

# Compensação da Temperatura do Fluido em Anemômetros a Fio Quente

Rômulo Pires Coelho Ferreira

Tese de Doutorado submetida à Coordenação dos Cursos de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande, como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Doutor em Ciências no domínio da Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Processamento da Informação

Raimundo C. S. Freire, Dr. – UFPB  
Orientador

Gurdip S. Deep, Ph.D. – UFPB  
Orientador

Campina Grande, Paraíba, Brasil  
Dezembro de 2002



F383c  
2002

Ferreira, Rômulo Pires Coelho

Compensação da temperatura do fluido em anemômetros a fio quente /Rômulo Pires Coelho Ferreira. - Campina Grande: UFCG, 2002.

94 p.: il.

Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - UFCG/CCT/DEE  
Inclui bibliografia

1. Anemômetro 2. Sensores termo-resistivo 3. Sistemas realimentados I.Título

CDU 621.36(043)

CDU: 621.317.7: 629.1.053.2

COMPENSAÇÃO DA TEMPERATURA DO FLUIDO EM ANEMÔMETROS  
A FIO QUENTE

RÔMULO PIRES COELHO FERREIRA

Tese Aprovada em 06.12.2002

*Raimundo Carlos Silvério Freire*  
RAIMUNDO CARLOS SILVÉRIO FREIRE, Dr., UFCG  
Orientador

GURDIP SINGH DEEP, Ph.D., UFCG  
Orientador

*Pio Caetano Lobo*  
PIO CAETANO LOBO, Ph.D., UNIFEI  
Componente da Banca

*Jacobus Willibrordus Swart*  
JACOBUS WILLIBRORDUS SWART, Dr., UNICAMP  
Componente da Banca

*E. Melcher*  
ELMAR UWE KURT MELCHER, Dr., UFCG  
Componente da Banca

*PS*  
ANTONIO MARCUS NOGUEIRA LIMA, Dr., UFCG  
Componente da Banca

CAMPINA GRANDE – PB  
Dezembro – 2002

# Compensação da Temperatura do Fluido em Anemômetros a Fio Quente

Rômulo Pires Coelho Ferreira

Tese de Doutorado apresentada em Dezembro de 2002

Raimundo C. S. Freire, Dr. – UFPB  
Orientador

Gurdip S. Deep, Ph.D. – UFPB  
Orientador

Jacobus W. Swart  
Componente da Banca

Pio Caetano Lobo  
Componente da Banca

Antonio Marcos Nogueira Lima  
Componente da Banca

Elmar Uwe Kurt Melcher  
Componente da Banca

Campina Grande, Paraíba, Brasil  
Dezembro de 2002

# Dedicatória

---

A Deus, por tudo que tenho na vida.

A minha esposa, Palmira e aos meus filhos Rômulo e Pedro, os maiores presentes que Deus me deu na minha vida.

Aos meus pais Rochael e Edinete, responsáveis por tudo o que sou e construí na vida.

Aos meus irmãos Rildásia, Ricardo, Riliana e Rilena, pelo incentivo dado à realização desse sonho.

Ao meu sogro Segismundo e a minha sogra Zezé, pelo amor dedicado à minha família.

Aos meus orientadores, professores Raimundo Carlos Silvério Freire e Gurdip Singh Deep, pelo trabalho realizado.

# Agradecimentos

---

Aos meus orientadores, professores Raimundo Carlos Silvério Freire e Gurdip Singh Deep, pela valiosa contribuição dada na realização deste trabalho.

Aos professores José Sérgio da Rocha Neto e Amauri Oliveira, pelas discussões sobre o trabalho e pelas contribuições dadas nos artigos publicados.

Ao professor Emerson Jaguaribe, do Laboratório de Termo-Energética do Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal da Paraíba, pelo apoio dado na realização dos experimentos práticos.

Aos amigos Aléssio Trindade, Ivan Sebastião, Luiz Alberto, Antenor Barbosa, pela atenção dada nas discussões sobre este trabalho e pelos momentos de descontração necessários à renovação do espírito para a continuação do trabalho.

A todos os colegas do LPMS e LIEC.

A Ângela, Pedro e Marcos da COPELE pelo apoio dado ao curso.

Ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Alagoas – CEFET-AL, pelo programa de apoio e incentivo na formação e aperfeiçoamento de seus professores, com o objetivo de melhorar a qualidade do ensino e dos profissionais que este Centro fornece ao mercado de trabalho.

Aos professores do curso de Eletrônica do CEFET-AL, por terem acreditado em mim e contribuído de forma direta ou indireta à realização deste trabalho.

Ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e tecnológico), pelo apoio financeiro.

# Resumo

---

Nos anemômetros a fio quente, além da velocidade, o sensor sofre influências da temperatura do fluido. Portanto, deve-se compensar as variações da temperatura do fluido, para que a velocidade seja estimada com o menor erro possível. Na literatura, mostram-se várias estruturas e soluções para a compensação da temperatura do fluido nesse tipo de anemômetro. Normalmente, essas estruturas são compostas por dois sensores para que a compensação de  $T_f$  seja realizada.

A configuração de anemômetro a fio quente mais utilizada é à temperatura constante. Esse tipo de anemômetro possui o menor tempo de resposta, o que permite a sua utilização na medição de velocidades transientes do fluido (turbulência).

Apresenta-se neste trabalho, um estudo dos métodos existentes de compensação da temperatura do fluido e se investigar a possibilidade de se realizar essa compensação com a utilização de apenas um sensor na configuração a temperatura constante.

Para a realização das simulações foi desenvolvido um modelo matemático que representa o anemômetro a fio quente a temperatura constante. Nesse modelo, são consideradas as respostas dinâmicas do sensor e do amplificador operacional.

Outro ponto importante nesse trabalho é o estudo das influências da tensão de desvio de entrada do amplificador operacional, no sistema do anemômetro. Com isso, é possível propor soluções à sua compensação nas medições de velocidades do fluido.

# Abstract

---

A hot-wire anemometer sensor is influenced not only by the fluid velocity, but also by the fluid temperature  $T_f$ . Hence, for accurate fluid velocity measurement, compensation must be provided for the effect of fluid temperature variations. In the literature, configurations described for compensating the effect of variations in fluid temperature  $T_f$  in hot-wire anemometers, usually employ two sensors.

The constant temperature hot-wire anemometer is the most widely used. This anemometer configuration has the shortest response time, which allows its use in instantaneous velocity measurements in transient and turbulent fluid flows.

The present work, analyses existing methods of compensating for fluid temperature variations and investigates the possibility of compensation with a single sensor, for a constant temperature anemometer.

A mathematical model was developed to simulate the constant temperature hot wire anemometers. This model includes the dynamic response limitations of the sensor and operational amplifier.

Another important aspect covered in this work is the study of the influence of the amplifier input offset voltage on fluid velocity measurements and proposals for its compensation.



# Sumário

---

1. Introdução .....	1
1.1. Motivação .....	4
1.2. Organização do Documento .....	7
2. Anemômetro a Fio Quente a Temperatura Constante .....	9
2.1. Equilíbrio Termodinâmico .....	10
2.2. Análise do Circuito .....	12
2.2.1. Estimação de $V_{os}$ .....	13
2.3. Cálculo da Velocidade do Fluido .....	16
2.3.1. Compensação da Tensão de Desvio $V_{os}$ na Estimação de $\vartheta$ .....	17
2.4. Simulações .....	19
2.4.1. Variação de $V_s$ e $V_o$ com a Velocidade do Fluido $\vartheta$ .....	22
2.4.2. Variação de $V_s$ e $V_o$ com a Temperatura do Fluido $T_f$ .....	26
2.4.3. Variação de $V_s$ e $V_o$ com a Tensão de Desvio $V_{os}$ .....	31
2.4.4. Análise dos Resultados das Variações de $V_s$ e $V_o$ com $\vartheta$ , $T_f$ e $V_{os}$ .....	35
2.5. Constante de Tempo do CTA .....	38
3. Compensação da Temperatura do Fluido em Anemômetros CTA .....	40
3.1. CTA com Sensor de Compensação .....	40
3.1.1. Anemômetro com Duas Fontes de Corrente .....	42
3.2. Anemômetro com Dois Sensores de Fio na Ponte .....	45
3.3. Anemômetro com Dois Sensores de Fio Quente .....	47
3.3.1. Estimação da Velocidade .....	48
3.4. CTA com Sensor de Compensação: Uma Solução Analógica .....	49
4. CTA com Sensor Único .....	53
4.1. CTA com Chaveamento de Resistores em Ponte de Wheatstone .....	53
4.1.1. Simulação .....	55
4.1.2. Erro na Estimativa de Velocidades Variantes .....	58
4.2. CTA com Ciclo de Potência Zero .....	62
4.3. Implementação do CTA com Microestruturas MEMS .....	65

5. Controle da Tensão de Desvio $V_{os}$ .....	66
6. Resultados Experimentais .....	70
7. Conclusões .....	73
7.1. Proposta de Continuidade e Sugestões .....	74
Referências .....	76
Apêndice A .....	82
Apêndice B .....	83
Apêndice C .....	86
Apêndice D .....	88
Apêndice E .....	90
Apêndice F .....	92

# Lista de Figuras

---

1.1	Ilustração do princípio de funcionamento do anemômetro a fio quente .....	2
1.2	Diagrama esquemático de um anemômetro a fio quente a temperatura constante (CTA) .....	3
2.1	Diagrama de um CTA, considerando-se as imperfeições do amplificador operacional .....	9
2.2	Curva dos valores de $V_{os}$ medidos (linha contínua) e dos valores estimados com a equação (2.14) (linha pontilhada) .....	15
2.3	Curva do erro obtido na estimação de $V_{os}$ .....	15
2.4	Proposta de um circuito de anemômetro com controle automático da tensão de desvio .....	18
2.5	Variação da tensão de saída do amplificador operacional $V_o$ em relação à variação de velocidade do fluido .....	21
2.6	Resposta do anemômetro às variações de velocidade: a) velocidade do fluido com variação senoidal; b) variação da tensão de saída do amplificador; c) variação da tensão sobre o sensor; d) variação da temperatura de operação do sensor .....	22
2.7	Resposta do anemômetro às variações de velocidade: a) o sensor é submetido a um degrau de velocidade de fluido; b) variação da tensão de saída do amplificador; c) variação da tensão sobre o sensor; d) variação da temperatura de operação do sensor .....	23
2.8	Detalhes da resposta do anemômetro ao degrau de velocidade: a) transição positiva do degrau de velocidade do fluido; b) variação da tensão de saída do amplificador; c) variação da tensão sobre o sensor; d) variação da temperatura de operação do sensor .....	24
2.9	Detalhes da resposta do anemômetro ao degrau de velocidade: a) transição negativa do degrau de velocidade do fluido; b) variação da tensão de saída do amplificador; c) variação da tensão sobre o sensor; d) variação da temperatura de operação do sensor .....	25
2.10	Resposta do anemômetro às variações de temperatura do fluido: a) temperatura do fluido com variação senoidal; b) variação da tensão de saída do amplificador; c) variação da tensão sobre o sensor; d) variação da temperatura de operação do sensor .....	27

2.11 Resposta do anemômetro às variações de temperatura do fluido: a) o sensor é submetido a um degrau de temperatura de fluido; b) variação da tensão de saída do amplificador; c) variação da tensão sobre o sensor; d) variação da temperatura de operação do sensor .....	28
2.12 Detalhes da resposta do anemômetro ao degrau de temperatura: a) transição positiva do degrau de temperatura do fluido; b) variação da tensão de saída do amplificador; c) variação da tensão sobre o sensor; d) variação da temperatura de operação do sensor .....	29
2.13 Detalhes da resposta do anemômetro ao degrau de temperatura: a) transição negativa do degrau de temperatura do fluido; b) variação da tensão de saída do amplificador; c) variação da tensão sobre o sensor; d) variação da temperatura de operação do sensor .....	30
2.14 Resposta do anemômetro às variações de $V_{os}$ : a) variação senoidal de $V_{os}$ ; b) variação da tensão de saída do amplificador; c) variação da tensão sobre o sensor; d) variação da temperatura de operação do sensor .....	31
2.15 Resposta do anemômetro às variações de $V_{os}$ : a) o circuito é submetido a um degrau de $V_{os}$ ; b) variação da tensão de saída do amplificador; c) variação da tensão sobre o sensor; d) variação da temperatura de operação do sensor .....	32
2.16 Detalhes da resposta do anemômetro ao degrau de $V_{os}$ : a) transição positiva do degrau de $V_{os}$ ; b) variação da tensão de saída do amplificador; c) variação da tensão sobre o sensor; d) variação da temperatura de operação do sensor .....	33
2.17 Detalhes da resposta do anemômetro ao degrau de $V_{os}$ : a) transição negativa do degrau de $V_{os}$ ; b) variação da tensão de saída do amplificador; c) variação da tensão sobre o sensor; d) variação da temperatura de operação do sensor .....	34
2.18 Resposta do anemômetro às variações de velocidade do fluido com redução de $V_{os}$ : a) velocidade do fluido com variação senoidal; b) variação da tensão de saída do amplificador; c) variação da tensão sobre o sensor; d) variação da temperatura de operação do sensor .....	36
2.19 Resposta do anemômetro às variações de temperatura do fluido com redução de $V_{os}$ : a) temperatura do fluido com variação senoidal; b) variação da tensão de saída do amplificador; c) variação da tensão sobre o sensor; d) variação da temperatura de operação do sensor .....	37
2.20 Resposta do anemômetro ao degrau de velocidade: a) degrau positivo de velocidade de 3 m/s para 5 m/s; e b) variação da tensão de saída do amplificador .....	38
3.1 Diagrama de um CTA com sensor de compensação .....	41
3.2 Arquitetura de um CTA com duas fontes de corrente controlada .....	42
3.3 Diagrama de um CTA com sensor de compensação (estrutura com duas fontes de corrente controladas) .....	44

3.4	Estrutura de um CTA com dois sensores termo-resistivos .....	45
3.5	Estrutura de um anemômetro com duas pontes de Wheatstone .....	47
3.6	Estrutura de um anemômetro Proposto por Savostenko .....	49
3.7	Diagrama de blocos do anemômetro proposto por Savostenko .....	51
4.1	Estrutura de um CTA com compensação de $T_f$ usando um único sensor .....	54
4.2	Resultado da simulação da estimação de velocidade com CTA com chaveamento de resistores ( $\vartheta=3+2\text{sen}(2\pi 5t) \text{ m/s}$ ) .....	55
4.3	Resultado de uma simulação de um chaveamento dos resistores. a) Chaveamento do resistor $R_x$ para $R_y$ ; b) Transitório ocorrido na tensão de saída do amplificador operacional após um chaveamento .....	56
4.4	Resultado da simulação da estimação de velocidade com CTA com chaveamento de resistores ( $\vartheta=3+2\text{sen}(2\pi 500t) \text{ m/s}$ ) .....	57
4.5	Estimação da velocidade com filtragem digital. A curva contínua corresponde à velocidade do fluido de entrada. A curva pontilhada corresponde à velocidade estimada do fluido na saída do filtro .....	58
4.6	Erro na estimativa da velocidade do fluido com o uso da equação (4.6) .....	61
4.7	CTA com ciclo de potência zero .....	62
4.8	Resultado de simulação de um anemômetro com controle de potência zero ..	63
4.9	Detalhe do resultado de simulação de um anemômetro com controle de potência zero .....	64
5.1	Anemômetro de fio quente com ajuste da tensão de desvio .....	66
5.2	Anemômetro de fio quente com controle automático da tensão de desvio .....	67
5.3	Curvas obtidas experimentalmente com o sistema operando com e sem o controle de $V_{os}$ .....	68
5.4	Curvas obtidas experimentalmente com o sistema operando com e sem o controle de $V_{os}$ .....	69
6.1	Circuito do anemômetro utilizado nos experimentos práticos .....	70
6.2	Estrutura utilizada para a medição de $\vartheta$ .....	71

# Lista de Tabelas

1	Parâmetros Utilizados .....	20
2	Estimação da Velocidade do Fluido .....	72
3	Estimação da Velocidade do Fluido com Variação de $T_f$ .....	72

# Lista de Símbolos

---

- $a$  - Constante da lei de King
- $\alpha$  - Fator de variação da velocidade do fluido entre duas amostras consecutivas
- $b$  - Constante da lei de King
- $\beta$  - Coeficiente de temperatura do sensor
- $\beta_f$  - Coeficiente de temperatura do sensor  $R_f$
- $c$  - 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
- $G$  - Ganho de malha aberta do amplificador operacional
- $h$  - Coeficiente de transferência de calor na superfície do sensor
- $I_s$  - Corrente pelo sensor
- $l$  - Comprimento do sensor
- $m$  - Massa do sensor
- $Ma$  - Número de *Mach*
- $n$  - Constante da lei de King
- $Nu$  - Número de Nusselt
- $\rho$  - Densidade do meio
- $P_e$  - Potência elétrica dissipada pelo sensor
- $P_{ex}$  - Potência elétrica dissipada pelo sensor para a temperatura  $T_{sx}$
- $P_{ey}$  - Potência elétrica dissipada pelo sensor para a temperatura  $T_{sy}$
- $P_{ek}$  - Potência elétrica dissipada pelo sensor na amostra  $k$
- $P_{ek-1}$  - Potência elétrica dissipada pelo sensor na amostra  $k-1$

- $Re$  - Número de Reynolds
- $R_o$  - Resistência elétrica do sensor na temperatura  $T_o$
- $R_f$  - Resistência elétrica do sensor na temperatura  $T_f$
- $R_{of}$  - Resistência elétrica do sensor  $R_f$  na temperatura  $T_o$
- $R_i$  - Resistência elétrica que define a temperatura de operação do sensor  $T_s$
- $R_x$  - Resistência elétrica que define a temperatura de operação do sensor  $T_{sx}$
- $R_y$  - Resistência elétrica que define a temperatura de operação do sensor  $T_{sy}$
- $R_k$  - Resistência elétrica que define a temperatura de operação do sensor  $T_{sk}$  na amostra  $k$
- $R_{k-1}$  - Resistência elétrica que define a temperatura de operação do sensor  $T_{sk-1}$  na amostra  $k-1$
- $R_s$  - Resistência elétrica do sensor na temperatura  $T_s$
- $S$  - Área do sensor
- $t$  - Tempo
- $\tau$  - Constante de tempo do amplificador operacional
- $T_f$  - Temperatura do fluido
- $T_s$  - Temperatura do sensor
- $T_{sx}$  - Temperatura do sensor determinada pelo resistor  $R_x$
- $T_{sy}$  - Temperatura do sensor determinada pelo resistor  $R_y$
- $T_{sk}$  - Temperatura do sensor na amostra  $k$
- $T_{sk-1}$  - Temperatura do sensor na amostra  $k-1$
- $\mu$  - 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
- $V_{sx}$  - Tensão sobre o sensor para a temperatura  $T_{sx}$
- $V_{sy}$  - Tensão sobre o sensor para a temperatura  $T_{sy}$
- $V_{ox}$  - Tensão na saída do amplificador operacional para a temperatura  $T_{sx}$
- $V_{oy}$  - Tensão na saída do amplificador operacional para a temperatura  $T_{sy}$



$V_{sk}$  - Tensão sobre o sensor para a amostra  $k$

$V_{ok}$  - Tensão na saída do amplificador operacional para a amostra  $k$

$V_{sk-1}$  - Tensão sobre o sensor para a amostra  $k-1$

$V_{ok-1}$  - Tensão na saída do amplificador operacional para a amostra  $k-1$

$\vartheta$  - Velocidade do fluido

$\vartheta_k$  - Velocidade do fluido na amostra  $k$

$\vartheta_{k-1}$  - Velocidade do fluido na amostra  $k-1$

$\vartheta_{kc}$  - Velocidade do fluido constante

$\vartheta_{kv}$  - Velocidade do fluido variante

# 1 - Introdução

---

Os instrumentos utilizados para medir velocidades de fluidos são chamados de anemômetros. Eles podem ser de diversos tipos, tais como: de concha, de palheta, de tubo de *Prandtl* (tubos de *pitot*) ou a sensor aquecido (por exemplo a fio quente). Cada tipo é mais adequado para determinadas aplicações: os de concha e os de palheta são mais usados para medir velocidades médias ou que tenham variações lentas; os tubos de *Prandtl* são usados pra medir velocidades elevadas. Já os anemômetros a fio quente são empregados em medições de velocidades variantes de fluidos, por apresentarem pequenas constantes de tempo e uma boa resposta em frequência (LOMAS, 1986) (JORGENSEN, 2002).

A faixa de velocidade que se pode medir com os anemômetros a fio quente é bem ampla, indo de poucos *cm/s* até velocidades supersônicas (dependendo do tipo do sensor), mesmo levando-se em consideração que a sensibilidade desse tipo de anemômetro, diminui com o aumento da velocidade.

A faixa de velocidade de medição e as características do fluido, determinam o tipo de sensor utilizado. Assim, para altos fluxos de massa (= densidade x velocidade) o sensor deve ser bem mais robusto que um sensor utilizado para baixos fluxos de massa, como o ar em baixas velocidades (JORGENSEN, 2002).

A medição de velocidade de fluidos com anemômetros 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 termoresistivo, ou seja, um resistor cuja resistência elétrica  $R_s$  varia com a sua temperatura  $T_s$  ( $R_s=f(T_s)$ ), aquecido eletricamente, a potência elétrica fornecida ao sensor, no estado estacionário, se iguala à potência térmica transferida ao fluido, pela Primeira Lei da Termodinâmica. Uma calibração fornece as constantes da função de regressão entre o fluxo de massa do fluido e a potência elétrica fornecida ao sensor para cada temperatura do fluido  $T_f$  (LOBO, 1966), (SAKAO, 1973) e (JORGENSEN, 2002).

O princípio básico do funcionamento desse tipo de anemômetro é ilustrado na figura 1.1.

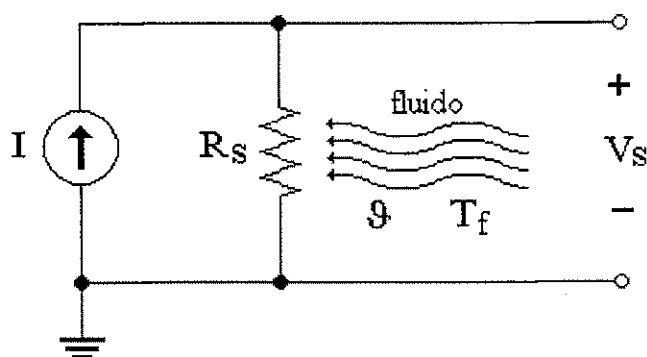


Figura 1.1 – Ilustração do princípio de funcionamento do anemômetro a fio quente

Nos anemômetros a fio quente, o sensor utilizado é normalmente um fio ou filme metálico (platina ou tungstênio) de pequena área transversal (FREYMUTH, 1969) para que apresente um tempo de resposta o menor possível (JORGENSEN, 2002) e para que introduza menor influência no sistema sob medição, ou seja, o sensor não deve modificar o fluxo do fluido nem introduzir perturbações apreciáveis (por suas dimensões físicas), no escoamento.

Considerando-se o sensor aquecido pela passagem de uma corrente elétrica  $I$  e imerso em um fluido com velocidade  $v$  e temperatura  $T_f$  (figura 1.1), na qual a temperatura de operação do sensor  $T_s$  é maior que o máximo valor de  $T_f$  então, devido à troca de calor entre o sensor e o fluido, há uma variação na temperatura do sensor e, conseqüentemente, de sua resistência elétrica  $R_s$ . 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  $v$  (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  $T_f$  e o sinal de saída nos anemômetros a fio quente é função tanto da velocidade do fluido quanto de sua temperatura ( $V_s=f(v, T_f)$ ).

Outras propriedades do fluido ao qual o sensor está imerso (densidade, viscosidade, etc) também afetam o sinal de saída do sistema, porém dependem principalmente das

temperaturas do fluido e do sensor. Portanto, a expressão  $V_s = f(\vartheta, T_f)$ , em que  $f$  é função das propriedades do fluido, é válida para qualquer tipo de fluido.

Nas configurações tradicionais de anemômetros a fio quente o sensor é submetido a uma: tensão constante (CVA – Constant Voltage Anemometer); corrente constante (CCA – Constant Current Anemometer) ou temperatura constante (CTA – Constant Temperature Anemometer). Desses três tipos, o anemômetro a fio quente a temperatura constante (CTA) é o que apresenta o menor tempo de resposta, por isso são os mais indicados para aplicações em medições de fluidos turbulentos (LOMAS, 1986) (SARMA, 1993) (JORGENSEN, 2002).

A configuração tradicional de um CTA é apresentada na figura 1.2. Nesse circuito, um sensor termo-resistivo (normalmente do tipo PTC – Positive Temperature Coefficient) é aquecido por uma corrente elétrica fornecida pela realimentação do circuito até que a ponte de Wheatstone estabilize, ou seja, até que a temperatura de operação do sensor atinja seu valor de regime. Considerando que os resistores  $R_1$  e  $R_2$  sejam fixos (invariantes com a corrente, com o tempo e com a temperatura ambiente), então a temperatura de operação do sensor  $T_s$  é determinada pelo valor do resistor  $R$ . Quando o sensor aquecido é imerso em um fluido em movimento, sua temperatura tende a diminuir, havendo uma variação na tensão sobre o sensor que é percebida pelo amplificador operacional, que realimenta o circuito, aumentando a tensão na sua saída e, conseqüentemente, a corrente através do sensor aumenta de modo a manter sua resistência e sua temperatura constantes. Caso a velocidade do fluido diminua, o processo se dá de forma inversa.

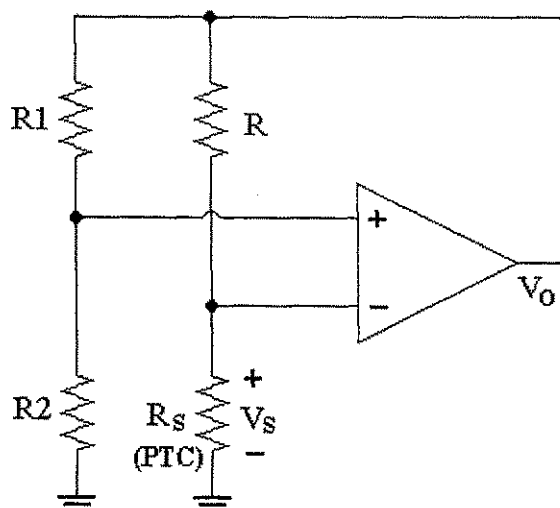


Figura 1.2 – Diagrama esquemático de um anemômetro a fio quente a temperatura constante (CTA)

Como nos anemômetros a fio quente o sinal de saída é função tanto da velocidade do fluido  $\vartheta$  quanto da sua temperatura  $T_f$ , deve-se compensar os efeitos de  $T_f$  para que o valor da velocidade seja estimado com o menor erro possível (FREYMUTH, 1969) (LOMAS, 1986) (JORGENSEN, 2002) (OKAMOTO, OHHASHI et al., 1994) (SAKAO, 1973) (SAVOSTENKO, SERBIN, 1989) (SMITS, PERRY et al., 1978) (TAKAGI, 1986).

A estimação da velocidade do fluido  $\vartheta$  é feita a partir da equação do equilíbrio termodinâmico, na qual o coeficiente de transferência de calor com o meio varia com  $\vartheta$ . A equação de King (HINZE, 1975) 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:  $h=a+b\vartheta^n$  ( $a$ ,  $b$  e  $n$  são constantes do sensor); 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  $Re=\rho d\vartheta/\mu$  ( $Nu$  é o número de Nusselt,  $Re$  é o número de Reynolds,  $d$  é o diâmetro do sensor,  $\rho$  é a densidade do meio e  $\mu$  é sua viscosidade).

Neste trabalho, considera-se que o coeficiente de transferência de calor entre o sensor e o meio, é função apenas da velocidade do fluido ( $h=a+b\vartheta^n$ ), da mesma forma que em (FREYMUTH, 1969) (LOMAS, 1986) (JORGENSEN, 2002). 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 ( $Nu=a+b(\rho d\vartheta/\mu)^n$ ) que relaciona as grandezas físicas densidade e viscosidade do meio.

## 1.1 – Motivação

O principal problema na estimação da velocidade do fluido  $\vartheta$  com anemômetros a fio quente é a influência da sua temperatura  $T_f$ . Várias estruturas são apresentadas na literatura (e descritas neste trabalho), com soluções para a compensação da variação da temperatura  $T_f$  na medição desta velocidade (FREYMUTH, 1969) (LOMAS, 1986) (JORGENSEN, 2002) (OKAMOTO, OHHASHI et al., 1994) (SAKAO, 1973)

(SAVOSTENKO, SERBIN, 1989) (SMITS, PERRY et al., 1978) (TAKAGI, 1986) (OLIVEIRA, 1997c).

Na literatura pesquisada, o que se tem proposto para compensar os efeitos da variação da temperatura do fluido sobre a medição de sua velocidade, é a utilização de um sensor adicional (sensor de compensação) não aquecido. Em 1973, SAKAO propôs uma configuração que utilizava duas pontes com dois sensores aquecidos, em temperaturas distintas, para se compensar  $T_f$ . OLIVEIRA, FREIRE et al. (1997a) propuseram uma estrutura na qual a velocidade do fluido é estimada com um anemômetro a fio quente com a utilização de um único sensor, porém o método foi desenvolvido para velocidades constantes e não foram analisados os efeitos causados ao sistema pela presença da tensão de desvio do amplificador operacional  $V_{os}$ .

Nas estruturas tradicionais de anemômetros a fio quente com compensação da temperatura do fluido, dois sensores são utilizados, um aquecido e o outro não. O sensor aquecido, responde à velocidade e à temperatura do fluido. O sensor não aquecido, responde apenas à temperatura do fluido, ou seja, esse sensor é utilizado para medir  $T_f$ .

Dessa forma, o sensor não aquecido pode ser de um outro tipo, diferente do sensor aquecido. Isso implica em circuitos de condicionamentos de sinais diferentes para os dois sensores, podendo haver tempos de respostas diferentes para cada sensor. Isso restringe o anemômetro a uma faixa de compensação da temperatura do fluido, na qual as diferenças nos tempos de respostas sejam o menor possível.

Um outro problema associado a estruturas que utilizam dois sensores, é a proximidade dos mesmos. Para fluidos com gradientes de temperatura elevados, a distância física entre os sensores pode comprometer a exatidão da compensação, uma vez em que os sensores estariam em temperaturas de fluido diferentes. Como os sensores são, normalmente, de tipos e tamanhos diferentes, a aproximação entre eles é dificultada.

Por outro lado, dependendo dos tipos dos sensores, como no caso da estrutura proposta por (SAKAO, 1973) em que são do mesmo tipo, a aproximação entre eles pode contribuir para a troca de calor entre os sensores. Com isso, um sensor receberia calor do outro sensor, e o efeito no sinal seria interpretado como uma variação na temperatura do fluido, mesmo que o gradiente de temperatura fosse pequeno.

Uma solução para esse problema é a utilização de anemômetros a fio quente com sensor único. Com isso, se elimina o problema dos diferentes tempos de resposta entre os sensores e o gradiente de temperatura do fluido.

Propõe-se neste trabalho uma investigação no sentido de se realizar a compensação de  $T_f$  na estimação das velocidades transientes do fluido com anemômetros a fio quente com um único sensor (OLIVEIRA, FREIRE et al., 1997a) (FERREIRA, FREIRE et al., 2000, 2001 e 2002).

Um outro tema abordado na literatura sobre anemômetros a fio quente é a influência da tensão de desvio de entrada do amplificador operacional  $V_{os}$  nas configurações realimentadas (PERRY e MORRISON, 1971) (FREIRE, DEEP et al., 1997 e 1999). Essa tensão afeta a estabilidade do sistema, influi na temperatura de operação do sensor e no tempo de resposta do circuito do anemômetro (PERRY e MORRISON, 1971) (FERREIRA, FREIRE et al., 2001). Portanto, como a tensão de desvio afeta o sistema, erros na estimação da velocidade do fluido são esperados.

Como a tensão de desvio do amplificador operacional afeta a estabilidade e o tempo de resposta do sistema, seu valor deve ser ajustado de forma que o sistema possua o menor tempo de resposta possível e não entre na região de instabilidade que leva o sistema à oscilação. Entretanto esta tensão varia com a temperatura ambiente e com a corrente de saída do amplificador. Assim, propõe-se neste trabalho um circuito eletrônico para o controle automático de  $V_{os}$ , de forma que o valor calibrado seja corrigido automaticamente.

Nesse trabalho, mostra-se como  $V_{os}$  influi na resposta temporal do sistema e apresenta-se uma metodologia na qual a estimação da velocidade do fluido é feita independentemente da variação da tensão de desvio do amplificador operacional.

Para as realizações dos estudos analíticos, necessários à compreensão das formas de compensação de  $T_f$ , e das simulações das configurações de anemômetros citadas na literatura e propostas nesse trabalho, foi desenvolvido um modelo matemático que representa o sistema do anemômetro a fio quente a temperatura constante. Consideram-se nesse modelo, as respostas dinâmicas do sensor termo-resistivo e do amplificador operacional, bem como a presença da tensão de desvio de entrada.

Com esse modelo, é possível simular:

- As influências da temperatura do fluido no sinal de saída do anemômetro e na estimação da velocidade do fluido;
- As influências da tensão de desvio do amplificador operacional no sinal de saída do anemômetro e na estimação da velocidade do fluido;
- A resposta em frequência do sensor e do amplificador operacional;
- Os métodos de compensação da temperatura do fluido em anemômetros CTA citados na literatura;
- Os métodos de compensação da temperatura do fluido em anemômetros CTA com sensor único, proposto nesse trabalho.

## 1.2 – Organização do Documento

O texto deste trabalho está dividido em 6 capítulos:

No capítulo 2 apresenta-se um estudo sobre o anemômetro a fio quente a temperatura constante para o desenvolvimento do modelo matemático do sistema. Com isso, mostra-se o funcionamento do circuito com as influências das grandezas físicas (como velocidade e temperatura do fluido) e elétricas (como a tensão de desvio), as expressões para estimação da velocidade do fluido e os procedimentos para as simulações levando-se em consideração as respostas dinâmicas do sensor termo-resistivo e do amplificador operacional real.

No capítulo 3 são abordados e discutidos os métodos de compensação da variação e da influência da temperatura do fluido  $T_f$  na estimação de sua velocidade  $\vartheta$  apresentados na literatura (estado da arte).

No capítulo 4 apresentam-se as propostas de arquiteturas de anemômetros a fio quente a temperatura constante compensados em temperatura com a utilização de apenas um sensor termo-resistivo. São mostrados os procedimentos analíticos para cada método e os resultados de simulação a partir do modelo matemático desenvolvido.



No capítulo 5 apresentam-se o circuito de controle automático da tensão de desvio do amplificador operacional.

No capítulo 6 apresentam-se os resultados experimentais práticos obtidos.

No capítulo 7 apresentam-se as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

## 2 – Anemômetro a Fio Quente a Temperatura Constante

Apresenta-se neste capítulo um estudo da configuração em ponte de Wheatstone do anemômetro a fio quente a temperatura constante (CTA). Com isso, é possível observar as respostas do circuito às variações de velocidade de fluido  $\vartheta$ , de sua temperatura  $T_f$  e da tensão de desvio do amplificador operacional  $V_{os}$ . Para isso é desenvolvido um modelo matemático (analítico) que represente o CTA.

Com esse modelo, pode-se determinar expressões para a estimação da velocidade do fluido e verificar como sua temperatura influi nessa estimação. Com isso, é possível analisar e implementar as estruturas tradicionais de compensação de  $T_f$  em anemômetros a fio quente, citadas na literatura, bem como a estrutura de um CTA com compensação de  $T_f$  com sensor único. As simulações dos métodos de compensação das influências da temperatura do fluido na medição da sua velocidade também são realizadas a partir do modelo apresentado.

O diagrama esquemático do CTA é mostrado na figura 2.1. Para o estudo desse anemômetro, considerou-se a presença da tensão de desvio de entrada do amplificador operacional  $V_{os}$  e sua resposta em frequência para o desenvolvimento do modelo matemático (FERREIRA, FREIRE et al., 2001).

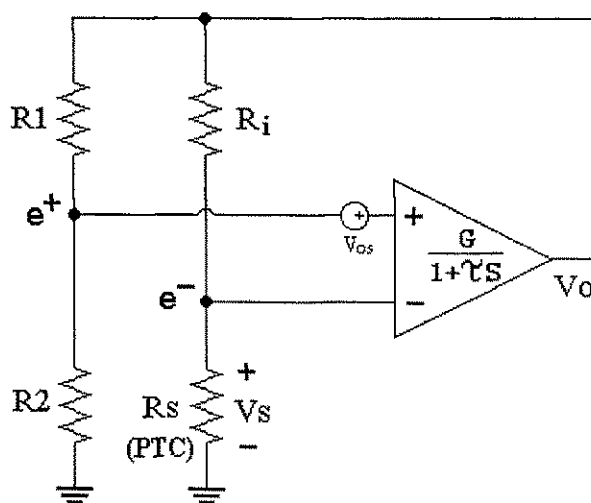


Figura 2.1 – Diagrama de um CTA, considerando-se as imperfeições do amplificador operacional

O estudo desse CTA é feito a partir da análise da equação da conservação de energia (como é citado na literatura), na qual relacionam-se as grandezas físicas envolvidas, como calor, trabalho e energia interna do sensor, temperaturas do sensor e do fluido, bem como os parâmetros do circuito, como tensão de desvio e as tensões sobre o sensor e na saída do amplificador operacional.

## 2.1 – Equilíbrio Termodinâmico

Pela configuração em ponte de Wheatstone do circuito do CTA, mostrado na figura 2.1, a temperatura do sensor é mantida constante através da realimentação do circuito. Uma variação na velocidade do fluido tende a desequilibrar a ponte, uma vez que a variação resultante na transferência de calor do sensor (PTC) tende a variar sua temperatura  $T_s$  e, conseqüentemente, sua resistência  $R_s$ . Com a realimentação, a corrente que passa pelo sensor varia de forma que, em condições ideais ( $V_{os}$  nulo e  $G$  infinito), a ponte volta a se equilibrar e o novo valor da tensão  $V_s$  é associado ao valor atual de  $\vartheta$ .

Observa-se que uma variação na velocidade do fluido implica na variação da troca de calor entre o sensor e o fluido. Para manter a temperatura constante, a corrente elétrica pelo sensor também varia, ou seja, varia-se a potência elétrica entregue ao sensor, de forma que o equilíbrio da ponte seja re-estabelecido. Pode-se chegar a essa conclusão diretamente da equação de energia, para um fio com comprimento de, pelo menos, 200 vezes o seu diâmetro, na qual a condução axial de calor é desprezível em comparação com a convecção (FREYMUTH, 1969):

$$P_e = hS(T_s - T_f) + mc \frac{dT_s}{dt} \quad (2.1)$$

na qual:  $P_e$  é a potência elétrica entregue ao sensor,  $S$  é a área do sensor exposta ao fluido,  $T_s$  é a sua temperatura e  $T_f$  é a temperatura do fluido,  $h$  é o coeficiente de transferência de calor entre o sensor e o fluido,  $m$  é a massa do sensor,  $c$  o seu calor específico,  $t$  é o tempo.

Pela equação de King, tem-se que:

$$h = a + b\vartheta^n \quad (2.2)$$

na qual,  $a$ ,  $b$  e  $n$  são constantes que devem ser determinadas experimentalmente na condição de operação do sensor (Apêndice A) e  $\vartheta$  é a velocidade do fluido. Para baixas velocidades ( $Ma \ll 1$ ) o valor típico de  $n$  é 0,5 (JORGENSEN, 2002).

FREYMUTH e TAKAGI usam a equação (2.2) para representar o coeficiente de transferência de calor entre o sensor e o fluido. Os autores SAKAO, KOCH e GARTSHORE, SMITS et al., LI e GOW, DAVIS e LOMAS usam a expressão  $Nu = a + bRe^n$  (válido para fluidos em geral com baixos valores do número de Mach ( $Ma$ )) no qual  $Re = \rho d \vartheta / \mu$  ( $Nu$  é o número de Nusselt,  $Re$  é o número de Reynolds,  $d$  é o diâmetro do fio do sensor,  $\rho$  é a densidade do meio e  $\mu$  é sua viscosidade). Nesse trabalho, considera-se que o fluido em estudo é o ar, com baixa velocidade ( $Ma \ll 1$ ) e viscosidade e densidade constantes, o que permite o uso da equação (2.2).

Para um sensor termo-resistivo do tipo metálico (PTC), a relação entre sua resistência e sua temperatura é dada aproximadamente por:

$$R_s \approx R_o (1 + \beta T_s) \quad (2.3)$$

no qual  $R_o$  é a resistência do sensor a  $0^\circ\text{C}$  e  $\beta$  é o coeficiente de temperatura de sua resistência elétrica.

Da equação (2.3), tem-se que,

$$T_s = \frac{1}{\beta} \left( \frac{R_s}{R_o} - 1 \right) \quad (2.4)$$

Derivando-se a equação (2.4), tem-se,

$$\frac{dT_s}{dt} = \frac{1}{\beta R_o} \frac{dR_s}{dt} \quad (2.5)$$

A expressão da potência elétrica dissipada pelo sensor é dada por:

$$P_e = \frac{V_s^2}{R_s} = I_s^2 R_s \quad (2.6)$$

Assim, a partir das equações (2.2), (2.5) e (2.6) a equação (2.1) pode ser re-escrita como:

$$\boxed{\frac{dR_s}{dt} = \frac{\beta R_0}{mc} \left[ \frac{V_s^2}{R_s} - S(a + b\vartheta^n)(T_s - T_f) \right]} \quad (2.7)$$

A variação da resistência do sensor, com a velocidade e temperatura do fluido, é expressa pela equação (2.7). Observa-se que, na condição de temperatura constante,  $dR_s/dt=0$ , ou seja, a potência elétrica dissipada pelo sensor é igual às perdas de calor para o fluido.

## 2.2 – Análise do Circuito

Para a análise do circuito do anemômetro (figura 2.1), considerou-se no modelo matemático do amplificador operacional apenas a tensão de desvio de entrada  $V_{os}$  (OLIVEIRA, FREIRE et al., 1997) e sua resposta em frequência.

A partir do circuito da figura 2.1, pode-se escrever que:

$$V_o = \frac{G}{1 + \tau s} (e^+ - e^- + V_{os}), \quad (2.8)$$

na qual,

$$e^+ = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_o = k V_o, \quad (2.9)$$

e

$$e^- = \frac{R_s}{R_i + R_s} V_o = V_s \quad (2.10)$$

Passando a equação (2.8) para o domínio do tempo, tem-se:

$$\boxed{\frac{dV_o}{dt} = \frac{G(kV_o - V_s + V_{os}) - V_o}{\tau}} \quad (2.11)$$

em que,

$$\tau = \frac{1}{2\pi f_c} \quad (2.12)$$

na qual,  $f_c$  é a frequência de corte do amplificador operacional e  $G$  o ganho em malha aberta.

A equação (2.11) relaciona à variação da tensão de saída do amplificador operacional  $V_o$  com as variações da tensão de desvio  $V_{os}$  e da tensão sobre o sensor  $V_s$ , que é função da velocidade e temperatura do fluido.

Portanto, pode-se usar as equações (2.7) e (2.11) como o modelo matemático do CTA, ou seja, essas equações descrevem o comportamento dinâmico do circuito do anemômetro mostrado na figura 2.1. A partir dessas equações é possível realizar as simulações necessárias ao estudo do anemômetro apresentado neste trabalho.

As equações (2.7) e (2.11) formam um sistema não-linear cuja solução numérica é fortemente dependente das condições iniciais. Para as simulações, as condições iniciais são obtidas a partir da condição de regime estacionário, cujo desenvolvimento analítico é apresentado no Apêndice B.

### 2.2.1 – Estimação de $V_{os}$

Para essa estrutura de CTA, é possível estimar o valor da tensão de desvio  $V_{os}$  a partir das tensões  $V_s$  e  $V_o$ .

A partir da condição de regime estacionário da equação (2.11) e considerando-se as equações (2.9) e (2.10), pode-se escrever que:

$$V_o = G(kV_o - V_s + V_{os}) \quad (2.13)$$

Considerando-se que o ganho do amplificador  $G$  é muito grande, ou seja,  $1/G \ll k$ , tem-se que:

$$\boxed{V_{os} = V_s - kV_o} \quad (2.14)$$

A equação (2.14) relaciona  $V_{os}$  com as tensões sobre o sensor e na saída do amplificador operacional  $V_s$  e  $V_o$ , respectivamente. Observa-se por essa equação que o  $G$  desapareceu com a consideração de que  $1/G \ll k$ . Essa consideração sempre será feita na

condição de regime estacionário. Para o caso das análises dos comportamentos dinâmicos do sistema, o ganho  $G$  será considerado.

Para verificar a validade da expressão, foram realizados experimentos práticos nos quais foram medidos valores diferentes de  $V_{os}$  e, para cada valor adquirido da tensão de desvio, foram adquiridas as tensões  $V_s$  e  $V_o$  simultaneamente. Para isso, usou-se o amplificador operacional TL081, com ajuste da tensão de desvio feito a partir de um potenciômetro. As aquisições das tensões  $V_s$ ,  $V_o$  e  $V_{os}$  foram feitas com multímetros digitais de 6½ dígitos conectados a um PC através de uma interface GPIB.

Para medir a tensão  $V_{os}$ , utilizou-se o circuito da figura 2.1, no qual foi aterrada a entrada não inversora do amplificador ( $e^+ = 0$ ), com isso o circuito do anemômetro é modificado para uma configuração de um amplificador inversor. Dessa forma a corrente que passa pelo sensor é muito pequena, já que não existe excitação elétrica no circuito. Mesmo assim, o sensor termo-resistivo foi isolado para não ser submetido a fluido em movimento. Sem a excitação no circuito, a tensão presente na saída do amplificador é proporcional à tensão de desvio de entrada do mesmo. Conhecendo-se o ganho do circuito, pode-se estimar o valor  $V_{os}$  ( $V_o = (1 + R_f/R_s)V_{os}$ ).

Dessa forma, o valor de  $V_{os}$  pode ser obtido com a medição de  $V_o$  através de um multímetro digital. Depois disso, a entrada não inversora do amplificador operacional não é mais aterrada e o circuito volta a operar normalmente. Nesse momento são adquiridas as tensões  $V_s$  e  $V_o$  através dos multímetros digitais.

Com os valores obtidos em laboratório das tensões  $V_s$  e  $V_o$ , estimou-se, a partir da equação (2.14), os valores de  $V_{os}$ . Para os valores dos resistores  $R_1$  e  $R_2$  (figura 2.1), o valor de  $k$  é 0,5013. Os resultados são mostrados na figura 2.2.

Na figura 2.2, os valores das tensões de desvio adquiridas são representados pela curva contínua. Os valores de  $V_{os}$  estimados a partir da equação (2.14), são representados pela curva pontilhada.

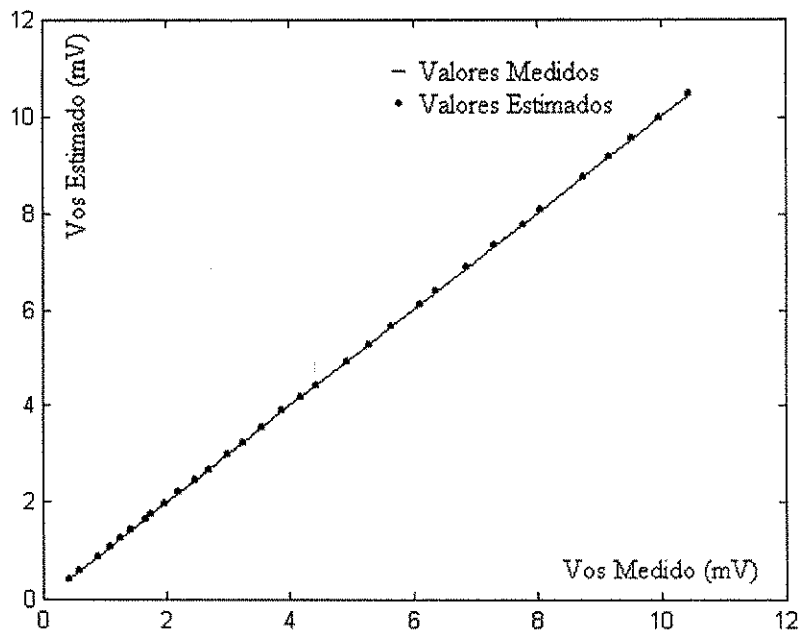


Figura 2.2 – Curva dos valores de  $V_{os}$  medidos (linha contínua) e dos valores estimados com a equação (2.14) (linha pontilhada)

Neste experimento prático, foram adquiridos 32 valores diferentes de  $V_s$ ,  $V_o$  e  $V_{os}$ , entre  $408 \mu V$  e  $10,45 mV$ . O erro obtido entre os valores de  $V_{os}$  medidos e os valores estimados a partir da equação (2.14), são mostrados na figura 2.3.

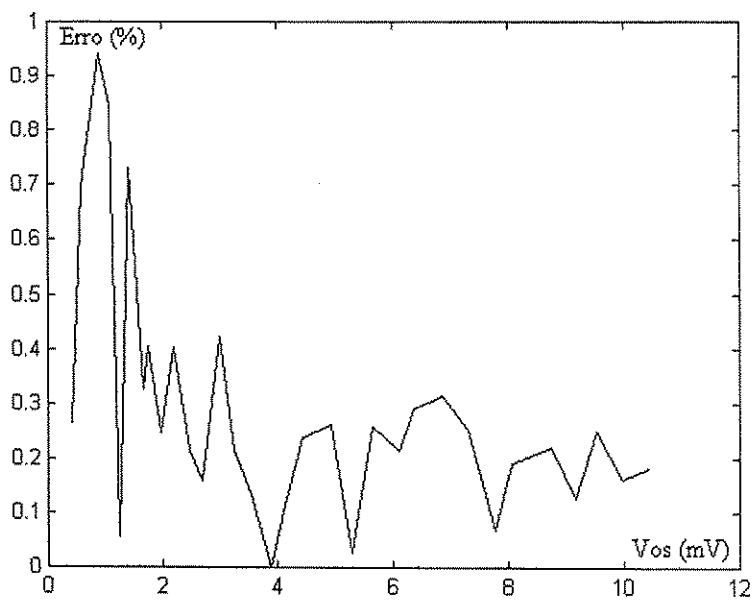


Figura 2.3 – Curva do erro obtido na estimativa de  $V_{os}$ .



Para esse conjunto de valores obtidos nos experimentos, o erro máximo obtido foi de 0,94 %. Observa-se na figura 2.3, que o erro na estimativa de  $V_{os}$  a partir de 2 mV é abaixo de 0,4 %. Esses resultados comprovam a validade do método (equação 2.14).

## 2.3 – Cálculo da Velocidade do Fluido

A velocidade de fluido  $\vartheta$  é estimada a partir da condição de escoamento estacionário (velocidade e temperatura constantes) da equação (2.1) ( $dT_s/dt=0$ ) e pela equação (2.2) (OLIVEIRA, FREIRE et al., 1997a). Assim:

$$\vartheta = \left\{ \frac{I \left[ \frac{P_e}{S(T_s - T_f)} - a \right]}{b} \right\}^{\frac{1}{n}} \quad (2.15)$$

Observa-se pela equação (2.15) a dependência do cálculo da velocidade do fluido com sua temperatura  $T_f$ . A potência elétrica  $P_e$  e a temperatura de operação do sensor  $T_s$  podem ser obtidas a partir das tensões  $V_s$  e  $V_o$ , conforme mostrado a seguir.

Para o sensor termo-resistivo usado, o valor da temperatura  $T_s$  pode ser obtido a partir do valor da resistência elétrica do sensor  $R_s$ , equação (2.3). Pela equação (2.10) pode-se estimar o valor de  $R_s$ , assim:

$$R_s = \frac{R_i V_s}{V_o - V_s} \quad (2.16)$$

Com isso, a partir da equação (2.16), a equação (2.4) pode ser re-escrita como:

$$T_s = \frac{1}{\beta} \left( \frac{R_i V_s}{R_o (V_o - V_s)} - I \right) \quad (2.17)$$

A partir da equação (2.16), a equação (2.6) pode ser re-escrita como:

$$P_e = \frac{V_s (V_o - V_s)}{R_i} \quad (2.18)$$

As equações (2.17) e (2.18) expressam os cálculos da temperatura de operação do sensor  $T_s$  e da potência elétrica entregue ao sensor  $P_e$ , respectivamente, obtidas a partir das tensões sobre o sensor  $V_s$  e na saída do amplificador operacional  $V_o$ .

Observa-se pela equação (2.15) que para a estimativa da velocidade do fluido, é necessário o conhecimento do valor de sua temperatura.

### 2.3.1 – Compensação da tensão de desvio $V_{os}$ na estimativa de $\vartheta$

Pelas equações (2.15), (2.17) e (2.18), observa-se que a estimativa da velocidade do fluido é feita a partir das tensões  $V_s$  e  $V_o$ , porém nos trabalhos apresentados na literatura, a estimativa da velocidade é feita apenas com o sinal de saída do anemômetro  $V_o$  (figura 2.1). Para que a temperatura e a potência elétrica do sensor (equações (2.17) e (2.18)) possam ser estimadas apenas com  $V_o$ , a tensão sobre o sensor  $V_s$  deve ser representada em função de  $V_o$ , como na equação (2.14). Assim, as equações (2.17) e (2.18) podem ser re-escritas como:

$$T_s = \frac{I}{\beta} \left( \frac{R_i(V_{os} + kV_o)}{R_o[V_o(k+1) - V_{os}]} - 1 \right) \quad (2.19)$$

e,

$$P_e = \frac{V_o V_{os} - V_{os}^2 + kV_o^2(k+1)}{R_i} \quad (2.20)$$

Dessa forma, observa-se claramente a influência de  $V_{os}$  na estimativa da temperatura e da potência elétrica do sensor. Com isso, a estimativa da velocidade do fluido também é afetada pela tensão de desvio.

Portanto, para a estimativa da velocidade do fluido feita a partir da tensão de saída do circuito  $V_o$  (figura 2.1), utiliza-se às equações (2.15), (2.19) e (2.20). O que implica na necessidade do conhecimento da tensão de desvio  $V_{os}$ , que na prática não é uma tarefa simples de se realizar em tempo real para a estimativa da velocidade. Além disso, essa tensão varia com a temperatura do ambiente em que está imerso o amplificador operacional.

A solução adotada na literatura é o ajuste da tensão de desvio do amplificador no circuito de condicionamento de sinal (ou nos terminais próprios para essa função em alguns tipos de amplificadores) (JORGENSEN, 2002). Essa solução não resolve o problema da compensação de  $V_{os}$ , apenas tende a minimizar o seu efeito sobre a estimação da velocidade, uma vez que seu valor não é constante.

Com o método apresentado na seção 2.3 para a estimação da velocidade de fluido a partir dos valores das tensões sobre o sensor  $V_s$  e na saída do amplificador operacional  $V_o$  (equações (2.15), (2.17) e (2.18)), a compensação de  $V_{os}$  é feita automaticamente, já que seu valor está associado a essas tensões. Sendo, portanto, uma alternativa para a estimação da velocidade do fluido independente de  $V_{os}$ .

Entretanto, a tensão de desvio  $V_{os}$  também influi na resposta temporal do sistema (FREIRE, DEEP et al., 1998). Quanto maior essa tensão, pior essa resposta temporal. Como, com o método apresentado na seção 2.2.1 (equação (2.14)), pode-se estimar a tensão de desvio, se for usado um amplificador operacional com ajuste dessa tensão, pode-se então, minimizar a resposta temporal sem que o sistema fique instável. Se essa estimativa da tensão de desvio for feita dinamicamente, pode-se também compensar a sua variação, como é mostrado no capítulo 5.

Uma proposta para o controle automático da tensão de desvio, é o desenvolvimento de um circuito eletrônico que implemente a equação (2.14) para realizar a correção de  $V_{os}$ . Para isso, teria que se utilizar um amplificador operacional com ajuste de tensão de desvio (LM741, TL081). O diagrama desse sistema é mostrado na figura 2.4.

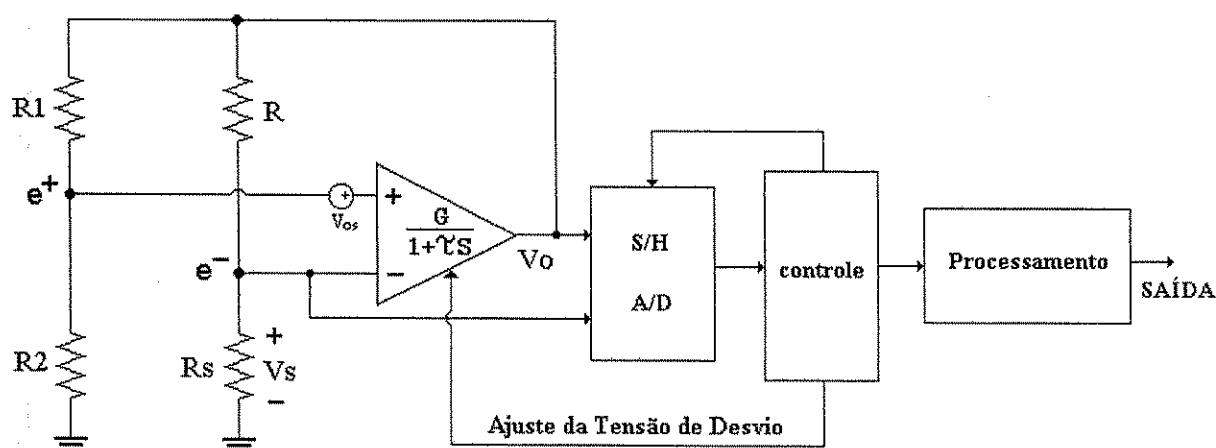


Figura 2.4 – Proposta de um circuito de anemômetro com controle automático da tensão de desvio

No circuito da figura 2.4 mostra-se uma configuração de um anemômetro a fio quente a temperatura constante com ajuste automático de  $V_{os}$ . As tensões sobre o sensor  $V_s$  e na saída do amplificador operacional  $V_o$  são adquiridas (amostradas) através de um *bloco de conversão A/D*, cuja frequência de amostragem é definida pelo *bloco de controle*. A partir das amostras adquiridas de  $V_s$  e  $V_o$ , a tensão  $V_{os}$  é estimada, a partir da equação (2.14), no *bloco de controle*, e depois compara com o valor de  $V_{os}$  calibrado. Com isso, um sinal de correção de  $V_{os}$  é gerado e enviado aos pinos de ajuste de tensão de desvio do amplificador operacional. Na amostra seguinte, os valores de  $V_s$  e  $V_o$  são novamente adquiridos e o processo de ajuste de  $V_{os}$  se repete. Com isso, observa-se que a partir das tensões adquiridas,  $V_{os}$  é estimado e o sistema envia os sinais de ajuste de modo que seu valor varie o mínimo possível em torno do valor calibrado.

No diagrama proposto na figura 2.4, os valores das tensões  $V_s$  e  $V_o$  também são enviados a um *bloco de processamento*, no qual os cálculos para a estimação da velocidade do fluido são realizados a partir das equações (2.15), (2.17) e (2.18).

No capítulo 5, apresenta-se um circuito de controle automático da tensão de desvio do amplificador operacional, proposto nesta seção (figura 2.4).

## 2.4 – Simulações

Com as equações diferenciais (2.7) e (2.11) que constituem o modelo matemático do anemômetro a fio quente a temperatura constante, pode-se criar um ambiente de simulação desse anemômetro, para que as influências das grandezas físicas e elétricas, associadas ao sistema, possam ser simuladas e estudadas.

As equações diferenciais (2.7) e (2.11) foram resolvidas numericamente com o auxílio de uma ferramenta matemática: o MATLAB. As equações diferenciais foram resolvidas usando o método de Runge Kutta de 4ª ordem.

As equações diferenciais (2.7) e (2.11) são resolvidas de forma a se obter os valores das tensões  $V_s$  e  $V_o$ , pois, conforme mostrado na seção 2.3, a velocidade do fluido, a temperatura de operação do sensor e sua potência elétrica são estimadas a partir dessas tensões.

A equação diferencial (2.7) descreve o comportamento dinâmico do sensor ( $dR_s/dt$ ). A solução dessa equação fornece o valor da resistência do sensor  $R_s$ . A equação diferencial (2.11) descreve o comportamento dinâmico do sinal de saída do amplificador operacional ( $dV_o/dt$ ). A solução dessa equação fornece o valor da tensão de saída do amplificador  $V_o$ . Com os valores instantâneos de  $R_s$  e  $V_o$ , pode-se determinar o valor da tensão sobre o sensor  $V_s$  conforme a equação (2.10). Portanto, com a solução das equações (2.7) e (2.11) e com o auxílio da equação (2.10), tem-se os valores das tensões  $V_s$  e  $V_o$ , que são necessárias para o conhecimento da velocidade do fluido (equação (2.15)), da temperatura de operação do sensor (equação (2.17)) e da potência elétrica entregue ao sensor (equação (2.18)).

Um programa escrito em MATLAB, no qual as equações diferenciais (2.7) e (2.11) são resolvidas numericamente com o método de Runge Kutta de 4ª ordem, de forma que as tensões  $V_s$  e  $V_o$  sejam obtidas, é mostrado no Apêndice C.

Os parâmetros, do sensor (do tipo PTC) e do amplificador operacional, utilizados nas simulações são mostrados na tabela 1. Os valores dos parâmetros do sensor são próximos dos do sensor utilizado nos experimentos práticos.

Tabela 1 – Parâmetros Utilizados

Sensor	$S$	$8,917 \times 10^{-8} \text{ m}^2$
	$mc$	$1,8 \times 10^{-9} \text{ J}^\circ\text{C}^{-1}$
	$\beta$	$0,00172 \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$
	$R_o$	$6,8041 \text{ } \Omega$
	$a$	$1375 \text{ W/m}^2\text{ }^\circ\text{C}$
	$b$	$976 \text{ Ws}^{0,5}/\text{m}^{2,5}\text{ }^\circ\text{C}$
	$n$	$0,5$
	$d$	$10 \text{ } \mu\text{m}$
	$l$	$2,6 \text{ mm}$
Amplificador Operacional	$G$	$10^5$
	$f_c$	$100 \text{ Hz}$
	$V_{os}$	$5 \text{ mV}$

Com os parâmetros da tabela 1 e com o programa escrito em MATLAB, pode-se realizar uma simulação para se observar a variação da tensão de saída do amplificador operacional  $V_o$  em relação à variação de velocidade do fluido. O programa em MATLAB para essa simulação é mostrado no Apêndice D. O resultado dessa simulação é mostrado na figura 2.5.

Observa-se, pela figura 2.5, que a sensibilidade do anemômetro à variação da velocidade do fluido diminui com o aumento de  $\vartheta$ . Para velocidades baixas, a sensibilidade é alta, porém existe um limite mínimo, em torno de  $0,3 \text{ m/s}$ , no qual a convecção forçada não é bem maior que a convecção livre. Isso quer dizer que a troca de calor entre o sensor e o meio não sofre influências da velocidade. Portanto, para velocidades abaixo de  $0,3 \text{ m/s}$ , o sistema apresenta limitações. Além disso, observa-se também a influência da temperatura do fluido no sinal de saída do anemômetro.

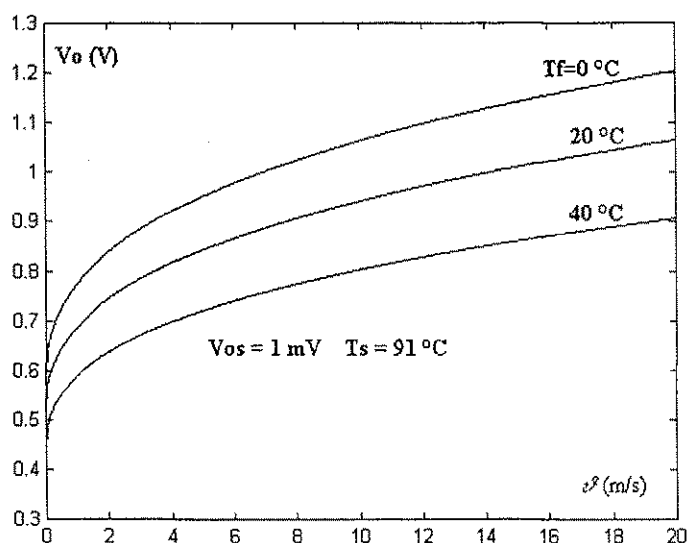


Figura 2.5 – Variação da tensão de saída do amplificador operacional  $V_o$  em relação à variação de velocidade do fluido

Com os parâmetros do sensor e do amplificador operacional, mostrados na tabela 1, e com o programa escrito em MATLAB, mostrado nessa seção, pode-se realizar as simulações para se estudar e investigar, separadamente, como o circuito do CTA responde às variações de velocidades do fluido  $\vartheta$ , de sua temperatura  $T_s$  e com a tensão de desvio de entrada do amplificador  $V_{os}$ . Para isso, o circuito do anemômetro é excitado, por cada uma dessas grandezas, com um sinal senoidal e depois por um degrau.

### 2.4.1 – Variação de $V_s$ e $V_o$ com a velocidade do fluido $v$

Para se observar a resposta do sistema às variações de velocidade do fluido, foram realizadas duas simulações: na primeira simulação, o sensor foi submetido a uma variação senoidal de velocidade de fluido e na segunda simulação, o sensor foi submetido a um degrau de velocidade. Para as duas simulações, foram observadas as variações das tensões sobre o sensor, na saída do amplificador operacional e na temperatura de operação do sensor.

Para o sensor imerso em um fluido com variação senoidal de velocidade de 1  $m/s$  a 5  $m/s$  e com frequência de 500  $Hz$  ( $v=3+2\text{sen}(2\pi 500t)$   $m/s$ ). Para essa simulação, considera-se que a temperatura do fluido  $T_f$  é constante e igual a 30  $^{\circ}C$  e a tensão de desvio do amplificador  $V_{os}$  é de 5  $mV$ . Os resultados dessa simulação são mostrados na figura 2.6.

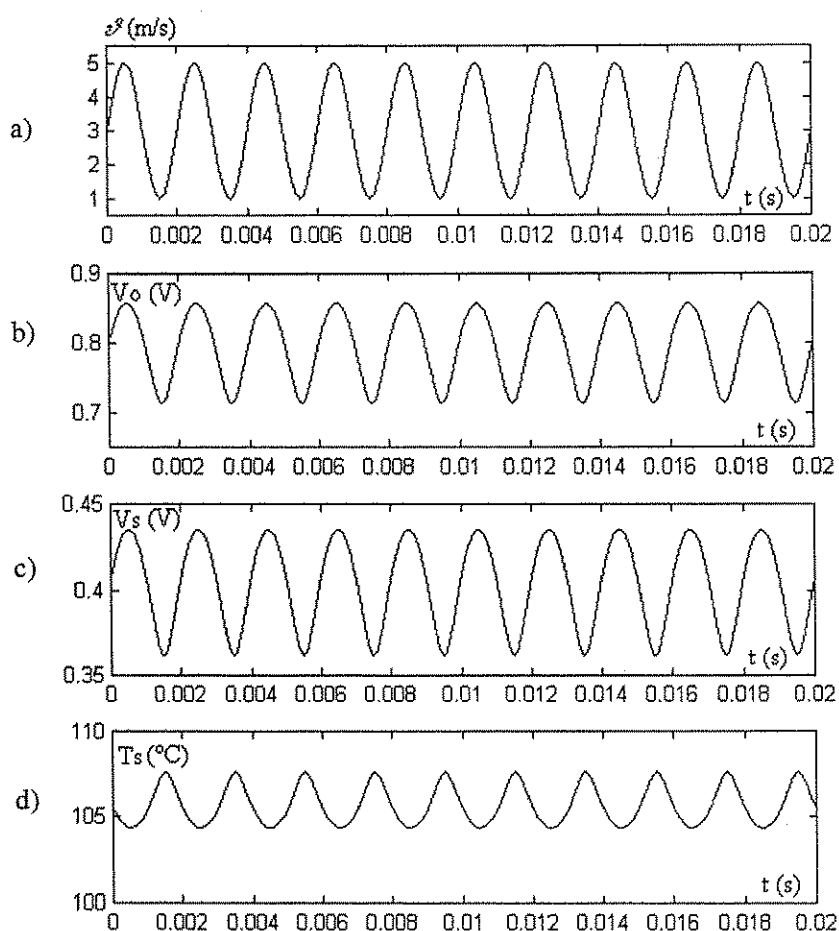


Figura 2.6 – Resposta do anemômetro às variações de velocidade: a) velocidade do fluido com variação senoidal; b) variação da tensão de saída do amplificador; c) variação da tensão sobre o sensor; d) variação da temperatura de operação do sensor.

Para o sensor submetido a um degrau de velocidade de fluido de 3 m/s para 5 m/s, é possível observar o tempo de resposta do anemômetro à variação da velocidade do fluido. Para essa simulação, considera-se que a temperatura do fluido  $T_f$  é constante e igual a 30 °C e a tensão de desvio do amplificador  $V_{os}$  é de 5 mV. Os resultados dessa simulação são mostrados na figura 2.7.

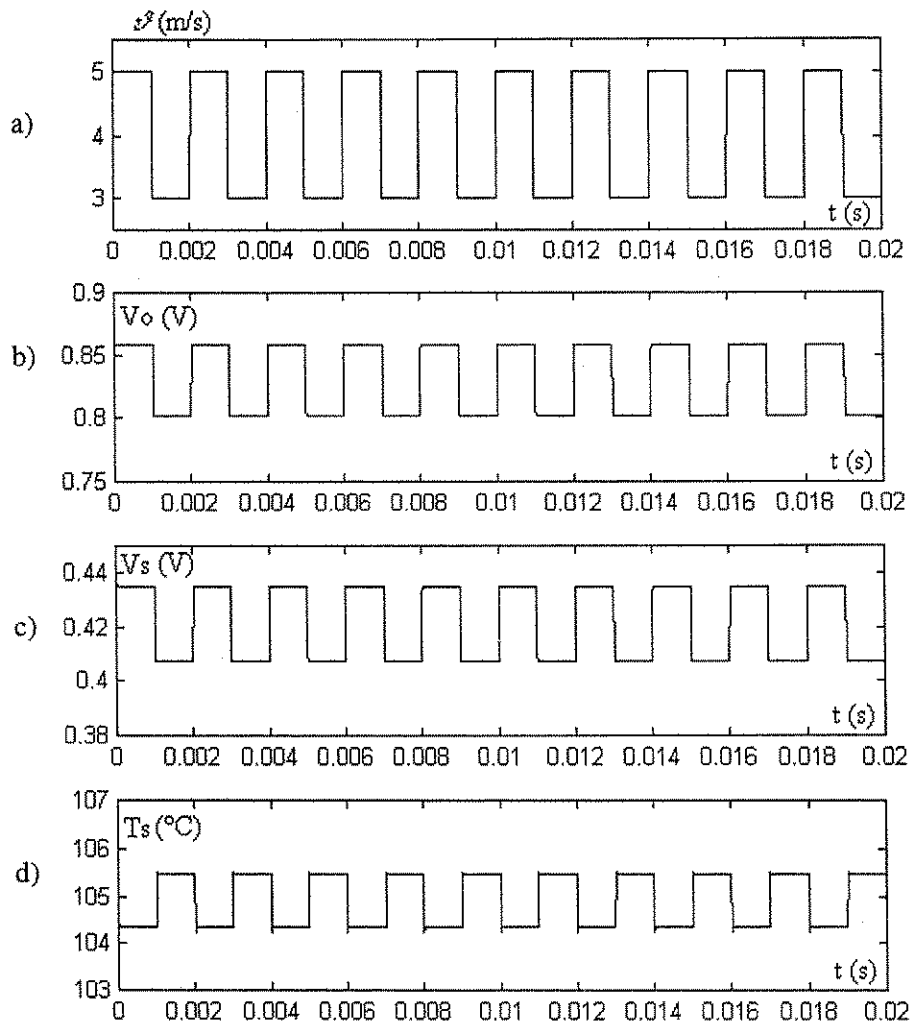


Figura 2.7 – Resposta do anemômetro às variações de velocidade: a) o sensor é submetido a um degrau de velocidade de fluido; b) variação da tensão de saída do amplificador; c) variação da tensão sobre o sensor; d) variação da temperatura de operação do sensor.

Pelos resultados das simulações apresentados nas figuras 2.6 e 2.7, observou-se que para uma variação senoidal na velocidade do fluido de entrada com amplitude variando de 1 m/s a 5 m/s e 500 Hz de frequência (figura 2.6.a), a tensão na saída do amplificador operacional  $V_o$  variou de 713 mV a 858 mV (figura 2.6.b), a tensão sobre o sensor  $V_s$  variou de 362 mV a 435 mV (figura 2.6.c) e a temperatura de operação do sensor  $T_s$  variou de 104,4 °C a 107,6 °C (figura 2.6.d), todos com a mesma frequência. Para o



sensor submetido a um degrau de velocidade de 3  $m/s$  para 5  $m/s$  (figura 2.7.a), a variação na tensão de saída do amplificador  $V_o$ , variou de 802  $mV$  a 858  $mV$  (figura 2.7.b), a variação da tensão sobre o sensor  $V_s$  foi de 407  $mV$  a 435  $mV$  (figura 2.7.c) e a variação da temperatura do sensor  $T_s$  foi de 104,5  $^{\circ}C$  a 105,45  $^{\circ}C$  (figura 2.7.d).

A observação da resposta do anemômetro ao degrau de velocidade é importante para se determinar o tempo de resposta do circuito (JORGENSEN, 2002). Na figura 2.8, tem-se uma ampliação da figura 2.7, na qual se observa a transição positiva do degrau de velocidade.

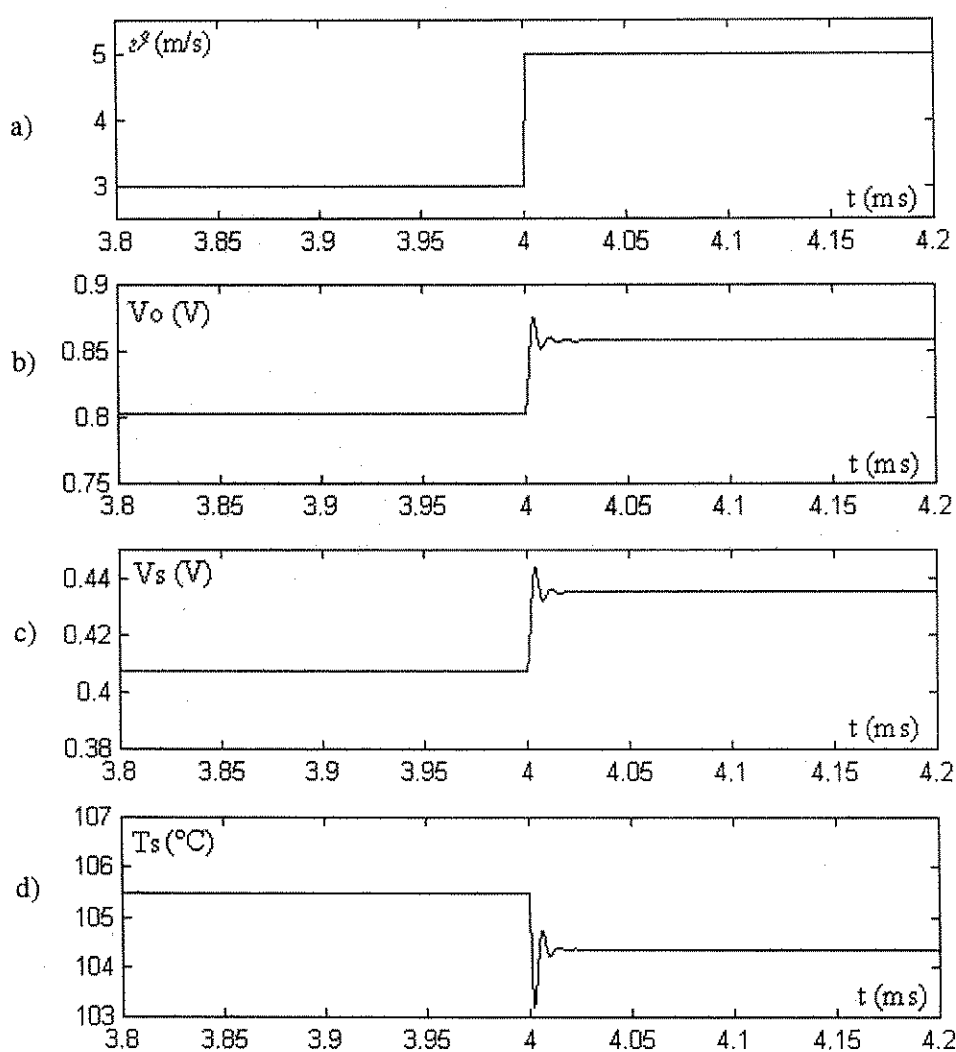


Figura 2.8 – Detalhes da resposta do anemômetro ao degrau de velocidade: a) transição positiva do degrau de velocidade do fluido; b) variação da tensão de saída do amplificador; c) variação da tensão sobre o sensor; d) variação da temperatura de operação do sensor.

Na figura 2.9, tem-se uma ampliação da figura 2.7, na qual se observa a transição negativa do degrau de velocidade.

Nos experimentos práticos, o degrau a que o circuito do anemômetro foi submetido, foi obtido pela mudança brusca da temperatura de operação do sensor. Essa mudança foi feita com o chaveamento do resistor  $R_i$  mostrado na figura 2.1. Pela variação das tensões  $V_s$  e  $V_o$ , ocorridas depois do chaveamento do resistor, pode-se medir com um osciloscópio o tempo de resposta do anemômetro. O diagrama do circuito utilizado nos experimentos práticos é apresentado na figura 5.1 no capítulo 5.

Para essas simulações, considerou-se todas as grandezas físicas e elétricas constantes, exceto a velocidade do fluido, para que se observe apenas a influência da velocidade no tempo de resposta do anemômetro.

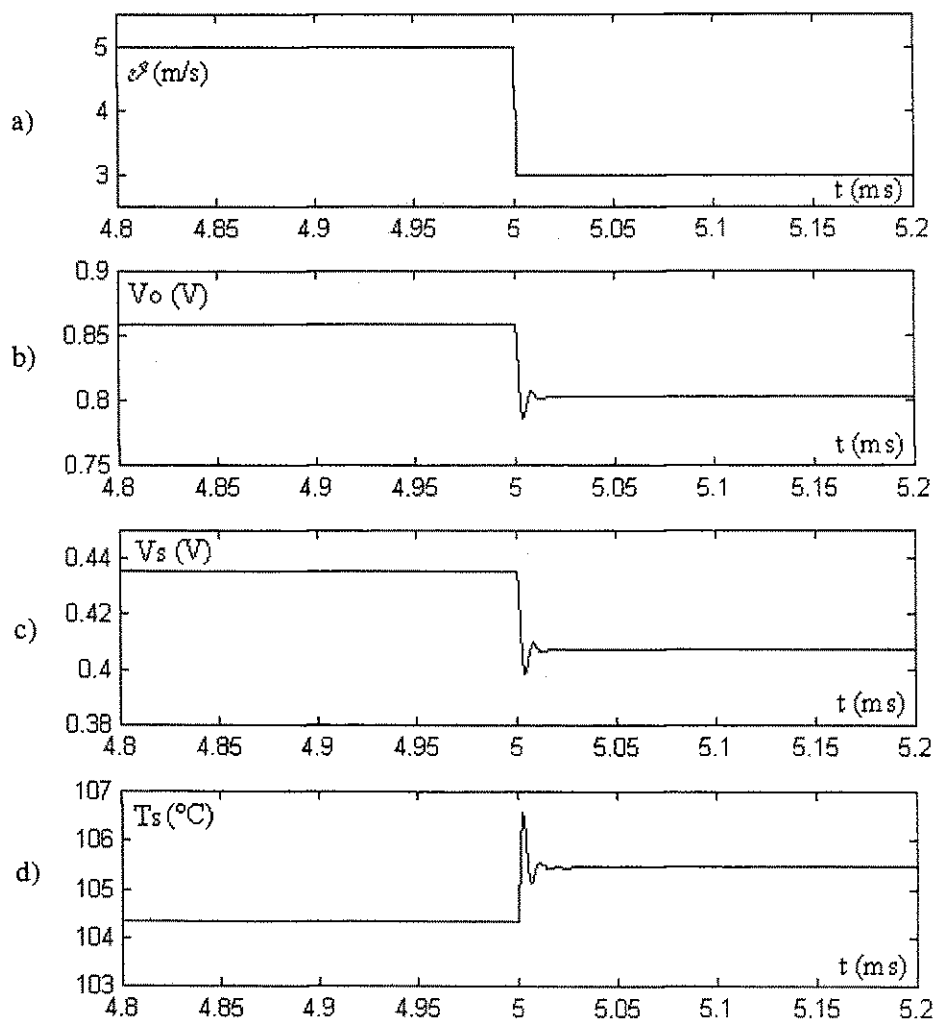


Figura 2.9 – Detalhes da resposta do anemômetro ao degrau de velocidade: a) transição negativa do degrau de velocidade do fluido; b) variação da tensão de saída do amplificador; c) variação da tensão sobre o sensor; d) variação da temperatura de operação do sensor.

Os níveis de variação de cada sinal apresentados nas figuras 2.8 e 2.9 são os mesmos da figura 2.7, para a resposta do anemômetro ao degrau de velocidade. Com os transitórios observados, o tempo de resposta do anemômetro foi de  $30 \mu s$ . Esse tempo de resposta obtido por simulação, foi comprovado nos experimentos práticos, o que comprova a validade do modelo utilizado. Na literatura, *tempo de resposta* é o tempo necessário para que o sinal de saída atinja uma variação de 1 a 3 % do seu valor de regime, em resposta a um degrau aplicado na entrada do sistema (JORGENSEN, 2002).

Os transitórios ocorridos após a aplicação do degrau de velocidade, ocorrem porque as respostas do sensor termo-resistivo e do amplificador operacional não são instantâneas, ou seja, como o sistema tem um tempo de resposta não nulo, para uma excitação de entrada, na forma de um degrau de velocidade de fluido, sua saída leva um certo tempo até atingir o regime estacionário.

#### **2.4.2 – Variação de $V_s$ e $V_o$ com a temperatura do fluido $T_f$**

Para se observar a resposta do sistema às variações da temperatura do fluido  $T_f$ , foram realizadas duas simulações: na primeira simulação, o sensor foi submetido a uma variação senoidal da temperatura de fluido e na segunda simulação, o sensor foi submetido a um degrau de temperatura de fluido. Para as duas simulações, foram observadas as variações das tensões sobre o sensor, na saída do amplificador operacional e na temperatura de operação do sensor.

Para o sensor imerso em um fluido com variação senoidal de sua temperatura de  $27^\circ C$  a  $33^\circ C$ , com frequência de  $100 Hz$  ( $T_f = 30 + 3 \text{sen}(2\pi 100t)$   $^\circ C$ ). Para essas simulações, considera-se que a velocidade do fluido é constante em  $3 m/s$  e a tensão de desvio do amplificador  $V_{os}$  é de  $5 mV$ . Os resultados dessa simulação são mostrados na figura 2.10.

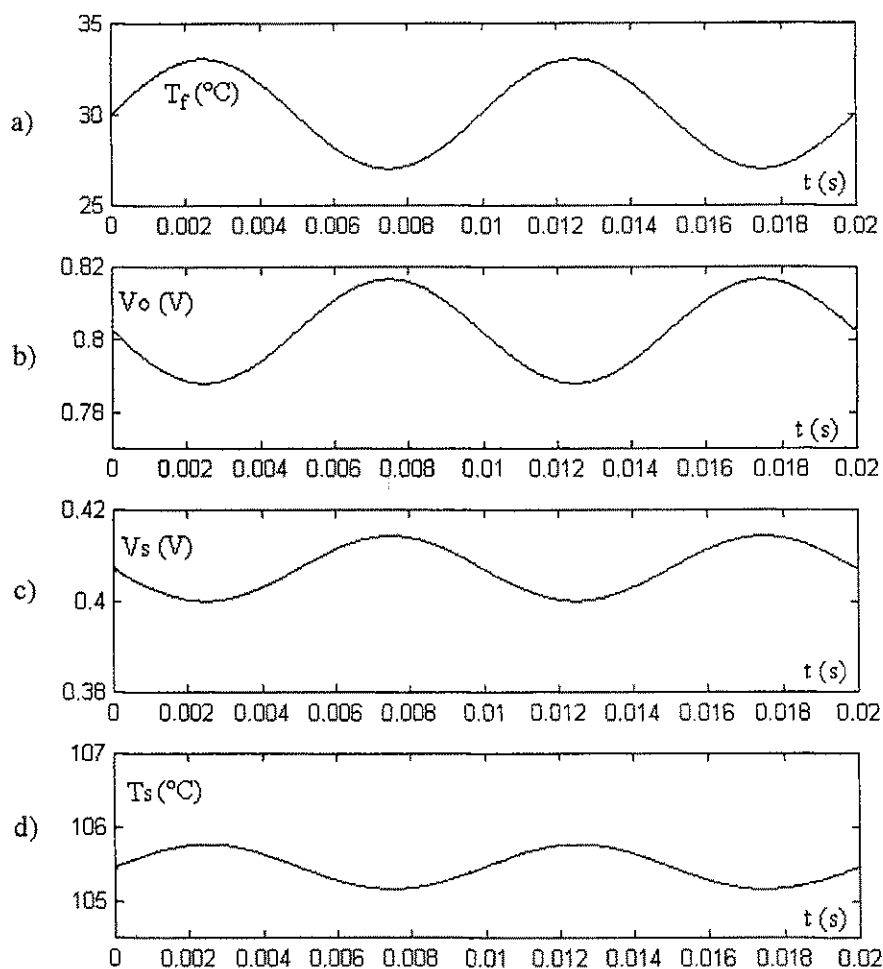


Figura 2.10 – Resposta do anemômetro às variações de temperatura do fluido: a) temperatura do fluido com variação senoidal; b) variação da tensão de saída do amplificador; c) variação da tensão sobre o sensor; d) variação da temperatura de operação do sensor.

Para o sensor submetido a um degrau de temperatura de fluido de 30 °C a 33 °C, é possível observar o tempo de resposta do anemômetro à variação da temperatura do fluido. Para essa simulação, considera-se que a velocidade do fluido é constante em 3 m/s e a tensão de desvio do amplificador  $V_{os}$  é de 5 mV. Os resultados dessa simulação são mostrados na figura 2.11.

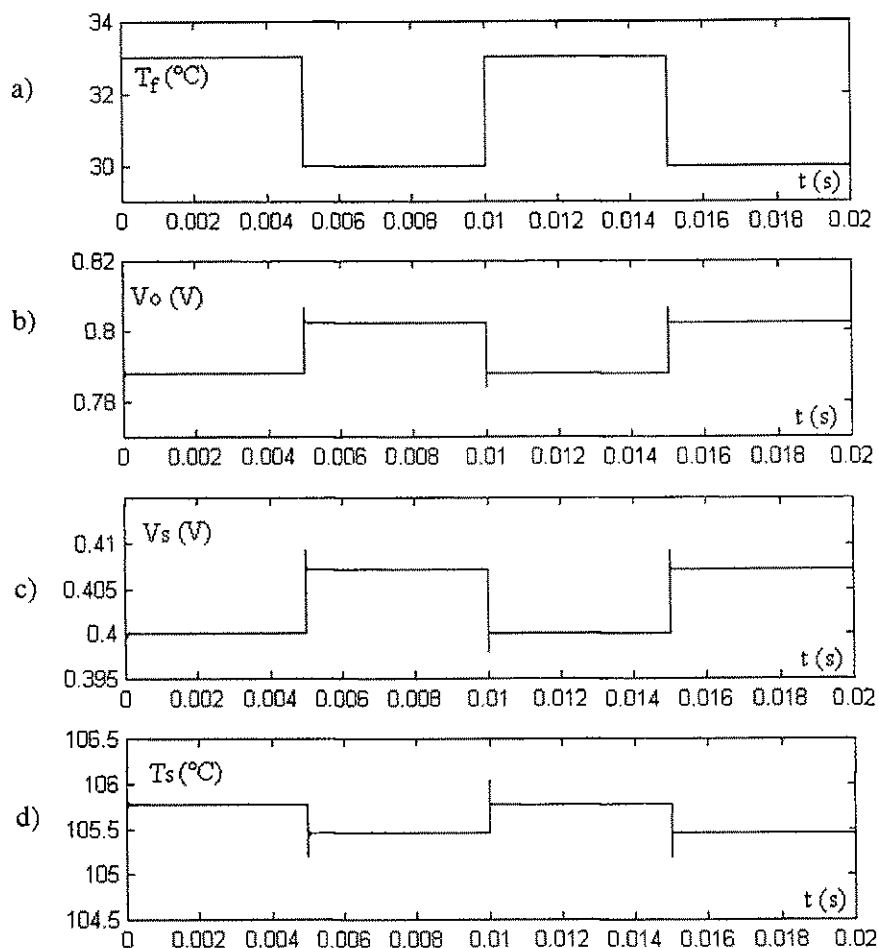


Figura 2.11 – Resposta do anemômetro às variações de temperatura do fluido: a) o sensor é submetido a um degrau de temperatura de fluido; b) variação da tensão de saída do amplificador; c) variação da tensão sobre o sensor; d) variação da temperatura de operação do sensor.

Pelos resultados das simulações apresentados nas figuras 2.10 e 2.11, observou-se que para uma variação senoidal na temperatura do fluido com amplitude variando de 27 °C a 33 °C e 100 Hz de frequência (figura 2.10.a), a tensão na saída do amplificador operacional  $V_o$  variou de 788 mV a 817 mV (figura 2.10.b), a tensão sobre o sensor  $V_s$  variou de 400 mV a 414 mV (figura 2.10.c) e a temperatura de operação do sensor  $T_s$  variou de 105,1 °C a 105,8 °C (figura 2.10.d), todos com a mesma frequência. Para o sensor submetido a um degrau de temperatura de 30 °C para 33 °C (figura 2.11.a), a variação na tensão de saída do amplificador  $V_o$ , variou de 788 mV a 802 mV (figura 2.11.b), a variação da tensão sobre o sensor  $V_s$  foi de 400 mV a 407 mV (figura 2.11.c) e a variação da temperatura do sensor  $T_s$  foi de 105,4 °C a 105,8 °C (figura 2.11.d).

A observação da resposta do anemômetro ao degrau de temperatura é importante para se determinar o tempo de resposta do circuito (JORGENSEN, 2002). Na figura 2.12,

tem-se uma ampliação da figura 2.11, na qual se observa a transição positiva do degrau de temperatura.

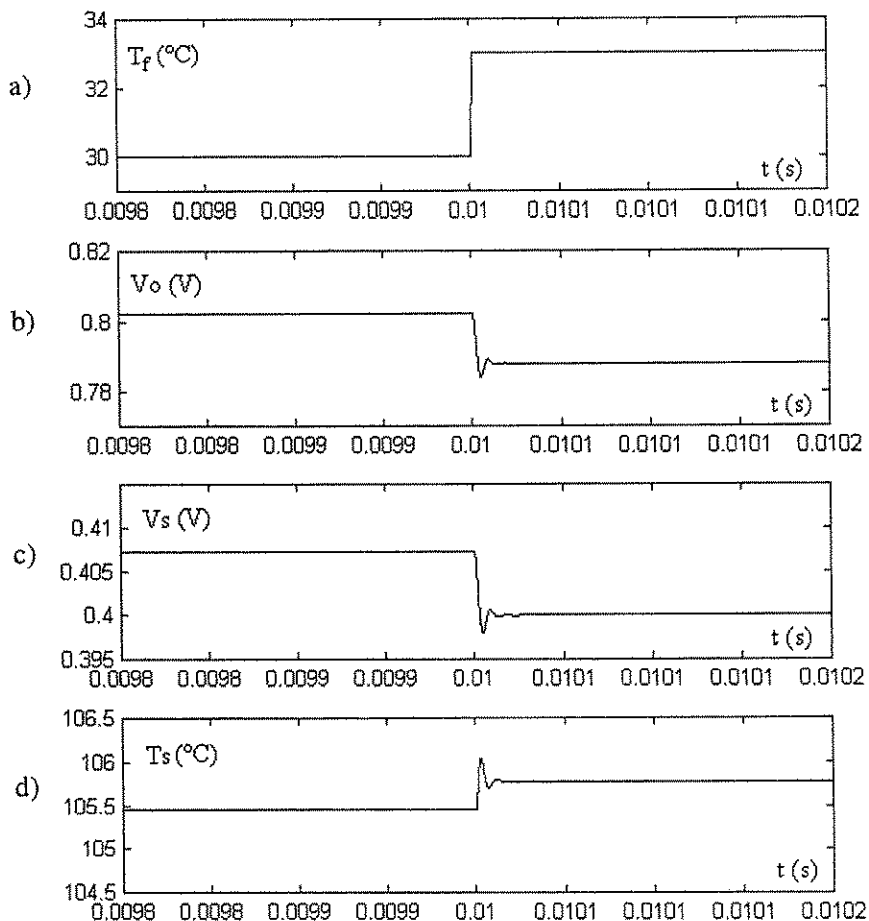


Figura 2.12 – Detalhes da resposta do anemômetro ao degrau de temperatura: a) transição positiva do degrau de temperatura do fluido; b) variação da tensão de saída do amplificador; c) variação da tensão sobre o sensor; d) variação da temperatura de operação do sensor.

Na figura 2.13, tem-se uma ampliação da figura 2.11, na qual se observa a transição negativa do degrau de velocidade.

Nos experimentos práticos, o degrau a que o circuito do anemômetro foi submetido, foi obtido pela mudança brusca da temperatura de operação do sensor. Essa mudança foi feita com o chaveamento do resistor  $R_i$  mostrado na figura 2.1. Pela variação das tensões  $V_s$  e  $V_o$ , ocorridas depois do chaveamento do resistor, pode-se medir com um osciloscópio o tempo de resposta do anemômetro. O diagrama do circuito utilizado nos experimentos práticos é apresentado na figura 5.1 no capítulo 5.

Para essas simulações, considerou-se todas as grandezas físicas e elétricas constantes, exceto a temperatura do fluido, para que se observe apenas a influência de  $T_f$  no tempo de resposta do anemômetro.

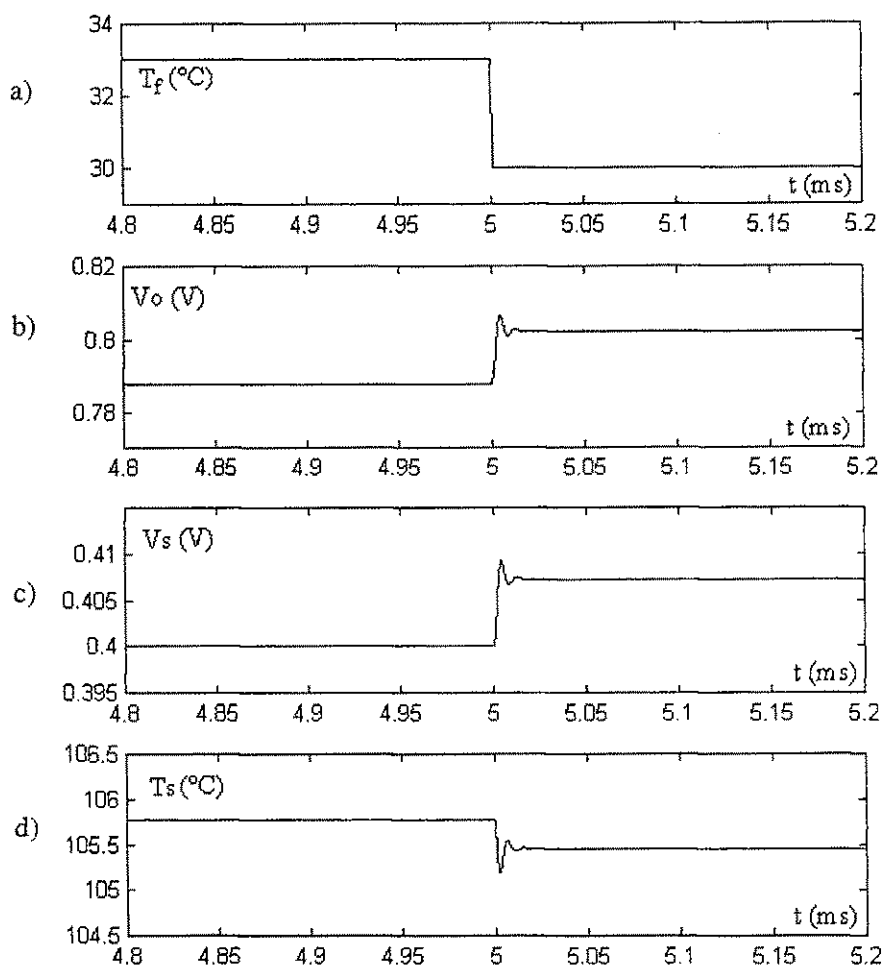


Figura 2.13 – Detalhes da resposta do anemômetro ao degrau de temperatura: a) transição negativa do degrau de temperatura do fluido; b) variação da tensão de saída do amplificador; c) variação da tensão sobre o sensor; d) variação da temperatura de operação do sensor.

Os níveis de variação de cada sinal apresentado na figura 2.13, são os mesmos dos da figura 2.11, para a resposta do anemômetro ao degrau de  $T_f$ . Com os transitórios observados, o tempo de resposta do anemômetro foi de  $30 \mu s$ .

Os transitórios ocorridos após a aplicação do degrau de temperatura do fluido, ocorrem porque as respostas do sensor termo-resistivo e do amplificador operacional não são instantâneas, ou seja, como o sistema tem um tempo de resposta não nulo, para uma excitação de entrada, na forma de um degrau de temperatura, sua saída leva um certo tempo até atingir o regime estacionário.

### 2.4.3 – Variação de $V_s$ e $V_o$ com a tensão de desvio $V_{os}$

Para se observar a resposta do sistema às variações da tensão de desvio do amplificador operacional  $V_{os}$ , foram realizadas duas simulações: na primeira simulação, o sensor foi submetido a uma variação senoidal de  $V_{os}$  e na segunda simulação, o sensor foi submetido a um degrau de  $V_{os}$ . Para as duas simulações, foram observadas as variações das tensões sobre o sensor, na saída do amplificador operacional e na temperatura de operação do sensor.

Para o sensor imerso em um fluido com variação senoidal da tensão de desvio de  $5\text{ mV}$  a  $15\text{ mV}$ , com frequência de  $100\text{ Hz}$  ( $V_{os}=0.010+0.005\text{sen}(2\pi 100t)\text{ mV}$ ). Para essas simulações, considera-se que a velocidade e a temperatura do fluido  $T_f$  são constantes em  $3\text{ m/s}$  e em  $30^\circ\text{C}$ , respectivamente. Os resultados dessa simulação são mostrados na figura 2.14.

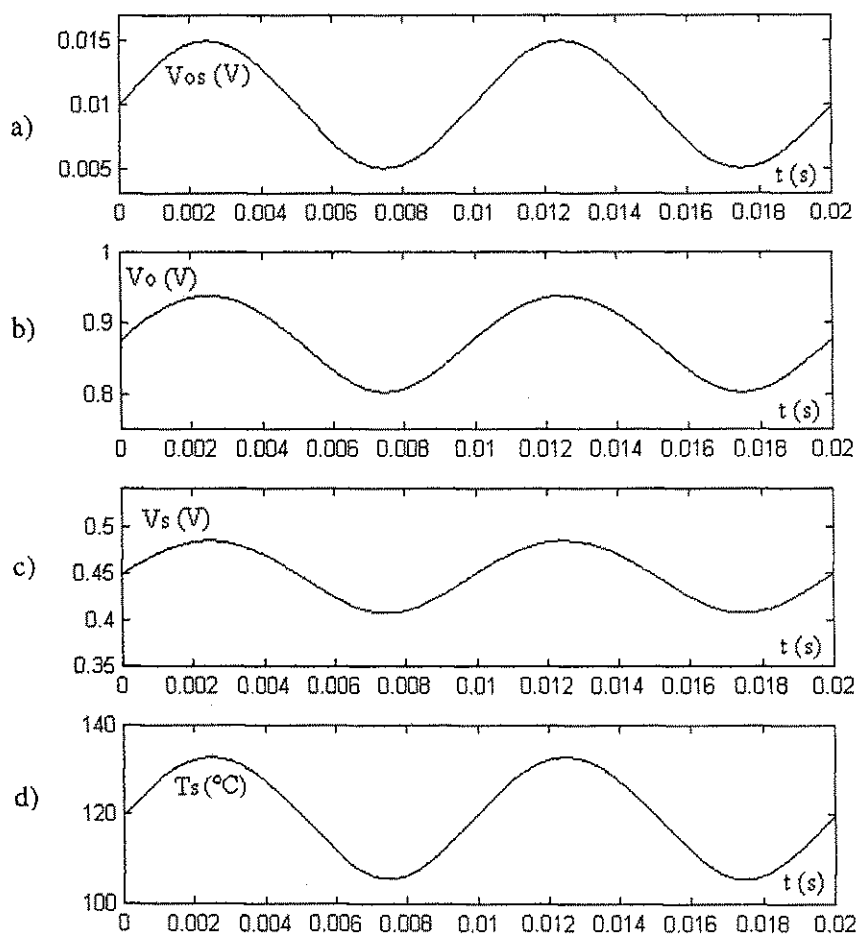


Figura 2.14 – Resposta do anemômetro às variações de  $V_{os}$ : a) variação senoidal de  $V_{os}$ ; b) variação da tensão de saída do amplificador; c) variação da tensão sobre o sensor; d) variação da temperatura de operação do sensor.



Para o sensor submetido a um degrau de  $V_{os}$  de  $10\text{ mV}$  para  $15\text{ mV}$ , é possível observar o tempo de resposta do anemômetro à variação da tensão de desvio do amplificador operacional. Para essa simulação, considera-se que a velocidade do fluido é constante em  $3\text{ m/s}$  e a temperatura do fluido  $T_f$  é constante em  $30^\circ\text{C}$ . Os resultados dessa simulação são mostrados na figura 2.15.

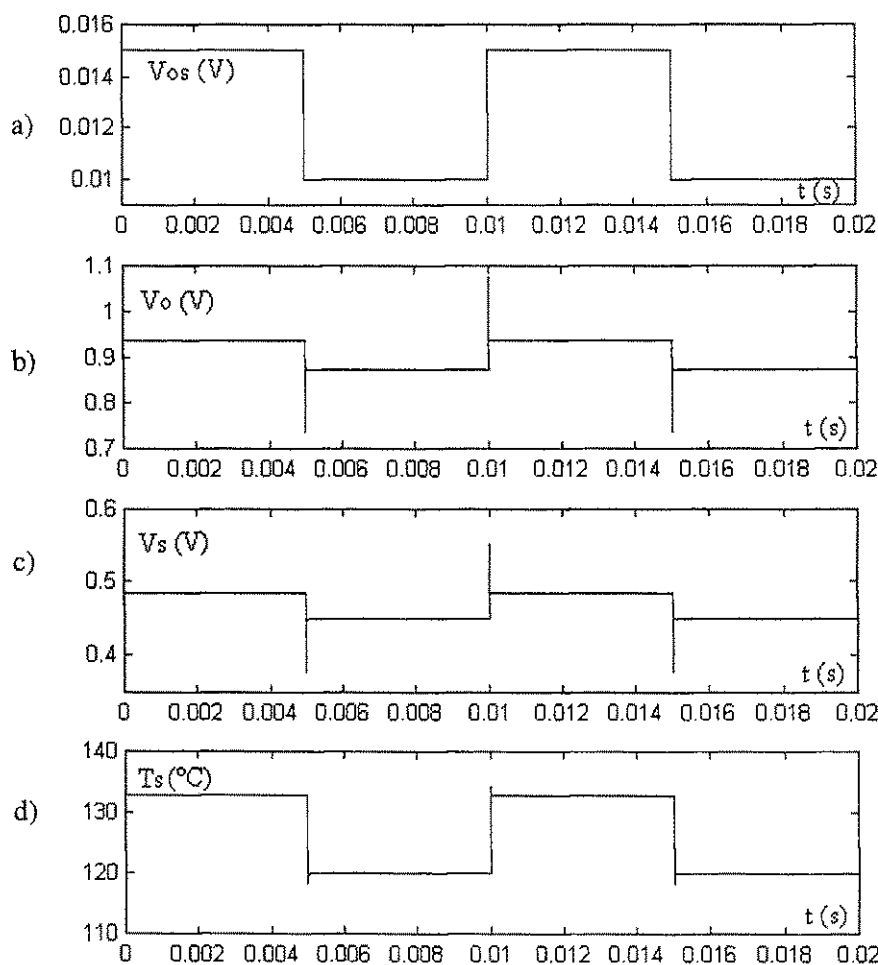


Figura 2.15 – Resposta do anemômetro às variações de  $V_{os}$ : a) o circuito é submetido a um degrau de  $V_{os}$ ; b) variação da tensão de saída do amplificador; c) variação da tensão sobre o sensor; d) variação da temperatura de operação do sensor.

Pelos resultados das simulações apresentados nas figuras 2.14 e 2.15, observou-se que para uma variação senoidal na tensão de desvio do amplificador operacional com amplitude variando de  $5\text{ mV}$  a  $15\text{ mV}$  com  $100\text{ Hz}$  de frequência (figura 2.14.a), a tensão na saída do amplificador operacional  $V_o$  variou de  $802\text{ mV}$  a  $937\text{ mV}$  (figura 2.14.b), a tensão sobre o sensor  $V_s$  variou de  $407\text{ mV}$  a  $485\text{ mV}$  (figura 2.14.c) e a temperatura de operação do sensor  $T_s$  variou de  $105,4^\circ\text{C}$  a  $132,8^\circ\text{C}$  (figura 2.14.d), todos com a mesma

freqüência. Para o sensor submetido a um degrau de  $V_{os}$  de 10 mV para 15 mV (figura 2.15.a), a variação na tensão de saída do amplificador  $V_o$ , variou de 875 mV a 937 mV (figura 2.15.b), a variação da tensão sobre o sensor  $V_s$  foi de 449 mV a 485 mV (figura 2.15.c) e a variação da temperatura do sensor  $T_s$  foi de 119,9 °C a 132,8 °C (figura 2.15.d).

A observação da resposta do anemômetro ao degrau de  $V_{os}$ , é importante para se determinar o tempo de resposta do circuito (JORGENSEN, 2002). Na figura 2.16, tem-se uma ampliação da figura 2.15, na qual se observa a transição positiva do degrau da tensão de desvio  $V_{os}$ .

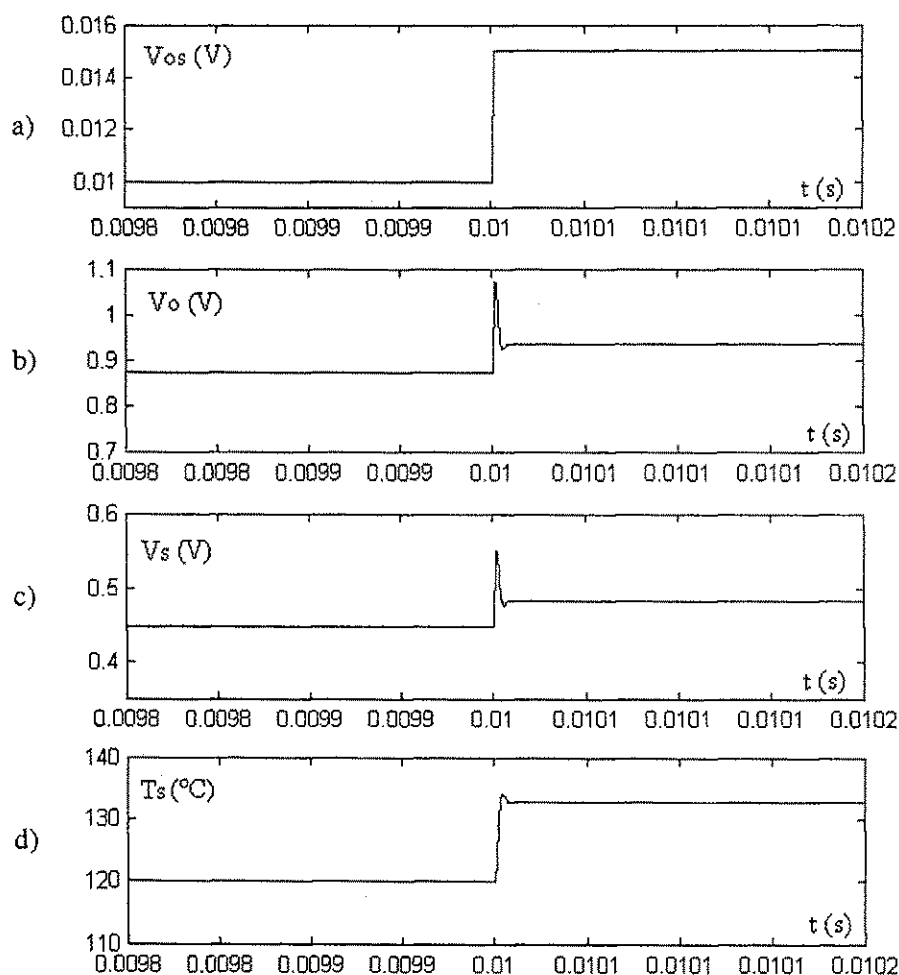


Figura 2.16 – Detalhes da resposta do anemômetro ao degrau de  $V_{os}$ : a) transição positiva do degrau de  $V_{os}$ ; b) variação da tensão de saída do amplificador; c) variação da tensão sobre o sensor; d) variação da temperatura de operação do sensor.

Na figura 2.17, tem-se uma ampliação da figura 2.15, na qual se observa a transição negativa do degrau da tensão de desvio  $V_{os}$ .

Nos experimentos práticos, o degrau a que o circuito do anemômetro foi submetido, foi obtido pela mudança brusca da temperatura de operação do sensor. Essa mudança foi feita com o chaveamento do resistor  $R_i$  mostrado na figura 2.1. Pela variação das tensões  $V_s$  e  $V_o$ , ocorridas depois do chaveamento do resistor, pode-se medir com um osciloscópio o tempo de resposta do anemômetro. O diagrama do circuito utilizado nos experimentos práticos é apresentado na figura 5.1 no capítulo 5.

Para essas simulações, considerou-se todas as grandezas físicas e elétricas constantes, exceto a da tensão de desvio  $V_{os}$ , para que se observe apenas a sua influência no tempo de resposta do anemômetro.

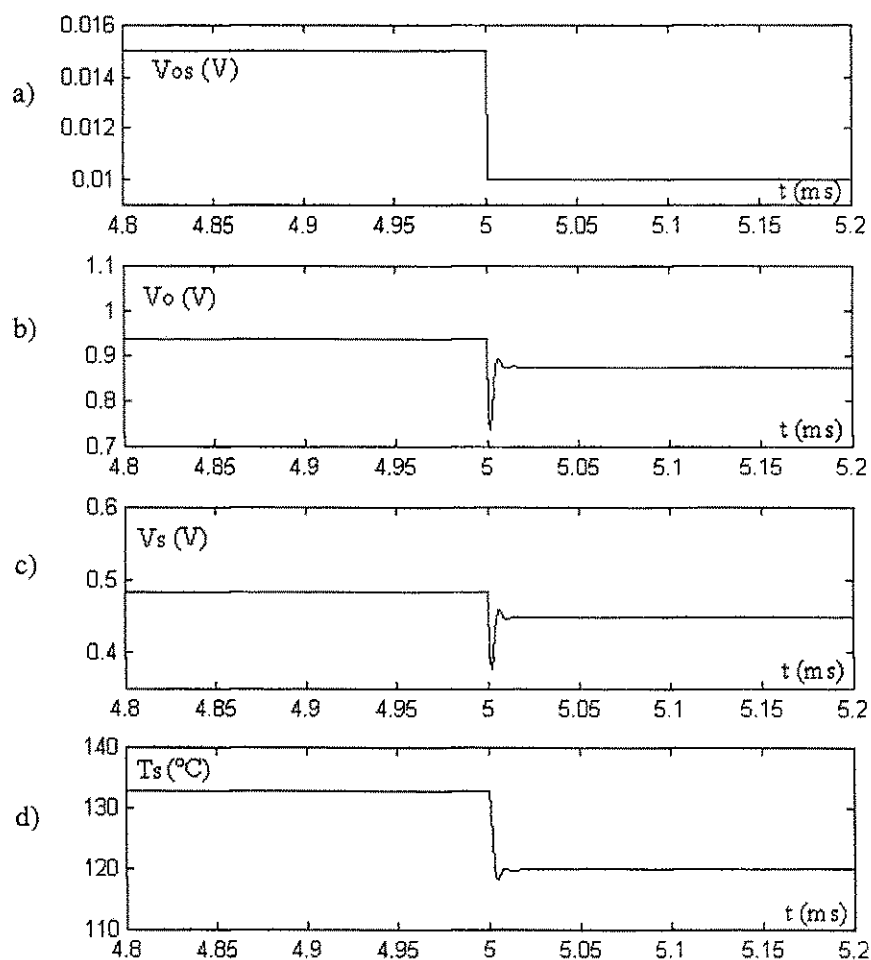


Figura 2.17 – Detalhes da resposta do anemômetro ao degrau de  $V_{os}$ : a) transição negativa do degrau de  $V_{os}$ ; b) variação da tensão de saída do amplificador; c) variação da tensão sobre o sensor; d) variação da temperatura de operação do sensor.

Os níveis de variação de cada sinal apresentado na figura 2.17, são os mesmos dos da figura 2.15, para a resposta do anemômetro ao degrau de  $V_{os}$ . Com os transitórios observados, o tempo de resposta do anemômetro foi de  $30 \mu s$ .

Os transitórios ocorridos após a aplicação do degrau de  $V_{os}$ , ocorrem porque as respostas do sensor termo-resistivo e do amplificador operacional não são instantâneas, ou seja, como o sistema tem um tempo de resposta não nulo, para uma excitação de entrada, na forma de um degrau de  $V_{os}$ , sua saída leva um certo tempo até atingir o regime estacionário.

#### 2.4.4 – Análise dos resultados das variações de $V_s$ e $V_o$ com $\vartheta$ , $T_f$ e $V_{os}$

Pelos resultados das simulações mostrados nas figura 2.6 a 2.17, observa-se que na configuração do anemômetro a fio quente a temperatura constante, figura 2.1, a temperatura de operação do sensor  $T_s$  varia com a velocidade do fluido  $\vartheta$ , com a temperatura  $T_f$  e com a tensão de desvio do amplificador operacional  $V_{os}$ . Isso vem corroborar os trabalhos de FREIRE et al. (1997, 1998 e 1999) que mostram, para o caso de um radiômetro, que se  $V_{os}$  é diferente de zero, a temperatura de operação do sensor não se mantém constante se a velocidade do fluido variar. Para explicar esse fato analiticamente, é feita uma análise a partir das equações apresentadas nas seções 2.1, 2.2 e 2.3.

Pela equação (2.17) tem-se que a temperatura de operação do sensor  $T_s$  é função das tensões sobre o sensor e na saída do amplificador operacional, ou seja,  $T_s = f(V_s, V_o)$ . Por outro lado, pelas equações (2.7) e (2.11), observa-se que as tensões  $V_s$  e  $V_o$  variam com a velocidade do fluido  $\vartheta$ , com sua temperatura  $T_f$  e com a tensão de desvio do amplificador  $V_{os}$ , ou seja,  $V_s = f(\vartheta, T_f, V_{os})$  e  $V_o = f(\vartheta, T_f, V_{os})$ . Isso também é observado pelas figuras 2.6 a 2.17. Com isso, qualquer variação numa dessas grandezas a temperatura de operação do sensor é afetada.

Pela equação (2.19), observa-se que se a tensão de desvio do amplificador operacional for nula, a temperatura de operação do sensor é dada por:  $T_s = [kR_o / (k+1)R_o - 1] / \beta$ , ou seja, a temperatura  $T_s$  independe da velocidade e da temperatura do fluido, bem como de  $V_{os}$ , logo é constante. Portanto, a tensão de desvio  $V_{os}$  é fundamental na

determinação da temperatura de operação do sensor. Contudo, a tensão de desvio  $V_{os}$  não pode ser nula, pois OLIVEIRA (1997c) mostra que se  $|V_{os}| < |V_o|/G$ , o sistema oscila. Assim, o valor de  $V_{os}$  deve ser o menor possível de modo que satisfaça a esta relação.

Para ilustrar esses resultados, tem-se na figura 2.18 o resultado de uma simulação na qual, as condições são as mesmas da simulação realizada na seção 2.4.1, exceto o valor de  $V_{os}$  que foi reduzido de  $5\text{ mV}$  para  $100\ \mu\text{V}$ .

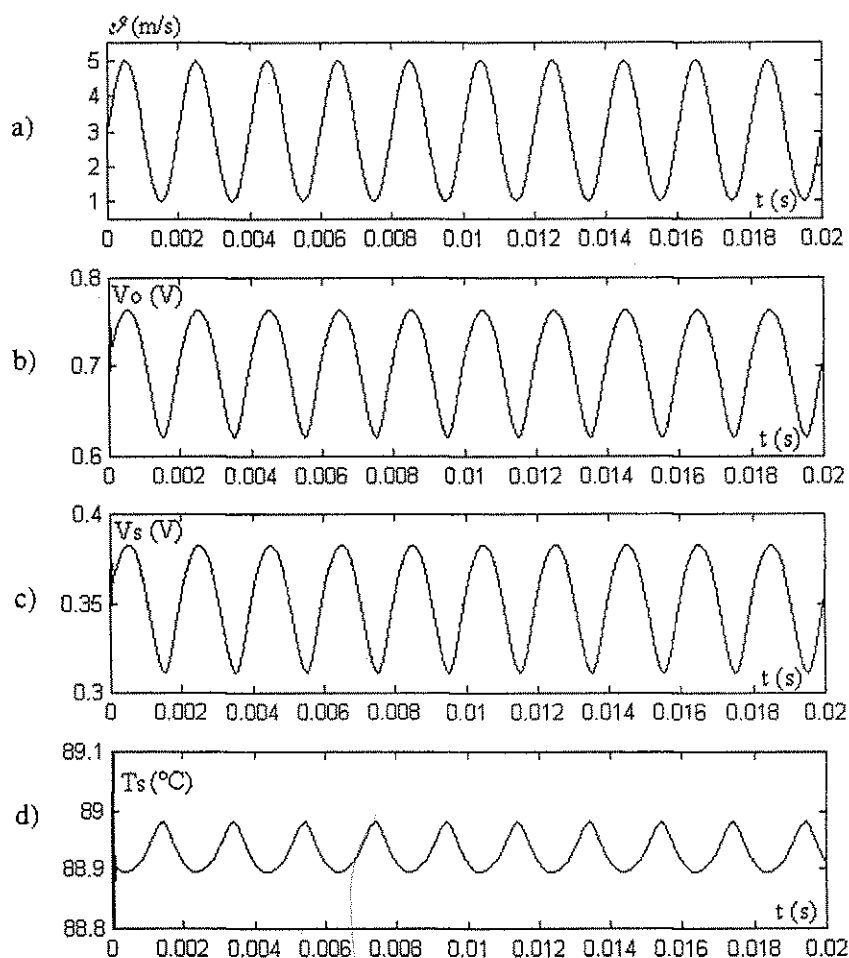


Figura 2.18 – Resposta do anemômetro às variações de velocidade do fluido com redução de  $V_{os}$ : a) velocidade do fluido com variação senoidal; b) variação da tensão de saída do amplificador; c) variação da tensão sobre o sensor; d) variação da temperatura de operação do sensor.

Observa-se pela figura 2.18 que para a velocidade do fluido variando senoidalmente de  $1\text{ m/s}$  a  $5\text{ m/s}$  e  $500\text{ Hz}$  de frequência (figura 2.18.a), a tensão na saída do amplificador operacional  $V_o$  variou de  $621\text{ mV}$  a  $764\text{ mV}$  (figura 2.18.b), a tensão sobre o

sensor  $V_s$  variou de 312  $mV$  a 382  $mV$  (figura 2.18.c) e a temperatura de operação do sensor  $T_s$  variou de 88,895  $^{\circ}C$  a 88,981  $^{\circ}C$  (figura 2.18.d).

Na figura 2.19 tem-se o resultado de uma simulação na qual, as condições são as mesmas da simulação realizada na seção 2.4.2, exceto o valor de  $V_{os}$  que foi reduzido de 5  $mV$  para 100  $\mu V$ .

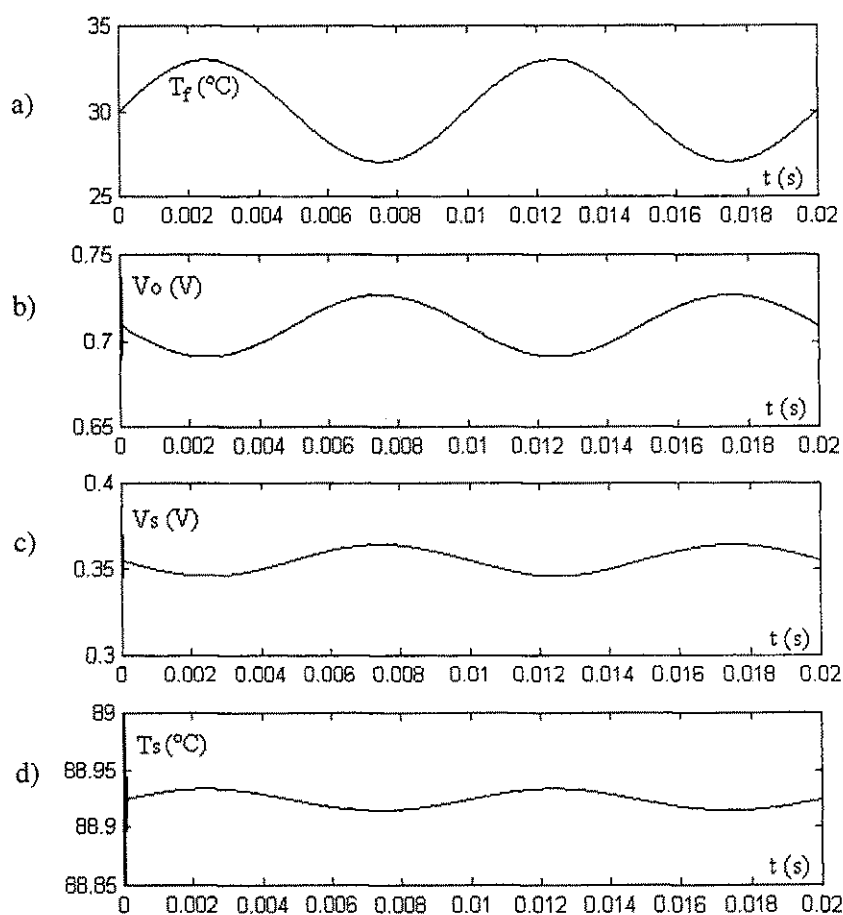


Figura 2.19 – Resposta do anemômetro às variações de temperatura do fluido com redução de  $V_{os}$ : a) temperatura do fluido com variação senoidal; b) variação da tensão de saída do amplificador; c) variação da tensão sobre o sensor; d) variação da temperatura de operação do sensor.

Observa-se pela figura 2.19 que para a temperatura do fluido variando senoidalmente de 27  $^{\circ}C$  a 33  $^{\circ}C$  (figura 2.19.a), a variação na tensão de saída do amplificador  $V_o$ , variou de 690  $mV$  a 727  $mV$  (figura 2.19.b), a variação da tensão sobre o sensor  $V_s$  foi de 346  $mV$  a 364  $mV$  (figura 2.19.c) e a variação da temperatura do sensor  $T_s$  foi de 88,915  $^{\circ}C$  a 88,933  $^{\circ}C$  (figura 2.19.d).

Com esses resultados das figuras 2.18 e 2.19, observa-se que para uma redução da tensão de desvio do amplificador de  $5\text{ mV}$  para  $100\ \mu\text{V}$ , a variação na temperatura de operação do sensor reduziu de  $3,2\text{ }^\circ\text{C}$  (figura 2.6.d) para  $0,086\text{ }^\circ\text{C}$ , para variações senoidais na velocidade do fluido. Para variações senoidais na temperatura do fluido, a redução da variação de  $T_s$  foi de  $0,7\text{ }^\circ\text{C}$  para  $0,018\text{ }^\circ\text{C}$  (figura 2.10.d). O que confirma que quanto menor for  $V_{os}$ , menor será a variação da temperatura de operação do sensor às variações das grandezas físicas.

## 2.5 – Constante de tempo do CTA

Para se determinar a constante de tempo do CTA observada na seção 2.4, foi realizada uma simulação na qual o sensor foi submetido a um degrau de velocidade de fluido de  $3\text{ m/s}$  para  $5\text{ m/s}$ . Para isso, considerou-se que:  $mc = 1,8 \times 10^{-9}\text{ J }^\circ\text{C}^{-1}$ ,  $G = 10^5$  e  $V_{os} = 5\text{ mV}$ . O resultado é apresentado na figura 2.20.

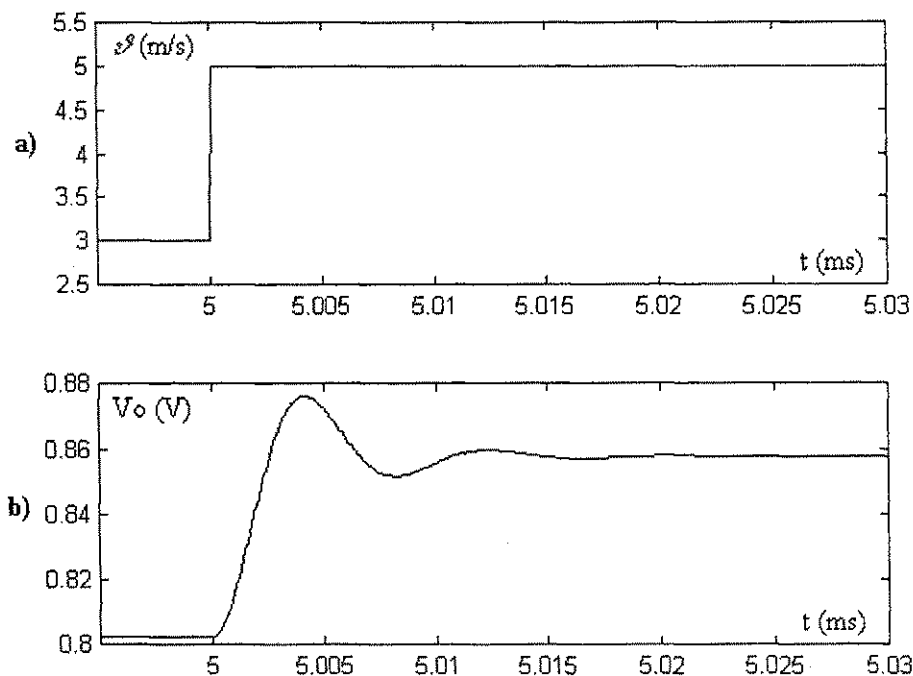


Figura 2.20 – Resposta do anemômetro ao degrau de velocidade: a) degrau positivo de velocidade de  $3\text{ m/s}$  para  $5\text{ m/s}$ ; e b) variação da tensão de saída do amplificador.

Na figura 2.20.a tem-se o sinal da velocidade, obtido por simulação, a que o sensor termo-resistivo está submetido. Na figura 2.20.b, tem-se o sinal de saída do amplificador

operacional, também obtido por simulação. Esse sinal representa a resposta do CTA ao degrau de velocidade de entrada. Observa-se que o tempo necessário para que o sistema atinja o estado estacionário é de  $30 \mu s$ . Considerando-se que esse tempo é aproximadamente  $5\tau$ , conclui-se que  $\tau = 6 \mu s$ .

A frequência de corte do circuito do CTA é dada por (JORGENSEN, 2002):

$$f_c = \frac{1}{2\pi\tau} \quad (2.21)$$

O conhecimento da resposta em frequência do CTA é muito importante para que as expressões utilizadas para estimação da velocidade sejam válidas (equações (2.15), (2.17) e (2.18)). Isso porque essas expressões foram obtidas considerando-se o equilíbrio estático da ponte, ou seja,  $dT/dt=0$ , (equação (2.1)). Para que essa condição seja satisfeita, a máxima variação da velocidade do fluido deve ser menor que a frequência de corte do CTA.

Portanto, para fluidos que apresentem variações em sua velocidade bem abaixo da frequência de corte  $f_c$ , pode-se considerar que o circuito é rápido o suficiente para manter a estabilidade da ponte (figura 2.1).



## 3 – Compensação da Temperatura do Fluido em Anemômetros CTA

---

Como foi visto no capítulo 1, um dos maiores problemas dos anemômetros a fio quente é a influência da temperatura do fluido  $T_f$  na medição de sua temperatura. Encontra-se na literatura, que o erro obtido na medição da velocidade do fluido é entre 1 % e 2 % (para o ar) para cada grau centígrado de variação de  $T_f$  (JORGENSEN, 2002) (SAVOSTENKO, SERBIN, 1989) (para a água o erro é de 10 % / °C). Portanto, a compensação de  $T_f$  é necessária para que a estimativa da velocidade do fluido seja feita sem a influência de sua temperatura, ou seja, com o menor erro possível.

Neste capítulo apresenta-se um estudo no qual, mostra-se como é feita a compensação de  $T_f$  na estimativa da velocidade do fluido, citada na literatura pesquisada. Para isso, são mostradas as arquiteturas mais usadas e citadas na literatura.

### 3.1 – CTA com sensor de compensação

A configuração tradicional de um anemômetro a fio quente a temperatura constante com compensação da temperatura do fluido  $T_f$  é a que utiliza um sensor adicional chamado de “sensor de compensação” (FREYMUTH, 1969) (LOMAS, 1986) (FUJITA, OHHASHI et al., 1995). Normalmente esse sensor adicional não é aquecido e serve exclusivamente para medir a temperatura do fluido. Portanto, a compensação da temperatura  $T_f$  nesse tipo de anemômetro, pode ser feita por qualquer tipo de circuito de medição de temperatura. Nos sistemas comerciais, utiliza-se normalmente um termistor (NTC) ou um termopar como sensor de compensação. Na figura 3.1 tem-se um diagrama desse tipo de anemômetro.

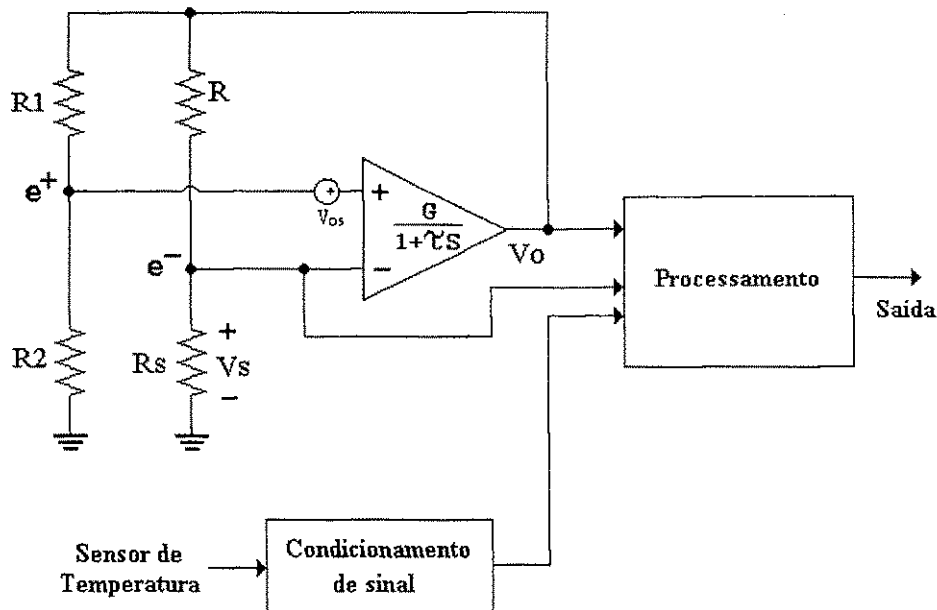


Figura 3.1 – Diagrama de um CTA com sensor de compensação

No esquema da figura 3.1, o circuito de condicionamento do sinal do sensor de temperatura (compensação) depende do seu tipo. O bloco de processamento realiza as operações, a partir dos sinais de entrada, para a estimação da velocidade.

Para um processamento digital para a estimação da velocidade do fluido, o bloco de processamento possui um conversor A/D no estágio de entrada, no qual os sinais de entrada são convertidos para o formato digital. Com isso, os cálculos para a estimação podem ser realizados por um microprocessador, microcontrolador, um DSP (Digital Signal Processor) ou por um circuito implementado para essa finalidade, como um ASIC (Specific Application Integrated Circuit) ou FPGA (Field Programmable Gate Array). Qualquer componente que seja utilizado, será chamado nesse trabalho de *processador*. O processador utilizado para realizar os cálculos deve implementar as equações (2.15), (2.17) e (2.18).

Com as aquisições das tensões  $V_s$  e  $V_o$  e da temperatura do fluido  $T_f$ , o conversor analógico/digital fornece ao processador seus valores digitalizados. Com esses valores, a velocidade do fluido é estimada para cada amostra adquirida de  $V_s$ ,  $V_o$  e  $T_f$ . Essa é a forma mais utilizada (e mais simples) para a estimação de velocidade de fluido com compensação de sua temperatura (FUJITA, OHHASHI et al., 1995) (JORGENSEN, 2002).

### 3.1.1 – Anemômetro com duas fontes de corrente

Em 1987, MILLER, SHAH et al. propuseram uma arquitetura de um anemômetro a fio quente a temperatura constante, na qual a ponte de Wheatstone é substituída por duas fontes de corrente controladas, conforme mostrado na figura 3.2.

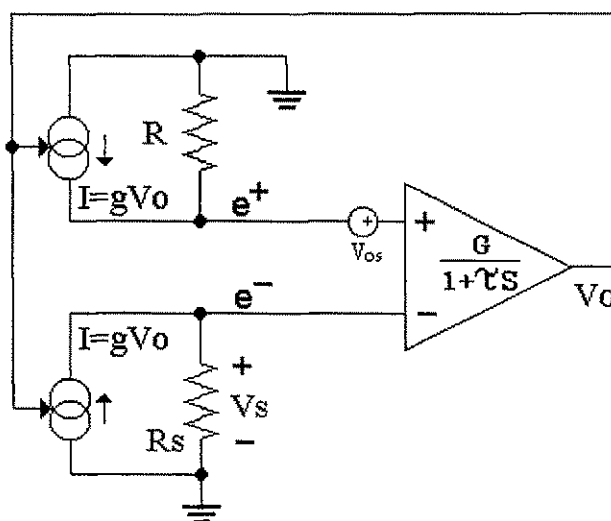


Figura 3.2 – Arquitetura de um CTA com duas fontes de corrente controlada

A arquitetura do anemômetro a fio quente mostrada na figura 3.2, também é a temperatura constante. Nessa estrutura, a temperatura de operação do sensor  $T_s$  é determinada pelo resistor  $R$  e sua temperatura é mantida constante através da realimentação com duas fontes de corrente controladas, na qual apresentam o mesmo valor  $I$ . Com isso, uma variação na velocidade do fluido faz variar a tensão sobre o sensor  $V_s$  e, conseqüentemente, uma diferença de tensão na entrada do amplificador operacional, o que também produz uma variação na sua tensão de saída. Assim, a variação na tensão  $V_o$  faz com que as fontes de correntes se ajustem a nova condição de equilíbrio do anemômetro, no sentido de manter a temperatura do sensor constante.

O modelo matemático para essa estrutura é desenvolvido de forma semelhante ao descrito no capítulo 2. Pelo circuito da figura 3.2, tem-se que:

$$I = gV_o \quad (3.1)$$

A potência elétrica é dada por,

$$P_e = IV_s = gV_oV_s \quad (3.2)$$

Assim, a equação (2.7) pode ser re-escrita, a partir da equação (3.2), como:

$$\boxed{\frac{dR_s}{dt} = \frac{\beta R_o}{mc} [gV_o V_s - S(a + b\vartheta^n)(T_s - T_f)]} \quad (3.3)$$

Pelo circuito da figura 3.1, tem-se que:

$$e^+ = RI = RgV_o, \quad (3.4)$$

e

$$e^- = V_s \quad (3.5)$$

Com isso, a equação (2.11) pode ser re-escrita como:

$$\boxed{\frac{dV_o}{dt} = \frac{G(RgV_o - V_s + V_{os}) - V_o}{\tau}} \quad (3.6)$$

As equações (3.3) e (3.6) representam o modelo matemático do CTA com fontes de corrente controlada.

A expressão para a estimativa da velocidade do fluido é obtida a partir da condição de equilíbrio da equação (3.3). Assim, pode-se escrever que:

$$\boxed{\vartheta = \left\{ \frac{I}{b} \left[ \frac{gV_o V_s}{S(T_s - T_f)} - a \right] \right\}^{\frac{1}{n}}} \quad (3.7)$$

Considerando-se que:

$$R_s = \frac{V_s}{I} = \frac{V_s}{gV_o} \quad (3.8)$$

A temperatura de operação do sensor é obtida a partir da equação (2.4) e (3.8).

Assim,

$$\boxed{T_s = \frac{I}{\beta} \left( \frac{V_s}{R_o g V_o} - I \right)} \quad (3.9)$$

As equações (3.7) e (3.9) expressam os cálculos da velocidade do fluido e da temperatura de operação do sensor  $T_s$ , respectivamente.

Observa-se a semelhança entre as equações (2.15) (com a potência elétrica dada pela equação (2.18)) e (3.7). A diferença entre essas equações é que as potências elétricas dissipadas pelo sensor são definidas de forma diferente, devido às características de cada arquitetura utilizada.

Dessa forma, a compensação da temperatura do fluido com a utilização do sensor de compensação (adicional), pode ser feita da mesma maneira que a descrita na seção 3.1. Assim, o diagrama esquemático desse sistema é apresentado na figura 3.3.

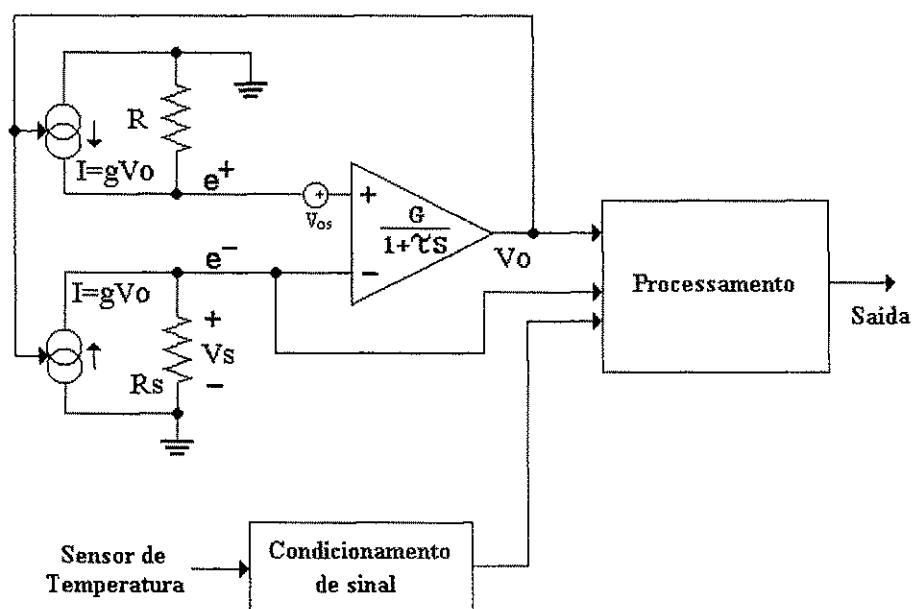


Figura 3.3 – Diagrama de um CTA com sensor de compensação (estrutura com duas fontes de corrente controladas).

As estruturas dos circuitos das figuras 3.1 e 3.3, diferem apenas na configuração do anemômetro a fio quente a temperatura constante. Com isso, os blocos de condicionamento de sinal do sensor de temperatura e de processamento podem ser os mesmos, ou seja, a compensação da temperatura do fluido é feita similarmente entre as duas estruturas. As equações (3.7) e (3.9) são implementadas pelo processador, na configuração com duas fontes de correntes, para a estimativa da velocidade do fluido.

A vantagem dessa estrutura do anemômetro a fio quente a temperatura constante em relação à estrutura tradicional em ponte de wheatstone (figura 2.1), segundo MILLER et al., é que as capacitâncias e indutâncias do cabo que liga o sensor ao circuito não alteram a temperatura de operação do sensor e nem afetam a estabilidade da ponte.

### 3.2 – Anemômetro com dois sensores de fio na ponte

O circuito proposto por TAKAGI (1986) e LOMAS (1986) que utiliza dois sensores termo-resistivos conectados na mesma ponte, porém em braços diferentes, é mostrado na figura 3.4.

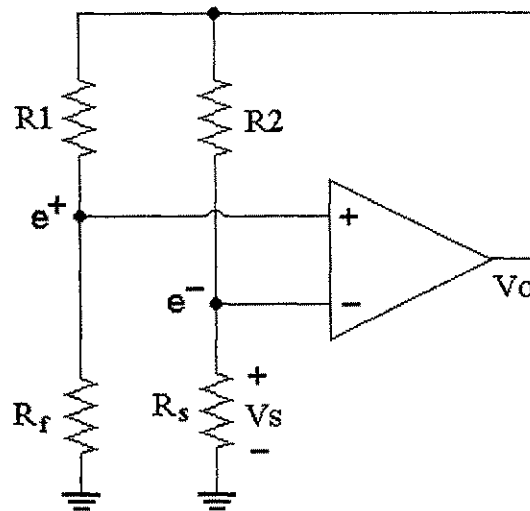


Figura 3.4 – Estrutura de um CTA com dois sensores termo-resistivos

Para mostrar como a compensação da temperatura do fluido, na medição de sua velocidade, TAKAGI (1986) considera que os coeficientes de temperatura dos sensores  $R_s$  e  $R_f$  ( $\beta_s$  e  $\beta_f$ ) são iguais. Nesse circuito, considera-se que o sensor  $R_f$  é utilizado como sensor de compensação de  $T_f$ . Dessa forma, pode-se dizer, pela equação (2.4), que:

$$T_s = \frac{I}{\beta} \left( \frac{R_s}{R_{os}} - 1 \right) \quad (3.10)$$

e

$$T_f = \frac{I}{\beta} \left( \frac{R_f}{R_{of}} - 1 \right) \quad (3.11)$$

Para a condição de regime estacionário da equação do equilíbrio termodinâmico, equação (2.1), tem-se que:

$$R_s I_s^2 = Sh(\vartheta)(T_s - T_f) \quad (3.12)$$

Pelas equações (3.10) e (3.11), tem-se que:

$$T_s - T_f = \frac{I}{\beta} \left( \frac{R_s}{R_{os}} - \frac{R_f}{R_{of}} \right) \quad (3.13)$$

Com isso, pelas equações (3.12) e (3.13), tem-se que:

$$I_s^2 = \frac{I}{R_s \beta} \left( \frac{R_s}{R_{os}} - \frac{R_f}{R_{of}} \right) h(\vartheta) = \frac{I}{\beta} \left( \frac{1}{R_{os}} - \frac{R_f}{R_s R_{of}} \right) h(\vartheta) \quad (3.14)$$

Considerando a condição de equilíbrio da ponte, tem-se que:

$$R_f R_2 = R_s R_1 \quad (3.15)$$

ou seja,

$$R_f = R_s \frac{R_1}{R_2} \quad (3.16)$$

Com as equações (3.14) e (3.16), tem-se que:

$$I_s^2 = \frac{I}{\beta} \left( \frac{1}{R_{os}} - \frac{R_1}{R_2 R_{of}} \right) h(\vartheta) \quad (3.17)$$

ou seja,

$$I_s^2 = \frac{I}{R_{os} \beta} \left( 1 - \frac{R_{os} R_1}{R_{of} R_2} \right) h(\vartheta) \quad (3.18)$$

Pela equação (3.18), observa-se porque TAKAGI não considera os sensores iguais, o motivo é que se os coeficientes de temperatura ( $\beta_s$  e  $\beta_f$ ) são iguais e se suas resistências a 0 °C ( $R_{os}$  e  $R_{of}$ ) também forem iguais, a corrente  $I_s$  seria nula, ou seja, o sinal de saída também seria nulo e não teria nenhuma correspondência com a velocidade do fluido.

Para o caso no qual os sensores apresentam os mesmos coeficientes de temperatura ( $\beta_s = \beta_f = \beta$ ) e diferentes resistências a 0 °C ( $R_{os} \neq R_{of}$ ), observa-se, pela equação (3.18), que o sinal de saída (corrente  $I_s$ ) não depende da temperatura do fluido.

A condição de equilíbrio da ponte (equação (3.15)) não ocorre devido à presença da tensão de desvio do amplificador operacional (FREIRE et al. 1997, 1998 e 1999). Com isso, esse método de compensação da temperatura do fluido apresenta limitações.

### 3.3 – Anemômetro com dois sensores de fio quente

Em 1973, SAKAO propôs uma arquitetura de um anemômetro a fio quente a temperatura constante, em que a compensação da temperatura do fluido  $T_f$  é realizada através da utilização de dois sensores de fio quentes. Para isso são utilizadas duas pontes de Wheatstone. Na figura 3.5 tem-se um diagrama desse tipo de anemômetro.

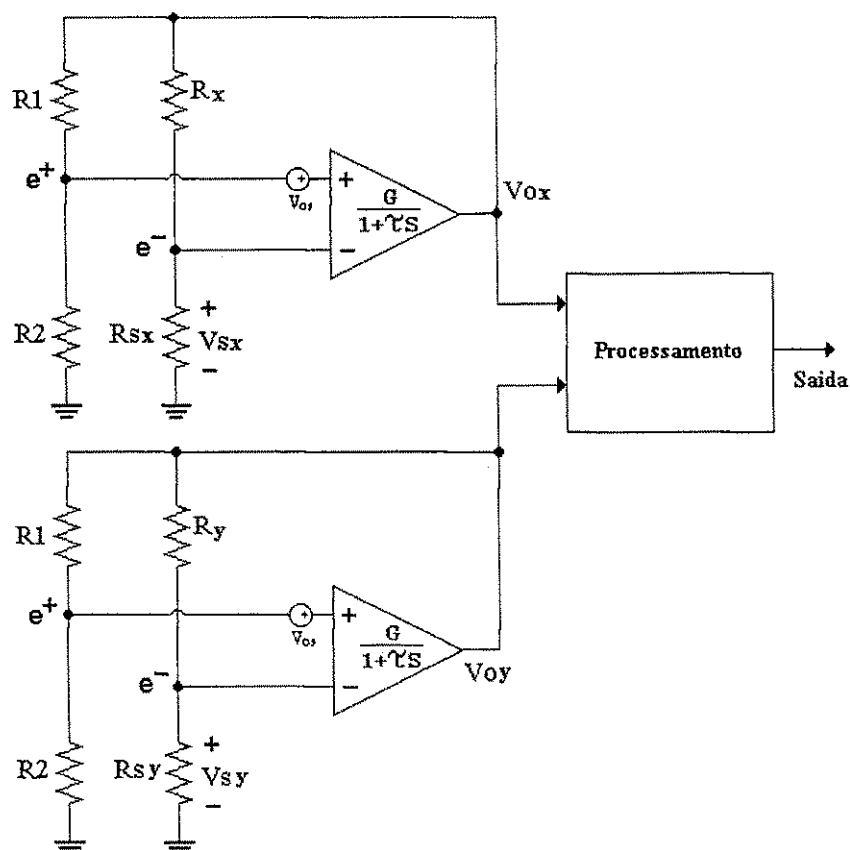


Figura 3.5 – Estrutura de um anemômetro com duas pontes de Wheatstone.

Na estrutura proposta por SAKAO, dois circuitos de CTA são usados. Cada ponte é projetada de forma que cada sensor termo-resistivo,  $R_{sx}$  e  $R_{sy}$ , operem em uma temperatura diferente, determinada pelos resistores  $R_x$  e  $R_y$ , respectivamente.

O princípio usado por SAKAO, para a compensação da temperatura do fluido é que, como os dois sensores aquecidos estão submetidos a velocidade e temperatura do fluido, as potências elétricas dissipadas neles são função dessas grandezas e de sua temperatura de operação, ou seja,  $P_{ex}=f(\vartheta, T_f, T_{sx})$  e  $P_{ey}=f(\vartheta, T_f, T_{sy})$ . Dessa forma, o autor mostra como é possível eliminar a influência de  $T_f$  na estimação da velocidade. Isso é demonstrado na seção 3.3.1.



O bloco de processamento dessa estrutura tem a mesma função e mesma implementação que o do circuito da figura 3.1, diferenciando apenas nas equações mostradas na seção a seguir.

### 3.3.1 – Estimação da velocidade

A estimação da velocidade do fluido com anemômetros CTA com dois sensores aquecidos, é feita a partir do equilíbrio térmico para cada temperatura de operação do sensor. Assim,

Para o resistor  $R_x$ ,

$$P_{ex} = S(a + b\vartheta^n)(T_{sx} - T_f) \quad (3.19)$$

e para o resistor  $R_y$ ,

$$P_{ey} = S(a + b\vartheta^n)(T_{sy} - T_f) \quad (3.20)$$

Com as equações (3.19) e (3.20), pode-se determinar a expressão do cálculo da velocidade do fluido:

$$\vartheta = \left\{ \frac{I}{b} \left[ \frac{P_{ex} - P_{ey}}{S(T_{sx} - T_{sy})} - a \right] \right\}^{\frac{1}{n}} \quad (3.21)$$

Observa-se pela expressão de estimação da velocidade do fluido (3.21) que seu valor independe da temperatura  $T_f$ .

As temperaturas de operações e as potências elétricas dos sensores podem ser obtidas a partir das equações (2.17) e (2.18), respectivamente. Assim,

$$T_{sx} = \frac{I}{\beta} \left( \frac{R_x V_{sx}}{R_o(V_{ox} - V_{sx})} - I \right) \quad \text{e} \quad T_{sy} = \frac{I}{\beta} \left( \frac{R_y V_{sy}}{R_o(V_{oy} - V_{sy})} - I \right) \quad (3.22)$$

e,

$$\boxed{P_{ex} = \frac{V_{sx}(V_{ox} - V_{sx})}{R_x}} \quad \text{e} \quad \boxed{P_{ey} = \frac{V_{sy}(V_{oy} - V_{sy})}{R_y}} \quad (3.23)$$

É importante enfatizar, que esse método é exato se os sensores forem idênticos e submetidos à mesma velocidade do fluido, caso contrário tem-se erros na estimativa.

### 3.4 – CTA com sensor de compensação: uma solução analógica

Em 1989, SAVOSTENKO e SERBIN propuseram uma arquitetura de um anemômetro a fio quente a temperatura constante, na qual a compensação da temperatura do fluido é feita através de uma corrente aplicada na entrada não inversora do amplificador operacional, conforme a figura 3.6. O valor dessa corrente varia com a temperatura do fluido.

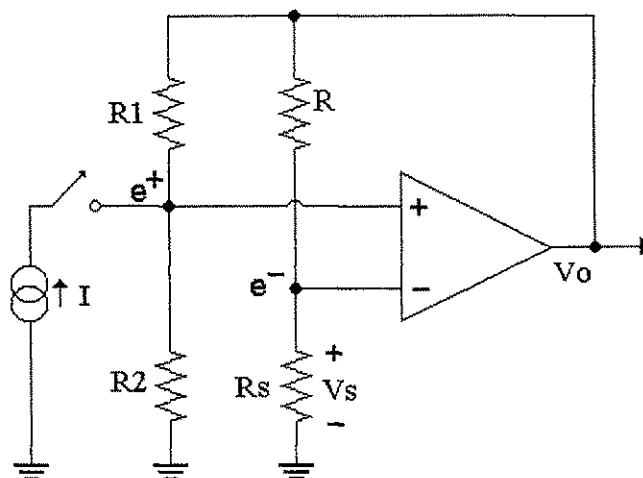


Figura 3.6 – Estrutura de um anemômetro proposto por Savostenko.

Para ver como a compensação de  $T_f$  é realizada, será feita a análise do circuito. Para o circuito proposto, considerou-se que:

$$R_1 = R_2 \quad (3.24)$$

e que a tensão de desvio do amplificador operacional é nula. Assim,

$$e^+ = e^- \quad (3.25)$$

Pelo circuito da figura 3.6, tem-se que:

$$e^+ = \frac{I}{2}V_o + \frac{R_2}{2}I \quad (3.26)$$

e,

$$e^- = V_s \quad (3.27)$$

Pelas equações (3.25), (3.26) e (3.27), tem-se que:

$$V_s = \frac{I}{2}V_o + \frac{R_2}{2}I \quad (3.28)$$

Para a condição de regime estacionário da equação do equilíbrio termodinâmico, equação (2.1), tem-se que:

$$P_e = Sh(\vartheta)(T_s - T_f) \quad (3.29)$$

Para,

$$P_e = \frac{V_s^2}{R_s} \quad (3.30)$$

tem-se, pela equação (3.28),

$$V_s^2 = \frac{I}{4}(V_o^2 + 2R_2V_oI + R_2^2I^2) \quad (3.31)$$

ou seja,

$$P_e = \frac{I}{4R_s}(V_o^2 + 2R_2V_oI + R_2^2I^2) \quad (3.32)$$

Das equações (3.29) e (3.32), tem-se que:

$$V_o^2 = 4R_s Sh(\vartheta)T_s - 4R_s Sh(\vartheta)T_f - 2R_2V_oI - R_2^2I^2 \quad (3.33)$$

Para que a saída do anemômetro ( $V_o$ ) seja independente de  $T_f$ , é necessário que:

$$R_2^2I^2 + 2R_2V_oI + 4R_s Sh(\vartheta)T_f = 0 \quad (3.34)$$

ou seja,

$$I = \frac{-V_o \left( I + \sqrt{\frac{T_s - T_f}{T_s}} \right)}{R_2} \quad (3.35)$$

A equação (3.35) expressa o valor da corrente  $I$  aplicada na entrada não inversora do amplificador operacional, de forma que a tensão na saída do circuito  $V_o$ , não varie com a temperatura do fluido.

O diagrama de blocos do circuito proposto por SAVOSTENKO e SERBIN, é mostrado na figura 3.7.

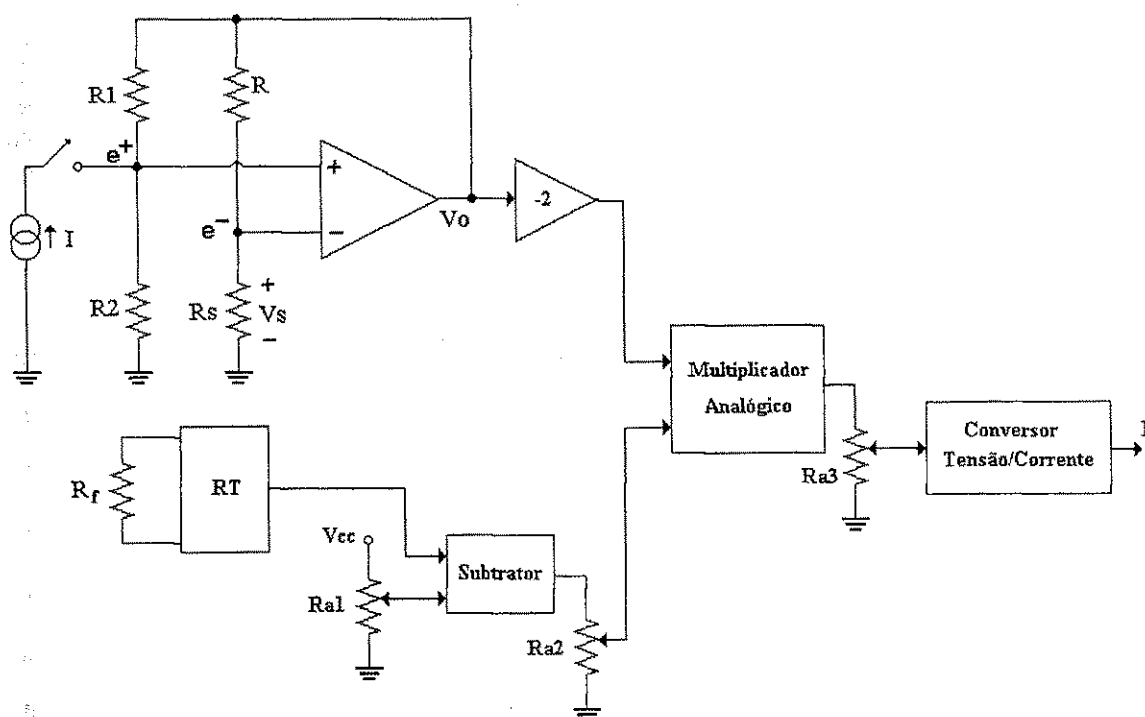


Figura 3.7 – Diagrama de blocos do anemômetro proposto por Savostenko.

O bloco  $RT$  faz a medição da temperatura do fluido  $T_f$  que é enviada ao bloco *subtrator*. Esse bloco fornece em sua saída um sinal proporcional a  $T_s - T_f$ . O valor de  $T_s$  é calibrado no potenciômetro  $R_{a1}$ . A saída do bloco *subtrator* passa por um divisor de tensão, formado pelo potenciômetro  $R_{a2}$ , que é calibrado para gerar um sinal proporcional a  $1 + \sqrt{(T_s - T_f)/T_s}$ . Esse sinal juntamente com o sinal de saída do anemômetro  $V_o$  são aplicados em um bloco *multiplicador*. A saída do bloco *multiplicador* é aplicada em um divisor de tensão, formado pelo potenciômetro  $R_{a3}$ , de forma a implementar a equação (3.35). Antes de ser aplicado na entrada não inversora do amplificador operacional, esse sinal passa por um bloco *conversor tensão/corrente*.

Observa-se que algumas funções implementadas com divisores de tensão, no circuito proposto, não são precisas, o que limita o método à pequenas variações de  $T_f$ .

Dessa forma, o circuito necessita de ajustes constantes, o que, segundo o autor, o limita a ensaios em laboratório tendo em vista as complexidades nos ajustes do circuito, bem como um controle sobre a temperatura do fluido para que os erros obtidos nas aproximações das expressões com os divisores de tensão, sejam os menores possíveis.

## 4 – CTA com Sensor Único

---

Apresenta-se nesse capítulo uma investigação da compensação da variação da temperatura do fluido com anemômetros a fio quente a temperatura constante utilizando-se apenas um sensor. São investigadas duas propostas de arquiteturas diferentes: CTA com chaveamento de resistores com ponte de Wheatstone e CTA com ciclos de potência zero.

### 4.1 – CTA com chaveamento de resistores em ponte de Wheatstone

A proposta de um anemômetro a fio quente a temperatura constante utilizando-se apenas um sensor, foi proposta por OLIVEIRA, FREIRE et al. em 1997 e serviu de referência para o desenvolvimento desse trabalho. Porém, OLIVEIRA considera o amplificador operacional ideal, ou seja, com a tensão de desvio nula, ganho de malha aberta infinito e resposta em frequência infinita. Nesse trabalho considera-se o amplificador operacional real.

O princípio utilizado para a realização da compensação da temperatura do fluido com CTA com sensor único com chaveamento de resistores na ponte de Wheatstone baseia-se na configuração que utiliza dois sensores aquecidos operando em temperaturas diferentes, conforme apresentado na seção 3.3 (SAKAO, 1973).

Pela estrutura do anemômetro mostrada na figura 3.5, observa-se que as duas pontes são iguais, exceto pelo uso dos resistores  $R_x$  e  $R_y$ , que determinam a temperatura dos sensores em cada ponte. A proposta de OLIVEIRA, FREIRE et al. (1997a) é utilizar apenas uma ponte e fazer chavear dois resistores de modo a se ter uma configuração equivalente a da estrutura proposta por SAKAO. O diagrama dessa configuração é apresentado na figura 4.1.

Pelo circuito da figura 4.1, tem-se que com o chaveamento dos resistores, a temperatura de operação do sensor alterna entre dois valores ( $T_{sx}$  e  $T_{sy}$ ) determinados pelos resistores  $R_x$  e  $R_y$ . Essa configuração é semelhante a que utiliza duas pontes, exceto pelo

fato de que as temperaturas  $T_{sx}$  e  $T_{sy}$  são obtidas em instantes diferentes, devido ao chaveamento.

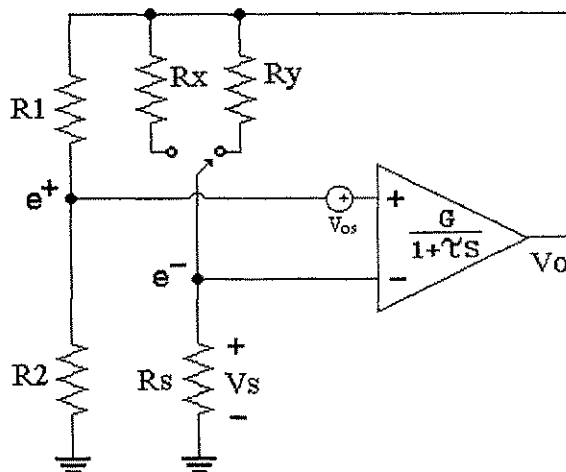


Figura 4.1 – Estrutura de um CTA com compensação de  $T_f$  usando um único sensor

As equações necessárias à estimação da velocidade do fluido, são as mesmas apresentadas na seção 3.3.1. Porém, na estrutura do anemômetro com chaveamento de resistores, as aquisições das tensões sobre o sensor e na saída do amplificador operacional para cada temperatura de operação, são feitas em intervalos de tempo diferentes. Como o método foi desenvolvido para duas pontes operando simultaneamente, essas tensões podem ser adquiridas no mesmo instante, o que significa dizer que a velocidade e a temperatura do fluido são as mesmas no instante da aquisição das amostras. Com isso, observa-se que o método só é válido se  $\vartheta$  e  $T_f$  são constantes durante o intervalo das aquisições. Essa condição é verdadeira para a estrutura da figura 3.5, já que isso é feito simultaneamente. Para o caso da estrutura com o chaveamento dos resistores, essa condição só é válida para velocidades constantes, pois as aquisições dessas tensões ocorrem em tempos diferentes.

Esse fato implica na ocorrência em erros na estimativa de velocidades variantes no tempo com a estrutura da figura 4.1. Porém, se a frequência de chaveamento dos resistores for bem maior que a variação da velocidade do fluido, esses erros podem ser reduzidos. Na seção 4.1.2, apresenta-se um estudo sobre o erro cometido na estimativa de  $\vartheta$ .

A frequência de chaveamento dos resistores depende do tempo de resposta do anemômetro. O estudo do tempo de resposta do anemômetro foi apresentado na seção 2.5.

A seguir são apresentados resultados de simulações para a observação dos erros cometidos na estimativa de velocidades variantes do fluido.

#### 4.1.1 – Simulação

As simulações foram realizadas com os dados da tabela 1. Para isso, aplicou-se uma variação senoidal de velocidade de  $5\text{ Hz}$  ( $v=3+2\text{sen}(2\pi 5t)\text{ m/s}$ ). A temperatura do fluido  $T_f$  foi mantida constante em  $30\text{ }^\circ\text{C}$  e a tensão de desvio do amplificador  $V_{os}$  em  $5\text{ mV}$ . O resultado dessa simulação é apresentado na figura 4.2. A velocidade do fluido foi estimada a partir das equações (3.20), (3.21) e (3.22).

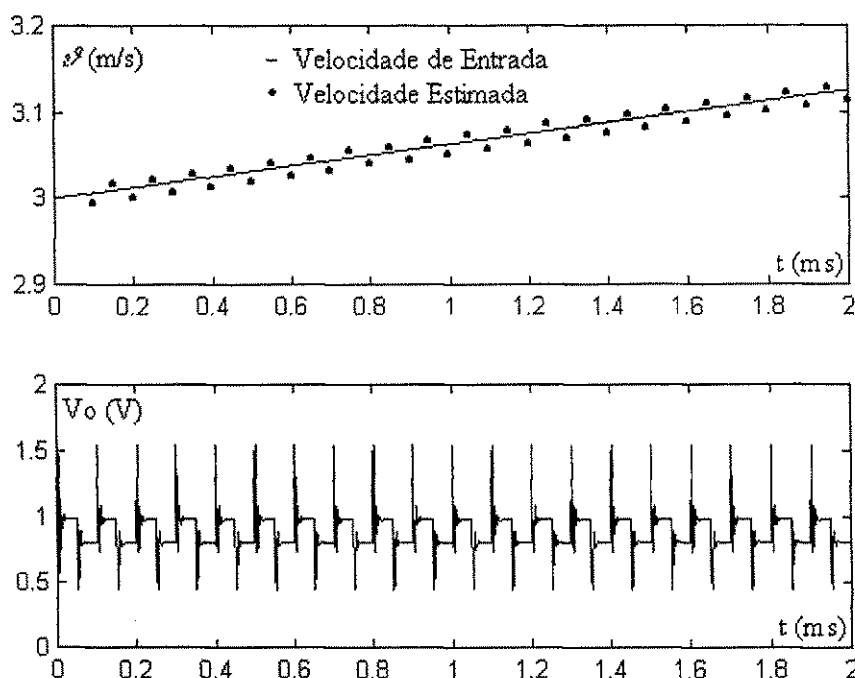


Figura 4.2 – Resultado da simulação da estimativa de velocidade com CTA com chaveamento de resistores ( $v=3+2\text{sen}(2\pi 5t)\text{ m/s}$ ).

Para uma velocidade de fluido com variação de  $5\text{ Hz}$  (figura 4.2) e uma frequência de chaveamento dos resistores de  $10\text{ kHz}$ , o erro na estimativa é pequeno (curva pontilhada na figura 4.2). A velocidade do fluido é estimada sempre nas regiões de estabilidade das tensões  $V_s$  e  $V_o$ , para se evitar as oscilações provocadas pelo chaveamento dos resistores. Na figura 4.3 tem-se o resultado da simulação de um chaveamento do resistor  $R_x$  para o



resistor  $R_y$  e a as variações ocorridas na tensão de saída do amplificador operacional, de  $V_{ox}$  para  $V_{oy}$ , respectivamente.

Na figura 4.3.a tem-se a identificação dos instantes em que o resistor  $R_x$  está conectado no circuito ( $t < 2 \text{ ms}$ ), bem como o resistor  $R_y$  ( $t > 2 \text{ ms}$ ). Na figura 4.3.b tem-se a identificação dos instantes em que as tensões  $V_{ox}$  e  $V_{oy}$  atingem a estabilidade, o que permite suas aquisições para a estimação da velocidade do fluido.

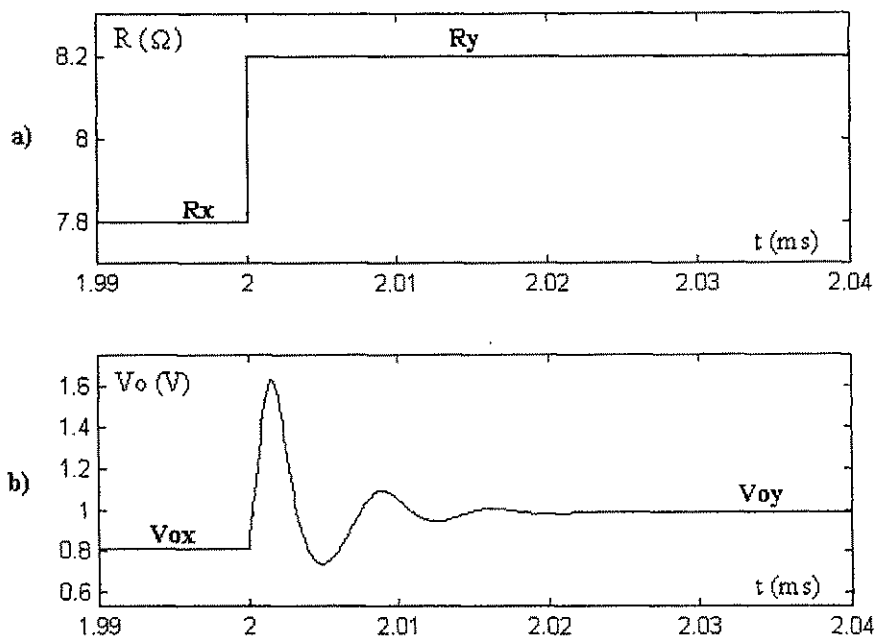


Figura 4.3 – Resultado de uma simulação de um chaveamento dos resistores. a) Chaveamento do resistor  $R_x$  para  $R_y$ ; b) Transitório ocorrido na tensão de saída do amplificador operacional após um chaveamento.

Pela figura 4.3.b, observa-se que o tempo de resposta do sistema é em torno de  $30 \mu s$  (esse tempo também foi observado na seção 2.4) para um chaveamento de  $R_x$  para  $R_y$ . Para um ciclo completo de chaveamento dos resistores, ou seja,  $R_x$  para  $R_y$  e depois para  $R_x$ , o tempo necessário para isso é o dobro do obtido com um chaveamento, ou seja,  $60 \mu s$ . Por isso que nas simulações considerou-se um chaveamento dos resistores de  $10 \text{ kHz}$  (período de  $100 \mu s$ ).

Para se observar a variação do erro quando a frequência de variação da velocidade aumenta, será realizada uma simulação na qual a velocidade do fluido apresenta uma variação de  $500 \text{ Hz}$  ( $v = 3 + 2\text{sen}(2\pi 500t) \text{ m/s}$ ). O resultado dessa simulação é mostrado na figura 4.4.

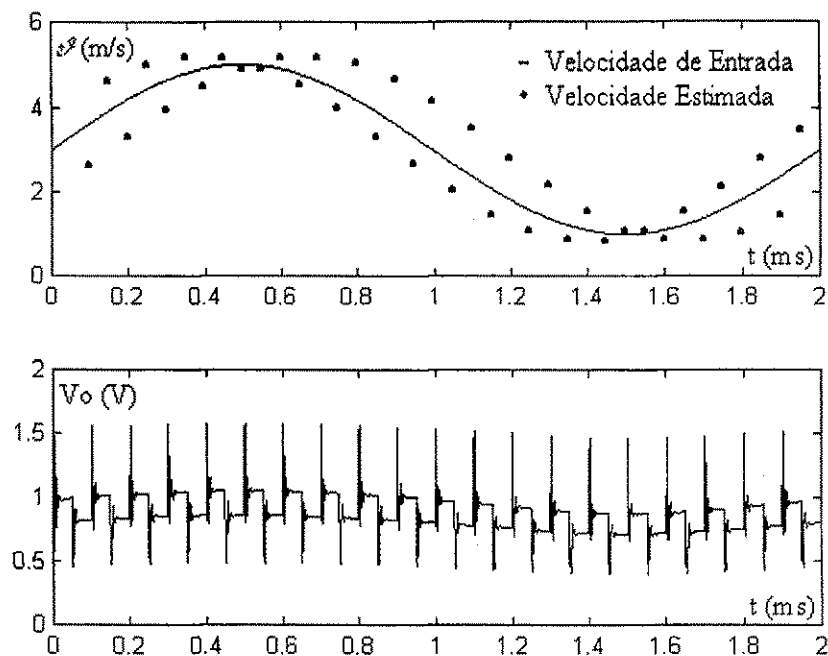


Figura 4.4 – Resultado da simulação da estimação de velocidade com CTA com chaveamento de resistores ( $v=3+2\text{sen}(2\pi 500t)$  m/s).

Observa-se pelo resultado da simulação mostrada na figura 4.4, que o erro na estimativa da velocidade já é bem considerável para essa faixa de frequências de variação do fluido. Isso constitui em uma limitação da resposta em frequência do anemômetro proposto.

Pelas figuras 4.2 e 4.4, observa-se que o erro obtido nas estimações da velocidade alterna entre valores positivos e negativos. Com isso pode-se esperar que com a utilização de um filtro possa-se reduzir o erro da velocidade estimada. Para isso foi utilizado um filtro passa baixa Butterworth de segunda ordem com frequência de corte de 5 kHz, pois a frequência de chaveamento dos resistores era de 10 kHz. O resultado do sinal filtrado é mostrado na figura 4.5.

Observa-se pela figura 4.5 que o erro após a filtragem do sinal estimado é bem menor. Com isso, a resposta em frequência do sistema melhora. Observa-se, ainda, que o erro no início da filtragem é maior que no estado de regime do filtro. Isso ocorre porque no início da filtragem, a quantidade de amostras é bem pequena o que compromete o desempenho do filtro.

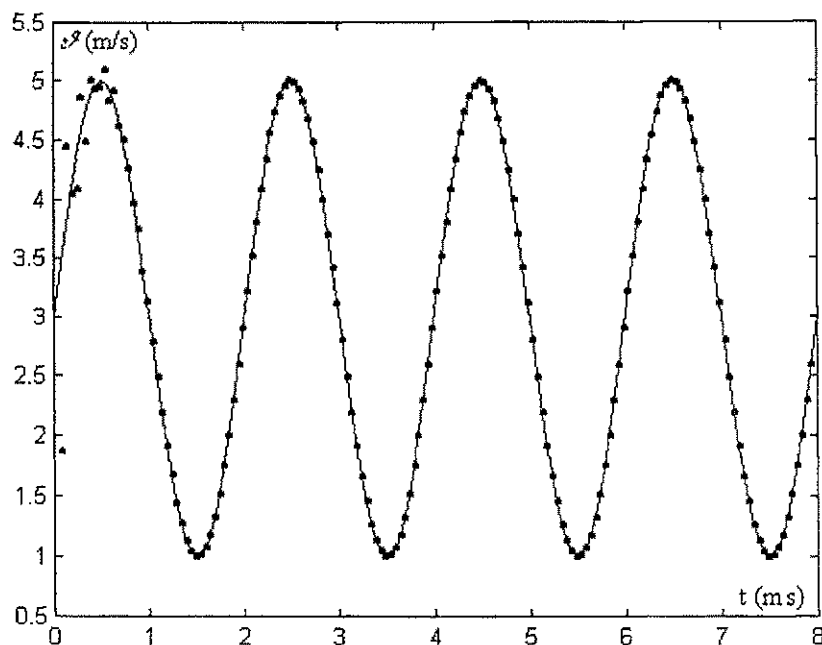


Figura 4.5 – Estimação da velocidade com filtragem digital. A curva contínua corresponde à velocidade do fluido de entrada. A curva pontilhada corresponde à velocidade estimada do fluido na saída do filtro.

#### 4.1.2 – Erro na estimativa de velocidades variantes

O método de compensação da temperatura do fluido na estimativa de sua velocidade, foi concebido para velocidades constantes nas duas temperaturas de operação do sensor. Esse fato implica em erros na estimativa de velocidades variantes, conforme apresentado na seção 4.1.1.

O erro na estimativa da velocidade é uma função da variação da velocidade  $\vartheta$  entre as amostras das tensões sobre o sensor e na saída do amplificador operacional, ou seja, é função da máxima frequência de variação de  $\vartheta$ . Quanto maior for a variação na velocidade, maior será o erro, e vice-versa (figuras 4.2 e 4.4).

Para o circuito do CTA com chaveamento dos resistores, as amostras das tensões  $V_s$  e  $V_o$  são adquiridas após a estabilização dessas tensões, cujo transitório é provocado pelo chaveamento dos resistores. No instante da aquisição das tensões, a chave pode estar selecionando um dos dois resistores,  $R_x$  ou  $R_y$ . Portanto, na aquisição de uma amostra  $k$  das tensões  $V_s$  e  $V_o$ , a temperatura de operação do sensor que depende do resistor selecionado

pela chave no instante da aquisição dessa amostra. Com isso, numa amostra anterior  $k-1$  (ou posterior,  $k+1$ ), tem-se a outra temperatura de operação do sensor.

Analisando o sistema por amostras e não pelo resistor selecionado, tem-se que as equações (2.1) e (2.2) podem ser re-escritas da seguinte forma, para velocidades variantes:

$$P_{ek} = S(a + b\vartheta_k^n)(T_{sk} - T_f) \quad (4.1)$$

e

$$P_{ek-1} = S(a + b\vartheta_{k-1}^n)(T_{sk-1} - T_f) \quad (4.2)$$

Para velocidades variantes, considera-se que entre uma amostra ( $k$ ) e outra ( $k-1$ ) a velocidade do fluido variou de um fator  $\alpha$ , dado pela expressão:

$$\vartheta_{k-1} = \alpha\vartheta_k \quad (4.3)$$

Pela equação (4.3), observa-se que para  $\alpha < 1$  a velocidade do fluido é crescente, para  $\alpha > 1$  a velocidade é decrescente e para  $\alpha = 1$  a velocidade é constante.

Assim a equação (4.2) pode ser re-escrita como:

$$P_{ek-1} = S[a + b(\alpha\vartheta_k)^n](T_{sk-1} - T_f) \quad (4.4)$$

Com isso, a partir dessas equações (4.1) e (4.4), pode-se determinar a expressão do cálculo da amostra  $k$  para velocidades variantes  $\vartheta_{kv}$ .

$$\vartheta_{kv} = \left\{ \frac{P_{ek} - P_{ek-1} - Sa(T_{sk} - T_{sk-1})}{Sb[(T_{sk} - T_f) - (T_{sk-1} - T_f)\alpha^n]} \right\}^{\frac{1}{n}} \quad (4.5)$$

Os resultados obtidos na estimativa da velocidade do fluido apresentados na seção 4.1.1 foram calculados a partir da equação (3.20), que é válida para velocidades constantes. Assim, para uma determinada amostra  $k$ , a equação (3.20) pode ser re-escrita da seguinte forma:

$$\vartheta_{kc} = \left\{ \frac{1}{b} \left[ \frac{P_{ek} - P_{ek-1}}{S(T_{sk} - T_{sk-1})} - a \right] \right\}^{\frac{1}{n}} \quad (4.6)$$

no qual,  $\vartheta_{kc}$  é o valor estimado de uma amostra  $k$  para velocidades constantes.

Para o cálculo das equações (4.5) e (4.6), os valores das potências elétricas e das temperaturas de operação do sensor podem ser re-escritos a partir das equações (3.21) e (3.22):

$$T_{sk} = \frac{I}{\beta} \left( \frac{R_k V_{sk}}{R_o (V_{ok} - V_{sk})} - 1 \right) \quad \text{e} \quad T_{sk-1} = \frac{I}{\beta} \left( \frac{R_{k-1} V_{sk-1}}{R_o (V_{ok-1} - V_{sk-1})} - 1 \right) \quad (4.7)$$

e

$$P_{ek} = \frac{V_{sk} (V_{ok} - V_{sk})}{R_k} \quad \text{e} \quad P_{ek-1} = \frac{V_{sk-1} (V_{ok-1} - V_{sk-1})}{R_{k-1}} \quad (4.8)$$

A equação (4.5) permite a estimação de velocidades variantes, porém o valor da temperatura do fluido e o fator de variação da velocidade entre as amostras adquiridas devem ser conhecidos. Com isso, a equação (4.6) é utilizada na estimação de velocidades variantes de fluidos e os erro nessa estimativa são observados nas figuras 4.2 e 4.4 (seção 4.1.1).

O erro na estimativa da velocidade do fluido é dado por:

$$erro_k (\%) = \frac{\vartheta_{kv} - \vartheta_{kc}}{\vartheta_{kv}} \times 100 \quad (4.9)$$

Assim, pelas equações (4.5) e (4.6), tem-se que:

$$erro_k (\%) = \left\{ 1 - \left[ \frac{(T_{sk} - T_{sk-1})}{[(T_{sk} - T_f) - (T_{sk-1} - T_f)\alpha^n]} \right]^{\frac{1}{n}} \right\} \times 100 \quad (4.10)$$

Devido ao chaveamento dos resistores (figura 4.1), a transição da temperatura do sensor pode ser positiva ou negativa, isso é definido pela diferença entre as temperaturas de operação do sensor,  $T_{sk}$  e  $T_{sk-1}$  ( $T_{sk} - T_{sk-1} > 0$  a transição de  $T_s$  é positiva, ou vice versa). Também foi definido anteriormente que, para  $\alpha < 1$ , a velocidade do fluido é crescente e para  $\alpha > 1$  a velocidade é decrescente. Portanto, pela equação (4.10) o erro depende da transição de  $T_s$  (positiva ou negativa) e da variação da velocidade do fluido. Para  $\alpha = 1$  (velocidade constante) o erro é idealmente nulo.

Com as transições positivas e negativas da temperatura do sensor e das variações da velocidade do fluido, o erro na estimativa de  $\vartheta$  pode ser negativo ou positivo (figuras 4.2 e 4.4). Na figura 4.6 tem-se a curva do erro para vários valores de  $T_{sk}$ ,  $T_{sk-1}$  e  $T_f$ .

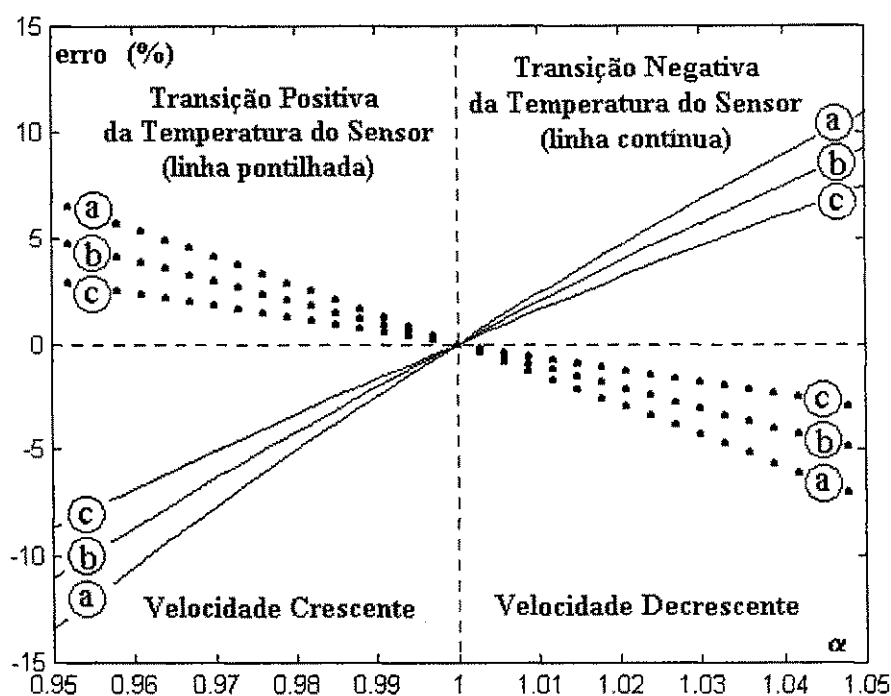


Figura 4.6 – Erro na estimativa da velocidade do fluido com o uso da equação (4.6)

No primeiro quadrante tem-se que o erro é positivo para uma transição negativa de  $T_s$  e velocidade decrescente. No segundo quadrante tem-se que o erro é positivo para uma transição positiva de  $T_s$  e velocidade crescente. No terceiro quadrante tem-se que o erro é negativo para uma transição negativa de  $T_s$  e velocidade crescente. No quarto quadrante tem-se que o erro é negativo para uma transição positiva de  $T_s$  e velocidade decrescente.

Os resultados das simulações apresentadas na figura 4.6, foram obtidos a partir da solução da equação 4.10, considerando que a diferença  $T_{sk}-T_{sk-1}$  sempre é de 50 °C. A curva a foi obtida para vários valores de  $T_{sk}$ ,  $T_{sk-1}$  e  $T_f$  de modo que  $T_{sk}-T_f=70$  °C e  $T_{sk-1}-T_f=120$  °C. A curva b foi obtida para vários valores de  $T_{sk}$ ,  $T_{sk-1}$  e  $T_f$  de tal modo que  $T_{sk}-T_f=50$  °C e  $T_{sk-1}-T_f=100$  °C. A curva c foi obtida para vários valores de  $T_{sk}$ ,  $T_{sk-1}$  e  $T_f$  de tal modo que  $T_{sk}-T_f=30$  °C e  $T_{sk-1}-T_f=80$  °C.

Com isso, observa-se que, mantendo-se as diferenças  $T_{sk}-T_f$ ,  $T_{sk-1}-T_f$  e  $T_{sk}-T_{sk-1}$  constantes, o erro é o mesmo. Porém quando as diferenças  $T_{sk}-T_f$  e  $T_{sk-1}-T_f$  diminuem, o

erro também diminui (o erro da curva *c* é menor que da curva *a*). Isso pode ser observado pela equação 4.10.

## 4.2 – CTA com ciclo de potência zero

Uma configuração de um anemômetro a fio quente a temperatura constante compensado em temperatura do fluido utilizando-se apenas um sensor, foi proposta na seção anterior. Os resultados de simulações apresentados mostram que essa configuração apresenta bons resultados para fluidos laminares ou com pouca turbulência, devido a sua resposta em frequência (isso também foi comprovado em experimentos práticos).

Uma solução para melhorar a resposta em frequência do CTA com sensor único, seria a de se variar a temperatura de operação do sensor, através de um chaveamento, de tal forma que o mesmo atingisse a temperatura do fluido, conforme mostrado na figura 4.7.

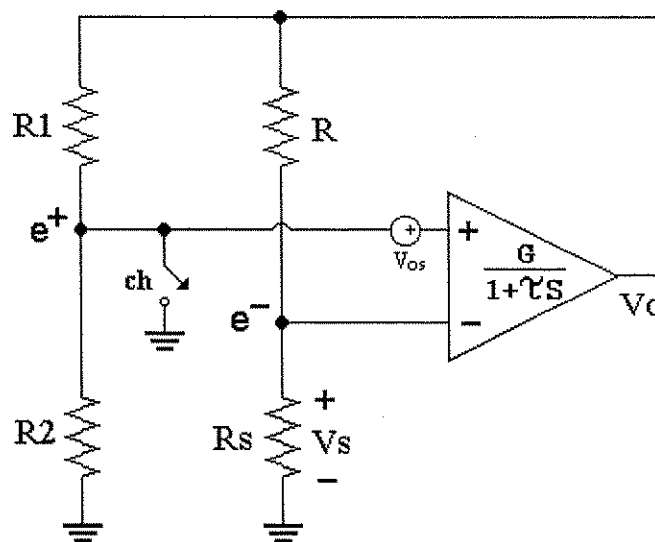


Figura 4.7 – CTA com ciclo de potência zero

A configuração apresentada na figura 4.7 é uma solução na qual aterrando-se a entrada não inversora do amplificador operacional através da chave *ch*, a corrente sobre o sensor será praticamente zero (devido à presença da tensão de desvio do amplificador operacional), o que levaria o sensor à potência zero. Estando no estado de potência zero, a

resistência do sensor é função apenas da temperatura do fluido, já que com o sensor não aquecido (potência zero) a velocidade do fluido não exerce nenhuma influência sobre o sensor.

Quando a chave  $ch$  é fechada, o circuito se reduz a uma estrutura de um amplificador inversor. Sabendo-se o valor da tensão de desvio  $V_{os}$  (equação (2.14)) um instante antes de se fechar a chave, pode-se estimar o valor da temperatura do fluido  $T_f$  a partir do sinal de saída  $V_o$  e do ganho do amplificador inversor.

A chave  $ch$  será fechada durante um intervalo de tempo pequeno o suficiente para que o sistema detecte a temperatura do fluido, depois disso, a chave abre e o anemômetro volta a operar normalmente (sensor aquecido) e a velocidade do fluido será estimada a partir das equações (2.15), (2.17) e (2.18) utilizando-se o valor medido de  $T_f$ . A frequência dos ciclos de potência zero será determinada pela máxima frequência de variação de  $T_f$  o que faria com que o seu valor fosse corrigido a cada ciclo de potência zero.

Na figura 4.8 tem-se o resultado de uma simulação na qual o controle de potência zero é utilizado para que a temperatura do sensor atinja a temperatura do fluido  $T_f$ . Observa-se que a precisão da estimativa da velocidade do fluido fora do intervalo de potência zero é comparável aos resultados das configurações que utilizam dois sensores. Durante o intervalo de potência zero, observa-se que se perde a informação de velocidade. Isso é um resultado óbvio, uma vez em que o sensor não estando aquecido não sofre influências da velocidade do fluido. Portanto, as informações de velocidade durante esse intervalo são perdidas.

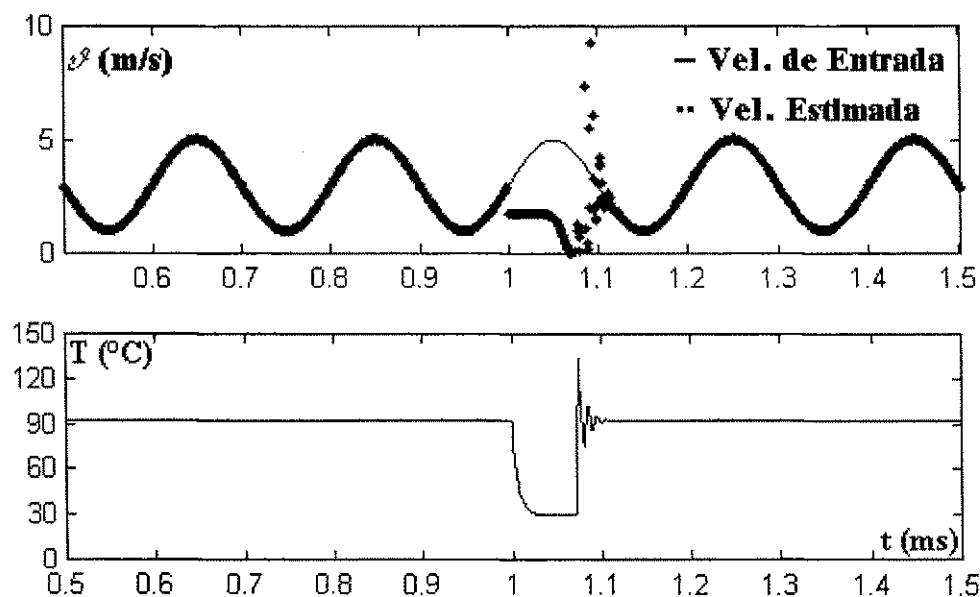


Figura 4.8 – Resultado de simulação de um anemômetro com controle de potência zero



O arquivo escrito em MATLAB, está mostrado no Apêndice E.

Na figura 4.9, observa-se que no instante  $t = 1 \text{ ms}$  tem-se o início de um ciclo de potência zero. A temperatura de operação do sensor cai de  $93 \text{ }^\circ\text{C}$  para  $30,0011 \text{ }^\circ\text{C}$ . Antes e depois do ciclo de potência zero, o erro na estimativa da velocidade do fluido é bem reduzido (curva pontilhada). Durante o ciclo de potência zero, não é possível estimar a velocidade, pois o sensor não está aquecido.

Na figura 4.9 tem-se uma ampliação da figura 4.8 adicionada com o gráfico da tensão na saída do amplificador operacional  $V_o$ . Vê-se claramente que durante o intervalo de potência zero, a temperatura do sensor é praticamente igual a  $T_f$ .

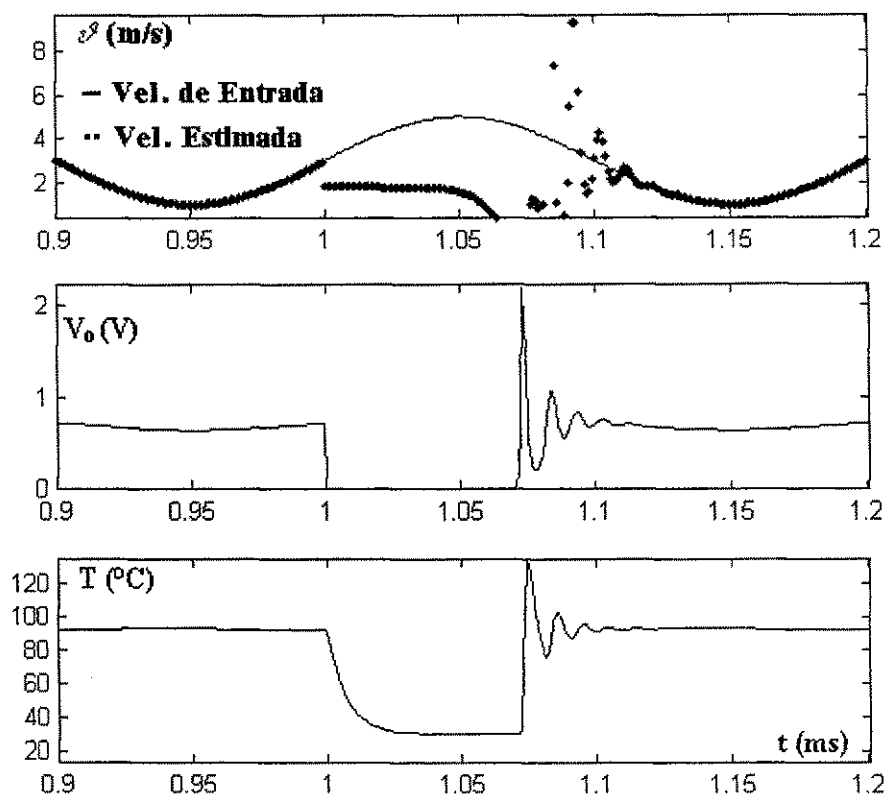


Figura 4.9 – Detalhe do resultado da simulação de um anemômetro com controle de potência zero

Pelo resultado apresentado na figura 4.9, observa-se que o tempo de duração da potência zero foi de aproximadamente  $130 \mu\text{s}$ , o que comprometeu a estimativa de meio ciclo da velocidade do fluido que apresentava uma frequência de  $5 \text{ kHz}$ . A utilização de sensores mais rápidos permitirá a medição de fluidos mais turbulentos e com pouca perda de informação de velocidade.

Essa configuração constitui em uma boa solução de um anemômetro a fio quente a temperatura constante com um único sensor, que permite a medição de velocidades de fluidos turbulentos.

A utilização de apenas um sensor resolve vários problemas associados aos anemômetros a fio quente como por exemplo na medição de velocidades de fluidos que apresentam um gradiente de temperatura elevado.

### **4.3 – Implementação do CTA com microestruturas MEMS**

A proposta apresentada para um anemômetro a fio quente a temperatura constante com compensação da temperatura do fluido usando apenas um sensor, pode ser implementada em microestruturas MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems). Para isso, teria que definir as características do anemômetro, como: temperatura de operação do sensor e tempo de resposta do circuito. Com essas especificações, pode-se determinar as características físicas do circuito e, principalmente do sensor. Em (RASMUSSEN e ZAGHLOUL, 1998), mostra-se que existem sensores implementados com MEMS que operam numa faixa de velocidade de fluido até 40 *m/s*.

Uma outra grande vantagem dessa tecnologia é a possibilidade de se implementar num mesmo substrato, tanto o sensor quanto o circuito eletrônico do anemômetro. Dessa forma, eliminar-se-ia os cabos que fazem a conexão do sensor com o circuito, que introduzem resistências no sistema, que precisam ser compensadas, além de ruídos. Assim, o sinal seria tratado no próprio substrato e o sinal (analógico ou digital) de saída já processado seria enviado a um sistema de aquisição de dados.

Um problema associado a essa implementação, seria o fato de que todo o circuito, inclusive o sensor, estaria submetido às influências da temperatura do fluido. Com isso, a tensão de desvio do amplificador operacional seria afetada por essa temperatura e, conseqüentemente, teria-se problemas com o tempo de resposta e estabilidade do sistema. Uma proposta para solucionar esse problema é apresentada no capítulo 5.

## 5 – Controle da Tensão de Desvio $V_{os}$

A resposta em frequência dos anemômetros a fio quente é função da constante de tempo intrínseca do sensor, da resposta em frequência do amplificador operacional e de sua tensão de desvio  $V_{os}$ , seção 2.5. A tensão de desvio do amplificador operacional também afeta a temperatura de operação do anemômetro, equação (2.19), e a estabilidade do sistema (OLIVEIRA, 1997c).

Para se ajustar a tensão de desvio de forma a se obter a melhor resposta em frequência do sistema, utilizou-se nos experimentos práticos o circuito da figura 5.1. Nesse circuito usou-se o amplificador operacional TL081, que possui dois terminais exclusivos para o ajuste de  $V_{os}$ . Outros amplificadores operacionais também possuem esses terminais de ajuste, como o LM741 e o TL082.

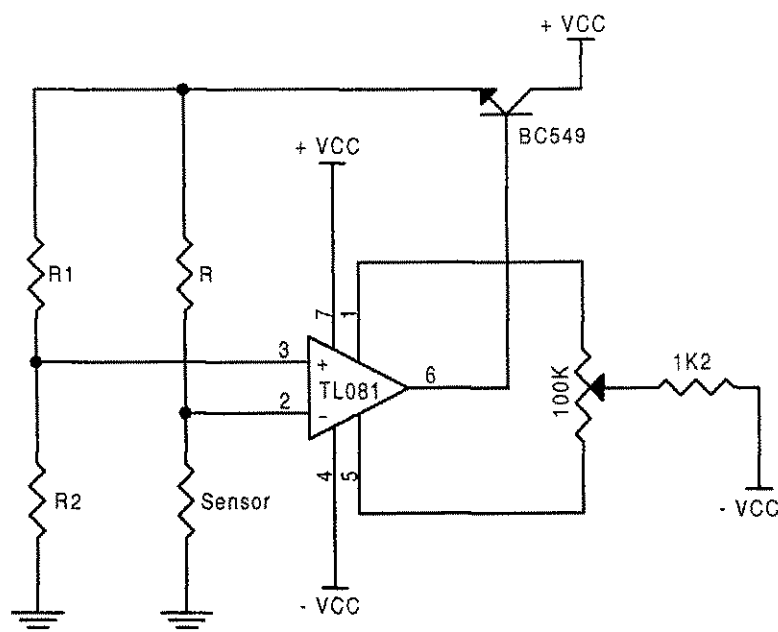


Figura 5.1 – Anemômetro de fio quente com ajuste da tensão de desvio

O ajuste de  $V_{os}$  é feito com um potenciômetro, de forma a se obter o melhor tempo de resposta. Durante o ajuste, a tensão  $V_{os}$  pode ser estimada a partir da equação (2.14). Para isso, basta medir os valores das tensões sobre o sensor  $V_s$  e na saída do amplificador operacional  $V_o$ .

Entretanto, a tensão de desvio do amplificador varia com a temperatura. Dessa forma, mesmo com o ajuste dessa tensão, uma variação na temperatura pode levar o sistema a oscilação, se a condição  $|V_{os}| > |V_o|/G$  não for satisfeita. Portanto, existe um compromisso entre tempo de resposta e estabilidade do sistema. A tensão  $V_{os}$  deve ser a menor possível para se obter o menor tempo de resposta, mas não pode ser suficientemente pequena para levar o sistema à oscilação (OLIVEIRA, 1997c).

Para evitar que o sistema entre em oscilação ou seu tempo de resposta aumente, foi usado um controle automático da tensão de desvio feita através dos pinos de ajuste de  $V_{os}$  do amplificador operacional.

O diagrama de um anemômetro a fio quente a temperatura constante com ajuste automático da tensão de desvio é mostrado na figura 5.2

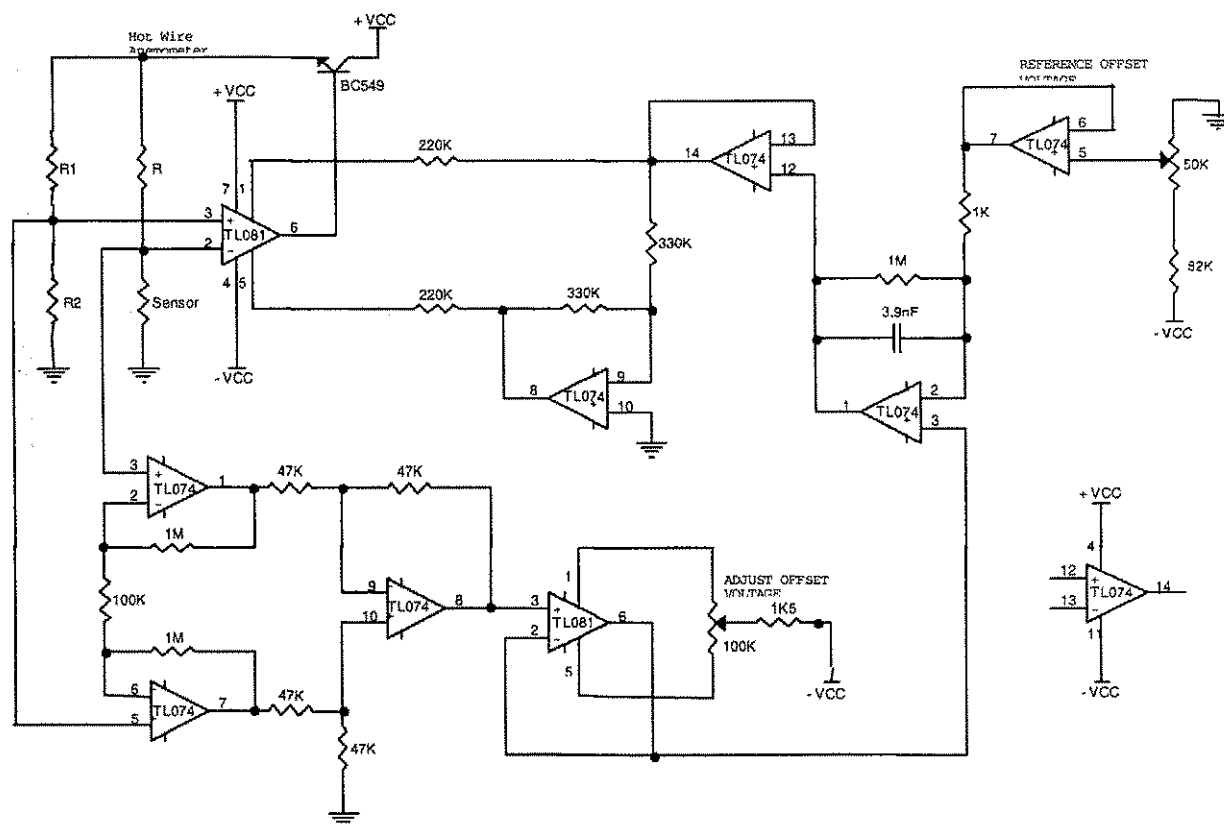


Figura 5.2 – Anemômetro de fio quente com controle automático da tensão de desvio

O amplificador de instrumentação é usado para a medição de  $V_{os}$  a partir de  $V_o$  e  $V_s$  do circuito do anemômetro, equação (2.14). Na saída desse amplificador utilizou-se um circuito para o ajuste da tensão de desvio do amplificador de instrumentação. Depois o sinal é injetado num integrador no qual esse sinal é comparado com o valor da tensão de

desvio desejada. A saída do integrador é injetada nos terminais de ajuste de  $V_{os}$  do amplificador operacional TL081.

O resultado experimental obtido com esse circuito é mostrado na figura 5.3.

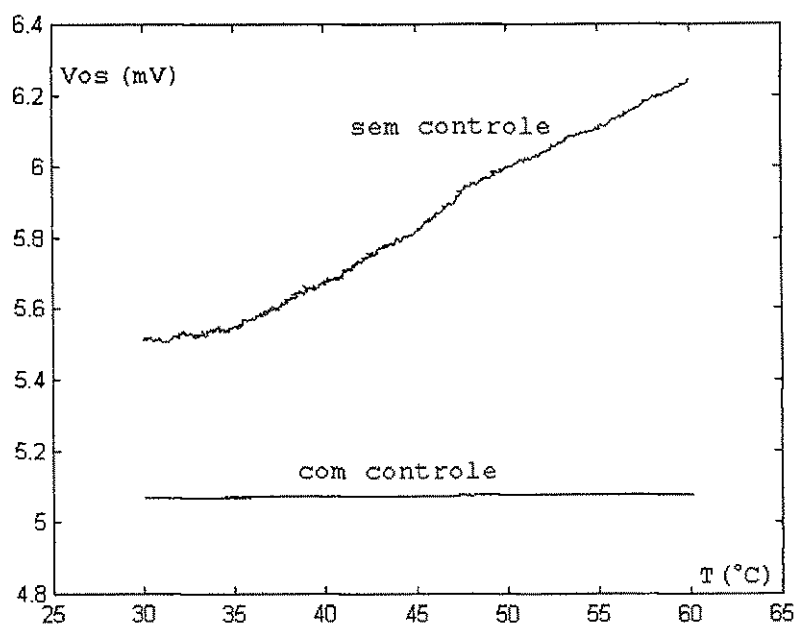


Figura 5.3 – Curvas obtidas experimentalmente com o sistema operando com e sem o controle de  $V_{os}$

Pela figura 5.3 observa-se que sem o controle da tensão de desvio do amplificador operacional, com o aumento da temperatura ambiente a tensão  $V_{os}$  variou de 5,5 mV até 6,2 mV, o que corresponde a uma variação aproximada de 13 %. Já com o circuito de controle conectado ao amplificador operacional, o erro observado é muito pequeno. Com esse resultado, conclui-se que o método proposto apresenta bons resultados práticos o que constitui uma solução para problema de tempo de resposta do anemômetro sem deixar que o sistema entre numa região de instabilidade.

Na figura 5.4 tem-se o detalhe do comportamento da tensão de desvio em relação à variação da temperatura, bem como da variação da tensão sobre o sensor  $V_s$ . Observa-se que o circuito ainda sofre influências da temperatura do fluido, o que é visto pela variação de  $V_s$  com a temperatura. Porém a tensão de desvio é muito mais estável às variações da temperatura.

Para este experimento prático, o sensor de fio foi colocado juntamente com o amplificador operacional dentro de uma estufa, que foi aquecida de 30 °C a 60 °C. Os

dados foram adquiridos com multímetros digitais com interface *GPIB*. O programa em *C* utilizado nas aquisições desses dados está mostrado no Apêndice F.

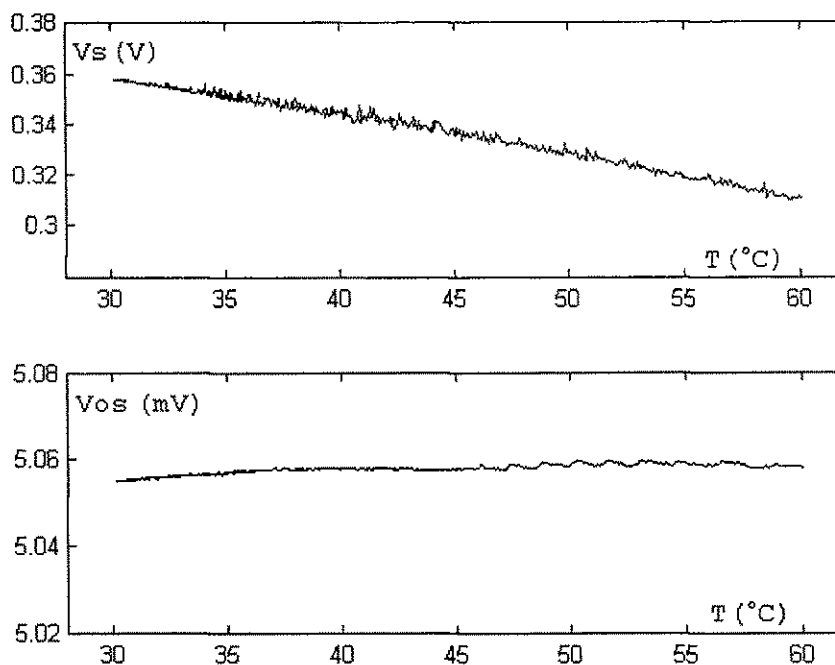


Figura 5.4 – Curvas obtidas experimentalmente com o sistema operando com e sem o controle de  $V_{os}$

Pelos resultados dos experimentos práticos mostrados nas figuras 5.3 e 5.4, observa-se que o circuito de controle automático da tensão de desvio do amplificador operacional, corrige com boa precisão o valor de  $V_{os}$  para uma variação da temperatura.

Este resultado é muito importante para implementações do anemômetro em microestruturas (MEMS - Micro-Electro-Mechanical Systems). Para estruturas desse tipo, além do sensor, o circuito também pode ser implementado no mesmo substrato, o que implicaria na influência da temperatura do fluido tanto sobre o sensor quanto no circuito. Dessa forma, sem o ajuste automático de  $V_{os}$ , o funcionamento do sistema seria comprometido.

Portanto, para um anemômetro implementado em microestruturas do tipo MEMS, o circuito de ajuste automático de  $V_{os}$  seria necessário para se garantir estabilidade no funcionamento do sistema.

## 6 – Resultados Experimentais

Neste capítulo, mostram-se os resultados dos experimentos práticos realizados. Para isso utilizou-se um sensor de fio de platina, cujos parâmetros são apresentados na tabela 1 (seção 2.4). As aquisições das tensões sobre o sensor e na saída do amplificador operacional, foram feitas com multímetros com interface GPIB conectados a um computador. As aquisições foram determinadas por um programa escrito em linguagem C. O conjunto multímetros-computador-programa constituem o bloco de processamento (conforme apresentado na seção 3.1) do CTA utilizado.

O circuito utilizado nos experimentos práticos é mostrado na figura 6.1.

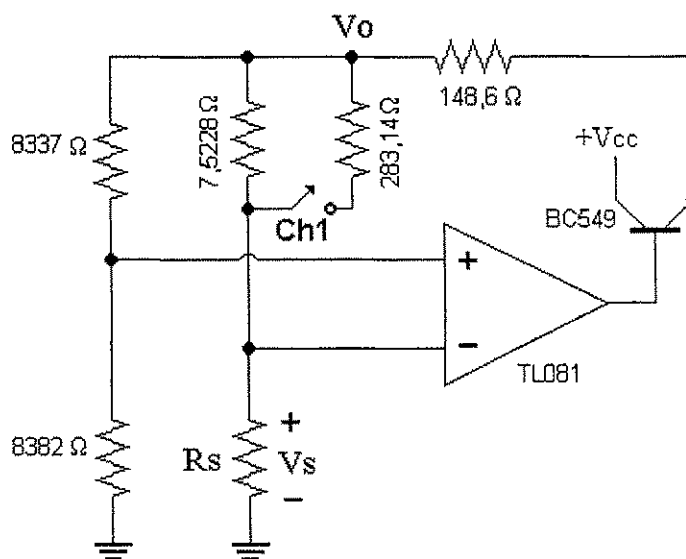


Figura 6.1 – Circuito do anemômetro utilizado nos experimentos práticos

Observa-se que o chaveamento dos resistores apresentado na figura 6.1 difere do mostrado na figura 4.1. Essa configuração prática (experimental) foi adotada para evitar que durante o chaveamento o sensor ficasse desconectado. Dessa forma o sensor sempre estará conectado reduzindo-se assim, os ruídos do chaveamento.

Os experimentos práticos realizados para medições de velocidades de fluido, foram realizados no Laboratório de Termoenergética da UFPb – Campus I.

Para a realização dos experimentos, utilizou-se a estrutura mostrada na figura 6.2. O compressor é responsável pelo fornecimento do ar comprimido para a geração do fluxo

a se medir a velocidade. Esse compressor possui apenas um pistão, o que apresenta uma variação na pressão de saída do ar, conseqüentemente uma variação na velocidade do fluido. O cilindro intermediário é de tamanho bem maior que o do compressor, sua função é estabilizar a pressão do ar entre o compressor e a câmara. A câmara é um calibrador de anemômetros, no qual apresenta em sua entrada, dois registros de ajuste da pressão interna da câmara (ajuste grosso e fino). Na entrada de ar do compartimento onde se encontra o sensor, tem-se cinco níveis de telas finas para reduzir as turbulências no interior da câmara. O sensor de fio quente fica instalado na saída de ar da câmara.



Figura 6.2 – Estrutura utilizada para a medição de  $v$

A calibração da velocidade do ar sobre o sensor é feita através da medição da pressão interna da câmara. Portanto, a exatidão na calibração do anemômetro depende da exatidão no ajuste da pressão interna. Esse foi o principal problema encontrado nos experimentos práticos. Primeiro, mesmo utilizando a estrutura da figura 6.2, a pressão interna da câmara não era muito estável, devido à capacidade do cilindro de ar comprimido do compressor. Segundo, a ausência de um manômetro de boa exatidão, dificultava o ajuste de uma determinada velocidade.

Como o ajuste de velocidade do ar na saída da câmara era feito através da sua pressão interna, que deve ser estável, esse tipo de equipamento é utilizado para calibrações (medições) de velocidades constantes.

Para as medições das velocidades do fluido, foi utilizada uma faixa de 0  $m/s$  a 2  $m/s$  (não se conseguiu uma faixa maior para a estrutura disponível). Neste experimento, foram adquiridas as tensões  $V_{sx}$ ,  $V_{sy}$ ,  $V_{ox}$  e  $V_{oy}$  com multímetros digitais conectados a um computador pela porta GPIB e controlados por um programa. A partir dessas amostras o valor da velocidade foi estimado a partir das equações (3.20), (3.21) e (3.22). Na tabela 2 têm-se os resultados das estimações da velocidade do fluido realizadas.



Tabela 2 – Estimação da Velocidade do Fluido

Valores Medidos		Valores Calculados	Erro
$T_f(^{\circ}C)$	$\vartheta$ (m/s)	$\vartheta$ (m/s)	(%)
28.8	0.0	0.000032	-----
28.6	0.5	0.495055	1.00
28.5	1.0	1.000610	0.06
28.5	1.5	1.550149	3.34
28.5	2.0	2.000810	0.04

Pela tabela 2, observa-se que os erros não são elevados, principalmente considerando-se as dificuldades de calibração do equipamento, devido às variações na pressão interna da câmara.

Para a verificação da validade do método proposto para compensação da variação da temperatura do fluido na medição de  $\vartheta$ , foi realizado um experimento no qual a velocidade do fluido foi mantida constante em 1 m/s e sua temperatura foi variada de 28,50 °C a 32,75 °C. Tem-se na tabela 3 os resultados deste experimento.

Tabela 3 – Estimação da Velocidade do Fluido com Variação de  $T_f$ 

Valores Medidos		Valores Calculados	Erro
$T_f(^{\circ}C)$	$\vartheta$ (m/s)	$\vartheta$ (m/s)	(%)
28.50	1.0	1.00061	0.06
29.88	1.0	1.01551	1.55
31.58	1.0	1.05639	5.64
32.00	1.0	1.03382	3.38
32.75	1.0	1.00134	0.13

Através dos resultados obtidos e considerando-se as dificuldades de calibração do equipamento, considera-se que os erros obtidos nos experimentos são aceitáveis, não comprometendo, portanto, a validade do método proposto para a compensação da variação da temperatura do fluido usando apenas um sensor.

As faixas dos valores de velocidade e de temperatura do fluido foram limitadas ao ambiente disponível para os testes.

## 7 – Conclusões

---

Com a realização deste trabalho, investigaram-se as formas e as arquiteturas de anemômetros a fio quente para se compensar os efeitos da variação da temperatura do fluido nas medições de sua velocidade. O ponto de partida foi a análise do sistema como um todo, desenvolvendo as equações necessárias à estimação da velocidade. A partir daí, estudou-se as possíveis formas de se compensar  $T_f$ , inclusive a forma clássica que utiliza um sensor de compensação.

Com os estudos desenvolvidos com a configuração tradicional do anemômetro a fio quente a temperatura constante, foi desenvolvido um modelo matemático para representar o anemômetro. Com esse modelo foi possível realizar simulações nas quais se podem verificar os efeitos das grandezas físicas e elétricas associadas ao anemômetro. Com esse modelo foi possível, também, encontrar a equação da constante de tempo do circuito.

Nas arquiteturas que utilizam apenas um sensor, na configuração com chaveamento de resistores, a resposta em frequência do sistema é inferior às configurações que utilizam dois sensores. A estrutura que utiliza o chaveamento dos resistores para fazer variar o ponto de operação do sensor, e conseqüentemente, compensar  $T_f$ , apresenta a pior resposta em frequência, o que a limita a estimativas de fluidos com pouca turbulência.

Nessa estrutura, observou-se que, devido ao chaveamento e à variação da velocidade do fluido, os erros obtidos na estimativa da velocidade ocorrem devido ao fato de que, entre uma amostra e outra, a velocidade do fluido variou. Como o sistema foi concebido inicialmente para velocidades constantes, os erros na estimativa eram esperados. A presença desses erros é que determinam a limitação em frequência dessa estrutura.

Como chaveamento dos resistores, que provocam uma variação na temperatura de operação do sensor, os erros alternam entre positivo e negativo. Dessa forma, observou-se que a filtragem desse sinal com um filtro passa-baixas, reduz significativamente os erros obtidos. Com isso, melhora-se a resposta em frequência desse tipo de anemômetro.

Para a configuração do anemômetro com controle de potência zero, a resposta é muito boa, porém nos intervalos onde se aplica a potência zero não se pode estimar a velocidade do fluido. A frequência com que se repete o ciclo de potência zero depende da máxima variação da temperatura do fluido, que para a medição de velocidades do ar, por exemplo, essa variação não é muito grande.

Para o circuito de ajuste automático da tensão de desvio do amplificador operacional, os resultados comprovaram que o método proposto é uma solução para o problema da variação de  $V_{os}$  com a temperatura do ambiente em que o amplificador operacional está imerso. Com isso, pode-se determinar o melhor ponto de operação do sistema, de tal forma que apresente o melhor tempo de resposta sem correr o risco de entrar na região de instabilidade, que levaria o sistema a oscilar.

## 7.1 – 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:

- Para o circuito de controle automático da tensão de desvio do amplificador operacional, sugere-se que o mesmo possua um sistema de detecção do ponto de instabilidade do sistema. Dessa forma, não seria necessário o ajuste da tensão de desvio desejada, ou seja, o próprio sistema detectaria o valor ótimo de  $V_{os}$ , de tal forma que proporcionasse o melhor tempo de resposta, porém sem permitir que o sistema oscile.
- Desenvolver estudos de anemômetros a fio quente com múltiplos sensores, que permitem medir componentes de velocidades tridimensionais.
- Para o caso de sistemas com sensores múltiplos, sugere-se um estudo referente a troca de calor entre os elementos dos sensores, pois isso produz um efeito no qual

o sistema opera como se cada elemento do sensor estivesse submetido a uma temperatura de fluido diferente, o que comprometeria sua compensação.

- Como o princípio de funcionamento dos anemômetros a fio quente parte da troca de calor do mesmo com o meio, estudos referentes aos parâmetros desse meio poderiam ser realizados. Como por exemplo, estudo da influência da umidade no coeficiente de transferência de calor.
- Desenvolvimento de um modelo matemático mais completo para o sistema. Com isso, poderia se observar outros efeitos relacionados com o amplificador operacional, como o slew rate, CMRR e saturação, e com o próprio sensor, como umidade do meio.

## REFERÊNCIAS

---

- CHEW, Y. T., KHOO, B. C., LIM, C. P. e TEO, C. J. (1998). *Dynamic Response of a Hot-Wire Anemometer. Part II: A Flush-Mounted Hot-Wire and Hot-Film Probes for Wall Shear Stress Measurements*, Measurement Science & Technology, Vol. 9, pp. 764-778.
- CHRISTMAN, P. J. e PODZIMEK, J. (1981). *Hot-Wire Anemometer Behaviour in Low Velocity Air Flow*, Journal of Physics E: Scientific Instruments, Vol. 14, pp. 46-51.
- DAVIS, M. R. (1970). *The Dynamic Response of Constant Resistance Anemometers*, Journal of Physics E: Scientific Instruments, Vol. 3, pp. 15-20.
- DEEP, G. S., FREIRE, R. C. S., LOBO, P. C., ROCHA NETO, J. S. e LIMA, A. M. N. (1992). *Dynamic Response of a Thermoresistive Sensors*, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. 41, pp. 815-819.
- DOEBELIN, E. O. (1976). *Measurement System Application and Design*, cap.7. Mc Graw-Hill.
- 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.
- FERREIRA, R. P. C., FREIRE, R. C. S., DEEP, G. S., ROCHA NETO, J. S. and OLIVEIRA, A. (2000). "Compensation of the Fluid Temperature Variation in a Hot-Wire Anemometer", *IMTC2000 - Instrumentation and Measurement Technology Conference*, pp. 512-517.
- 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.

- 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.
- 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.
- 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, pp. 898-903.
- FREIRE, R. C. S., DEEP, G. S., LOBO, P. C., LIMA, A. M. N. e ROCHA NETO, J. S. (1998). *Dynamic Response of a Feedback Thermoresistive Electrical Substitution Pyranometer*, Journal of Solar Energy Engineering, Transactions of the ASME, Vol. 120, pp. 126-130.
- 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.
- FREYMUTH, P., (1967). *Feedback Control Theory for Constant-Temperature Hot-Wire Anemometer*, Review of Scientific Instruments, vol. 38, n° 5, pp. 677-681.
- 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.
- FREYMUTH, P. (1977a). *Frequency Response and Electronic Testing for Constant Temperature Hot-Wire Anemometers*, Journal of Physics E: Scientific Instruments, Vol. 10, pp. 705-710.

- FREYMUTH, P. (1977b). *Further Investigation of the Nonlinear Theory for Constant Temperature Hot-Wire Anemometers*, Journal of Physics E: Scientific Instruments, Vol. 10, pp. 710-713.
- FREYMUTH, P. (1997). *Interpretations in the Control Theory of Thermal Anemometer*, Measurement Science & Technology, Vol. 8, pp. 174-177.
- FREYMUTH, P. (1998). *On Higher Order Dynamics of Constant-Temperature Hot-Wire Anemometers*, Measurement Science & Technology, Vol. 9, pp. 534-535.
- FUJITA, H., OHHASHI, T., ASAKURA, M., YAMADA, M. e WATANABE, K. (1995). *A Thermistor Anemometer for Low-Flow-Rate Measurement*, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. 44, pp. 779-782.
- HINZE, J. O. (1975). *Turbulence*, 2 ed. Cap.2 - *Principles of Methods and Techniques in the Measurement of Turbulent Flows*. Mc Graw-Hill.
- ITSWEIRE, E. C. e HELLAND, K. N. (1983). *A High-Performance Low-Cost Constant Temperature Hot-Wire Anemometer*, Journal of Physics E: Scientific Instruments, Vol. 16, pp. 549-553.
- JIANG, F., TAI, Y., HO, C. M. e LI, W. J. (1994). *A Micromachined Polysilicon Hot-Wire Anemometer*, Solid-State Sensor and Actuator Workshop. pp. 264-267.
- JORGENSEN, F. E. (2002). *How to Measure Turbulence with Hot-Wire Anemometers – A Practical Guide*. Dantec Dynamics.
- KHOO, B. C., CHEW, Y. T. e LI, G. L. (1995). *A New Method by Which to Determine the Dynamic Response of Marginally Elevated Hot-Wire Anemometer Probes for Near-Wall Velocity and Wall Shear Stress Measurements*, Measurement Science & Technology, Vol. 6, pp. 1399-1406.
- KHOO, B. C., CHEW, Y. T., LIM, C. P. e TEO, C. J. (1998). *Dynamic Response of a Hot-Wire Anemometer. Part I: A Marginally Elevated Hot-Wire Probe for Near-Wall Velocity Measurements*, Measurement Science & Technology, Vol. 9, pp. 751-763.

- KOCH, F. A. e GARTSHORE, I. S. (1972). *Temperature Effects on Hot-Wire Anemometer Calibrations*, Journal of Physics E: Scientific Instruments, Vol. 5, pp. 58-61.
- LARSEN, N. T. (1976). "A New Self-Balancing DC-Substitution RF Power Meter", IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 25, no. 4, pp. 343-347.
- LI, D. e GOW, K. S. (1995). *The Development of a Pulsed Multi-Element Hot-Wire Anemometer*, Measurement Science & Technology, Vol. 6, pp. 1175-1185.
- LOBO, P. C. (1966). *The Determination of Velocity Patterns in Engine Cylinders by Means of the Hot-Wire Anemometer*, Tese de Doutorado. King's College, London.
- LOMAS, C. G. (1986). *Fundamentals of Hot-Wire Anemometry*, Cambridge University Press.
- LU, S. S. (1979). *Dynamic Characteristics of a Simple Constant Temperature Hot-Wire Anemometer*, Review of Scientific Instruments, pp. 772-775.
- MILLER, I. S., SHAH, D. A. e ANTONIA, R. A. (1987). *A Constant Temperature Hot-Wire Anemometer*, Journal of Physics E: Scientific Instruments, Vol. 20, pp. 311-314.
- OKAMOTO, K., OHHASHI, T., ASAKURA, M. e WATANABE, K. (1994). *A Digital Anemometer*, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. 43, pp. 116-120.
- OLIVEIRA, A. (1995). *Anemômetro Digital*, Projeto de Pesquisa em Engenharia Elétrica, UFPb.
- 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.
- 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.



- 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.
- OLIVEIRA, A. (1997c). *Sensores Termo-resistivos em Configurações Realimentadas*, Tese de Doutorado em Engenharia Elétrica, UFPb.
- 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.
- LOUDHEUSDEN, B. W. (1997). *Effect of Operating Conditions on the Dynamic Response of Thermal Sensors With and Without Analog Feedback*, Sensors and Actuators, Elsevier Science Inc. Vol. 58, pp. 129-135.
- PAPANICOLAOU, P. N., PAPASPYROS, J. N. E., KASTRINAKIS, E. G. e NYCHAS, S. G. (1997). *A Fast Digital Technique for Calibration of Hot-Wire Over a Wide Temperature Range*, Measurement Science & Technology, Vol. 8, pp. 1363-1366.
- PERRY, A., MORRISON, G. L., (1971). *A Study of Constant-Temperature Hot-Wire Anemometer*, J. Fluid. Mech., Vol 47, part 3, pp 577-599.
- RASMUSSEN, A. e ZAGHLOUL, M. E., (1998). *In the Flow with MEMS, Circuits and Devices*, pp 12-25.
- ROCHA NETO, J. S. (1994). *Caracterização de Sensores Termo-resistivos*, Tese de Doutorado em Engenharia Elétrica, UFPb.
- SAKAO, F. (1973). *Constant Temperature Hot-Wires for Determining Velocity Fluctuations in an Air Flow Accompanied by Temperature Fluctuations*, Journal of Physics E: Scientific Instruments, Vol. 6, pp. 913-916.
- SARMA, G. R. (1993). *Analysis of a Constant Voltage Anemometer Circuit*, IMTC93 - Instrumentation and Measurement Technology Conference, pp. 731-736.
- SAVOSTENKO, P. I. e SERBIN, S. P. (1989). *Hot-Wire Anemometer Invariant to Temperature of the Medium*, ASME/JSME/JSES International Solar Energy Conference, Vol. 121, pp. 1174-1179.

- SMITS, A. J., PERRY, A. E. e HOFFMANN, P. H. (1978). *The Response to Temperature Fluctuations of a Constant-Current Hot-Wire Anemometer*, Journal of Physics E: Scientific Instruments, Vol. 11, pp. 909-914.
- SMITS, A. J. e PERRY, A. E. (1981). *A Note on Hot-Wire Anemometer Measurements of Turbulence in the Presence of Temperature Fluctuations*, Journal of Physics E: Scientific Instruments, Vol. 14, pp. 311-312.
- TAKAGI, S. (1986). *A Hot-Wire Anemometer Compensated for Ambient Temperature Variations*, Journal of Physics E: Scientific Instruments, Vol. 19, pp. 739-743.
- WATMUFF, J. H. (1995). *An Investigation of the Constant-Temperature Hot-Wire Anemometer*, Experimental Thermal and Fluid Science, Elsevier Science Inc. Vol. 11, pp. 117-134.
- YUE, Z. e MALMSTRÖM, T. G. (1998). *A Simple Method for Low-Speed Hot-Wire Anemometer Calibration*, Measurement Science & Technology, Vol. 9, pp. 1506-1510.

## Apêndice – A

---

Determinação dos parâmetros  $a$  e  $b$  usados na equação de King.

Pela equação do equilíbrio termodinâmico, tem-se que:

$$P_e = S(a + b\vartheta^n)(T_s - T_f)$$

assim,

$$a + b\vartheta^n = \frac{P_e}{S(T_s - T_f)}$$

Para o circuito da figura 2.1, a temperatura do sensor é dada pela equação (2.17) e a potência elétrica dissipada pelo sensor é dada pela equação (2.18). Dessa forma, isolando-se o sensor de qualquer fluxo de massa, a velocidade à qual este estaria submetido é aproximadamente nula. Assim, o parâmetro  $a$  é dado por:

$$a = \frac{P_e}{S(T_s - T_f)}$$

no qual a temperatura do fluido  $T_f$  deve ser conhecida.

Com o valor de  $a$  conhecido, pode-se submeter o sensor a um fluxo de massa com uma velocidade de 1  $m/s$ . Assim, o parâmetro  $b$  pode ser obtido pela expressão:

$$b = \frac{P_e}{S(T_s - T_f)} - a$$

Dessa forma, os parâmetros  $a$  e  $b$  são determinados experimentalmente.

## Apêndice – B

---

Determinação das condições iniciais para a solução numérica das equações diferenciais (2.7) e (2.11), usando o método de Runge Kutta de 4ª ordem, necessárias à realização das simulações.

Equação (2.7):

$$\boxed{\frac{dR_s}{dt} = \frac{\beta R_o}{mc} \left[ \frac{V_s^2}{R_s} - S(a + b\vartheta^n)(T_s - T_f) \right]} \quad (2.7)$$

Equação (2.11):

$$\boxed{\frac{dV_o}{dt} = \frac{G(kV_o - V_s + V_{os}) - V_o}{\tau}} \quad (2.11)$$

Para a condição de estado estacionário, tem-se que:

$$\frac{dR_s}{dt} = 0 \quad \text{e} \quad \frac{dV_o}{dt} = 0$$

Assim, tem-se que:

$$\frac{V_s^2}{R_s} - hS(T_s - T_f) = 0 \quad (B.1)$$

no qual h é definido na equação (2.2)  $h = a + b\vartheta^n$ , e

$$kV_o - V_s + V_{os} = 0 \quad \Rightarrow \quad V_s = kV_o + V_{os} \quad (B.2)$$

Equação (2.16):

$$R_s = \frac{R_i V_s}{V_o - V_s} \quad (2.16)$$

Equação (2.17):

$$T_s = \frac{1}{\beta} \left( \frac{R_i V_s}{R_o (V_o - V_s)} - 1 \right) \quad (2.17)$$

Substituindo as equações (2.16) e (2.17) na equação (B.1), tem-se que:

$$\frac{V_s^2}{R_i V_s} - \frac{hSR_i}{\beta R_o (V_o - V_s)} + \frac{hS}{\beta} + hST_f = 0$$

$$\frac{V_s (V_o - V_s)}{R_i} - \frac{hSR_i}{\beta R_o (V_o - V_s)} + hS \left( \frac{1}{\beta} + T_f \right) = 0 \quad (B.3)$$

Das equações (B.2) e (B.3), tem-se que:

$$\frac{(kV_o + V_{os})(V_o - kV_o - V_{os})}{R_i} - \frac{hSR_i}{\beta R_o (V_o - kV_o - V_{os})} + hS \left( \frac{1}{\beta} + T_f \right) = 0$$

$$(kV_o + V_{os})[(1-k)V_o - V_{os}] - \frac{hSR_i^2}{\beta R_o [(1-k)V_o - V_{os}]} + hSR_i \left( \frac{1}{\beta} + T_f \right) = 0$$

$$\beta R_o (kV_o + V_{os}) [(1-k)V_o - V_{os}]^2 - hSR_i^2 (kV_o + V_{os}) + R_o hSR_i (1 + \beta T_f) [(1-k)V_o - V_{os}] = 0 \quad (B.4)$$

Manipulando-se a equação (B.4), tem-se o seguinte polinômio:

$$k_o V_o^3 + k_1 V_o^2 + k_2 V_o + k_3 = 0$$

no qual:

$$k_o = \beta R_o (k - 2k^2 + k^3)$$

$$k_1 = \beta R_o (3k^2 - 4k + 1) V_{os}$$

$$k_2 = [\beta R_o (3k - 2) V_{os}^2 - hSR_i^2 k + R_o hSR_i (1 + \beta T_f) V_{os}]$$

$$k_3 = [\beta R_o V_{os}^3 - hSR_i^2 V_{os} - R_o hSR_i (1 + \beta T_f) V_{os}]$$

A solução desse polinômio fornece a condição inicial para a equação (2.11) ( $V_{oinicial}$ ). Esse polinômio possui três raízes, sendo que duas delas são complexas ou negativas, dependendo do valor da tensão de desvio  $V_{os}$ . O valor de  $V_{os}$  é responsável pela estabilidade do sistema, o que interfere diretamente no ponto de operação do anemômetro e conseqüentemente na determinação das condições iniciais. Dessa forma, o valor de  $V_{oinicial}$  será a raiz positiva do polinômio.

A condição inicial para a equação (2.7) ( $R_{sinicial}$ ) é obtida a partir das equações (2.16) e (B.2). Assim,

$$R_{sinicial} = \frac{R_i (kV_{oinicial} + V_{os})}{[(I - k)V_{oinicial} - V_{os}]} \quad (B.5)$$

Dessa forma,  $V_{oinicial}$  e  $R_{sinicial}$ , constituem os valores iniciais para a solução numérica do sistema composto pelas equações (2.7) e (2.11).

## Apêndice – C

Programa escrito em MATLAB, no qual as equações diferenciais (2.7) e (2.11) são resolvidas numericamente com o método de *Runge Kutta* de 4ª ordem, de forma que a se obter as tensões  $V_s$  e  $V_o$ .

```

global S Tf mc R0 Ri beta G Vos RC a b n k ff % variáveis globais

S =8.917e-8; % área do sensor
a= 1375;
b=976; % a, b e n são as constantes do sensor
n=0.5;
Tf =30; % temperatura do fluido
mc =1.8e-9; % capacidade térmica do sensor
R0 =6.8041; % Resistência do sensor a 0 °C
beta = 0.00172; % coeficiente de temperatura do sensor
G = 1e5; % ganho do amplificador operacional em malha aberta
Vos = 5e-3; % tensão de desvio do amplificador
k = 0.5013;
fc=100.00; % frequência de corte do amplificador
ff=500.0; % frequência de variação da velocidade do fluido
RC=1/(2*pi*fc);
Ri=7.8;
t0 = 0 ; % tempo inicial
tfinal = 0.02; % tempo final
passo = 0.00001; % passo de integração

% determinação das condições iniciais -> Apêndice B
vel=3;
h=a+b*(vel^n);
k0=beta*R0*(k-2*(k^2)+(k^3));
k1=beta*R0*(3*(k^2)-4*k+1)*Vos;
k2=(beta*R0*(3*k-2)*(Vos^2))-h*S*(Ri^2)*k+(R0*h*S*Ri*(1+beta*Tf)*(1-k));
k3=(beta*R0*(Vos^3))-(h*S*(Ri^2)*Vos)-(R0*h*S*Ri*(1+beta*Tf)*Vos);
coeficientes=[k0 k1 k2 k3];
raiz = roots(coeficientes)

Voinicial=raiz(1);
Rsinicial=(Ri*(k*Voinicial+Vos))/((1-k)*Voinicial-Vos);

% solução das equações diferenciais usando RUNGE KUTTA de 4ª ordem
options = odeset('RelTol',1e-12,'AbsTol',[1e-12 1e-12]);
[t,y]=ode45('sensor',[t0:passo:tfinal],[Rsinicial Voinicial]',options);

Rs=y(:,1); % solução da equação (2.7)
Vo=y(:,2); % solução da equação (2.11); Sinal de Vo

Vs=Vo.*Rs./(Ri+Rs); % equação (2.10); Sinal de Vs

```

```
function yp= sensor(t,y)
global S Tf mc R0 Ri beta G Vos RC a b n k ff

vel=3+2*(sin(2*pi*ff*t)); % velocidade do fluido

h=a+b*(vel^n); % equação (2.2)

Rs=y(1);
Vo=y(2);
Ts=(Rs/R0-1)/beta; % equação (2.4)
Vs=Vo*Rs/(Ri+Rs); % equação (2.10)

Vop=(G*(Vo*k-Vs+Vos)-Vo)/RC; % equação (2.11)
Rsp=(beta*R0/mc)*(Vs^2/Rs-h*S*(Ts-Tf)); % equação (2.7)

yp=[Rsp Vop]';
```



# Apêndice – D

---

Programa escrito em Matlab para a simulação de um anemômetro de fio quente a temperatura constante. Simulação da curva  $V_o \times \vartheta$ .

**Arquivo: anemo.m**

```

global S Tf mc R0 Ri beta G Vos RC a b n k ff

S =8.917e-8;          % sensor surface area
a= 1375;
b=976;
n=0.5;
Tf =40;              % surrounding air temperature
mc =1.8e-9; % sensor thermal capacity
R0 =6.8041; % sensor ohmic resistance at 0 graus C
beta = 0.00172; % sensor temperature coeficient
G = 1e5; % amplifier gain
Vos = 1e-3; % input offset voltage
k = 0.5013; % bridge ratio
fc=100.00; % frequency amplifier operational
ff=500.0; % frequency fluid
RC=1/(2*pi*fc);
Ri=7.8;
t0 = 0 ; % initial value of t
tfinal = 2; % final value of t
passo=0.00001; % passo de integração

% determinação das condições iniciais
vel=0;
h=a+b*(vel^n);
k0=beta*R0*(k-2*(k^2)+(k^3));
k1=beta*R0*(3*(k^2)-4*k+1)*Vos;
k2=(beta*R0*(3*k-2)*(Vos^2))-(h*S*(Ri^2)*k)+(R0*h*S*Ri*(1+beta*Tf)*(1-k));
k3=(beta*R0*(Vos^3))-(h*S*(Ri^2)*Vos)-(R0*h*S*Ri*(1+beta*Tf)*Vos);
coeficientes=[k0 k1 k2 k3];
raiz = roots(coeficientes)

Voinicial=raiz(1);
Rsinicial=(Ri*(k*Voinicial+Vos))/((1-k)*Voinicial-Vos);

% Solve differential equation
options = odeset('RelTol',1e-12,'AbsTol',[1e-12 1e-12]);
[t,y] = ode45('sensor',[t0:passo:tfinal],[Rsinicial
Voinicial]',options);

Rs=y(:,1);
Vo=y(:,2);
vel=10*t;

plot(vel,Vo);

```

**Arquivo: sensor.m**

```
function yp= sensor(t,y)
global S Tf mc R0 Ri beta G Vos RC a b n k ff

vel=10*t; % velocidade do fluido - variação contínua
h=a+b*(vel^n);

Rs=y(1);
Vo=y(2);
Ts=(Rs/R0-1)/beta;
Vs=Vo*Rs/(Ri+Rs);

Vop=(G*(Vo*k-Vs+Vos)-Vo)/RC;
Rsp=(beta*R0/mc)*(Vs^2/Rs-h*S*(Ts-Tf));

yp=[Rsp Vop]';
```

# Apêndice – E

---

Programa escrito em Matlab para a simulação de um anemômetro de fio quente a temperatura constante com potência zero.

## Arquivo: anemo\_f.m

```

global S Tf mc R0 R beta G Vos RC a b n k ff

S =89.17e-9;          % sensor surface area
a= 1375;
b=976;
n=0.459;
Tf =30;              % surrounding air temperature
mc =1.8e-9; % sensor thermal capacity
R0 =6.8041; % sensor ohmic resistance at 0 graus C
beta = 0.00172; % sensor temperature coeficient
G = 1e5; % amplifier gain
Vos = 1000e-6; % input offset voltage
k = 0.5013; % bridge ratio
Vout=0.53426; %
f=100.00; % frequency amplifier operational
ff=5000.0; % frequency fluid
RC=1/(2*pi*f);
t0 = 0 ; % initial value of t
tfinal = 0.005; % final value of t
R = 7.8; % initial value of sensor resistance

% Solve differential equation
options = odeset('RelTol',1e-12,'AbsTol',[1e-12 1e-12]);
[t,y] = ode45('sensor_f',[t0:0.000001:tfinal],[R Vout]',options);

Rs=y(:,1);
Vo=y(:,2);
Ts=(Rs/R0-1)/beta;
Vs=Vo.*Rs./(R+Rs);
Pe=(Vs.*(Vo-Vs))/R;
vel=3+2*(sin(2*pi.*ff.*t));
vel_est=(((Pe)./(S.*(Ts-Tf)))-a)/b).^ (1/n);

subplot(3,1,1);
plot(t,vel);
hold on;
plot(t,vel_est,'.');

subplot(3,1,2);
plot(t,Vo);
subplot(3,1,3);
plot(t,Ts);

```

**Arquivo: sensor\_f.m**

```
function yp= sensor_f(t,y)
global S Tf mc R0 R beta G Vos RC a b n k ff

vel=3+2*(sin(2*pi*ff*t)); % velocidade do fluido
h=a+b*(vel^n);

if t>=0.001 k=0; end;
if t>=0.00107 k=0.5013; end;

Rs=y(1);
Vo=y(2);
Ts=(Rs/R0-1)/beta;
Vs=Vo*Rs/(R+Rs);

Vop=(G*(Vo*k-Vs+Vos)-Vo)/RC;
Rsp=(beta*R0/mc)*(Vs^2/Rs-h*S*(Ts-Tf));

yp=[Rsp Vop]';
```

## Apêndice – F

---

Programa escrito em C para aquisição dos dados obtidos, pelos multímetros digitais, pela interface GPIB.

### Arquivo: offset2.c

```
#include <string.h>
#include <stdio.h>
#include <conio.h>
#include <process.h>
#include <stdlib.h>
#include <dos.h>
#include <alloc.h>
#include <time.h>
#include <math.h>
#include "cfunc.h" /* hpib functions */
#include "chpib.h" /* hpib functions */

void InitGpib(void);
float ReadMultimetro15(void);
float ReadMultimetro19(void);
float ReadMultimetro22(void);

void WriteGpib(int endereco, char*palavra);

int error;
char arquivo[30]; // nome dos arquivos utilizados

void main(void)
{
    char car;
    FILE *stream;
    float Vos, Ta, Vdc, dT, Vs;

    printf(" \n\n Nome do Arquivo de saída: " );
    scanf("%s", arquivo);
    stream=fopen(arquivo, "w");

    InitGpib();
    IOOUTPUTS(719, "*RST;*CLS", 9);
    delay(200);
    car=0x00;
    Ta=ReadMultimetro19(); // le tensao do LM35 ( Temperatura Ambiente )
    do
    {
        Vs =ReadMultimetro15(); // le tensao sobre o sensor
        Vdc=ReadMultimetro19(); //le tensao do LM35 (Temperatura Ambiente)
        Vos=ReadMultimetro22(); // le tensao de off set
        dT=(Vdc*100)-Ta; // Variacion la Temperatura
    }
}
```

```

    if (fabs(dT)>=0.07)
    {
        Ta=100*Vdc;
        Vos=fabs(Vos/21);
        printf("Ta=%2.2f Vs=%1.4f Vos=%1.7f\n", Ta, Vs, Vos);
        fprintf(stream, "%2.2f %1.4f %1.7f\n", Ta, Vs, Vos);
    }
    delay(200);
    if (kbhit())
    {
        car=getch();
    }
} while (car != 27);
fclose(stream);
}

void InitGpib()
{
    long x;
    x=7;
    IORESET(x); /* reset the interface card */
    IOTIMEOUT(x, 1.0); /* set the interface timeout to 5 seconds */
    IOCLEAR(x); /* clear the interface */
}

float ReadMultimetrol5()
{
    float valor;
    long quem;
    char comando[20];
    quem=715;
    sprintf(comando, "MEAS:VOLT:DC?");
    do {
        WriteGpib(15,comando);
        error=IOENTER(quem, &valor);
        delay(200);
    } while (error==4);
    return valor;
}

float ReadMultimetrol9()
{
    float valor;
    long quem;
    char comando[20];
    quem=719;
    sprintf(comando, "MEAS:VOLT:DC?");
    do {
        WriteGpib(19,comando);
        error=IOENTER(quem, &valor);
        delay(200);
    } while (error==4);
    return valor;
}

```

```
float ReadMultimetro22()
{
    float valor;
    long quem;
    char comando[20];
    quem=722;
    sprintf(comando, "MEAS:VOLT:DC?");
    do {
        WriteGpib(22,comando);
        error=IOENTER(quem, &valor);
        delay(200);
    } while (error==4);
    return valor;
}

void WriteGpib(int endereco, char *palavra)
{
    long x;
    x=endereco+700;
    IOOUTPUTS(x, palavra, strlen(palavra));
}
```