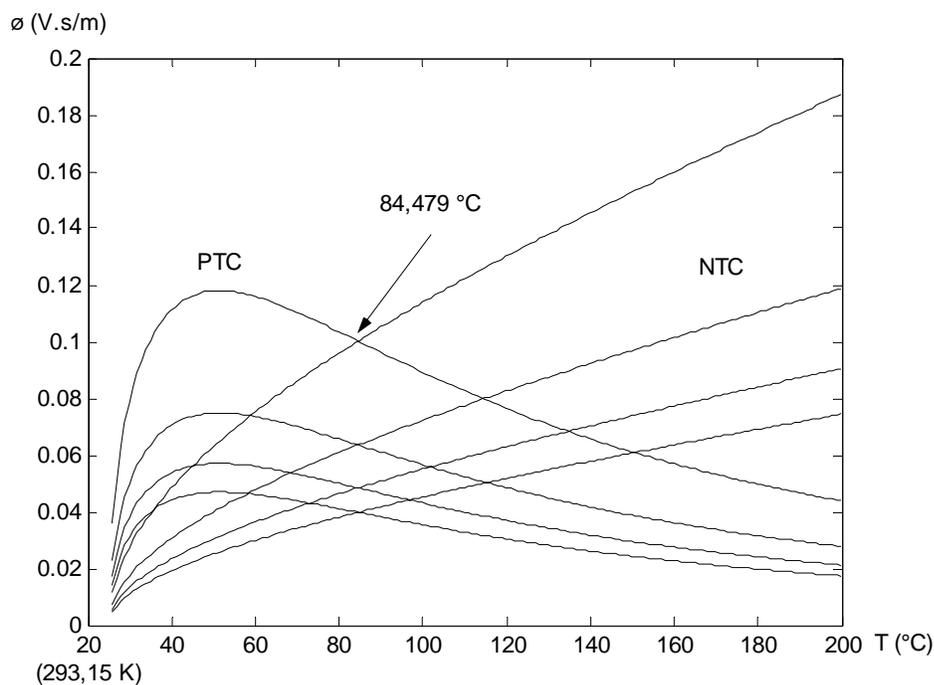


Figura 4.4 : Comparação entre as sensibilidades – PTC e NTC

De acordo com o gráfico acima, vemos que inicialmente o termistor NTC apresenta maior sensibilidade, sendo seu ponto de máxima sensibilidade a 51,32 °C o qual seu valor correspondente é igual a 0,118. A partir da temperatura igual a 84,479 °C, o sensor PTC apresentará maior sensibilidade, comparado com o NTC. Porém, só a 104,93 °C o sensor termo-resistivo PTC ultrapassará o ponto de máxima sensibilidade que foi alcançada pelo termistor NTC a 51,32 °C. No Apêndice – A mostramos o programa em MATLAB para obtenção do gráfico da Figura 4.4.

4.3 Cálculo do ponto de maior sensibilidade para o NTC

Como mostrado no gráfico da Figura 4.4, a curva de sensibilidade do circuito utilizando o NTC apresenta ponto de máxima sensibilidade para uma dada relação entre resistores, esta seção mostra como encontrar o ponto de maior sensibilidade dada uma temperatura de operação do sensor, T_s . O que nos levará ao valor ótimo de $K (R_1 \text{ e } R_2)$ e R , o qual trataremos deste assunto no próximo tópico. É importante mostrar que para o circuito com o sensor termo-resistivo PTC, disconsiderando o limite da tensão de alimentação, não será possível cálculo do ponto de maior sensibilidade, devido ao fato dele apresentar curva de sensibilidade crescente, como podemos ver na Figura 4.3.

Partindo da equação (4.3), onde mostra a sensibilidade do circuito na configuração à temperatura constante e utilizando termistor NTC, para chegarmos ao ponto de maior sensibilidade temos que calcular sua derivada em relação a temperatura do sensor e igualá-la a zero, ou seja, $\frac{\partial}{\partial T_s} \left(\frac{\partial V_o}{\partial \theta} \right) = 0$.

$$\frac{\partial \phi}{\partial T_s} = \frac{\partial}{\partial T_s} \left(\frac{Kbn\theta^{n-1} \sqrt{SR_s(T_s - T_a)}}{2\sqrt{a + b\theta^n}} \right) \quad (4.4)$$

Derivando a equação (4.3) em relação a T_s , e igualando a zero temos que:

$$\frac{SR_s(T_s^2 - \beta T_s + \beta T_a)}{2T_s^2 \sqrt{SR_s(T_s - T_a)}} = 0 \quad (4.5)$$

Logo chegamos a:

$$T_s^2 - \beta T_s + \beta T_a = 0 \quad (4.6)$$

Para análise da equação (4.6) temos dois modos de se obter o ponto de operação do circuito que apresenta máxima sensibilidade:

- 1) Dado um termistor já existente (conhecemos o valor de β), através da equação (4.6) obtemos a temperatura de operação do circuito, T_s , para maior sensibilidade. Que através destes valores obtemos o K correspondente para máxima sensibilidade, o qual mostraremos na próxima seção.
- 2) Caso não se tenha definido o termistor (não conhecemos o valor de β) pode-se definir uma temperatura de operação do circuito, T_s , e a partir da equação (4.6) obtemos o valor das constantes do termistor para esta temperatura (obtemos β).

Obs) Caso se utilize um valor aproximado de beta como por exemplo um valor comercial, pode-se refazer o cálculo da temperatura em função deste novo beta e obter a nova temperatura de operação do circuito.

Para o caso 1 temos que, como é mostrado na equação (4.6), temos uma função do segundo grau que nos dá duas soluções depende de β e T_a , sua solução é:

$$T_s = \frac{\beta \pm \sqrt{\beta^2 - 4\beta T_a}}{2} \quad (4.7)$$

Utilizando o valor conhecido do termistor $\beta = 4000$ e temperatura ambiente $T_a = 298,15$ K, substituindo na equação (4.7), o ponto de máxima sensibilidade é dado a $T_s = 324,47$ K. Ou seja, para o $\beta = 4000$ a maior sensibilidade do circuito será com a temperatura de operação igual a 324,47 K. Para confirmação das informações acima, foi feito o gráfico da equação (4.4) que é mostrado na Figura 3.5. No Apêndice – A é mostrado o programa correspondente ao gráfico a seguir.

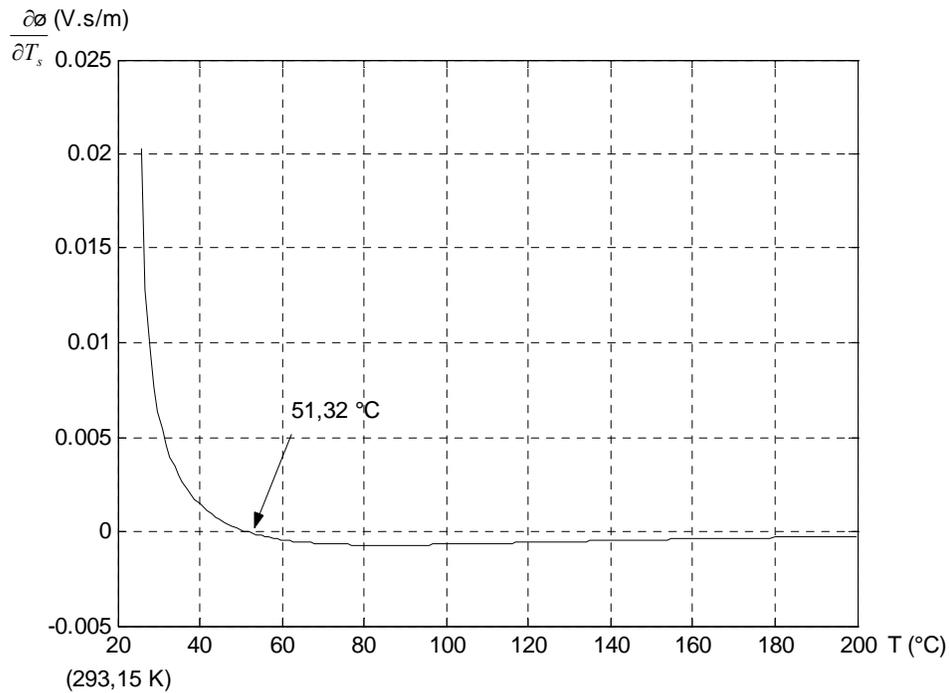


Figura 4.5 : Ponto de maior sensibilidade

Como é mostrado no gráfico da Figura 4.5 a curva da derivada da sensibilidade cruza o eixo x, ou seja, atinge o ponto zero à 51,32 °C, equivalente a 324,47 K, que justamente a essa temperatura do sensor que temos a maior sensibilidade do circuito. Que corresponde ao mesmo ponto encontrado na Figura 4.4.

Após ter encontrado o ponto onde há maior sensibilidade, ou seja, a temperatura de operação do sensor, T_s , onde teremos maior sensibilidade do circuito, que no caso acima é a 324,47 K podemos obter o valor do K (R_1 e R_2) “ótimo”, ou seja, o valor de K para que tenhamos máxima sensibilidade do circuito.

4.4 Cálculo do valor do K “Ótimo” para o NTC

Após ter mostrado uma das maneiras de se calcular a temperatura de operação do sensor para maior sensibilidade, dado uma relação entre os resistores, neste tópico é mostrado como calcular o valor da constante K , para que possamos escolher o melhor valor dos resistores R_1 e R_2 de forma a obter maior sensibilidade do circuito. Conforme gráfico da Figura 4.3, a curva de sensibilidade do circuito com o NTC apresenta ponto de máxima sensibilidade, desta forma, podemos encontrar um valor de K para fixar a temperatura do sensor no ponto de maior sensibilidade do circuito.

Isolando K da equação (4.3) temos:

$$K = \frac{V_o}{\sqrt{SR_s(a + b\mathcal{G}^n)(T_s - T_a)}} \quad (4.8)$$

Com o sensor NTC na temperatura de maior sensibilidade $T_s = 324,47$ K, utilizando os valores da Tabela 2, ou seja, $\beta = 4000$ e $R_\infty = 0,0033$ e substituindo estes valores na equação (2.9) podemos obter R_s , temos que:

$$R_s = R_\infty e^{\frac{\beta}{T_s}} = 745,432 \Omega$$

Os valores de S , a , b , n e T_a também são encontrados na Tabela 2. Já o valor de \mathcal{G} é estipulado o valor da velocidade máxima do vento que para este caso fixamos em $\mathcal{G} = 25$ m/s, o que deveremos ter uma máxima tensão de saída no amplificador operacional, que trabalhamos como $V_{omax} = 5$ V (para este estudo consideramos tensão máxima de saída do amplificador operacional igual a 5 volts). Substituindo estes valores na equação (4.8) obtemos:

$$K = 1,4657$$

Após termos encontrado o valor de T_s e K , para trabalharmos com o circuito na maior sensibilidade podemos, conseqüentemente, obter o valor de R que é dado pela equação (3.15):

$$T_s = 324,47 \text{ K}$$

$$R_s = 745,432 \Omega$$

$$R = R_s(K - 1) = 347,15 \Omega$$

Para visualizarmos os resultados acima, utilizamos o MATLAB para análise da tensão de saída do amplificador operacional, V_o , mostramos o gráfico referente a equação (3.13), como pode ser mostrado na Figura 4.6. Conforme mostrado na figura a seguir, com a velocidade máxima do vento $\mathcal{V} = 25$ m/s aplicada no sensor, obtemos a tensão máxima de saída no amplificador operacional $V_{o\max} = 5$ V.

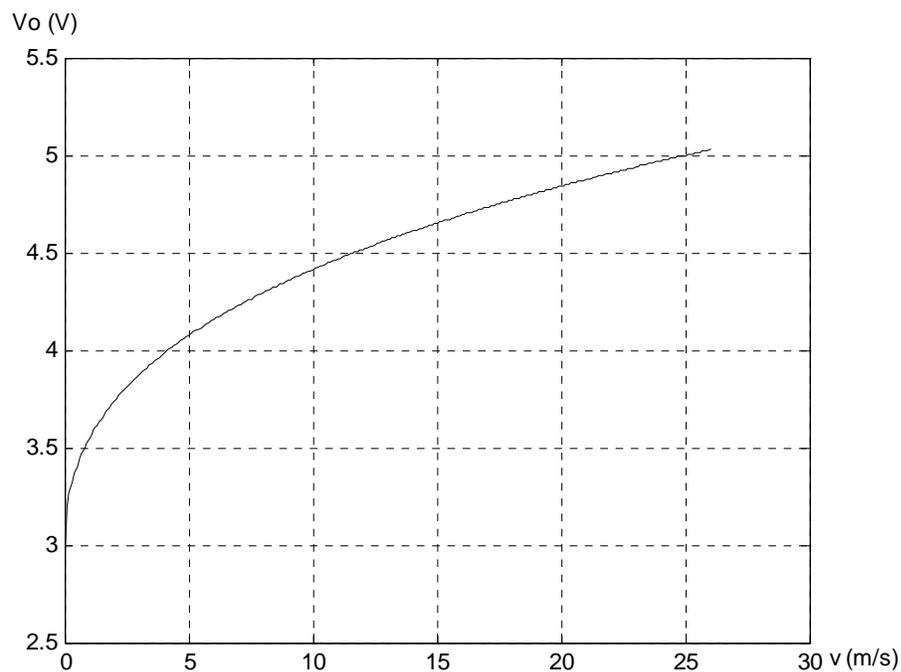


Figura 4.6 : Tensão máxima de saída $V_{o\max}$

4.5 Considerações sobre a variação da temperatura ambiente

Na seção 4.3 e 4.4 foi feito estudo da sensibilidade do circuito considerando a temperatura ambiente, T_a , constante, já neste seção faremos estudos para análise do desempenho do circuito quando ocorre a variação de T_a .

A sensibilidade do circuito utilizando o termistor NTC é dada pela equação (4.3) e consideramos que a , b , n e S são constantes com seus valores estabelecidos de acordo com a

Tabela 2. Já os valores de K e R_s são obtidos através das seguintes equações (4.8) e (2.9). Da equação (2.9) temos que R_s depende de β e R_∞ , no entanto, para que tenhamos maior sensibilidade do circuito temos que obedecer a equação (4.6), que nos fornece β da seguinte forma:

$$\beta = \frac{T_s^2}{T_s - T_a} \quad (4.9)$$

Na equação (4.8) temos as mesmas constantes a , b , n e S e os termos K e R_s são variáveis a serem substituídas na equação (4.3), já os termos \mathcal{G} , V_o e T_s serão obtidos da seguinte forma: voltando a equação (4.3) para o cálculo da sensibilidade do circuito, considerando a temperatura ambiente variando, temos que a velocidade do vento, \mathcal{G} , consideramos fixa e com um valor máximo de 25 m/s, para simulação. E para esta máxima velocidade do vento estabelecida, teremos máxima tensão de saída no amplificador operacional, V_o , que estabelecemos 5 V. Já o termo T_s consideramos constante, no entanto temos que estabelecer critérios para se escolher um melhor valor da temperatura de operação do circuito que nos leve a máxima sensibilidade. Para análise da equação (4.3) utilizamos a ferramenta MATLAB para fazermos as simulações, implementando as equações (4.3), (4.8), (2.9) e (4.9). Na figura seguinte apresenta-se o gráfico da sensibilidade do circuito em relação a variação da temperatura ambiente e implementando as equações acima citadas:

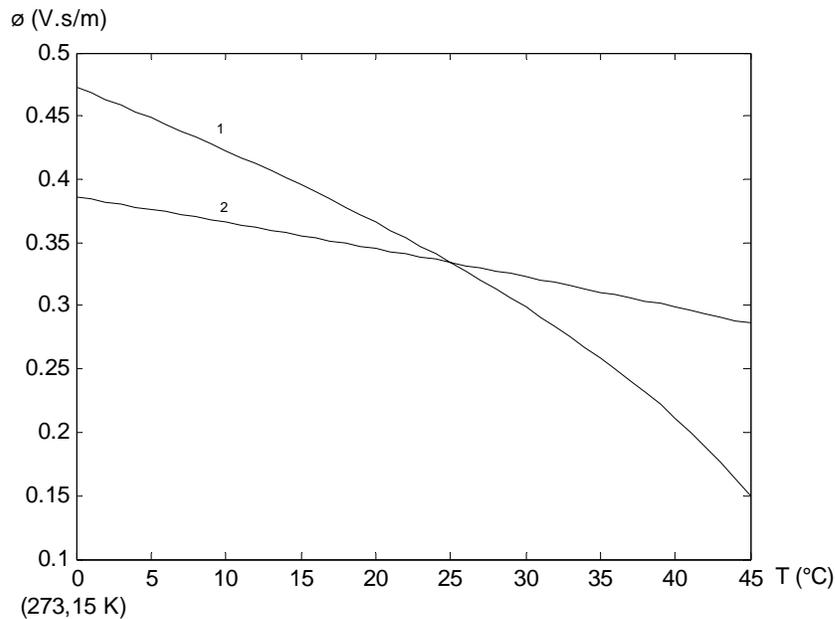


Figura 4.7 : Sensibilidade do circuito com a variação de T_a

Analisando os gráficos da Figura 4.7, as duas curvas mostradas foram obtidas utilizando os mesmos valores das constantes a , b , n , S , \mathcal{G} e V_o . Na curva um, foi fixado o valor da temperatura do sensor em 50 °C e na curva dois 100 °C. Ao analisar o gráfico, temos que quanto maior a temperatura de operação do sensor menor será a faixa de variação da sensibilidade máxima do circuito, para um dado V_{omax} que corresponde a um \mathcal{G}_{max} . No caso acima, a curva dois apresenta menor faixa de variação da sensibilidade máxima. Os gráficos se cruzam à 25 °C pois estabelecemos o valor de β para obter maior sensibilidade do circuito a temperatura ambiente de 25 °C, obedecendo a equação (4.9), conforme abaixo:

Curva 1:

$$\beta = \frac{T_s^2}{T_s - T_a} = \frac{(323,15)^2}{323,15 - 298,15} = 4177,04$$

Curva 2:

$$\beta = \frac{T_s^2}{T_s - T_a} = \frac{(373,15)^2}{373,15 - 298,15} = 1856,55$$

Como mostrado acima, temos dois valores de β distintos assim como as duas temperaturas de operação do circuito também distintas, porém com a temperatura ambiente à 25 °C os dois circuitos trabalharão com a máxima sensibilidade. Ou seja, a sensibilidade do circuito é máxima para qualquer valor de temperatura de operação do sensor, dado uma mesma temperatura ambiente e os parâmetros β e K ajustados, obedecendo a equação (4.6) . Analisando os gráficos da Figura 4.7, ao diminuir a temperatura ambiente, irá aumentar a sensibilidade, logo, para valores de T_a menor que a considerada, que neste caso foi de 25 °C, a sensibilidade é maior o que implica que a tensão de saída irá saturar no valor máximo, antes que a velocidade do vento atinja o valor máximo.

Ao se projetar um anemômetro a sensor aquecido, deve-se escolher os valores das constantes considerando menor valor da faixa de variação da temperatura ambiente, T_a , ou seja, projetar o circuito para operar na menor temperatura da região. Também, deve-se escolher a maior temperatura de operação do sensor pois irá apresentar menor faixa de variação da sensibilidade. Logo, para uma maior temperatura do sensor teremos um menor valor do β , conforme equação (4.9). Já o valor do parâmetro R_∞ influencia no cálculo de K , conforme equação (4.8), logo podemos escolher valores para esta constante de forma a manter o valor da relação entre os resistores R_1 e R_2 (K) aproximadamente iguais e com valores conforme fornecido por fabricantes (encontrados no mercado).

Capítulo 5

Reconstrução dos valores da velocidade do vento

Nesta seção a partir da tensão de saída do amplificador operacional, V_o , iremos reconstruir o sinal de entrada, que é correspondente a velocidade do vento o qual é aplicada na entrada do circuito. Para isto, iremos demonstrar a equação responsável pela obtenção do sinal, ou seja, da velocidade do vento.

Para se estimar a velocidade do vento é necessário medir os valores de tensão na saída do amplificador operacional. Para o NTC, partindo da equação (3.12) (A) temos:

$$V_o \left(\frac{A+K}{AK} \right) = V_{os} + \sqrt{SR_s (a + b\mathcal{G}^n)(T_s - T_a)} \quad (5.1)$$

Considerando-se o ganho $A \gg K$, temos que a velocidade do vento pode ser calculada por:

$$\mathcal{G} = \sqrt[n]{\frac{\left(\frac{V_o}{K} - V_{os} \right)^2}{bSR_s (T_s - T_a)} - \frac{a}{b}} \quad (5.2)$$

Para o PTC, partindo da equação (3.12) (B) temos:

$$V_o \left(\frac{A-K}{AK} \right) = \left(-V_{os} + \sqrt{R_s S (a + b\mathcal{G}^n)(T_s - T_a)} \right) \quad (5.3)$$

Considerando-se o ganho $A \gg K$, temos que a velocidade do vento pode ser calculada para o PTC por:

$$\mathcal{G} = \sqrt[n]{\frac{\left(\frac{V_o}{K} + V_{os} \right)^2}{bR_s S (T_s - T_a)} - \frac{a}{b}} \quad (5.4)$$

Para que a estimação da velocidade do vento seja implementada de forma exata temos que saber os valores dos parâmetros do amplificador operacional V_{os} e A , dos parâmetros do

sensor S , a , b e n , da temperatura e resistência de operação, T_s e R_s (pode-se também calcular R_s em função de T_s sabendo-se o valor das constantes do sensor termo-resistivo R_0 ou R_∞ e β) e da constante K .

De forma aproximada, para as configurações com PTC e NTC, considerando-se $V_{os} = 0$ e $A = \infty$, podemos chegar a equação que estima a velocidade do fluido da seguinte forma, partindo da equação (3.13):

$$\mathcal{G} = \sqrt[n]{\frac{\left(\frac{V_o}{K}\right)^2}{bR_s S(T_s - T_a)} - \frac{a}{b}} \quad (5.5)$$

A equação acima mostra uma forma aproximada de se estimar a velocidade do fluido, que para ser implementada é necessário saber os parâmetros do sensor S , a , b e n . Já os termos T_s e R_s e K são constantes definidas. Dessa forma, a velocidade de vento pode ser calculada a partir de medições dos valores da tensão de saída do amplificador operacional e da temperatura do fluido.

A importância de se verificar a propagação das incertezas nas determinações ou das variações dos parâmetros na estimativa final da velocidade do vento é de grande importância. As incertezas na medição de V_o e T_a interferem diretamente na incerteza final de determinação de \mathcal{G} , e sua redução contribui no aumento da precisão de estimativa [19]. Este estudo está fora do escopo deste trabalho e fica como sugestão para trabalhos futuros.

Capítulo 6

Conclusões

Neste trabalho, mostrou-se uma forma de se calcular a sensibilidade do anemômetro a sensor aquecido na configuração a temperatura constante. Com essa análise, foi mostrado que inicialmente o termistor NTC apresenta maior sensibilidade, e a partir de certa temperatura o sensor PTC apresentará maior sensibilidade, porém o valor desta sensibilidade só irá ultrapassar o valor de máxima sensibilidade alcançada pelo NTC a temperaturas relativamente altas. Dessa forma, a configuração que utiliza o NTC pode ser empregada em aplicações que o sensor seja aquecido a uma temperatura próxima a temperatura ambiente.

A partir da análise do anemômetro utilizando sensor NTC, foi obtido um método que relaciona os parâmetros do sensor e do circuito para que se o sistema opere com máxima sensibilidade. Com esse método, determinou-se um critério para escolha do melhor ponto de operação do circuito, o qual determina a temperatura e parâmetros do sensor, que apresenta menor variação de sensibilidade quando se leva em consideração a variação da temperatura ambiente:

- 1) Conhecendo-se os parâmetros do termistor (R_∞ e β) e da relação K dos resistores, obtemos a temperatura de operação do circuito que correspondem a máxima sensibilidade.
- 2) Caso não se tenha definido o termistor (não conhecemos o valor de β) pode-se definir uma temperatura de operação do circuito, T_s , e conseqüentemente os parâmetros do sensor, (R_∞ e β). Neste caso, se um valor aproximado de β for utilizado, como por exemplo um valor comercial, pode-se refazer o cálculo da temperatura em função deste novo β e obter a nova temperatura de operação do circuito.
- 3) Alternativamente, pode-se escolher uma temperatura de operação e determinar o valor de K para uma máxima sensibilidade. A escolha do valor do parâmetro R_∞ deve ser de forma a obter o valor de R_1 e R_2 (K) aproximadamente iguais e com valores encontrados no mercado.

Mostrou-se que o anemômetro pode operar com máxima sensibilidade a qualquer temperatura de operação do sensor, desde que obedeça o critério acima de escolha dos parâmetros do sensor e do circuito.

6.1 Proposta de continuidade e sugestões

Com a realização deste trabalho, vários pontos de discussão foram levantados e que constituem em propostas de continuidade e sugestões para trabalhos futuros. A seguir serão apresentados alguns temas:

- Em algumas simulações observou-se que o circuito com NTC apresenta respostas mais rápidas do que o circuito com PTC. Dessa forma, pode-se realizar um estudo da dinâmica das configurações de medição com NTC e PTC.
- Estudar o efeito das incertezas nas determinações dos parâmetros de operação do circuito e de medição das grandezas na incerteza final de estimação da velocidade do vento.

Referências Bibliográficas

- [1] CATUNDA. Considerações sobre Circuitos Mistos Reconfiguráveis para Medição - Tese de Doutorado, Campina Grande, Paraíba, Brasil – Dezembro de 2000.
- [2] SARMA, G. R. (1993). Analysis of a Constant Voltage Anemometer Circuit, IMTC93 - Instrumentation and Measurement Technology Conference, pp. 731-736.
- [3] SIEMENS, Componentes Technical Description and Characteristics for Students, edição de 1996, Munique: Siemens AG – Product-information, cap: Passive Components, parte 2: Resistor, p. 548-598.
- [4] AMETHERM CIRCUIT PROTECTION THERMISTORS
- [5] OLIVEIRA, AMAURI, Sensores Termo-Resistivos em Configuração Realimentados, Tese de Doutorado, Campina Grande, Paraíba, Brasil – Fevereiro de 1997.
- [6] JORGENSEN, F. E. (2002). How to Measure Turbulence with Hot-Wire Anemometers – A Practical Guide. Dantec Dynamics.
- [7] ROMULO, P., Compensação da Temperatura do Fluido em Anemômetros a Fio Quente, Tese de Doutorado, Campina Grande, Paraíba, Brasil – Dezembro de 2002.
- [8] HINZE, J. O. (1975). Turbulence, 2 ed. Cap.2 - Principles of Methods and Techniques in the Measurement of Turbulent Flows. Mc Graw-Hill.
- [9] FREYMUTH, P. (1969). Compensation for the Thermal Lag of a Thin Wire Resistance Thermometer by Means of a Constant Temperature Hot-Wire Anemometer Calibrations, Journal of Physics E: Scientific Instruments, Vol. 2, pp. 1001-1002.
- [10] LOMAS, C. G. (1986). Fundamentals of Hot-Wire Anemometry, Cambridge University Press.
- [11] DALLY, J.W., RILEY, W.F., McCONNEL, K.G. Instrumentation for engineering Measurements.
- [12] HANS, V., News temperature measuring methods improving accuracy and dynamic behaviour of sensor.
- [13] FREIRE, R. C. S., DEEP, G. S. e OLIVEIRA, A. (1997). Effect of Operational Amplifier Parameters on the Performance of Feedback Structures with Thermoresistive Sensor, IMTC97 - Instrumentation and Measurement Technology Conference.
- [14] FREIRE, R. C. S. e DEEP, G. S. (1999). Error in the Thermoresistive Sensor – Based Feedback Measurement Configuration Due to DC Amplifier Offset Voltage, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. 48, pp. 50-54.

- [15] FERREIRA. Fluid temperature compensation in a hot wire anemometer using a single sensor (2000).
- [16] FERREIRA, R. P. C., FREIRE, R. C. S., DEEP, G. S., ROCHA NETO, J. S. and OLIVEIRA, A. (2001). "Hot-Wire Anemometer With Temperature Compensation Using Only One Sensor", *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 50, no. 4, pp. 954-958.
- [17] FREIRE AND DEEP. "Error in the thermoresistive sensor-based feedback measurement configuration due to DC amplifier offset voltage," *Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on*, vol. 48, pp. 50-54, 1999.
- [18] CATUNDA, DEEP AND FREIRE. "Compensação da Temperatura na Medição de Concentração de Oxigênio Dissolvido," presented at XII Congresso Brasileiro de Automática, Uberlândia, MG - Brazil, 1998.
- [19] KAVLICO CORPORATION
- [20] FERREIRA, R. P. C. (1999). Anemômetro a Fio Quente com Compensação da Temperatura do Fluido com Sensor Único, Projeto e Pesquisa em Engenharia Elétrica, UFPb.
- [21] FERREIRA, R. P. C., FREIRE, R. C. S., DEEP, G. S., ROCHA NETO, J. S. and OLIVEIRA, A. (2000). "Anemômetro a Fio Quente Compensado em Temperatura com Sensor Único", CBA2000 – Congresso Brasileiro de Automática, pp. 1697-1702.
- [22] FERREIRA, R. P. C., FREIRE, R. C. S. and DEEP, G. S. (2002). "Performance Evaluation of a Fluid Temperature Compensated Single Sensor Constant Temperature Anemometer", IMTC2002 - Instrumentation and Measurement Technology Conference, pp. 969-973.
- [23] OLIVEIRA, A., ROCHA NETO, J. S., DEEP, G. S. e FREIRE, R. C. S. (1996). Thermoresistive Sensor Parameters from Its Static IxV Characteristics, IMTC96 - Instrumentation and Measurement Technology Conference, pp. 586-589.
- [24] OLIVEIRA, A., FREIRE, R. C. S. e DEEP, G. S. (1997a). Compensation of the Fluid Temperature Variation in a Hot-Wire Anemometer, IMTC97 - Instrumentation and Measurement Technology Conference, pp. 1377-1380.
- [25] OLIVEIRA, A., LOBO, P. C., DEEP, G. S., FREIRE, R. C. S., ROCHA NETO, J. S., (1997b). Frequency Domain Analysis of a Constant Temperature Radiation Meter, ASME/97, Washington, USA, pp. 155-161.
- [26] OLIVEIRA, A., LOBO, P. C., DEEP, G. S., FREIRE, R. C. S. e ROCHA NETO, J. S. (1999). Frequency Domain Analysis of an Electrical Substitution Radiometer, ASME/JSME/JSES International Solar Energy Conference, Vol. 121, pp. 110-115.

- [27] BENTELY, J. P., Temperature sensor characteristics and measurement system design, *J. Phys. E: Sei. Instrum.*, V. 17, p. 430-439, 1984.
- [28] NORTON, II. N., *Handbook of Transducers for Electronic Measuring System*, Englewood Cliffs – N.J.: Prentice-Hall Inc., 1969.
- [29] STANKOVIC, D. e ZLATANOVIC, M., A versatile computer controlled measuring system for recording voltage-current characteristics of various resistance sensors.
- [30] GASTER, M. e BRADBURY, L. J. S., The measurement of the spectra of highly turbulent flow by a randomly triggered pulsed-wire anemometer.
- [31] DUEBELING, Ernest, O., *Measurement System application and Design.*, Tokio: McGraw-Hill Kogakusha Ltda.
- [32] FREYMUTH, P., Feedback Control Theory for Constant-temperature Hot-wire Anemometers, *The Review of Scientific Instruments*.
- [33] PERRY, A. e MORRISON, G. I., A study of the Constant-temperature hot-wire Anemometers, *J. Fluid mech.*

Apêndice A – Programas escritos em Matlab

Programa para se obter o gráfico da tensão de saída do amplificador operacional em função da velocidade do vento para o circuito utilizando sensor PTC.

```
v = 0:.1:25;
Ri = 227.497;
a = 2375;
b = 976;
n = 0.459;
Ts = 332.117;
Ta = 298.15;
S = 0.00000008917;
V0 = [4*(Ri*S*(a+b*v.^n)*(Ts-Ta))].^0.5
figure(3)
plot(v,V0,'k')
grid
xlabel('Velocidade do vento (m/s)')
ylabel('Tensao V0 (volts)')
```

Programa para se obter o gráfico da tensão de saída do amplificador operacional em função da velocidade do vento para o circuito utilizando sensor NTC.

```
v = 0:.1:25;
Ri = 560;
a = 2375;
b = 976;
n = 0.459;
Ts = 332.117;
Ta = 298.15;
S = 0.00000008917;
V0 = [4*(Ri*S*(a+b*v.^n)*(Ts-Ta))].^0.5
figure(3)
plot(v,V0,'k')
grid
xlabel('Velocidade do vento (m/s)')
ylabel('Tensao V0 (volts)')
```

Programa para se obter o gráfico referente a sensibilidade do circuito em função da temperatura do sensor utilizando sensor termo-resistivo PTC.

```
Ts = 299:473;
v = 1;
btp = 0.00385;
R0p = 100;
a = 2375;
b = 976;
n = 0.459;
Ta = 298.15;
S = 89.17e-9;
K = 2;
Ri2 = R0p*(1+btp*Ts);
clp = sqrt(Ri2*S.*(Ts-Ta));
for k=1:4
    vv(k) = 5*k;
```

```

        v = vv(k);
        Sens2(k,:) = K*c1p*b*n*v^(n-1)/(2*sqrt(a+b*v^n)); %Sens do dV0/dv do PTC
    end
    figure(1)
    plot(Ts-273.15,Sens2(1,:), 'k',Ts-273.15,Sens2(2,:), 'k',Ts-
    273.15,Sens2(3,:), 'k',Ts-273.15,Sens2(4,:), 'k')
    ylabel('Sensibilidade (v.s/m)')
    xlabel('Temperatura no Temistor (K)')
    grid

```

Programa escrito para se obter o gráfico referente a sensibilidade do circuito em função da temperatura do sensor utilizando sensor termo-resistivo NTC.

```

Ts = 299:473;
v = 1;
btn = 4000;
R0n = 0.0033;
a = 2375;
b = 976;
n = 0.459;
Ta = 298.15;
S = 89.17e-9;
K = 2;
Ril = R0n*exp(btn./Ts);
c1 = sqrt(Ril*S.*(Ts-Ta));
for k=1:4
    vv(k) = 5*k;
    v = vv(k);
    Sens1(k,:) = K*c1*b*n*v^(n-1)/(2*sqrt(a+b*v^n)); %Sens do dV0/dv do NTC
end
figure(1)
plot(Ts-273.15,Sens1(1,:), 'k',Ts-273.15,Sens1(2,:), 'k',Ts-
273.15,Sens1(3,:), 'k',Ts-273.15,Sens1(4,:), 'k')
ylabel('Sensibilidade (v.s/m)')
xlabel('Temperatura no Temistor (K)')
grid

```

Programa escrito para obter gráfico de sensibilidade do circuito em função da temperatura do sensor, para os dois sensores termo-resistivo.

```

Ts = 273.15:473;
v = 1;
btn = 4000;
R0n = 0.0033;
btp = 0.00385;
R0p = 100;
k = 2;
a = 2375;
b = 976;
n = 0.459;
Ta = 298.15;
S = 89.17e-9;
Ril = R0n*exp(btn./Ts);
Ri2 = R0p*(1+btp*Ts);
for k=1:4
    vv(k) = 5*k;
    v = vv(k)
    Sens1(k,:) = (k./2)*((n*b*(v^(n-1)))*((Ril*S).*(Ts-
Ta)).^0.5))./((a+b*v^n).^0.5)
    Sens2(k,:) = (k/2)*((n*b*(v^(n-1)))*((Ri2*S).*(Ts-
Ta)).^0.5))./((a+b*v^n).^0.5)
end

```

```

figure(2)
plot(Ts-273.15,Sens1(1,:), 'k',Ts-273.15,Sens2(1,:), 'k',Ts-
273.15,Sens1(2,:), 'k',Ts-273.15,Sens2(2,:), 'k',Ts-273.15,Sens1(3,:), 'k',Ts-
273.15,Sens2(3,:), 'k',Ts-273.15,Sens1(4,:), 'k',Ts-273.15,Sens2(4,:), 'k')
ylabel('Sensibilidade (v.s/m)')
xlabel('Temperatura no Temistor (K)')
grid

```

Programa para se obter gráfico que mostra o ponto de sensibilidade máxima do circuito com sensor NTC.

```

Ts = 299:473;
v = 1;
btn = 4000;
R0n = 0.0033;
btp = 0.00385;
R0p = 100;
a = 2375;
b = 976;
n = 0.459;
Ta = 298.15;
S = 89.17e-9;
K = 2;
Ri1 = R0n*exp(btn./Ts);
Ri2 = R0p*(1+btp*Ts);
c1 = sqrt(Ri1*S.*(Ts-Ta));
c1p = sqrt(Ri2*S.*(Ts-Ta));
for k=1:4
    vv(k) = 5*k;
    v = vv(k);
    Dsens1(k,:) = K*b*n*v^(n-1)/(2*sqrt(a+b*v^n)) * 0.5*S*Ri1.*(-
btn*Ts+btn*Ta+Ts.^2)./sqrt(S*Ri1.*(Ts-Ta))./Ts.^2; %Curva de max do NTC =
d(dV0/dv)/dTs
end
figure(1)
plot(Ts,Dsens1(1,:),Ts,Dsens1(2,:),Ts,Dsens1(3,:),,Ts,Dsens1(4,:))
ylabel('Sensibilidade (v.s/m)')
xlabel('Temperatura no Temistor (K)')
grid

```

Apêndice B – Modelos desenvolvidos para o Simulink

Modelo do anemômetro a sensor aquecido (em seguida mostraremos os blocos em separado).

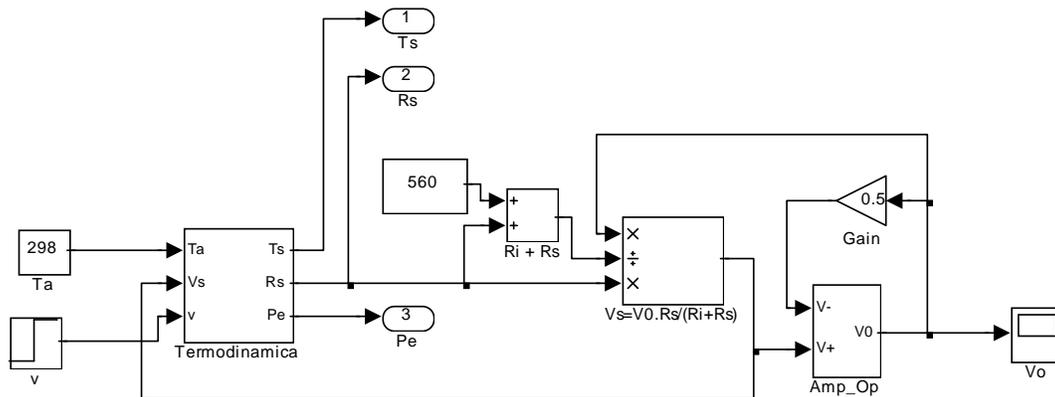


Figura B1 – Representação do circuito da Figura 2.2 no SIMULINK

Cada subsistema, Termodinâmica, Amp_Op apresentam blocos de sistemas que estão representados nas figuras abaixo:

Subsistema Termodinâmica:

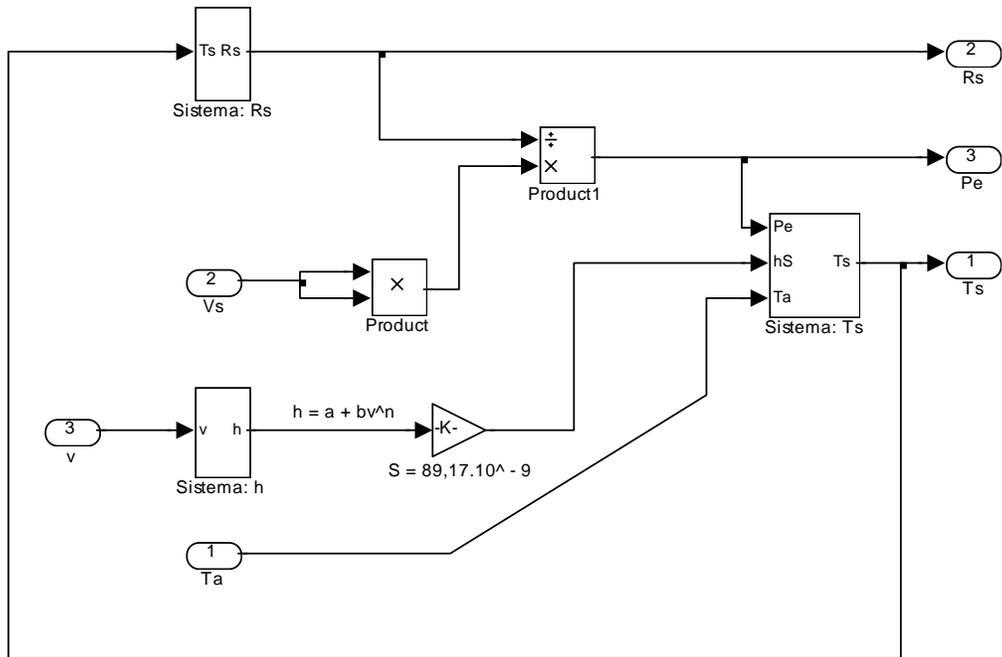


Figura B2 – Subsistema Termodinâmica

Abaixo, seguem as equações referentes ao subsistema termodinâmica.

$$T_s = \frac{P_e + hS}{mc.s + hS}$$

$$T_s = \frac{V_s^2 + R_s hS}{R_s (mc.s + hS)}$$

$$P_e = hS(T_s - T_a) + mc \frac{\partial T_s}{\partial t}$$

$$mcT_s s = P_e - hS(T_s - T_a)$$

$$mcT_s s = P_e - hST_s + hST_a$$

$$(mc.s + hS)T_s = P_e + hST_a$$

$$T_s = \frac{Pe + hST_a}{mc.s + hS}$$

Subsistema Sistema: Rs:

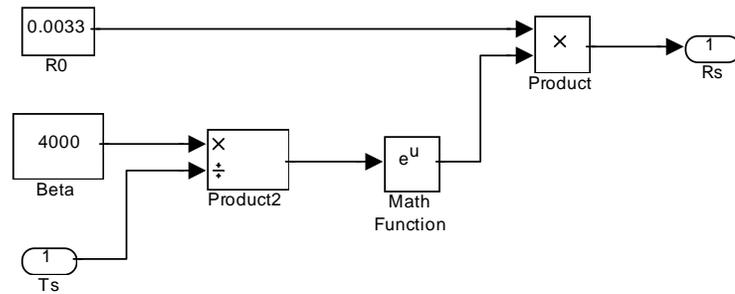


Figura B3 – Subsistema Sistema: Rs

Subsistema Sistema: Ts:

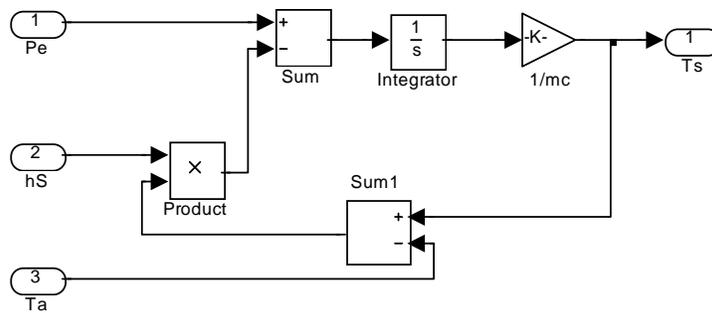


Figura B4 – Subsistema Sistema: Ts

Subsistema Amp_Op:

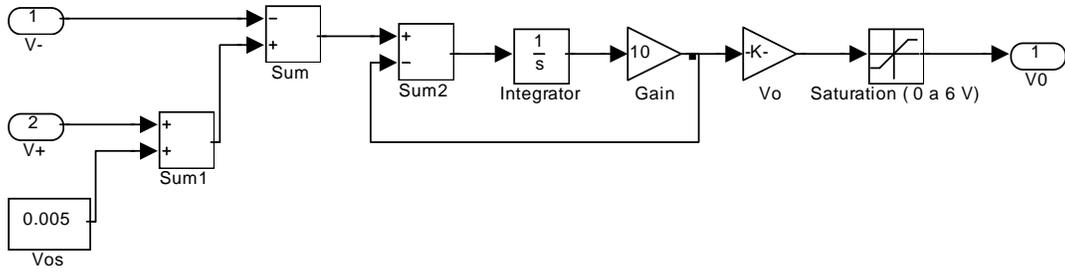


Figura B5 – Subsistema Amp_Op