



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”

FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

DESENVOLVIMENTO DE UM CIRCUITO ELETRÔNICO EXPERIMENTAL DE ANEMÔMETRO DE FIO QUENTE

Carlos César Aparecido Eguti

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de **Mestre em Engenharia Mecânica**.

Orientador: Prof. Dr. EDSON DEL RIO VIEIRA

Ilha Solteira, Dezembro de 2005

FICHA CATALOGRÁFICA

Elaborada pela Seção Técnica de Aquisição e Tratamento da Informação/Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação da UNESP-Ilha Solteira

E32d Eguti, Carlos César Aparecido
Desenvolvimento de um circuito eletrônico experimental de anemômetro de fio quente / Carlos César Aparecido Eguti. -- Ilha Solteira : [s.n.], 2005
xxvi, 182 p. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2005

Orientador: Edson Del Rio Vieira
Bibliografia: p. 155-163

1. Anemometria de fio quente. 2. Instrumentação eletrônica. 3. Calibração. 4. Tubo de Pitot. 5. Sensores.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: Desenvolvimento de um circuito eletrônico experimental de anemômetro de fio quente

AUTOR: CARLOS CESAR APARECIDO EGUTI
ORIENTADOR: Prof. Dr. EDSON DEL RIO VIEIRA

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de MESTRE em ENGENHARIA MECÂNICA pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. EDSON DEL RIO VIEIRA
Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia De Ilha Solteira

Prof. Dr. SERGIO SAID MANSUR
Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia De Ilha Solteira

Prof. Dr. MARCELLO AUGUSTO F. DE MEDEIROS
Departamento de Engenharia de Materiais Aeronáutica e Automobilística - USP/São Carlos

Data da realização: 16 de dezembro de 2005.

Presidente da Comissão Examinadora
Prof. Dr. EDSON DEL RIO VIEIRA

*Este trabalho é dedicado ao
Sr. Serguey Mokchin.
Seus ensinamentos e conselhos
abriram portas em minha mente
que jamais serão fechadas*

Agradecimentos

Quero agradecer ao professor Edson Del Rio Vieira pela orientação deste trabalho e principalmente, pela confiança dada durante todo o período de minha graduação e mestrado. Deixo aqui registrado meus mais sinceros votos de agradecimento com toda admiração que um aprendiz tem pelo seu mestre.

Um agradecimento especial aos professores Sérgio Said Mansur, Antônio de Pádua Lima Filho, Emanuel da Rocha Woisky e Ricardo Alan Verdú Ramos, pelos valiosos conhecimentos e conselhos cedidos durante a realização deste e de muitos outros trabalhos.

Aos técnicos de laboratório do Departamento de Engenharia Mecânica: Carlos José Santana “Grilo”, Darci Alves Ribeiro, Edvaldo Silva de Araújo “Guati”, Marino Teixeira Caetano e especialmente para Reginaldo Cordeiro da Silva e Hidemassa Oikawa, este último do Departamento de Engenharia Elétrica. Sem vocês eu não teria encontrado nada na oficina.

Não poderia esquecer de agradecer também às secretárias Elaine do Nascimento Ferreira e Érika Renata B. Lomba, pelo carinho e atenção cedidos nas diversas vezes que estive na secretaria do Departamento de Engenharia Mecânica.

A todos os funcionários da biblioteca do prédio central pelo excelente serviço de empréstimo e conservação do acervo, tarefas essas executadas com muito profissionalismo, amor e dedicação ao trabalho.

Quero agradecer ao Professor Dr. Ruiz C. Tokimatsu, tanto pela confiança depositada em vários trabalhos realizados em seu laboratório, quanto pelo empréstimo do osciloscópio digital, equipamento este muito importante para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao Professor Dr. Cláudio Luiz Carvalho e ao mestrando Raphael Otávio Peruzzi, ambos do Laboratório de Vidros e Cerâmicas do Departamento de Física e Química, pelo auxílio fornecido durante a caracterização elétrica das sondas de fio quente com o uso dos equipamentos de pesquisa com materiais supercondutores.

Ao professor Dr. Victor Solano Reynoso, também do Departamento de Física e Química, pelo empréstimo do *chopper*.

Ao professor Dr. Cláudio Kitano do Departamento de Engenharia Elétrica pelo empréstimo dos equipamentos do Laboratório de Opto-eletrônica da Unesp – IS.

Ao amigo João Marcos Salvi Sakamoto pelo auxílio na execução dos testes da resposta em frequência do circuito do anemômetro com o uso do *laser*, do *chopper* e outros equipamentos especiais do Laboratório de Opto-eletrônica.

Ao professor Dr. Átila Pantaleão da Silva Freire, responsável pelo Laboratório de Mecânica dos Flúidos e Aerodinâmica da UFRJ – Universidade Federal do Rio de Janeiro e ao Eng. Carlos Guedes Neto, do Laboratório de Aerodinâmica, Propulsão e Sistemas de Aeronaves “Prof. Kewi Lien Feng” do ITA – Instituto Tecnológico de Aeronáutica. Ambos contribuíram para o condicionamento de várias sondas de fio quente utilizadas neste trabalho.

A todos os amigos e professores os quais, direta e indiretamente, estiveram ao meu lado durante minha batalha em Ilha Solteira. Nada foi terminado aqui, tudo está apenas começando...

**“Pode ser que um dia o tempo passe.
Mas, se a amizade permanecer,
um do outro há de se lembrar.

Pode ser que um dia nos afastemos.
Mas, se formos amigos de verdade,
a amizade nos reaproximará”**

Albert Einstein (1879 – 1955)

Sumário

LISTA DE TABELAS	x
LISTA DE FIGURAS	xi
LISTA DE SÍMBOLOS	xix
SÍMBOLOS ARÁBICOS	xix
NÚMEROS ADIMENSIONAIS	xxi
SÍMBOLOS GREGOS	xxi
SÍMBOLOS GREGOS ADIMENSIONAIS.....	xxii
OPERADORES MATEMÁTICOS	xxii
LISTA DE CITAÇÕES	xxiii
RESUMO	xxv
ABSTRACT	xxvi
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	1
1.1 – Objetivos.....	5
1.2 – Justificativa e motivação	5
1.3 – Apresentação do Trabalho	8
CAPÍTULO 2 - ANEMOMETRIA DE FIO QUENTE	11
2.1 – Sensor de fio quente	13
2.1.1 – Tipos de sensores.....	15
2.1.2 – Transferência de calor no filamento	19
2.2 – Curvas de calibração para anemômetros de fio quente	24
2.2.1 – Calibração “Lei de King”	27
2.2.2 – Calibração “Lei de King” modificada	28
2.2.3 – Calibração “Lei de Kramer”	29
2.3 – Circuitos de controle para HWA	29
2.3.1 – Ponte de Wheatstone	31
2.3.2 – Circuito de Corrente Constante	38

2.3.3 – Circuito de Temperatura Constante.....	41
2.4 – Calibração estática de anemômetros de fio quente.....	49
2.4.1 – Calibração por jato livre	50
2.4.2 – Calibração por deslocamento de líquidos.....	54
2.4.3 – Calibração por esteira de vórtices.....	55
2.4.4 – Calibração com pêndulo	56
2.4.5 – Calibração com tubo de Pitot.....	58
2.5 – Calibração em frequência de anemômetros de fio quente.....	61
2.5.1 – Calibração com gerador de sinais.....	61
2.5.2 – Calibração com tubo de choque.....	63
2.5.3 – Calibração com laser	67
2.5.4 – Calibração com ar aquecido	68
2.6 – Limpeza de sondas de fio quente.....	69
CAPÍTULO 3 - CIRCUITO ELETRÔNICO CTA.....	71
3.1 – Primeiro protótipo	72
3.2 – Segundo Protótipo	78
CAPÍTULO 4 - METODOLOGIA EXPERIMENTAL	85
4.1 – Segundo protótipo do anemômetro CTA	85
4.2 – Calibração estática.....	87
4.2.1 – Calibração por jato livre	88
4.2.2 – Calibração com tubo de Pitot.....	91
4.3 – Ensaio no túnel aerodinâmico	93
4.4 – Verificação da resposta em frequência.....	97
4.4.1 – Verificação com laser	98
4.4.2 – Verificação com gerador de sinais.....	101
4.4.2.1 – Primeiro protótipo CTA	101
4.4.2.2 – Segundo protótipo CTA	103
4.5 – Caracterização das sondas de fio quente	104
CAPÍTULO 5 - RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	109

5.1 – Segundo protótipo do anemômetro CTA	109
5.2 – Calibração estática das sondas de fio quente.....	114
5.2.1 – Calibração por jato livre	115
5.2.2 – Calibração com tubo de Pitot.....	118
5.3 – Ensaio no túnel aerodinâmico	122
5.4 – Verificação da resposta em frequência.....	125
5.4.1 – Verificação com laser	125
5.4.2 – Verificação com gerador de sinais.....	129
5.4.2.1 – Primeiro protótipo CTA	129
5.4.2.2 – Segundo protótipo CTA	134
5.5 – Caracterização das sondas de fio quente	139
CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	147
Considerações Finais.....	152
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	155
Literatura Consultada	161
Manuais Consultados.....	162
APÊNDICE A	165
APÊNDICE B	173
APÊNDICE C	177
APÊNDICE D	181

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Coeficientes de resistividade térmica	37
Tabela 2 – Equações de calibração obtidas	118
Tabela 3 – Equações de calibração para sonda de camada limite	121
Tabela 4 – Valor das resistências elétricas dos componentes	143
Tabela A.1 – Dados ambientais durante os experimentos.....	170
Tabela A.2 – Incertezas associadas na medida da pressão	170
Tabela A.3 – Incertezas na medida da velocidade do escoamento.....	172
Tabela B.1 – Frações e massas molares das diversas substâncias que compõe o ar atmosférico padrão	174
Tabela B.2 – Dados ambientais durante os experimentos	175
Tabela B.3 – Densidade do ar e sua incerteza para o experimento	175
Tabela C.1 – Incertezas da medida da tensão e corrente pelos instrumentos da <i>Keithley</i>	178
Tabela C.2 – Valores máximos medidos de tensão e corrente	178
Tabela C.3 – Resistência elétrica dos dispositivos e suas incertezas	179
Tabela D.1 – Densidade da água destilada em $[g/cm^3]$ de 0 °C (estado líquido) até a temperatura de 30,9 °C com incrementos de 0,1 °C	182

Lista de Figuras

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

FIGURA 1.1 – Cadeia de medição típica para medição da velocidade de fluídos com o uso da anemometria de fio quente.	3
FIGURA 1.2 – Detalhes típicos de uma sonda de fio quente.....	5
FIGURA 1.3 – Aplicação da HWA no trabalho de LINDQUIST (2000).....	7
FIGURA 1.4 – Exemplos de aplicação da HWA no estudo do escoamento em maquetes.....	8

CAPÍTULO 2 – ANEMOMETRIA DE FIO QUENTE

FIGURA 2.1 – (a) Tubo de Pitot simples, (b) modelos usados em aviões e (c), detalhe da sua localização.	12
FIGURA 2.2 – Exemplos de sondas de fio quente de uma dimensão. (a) sonda de fio quente miniatura, (b) sonda de fio quente convencional, (c) sonda de filme quente.	15
FIGURA 2.3 – Exemplos de sondas de fio quente: (a) de uma dimensão para camada limite, (b) tipo “X” para duas dimensões e (c), ortogonal para três dimensões.	16
FIGURA 2.4 – (a) sensor miniatura 3D do trabalho de EBERFORS <i>et al.</i> (1998) e (b) sensor de polisilício de JIANG <i>et al.</i> (1992).	16
FIGURA 2.5 – Transferência de calor em uma seção infinitesimal de um fio aquecido.....	19
FIGURA 2.6 – Distribuição de temperatura no filamento para diferentes razões de aspecto.	22
FIGURA 2.7 – Curva característica de calibração entre velocidade do fluído e o sinal de anemômetros de fio quente.....	27
FIGURA 2.8 – Circuito anemômetro de fio quente tipo CCA com válvula termiônica do trabalho de GUPTA (1927).	30
FIGURA 2.9 – Circuitos rudimentares de anemômetro de fio quente tipo CCA em (a) e CTA em (b), extraídos de PRANDTL & TIETJENS (1934).	31

FIGURA 2.10 – Ponte de Wheatstone.	32
FIGURA 2.11 – Ponte de Wheatstone com variação de resistência de um elemento.	33
FIGURA 2.12 – Configuração típica dos elementos da ponte de Wheatstone em anemômetros de fio quente.	34
FIGURA 2.13 – Representação da resistência elétrica dos elementos que compõe o sensor do anemômetro. (a) Resistência do filamento, do seu suporte, conector e cabo. (b) Representação simplificada da sonda de fio quente.	36
FIGURA 2.14 – Circuito básico de um anemômetro de corrente constante - CCA.	38
FIGURA 2.15 – Princípio de funcionamento do circuito de compensação em frequência. (a) razão de amplitude no sinal de saída em função da frequência de entrada. (b) resposta desejada para o circuito de compensação. (c) resposta em frequência desejada para o sinal de saída.	40
FIGURA 2.16 – Esquema básico de anemômetro de fio quente de temperatura constante.	41
FIGURA 2.17 – Relação da amplitude do sinal de saída em função de uma excitação degrau unitário de entrada para modelagem dinâmica de um circuito CTA em um sistema de segunda ordem.	44
FIGURA 2.18 – Exemplos do tipo do sinal de saída em função do coeficiente de amortecimento em sistemas de segunda ordem.	46
FIGURA 2.19 – Características típicas de sinais de saída tipo sub-amortecidos em sistemas de segunda ordem.	47
FIGURA 2.20 – Sinais típicos de entrada, gráfico superior, e saída (gráfico inferior) de um anemômetro de fio quente.	48
FIGURA 2.21 – Efeito de histerese presente na calibração estática de anemômetros.	49
FIGURA 2.22 – Calibração estática de velocidade para HWA por jato livre.	50
FIGURA 2.23 – Região internas de um jato livre e seus perfis de velocidade característicos. PAI (1954).	52
FIGURA 2.24 – Calibradores de velocidade para sondas de fio e filme quente por jato livre. (a) <i>TSI</i> modelo 1129 e (b) <i>Dantec</i> modelo 54H10.	53
FIGURA 2.25 – Calibrador de sondas de fio quente para baixas velocidades de CHRISTMAN & PODZIMEK (1981).	54
FIGURA 2.26 – Metodologia de calibração de sonda de fio quente para baixas velocidades de LANSPEARY (1997).	55
FIGURA 2.27 – Método do braço oscilante para calibração estática de sonda de fio quente. GUELLOUZ & TAVOULARIS (1995).	57

FIGURA 2.28 – (a) Tubo de Pitot e (b), tubo de Prandtl.	59
FIGURA 2.29 – Calibração de HWA com tubo de Prandtl.	60
FIGURA 2.30 – Inserção de um gerador de sinais em paralelo com o sensor do anemômetro para realização de testes em frequência.....	62
FIGURA 2.31 – Sinal senoidal de 1 kHz e sua respectiva carga espectral.	63
FIGURA 2.32 – Onda quadrada de 1 kHz e sua respectiva carga espectral.	63
FIGURA 2.33 – Esquema simplificado de um tubo de choque.	65
FIGURA 2.34 – Resultados da calibração em frequência de um anemômetro CTA obtidos por LU (1978).	66
FIGURA 2.35 – Montagem experimental para calibração em frequência de um anemômetro CTA proposto por FIEDLER (1978).....	67
FIGURA 2.36 – Sinal de saída desejável quando somente o filamento é aquecido pelo laser, caso (a), e sinal de saída quando filamento e suportes são aquecidos pelo laser, caso (b). FIEDLER (1978).....	68
FIGURA 2.37 – Montagem experimental para calibração em frequência de um anemômetro CTA proposto por WEEKS <i>et al.</i> (1988).	69
FIGURA 2.38 – Dispositivo de limpeza de sondas proposto por WYATT (1952).	70

CAPÍTULO 3 – CIRCUITO ELETRÔNICO CTA

FIGURA 3.1 – Circuito experimental do anemômetro CTA desenvolvido – parte 1/2.....	72
FIGURA 3.2 – Exemplo de uma década resistiva.....	73
FIGURA 3.3 – Circuito experimental do anemômetro CTA desenvolvido – parte 2/2.....	74
FIGURA 3.4 – Primeiro protótipo do anemômetro de fio quente – vista frontal.....	75
FIGURA 3.5 – Primeiro protótipo do anemômetro de fio quente – vista traseira.	76
FIGURA 3.6 – Vista interna dos circuitos eletrônicos do primeiro protótipo.	76
FIGURA 3.7 – Simulação da variação da resistência da sonda de fio quente.	77
FIGURA 3.8 – Circuito eletrônico do segundo anemômetro CTA desenvolvido – parte 1/3.	79
FIGURA 3.9 – (a) resistor de 22 Ω de alto desempenho e (b), banco de resistores série-paralelo de 20 Ω	79

FIGURA 3.10 – Circuito eletrônico do segundo anemômetro CTA desenvolvido – parte 2/3.....	80
FIGURA 3.11 – Esquema completo das fontes de alimentação do segundo anemômetro CTA desenvolvido – parte 3/3.....	80
FIGURA 3.12 – Segundo protótipo do anemômetro de fio quente – vista frontal.....	83
FIGURA 3.13 – Segundo protótipo do anemômetro de fio quente – vista traseira interna. ...	83
FIGURA 3.14 – Placa de circuito impresso do segundo protótipo do anemômetro – Parte 1/2.	84
FIGURA 3.15 – Placa de circuito impresso do segundo protótipo do anemômetro – Parte 2/2.	84

CAPÍTULO 4 – METODOLOGIA EXPERIMENTAL

FIGURA 4.1 – Esquema de teste e simulação do circuito amplificador de corrente do segundo protótipo do anemômetro.	87
FIGURA 4.2 – Sondas com fio de tungstênio (a) de 5 μm de diâmetro e (b) de 12 μm	87
FIGURA 4.3 – Sondas com fio de tungstênio (a) de 5 μm de diâmetro e (b) de 12 μm	88
FIGURA 4.4 – Manômetro diferencial eletrônico e dispositivo de calibração por jato livre.....	89
FIGURA 4.5 – Vista esquemática do calibrador de sondas de fio quente baseado no modelo 1125 da <i>TSI Incorporated</i>	90
FIGURA 4.6 – Detalhe do posicionamento da sonda de fio quente na saída do orifício do jato livre do dispositivo de calibração.	91
FIGURA 4.7 – Posicionamento da sonda de fio quente e tubo de Pitot no interior da seção de testes do túnel aerodinâmico. (a) vista superior e (b), vista lateral externa.	92
FIGURA 4.8 – Vista geral do túnel aerodinâmico da Unesp - IS.	93
FIGURA 4.9 – (a) vista lateral do ventilador radial e inversor de frequência para o controle da velocidade de rotação e (b), vista posterior mostrando a tomada de ar.	94
FIGURA 4.10 – Detalhe dos quatro pontos de fixação de instrumentação na seção de teste. (a) vista lateral externa e (b), vista da saída do túnel.	95

FIGURA 4.11 – Vista da seção de teste com ilustração da diferença do espaçamento para (a) tubo de Pitot situado a duas vezes o diâmetro da esfera e (b), sonda de fio quente situada a uma distância de um diâmetro da esfera, ambos fixados na primeira escotilha (1D).	95
FIGURA 4.12 – Posicionador milimétrico para deslocamento da sonda de fio quente e tubo de Pitot na seção de testes do túnel aerodinâmico.....	96
FIGURA 4.13 – Multímetro e osciloscópio digital conectado num micro computador, utilizados para realização de aquisição de dados para o experimento.....	97
FIGURA 4.14 – Esquema da montagem experimental para calibração em frequência do primeiro protótipo do anemômetro.....	98
FIGURA 4.15 – Montagem experimental para calibração em frequência do primeiro protótipo do anemômetro de fio quente.....	99
FIGURA 4.16 – Detalhes da montagem experimental: (a) lente focalizadora, (b) posicionador da sonda e (c), disco do <i>chopper</i> em frente a saída do laser.....	100
FIGURA 4.17 – Detalhes da montagem experimental: (a) osciloscópio digital e (b), controlador digital do <i>chopper</i>	100
FIGURA 4.18 – Esquema da montagem experimental para calibração em frequência do anemômetro de fio quente com o uso de um gerador de sinais.....	102
FIGURA 4.19 – Detalhe do gerador de funções e do osciloscópio utilizados no teste com gerador de sinais no circuito da ponte de Wheatstone do primeiro anemômetro.	103
FIGURA 4.20 – Detalhe do gerador de funções e do osciloscópio utilizados no teste com gerador de sinais no circuito da ponte de Wheatstone do segundo protótipo.	103
FIGURA 4.21 – Esquema simplificado do processo de medição da resistência elétrica da sonda de fio quente.....	104
FIGURA 4.22 – Rotina implementada no programa <i>TestPoint</i> para medição automática da resistência elétrica da sonda de fio quente.....	105
FIGURA 4.23 – Bancada de caracterização de filmes supercondutores do Laboratório de Vidros e Cerâmicas – Depto. Física e Química da Unesp - IS.....	106
FIGURA 4.24 – Detalhe dos instrumentos utilizados na medição da resistência da sonda....	107
FIGURA 4.25 – Acessórios utilizados no experimento: (a) cabo de interligação de 4m e (b), sonda de curto-circuito e (c), suporte para sondas 55H22.....	107

CAPÍTULO 5 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

FIGURA 5.1 – Simulação dos amplificadores A1 e A2 com sinal de onda senoidal de 5 kHz.	109
FIGURA 5.2 – Simulação dos amplificadores A1 e A2 com sinal de onda quadrada de 5 kHz.	110
FIGURA 5.3 – Resultados do ganho dos amplificadores A1 e A2 com sinal de onda senoidal (a), e quadrada (b), ambos de mesma amplitude e frequência de 5,5 kHz.	111
FIGURA 5.4 – Simulação do amplificador de corrente com sinal senoidal de 100 kHz.	112
FIGURA 5.5 – Simulação do amplificador de corrente com onda quadrada de 100 kHz.	113
FIGURA 5.6 – Resultados da resposta em frequência do amplificador de corrente com (a), sinal senoidal e (b), onda quadrada.	114
FIGURA 5.7 – Curva de calibração estática da sonda de tungstênio de 5 μm	115
FIGURA 5.8 – Extração da raiz quadrada da velocidade e obtenção do quadrado da tensão de saída da curva de calibração da sonda de 5 μm da Figura 4.2(a). ...	116
FIGURA 5.9 – Curva de calibração estática da sonda de tungstênio de 12 μm	117
FIGURA 5.10 – Extração da raiz quadrada da velocidade e obtenção do quadrado da tensão de saída da curva de calibração da sonda de 12 μm da Figura 4.2(b).	118
FIGURA 5.11 – Curva de calibração estática da sonda de camada limite de 5 μm da Figura 4.3(c).	119
FIGURA 5.12 – Extração da raiz quadrada da velocidade e obtenção do quadrado da tensão de saída da curva de calibração da sonda de camada limite de 5 μm da Figura 4.3(c).	120
FIGURA 5.13 – Curva de calibração estática da sonda de camada limite de 5 μm por regressão linear.	121
FIGURA 5.14 – Distribuição de velocidades de um escoamento ao redor de uma esfera, obtidas com tubo de Pitot, no trabalho de SILVA <i>et al.</i> (2005).	122
FIGURA 5.15 – Medição do perfil de velocidade do escoamento no interior da seção de testes do túnel aerodinâmico para as escotilhas 2D e 4D, sem a presença da esfera.	123
FIGURA 5.16 – Distribuição de velocidades nas respectivas escotilhas de teste para o escoamento ao redor de uma esfera, obtidas com o segundo protótipo do anemômetro de fio quente e a sonda para camada limite.	124

FIGURA 5.17 – Dados de saída do anemômetro adquiridos pelo osciloscópio digital (a) sinal temporal da sonda para estimulação da sonda de 5 μm em 500 Hz e (b), FFT desse sinal.	126
FIGURA 5.18 – Dados de saída do anemômetro adquiridos pelo osciloscópio digital (a) sinal temporal da sonda de 5 μm para estimulação em 700 Hz e (b), FFT desse sinal.	127
FIGURA 5.19 – Dados de saída do anemômetro adquiridos pelo osciloscópio digital (a) sinal temporal da sonda para estimulação de 1 kHz e (b), FFT desse sinal. ...	127
FIGURA 5.20 – Dados de saída do anemômetro adquiridos pelo osciloscópio digital (a) sinal temporal da sonda para estimulação de 1250 Hz e (b), FFT desse sinal.	127
FIGURA 5.21 – Dados de saída do anemômetro adquiridos pelo osciloscópio digital (a) sinal temporal da sonda para estimulação de 1500 Hz e (b), FFT desse sinal.	128
FIGURA 5.22 – Dados de saída do anemômetro adquiridos pelo osciloscópio digital (a) sinal temporal da sonda para onda quadrada de 500 Hz e (b), a visualização deste sinal junto ao sinal de entrada.	130
FIGURA 5.23 – Dados de saída do anemômetro adquiridos pelo osciloscópio digital (a) sinal temporal da sonda para onda senoidal de 500 Hz e (b), a visualização deste sinal junto ao sinal de entrada.	130
FIGURA 5.24 – Dados de saída do anemômetro adquiridos pelo osciloscópio digital (a) sinal temporal da sonda para onda quadrada de 1 kHz e (b), a visualização deste sinal junto ao sinal de entrada.	131
FIGURA 5.25 – Dados de saída do anemômetro adquiridos pelo osciloscópio digital (a) sinal temporal da sonda para onda senoidal de 1 kHz e (b), sua visualização.	131
FIGURA 5.26 – Dados de saída do anemômetro adquiridos pelo osciloscópio digital (a) sinal temporal da sonda para onda quadrada de 5 kHz e (b), sua visualização.	132
FIGURA 5.27 – Dados de saída do anemômetro adquiridos pelo osciloscópio digital (a) sinal temporal da sonda para onda senoidal de 5 kHz e (b), sua visualização.	132
FIGURA 5.28 – Dados de saída do anemômetro adquiridos pelo osciloscópio digital (a) sinal temporal da sonda para onda quadrada de 10 kHz e (b), a visualização deste sinal junto ao sinal de entrada.	132
FIGURA 5.29 – Dados de saída do anemômetro adquiridos pelo osciloscópio digital (a) sinal temporal da sonda para onda senoidal de 10 kHz e (b), a visualização deste sinal junto ao sinal de entrada.	133

FIGURA 5.30 – Resultado do teste com gerador de sinais. Canal 1 - sinal de saída do anemômetro e canal 2 – sinal de entrada tipo onda quadrada de 1 kHz.....	135
FIGURA 5.31 – Resultado do teste com gerador de sinais. Canal 1 - sinal de saída do anemômetro e canal 2 – sinal de entrada tipo onda senoidal de 1,6 kHz.	135
FIGURA 5.32 – Variação contínua de 1 até 2,5 kHz da frequência do sinal de onda quadrada inserido do anemômetro, visto na tela do osciloscópio digital com persistência infinita.....	136
FIGURA 5.33 – Variação contínua de 1 até 2,5 kHz da frequência do sinal senoidal inserido do anemômetro, visto na tela do osciloscópio digital com persistência infinita.....	136
FIGURA 5.34 – Simulação do sinal de saída do circuito do anemômetro para uma estimulação de onda quadrada de 1 kHz.	137
FIGURA 5.35 – Simulação do sinal de saída do circuito do anemômetro para uma estimulação senoidal de 1 kHz.	137
FIGURA 5.36 – Simulação do sinal de saída do circuito do anemômetro para uma estimulação de onda quadrada de 2,5 kHz.	138
FIGURA 5.37 – Simulação do sinal de saída do circuito do anemômetro para uma estimulação senoidal de 2,5 kHz.	138
FIGURA 5.38 – Dados tensão × corrente do cabo de interligação de 4 m com o valor de sua resistência elétrica indicada.....	139
FIGURA 5.39 – Dados tensão × corrente do suporte de sondas 55H22 com o valor de sua resistência elétrica indicada.....	140
FIGURA 5.40 – Dados tensão × corrente da sonda de tungstênio – Figura 4.2(a) - e o valor de sua resistência elétrica.	141
FIGURA 5.41 – Dados tensão × corrente da sonda da sonda de 12 μm – Figura 4.2(b) - e o valor de sua resistência elétrica.	141
FIGURA 5.42 – Dados tensão × corrente da sonda sonda de 5 μm – Figura 4.3(a) - e o valor de sua resistência elétrica.	142
FIGURA 5.43 – Dados tensão × corrente da sonda de 5 μm – Figura 4.3(b) - e o valor de sua resistência elétrica.	142
FIGURA 5.44 – Dados tensão × corrente da sonda para camada limite – Figura 4.3(c) - e o valor de sua resistência elétrica.	143

Lista de Símbolos

SÍMBOLOS ARÁBICOS

A_f	área da seção transversal [m ²]
c	calor específico [J / kKg °C]
c_t	calor específico á temperatura constante [J / kg °C]
c_v	calor específico á volume constante [J / kg °C]
d	diâmetro nominal [m]
d_c	diâmetro do cilindro [m]
E	tensão de saída do anemômetro [V]
E_{off}	tensão de polarização [V]
E_{out}	tensão de saída do anemômetro CTA [V]
E_s	tensão de alimentação da ponte de Wheatstone [V]
f_s	freqüência de emissão dos vórtices de um lado do cilindro [Hz]
g	aceleração da gravidade local [m / s ²]
h	coeficiente de convecção térmica [W / m ² °C]
I	corrente elétrica [A]
k_f	coeficiente de condutividade térmica [W / m °C]
l	comprimento nominal [m]
M	massa molar de gás ideal [kg / mol]
m	massa de gás ideal [kg]
n	razão de massa de gás ideal [kg / mol]
P	pressão manométrica [N / m ²]
P_{atm}	pressão atmosférica local [N / m ²]
$P_{estática}$	pressão estática ou de estagnação do escoamento [N / m ²]
P_{total}	pressão total ou de estagnação do escoamento [N / m ²]
P_0	pressão estática [N / m ²]

r	raio de oscilação do pêndulo [m]
R	constante universal dos gases ideais 8,3144126 [N m / mol K]
R_a	resistência da ponte de Wheatstone [Ω]
R_{adj}	resistência elétrica do ajuste de sobre-aquecimento da ponte de Wheatstone [Ω]
R_b	resistência da ponte de Wheatstone [Ω]
R_c	resistência da ponte de Wheatstone [Ω]
R_{cb}	resistência elétrica do cabo da sonda [Ω]
R_{cn}	resistência elétrica do conector do cabo da sonda [Ω]
R_d	resistência da ponte de Wheatstone [Ω]
R_{eq}	resistência elétrica equivalente da ponte de Wheatstone [Ω]
R_f	resistência elétrica do filamento de fio quente [Ω]
R_s	resistência série da fonte de alimentação [Ω]
R_{sp}	resistência elétrica do suporte do filamento da sonda [Ω]
R_{to}	resistência elétrica total da sonda de fio quente (suporte, cabo e conectores) [Ω]
R_w	resistência elétrica do filamento na temperatura de operação [Ω]
R_0	resistência elétrica do filamento numa temperatura de referência [Ω]
T	período de oscilação do pêndulo [s]
T_a	temperatura absoluta do gás [K]
T_f	temperatura do filamento [$^{\circ}\text{C}$]
t_s	tempo de estabelecimento [s]
T_s	temperatura do fluido [$^{\circ}\text{C}$]
T_w	temperatura de operação da sonda de fio quente [$^{\circ}\text{C}$]
t_0	tempo de referência de um sinal [s]
T_0	temperatura de referência para sonda de fio quente [$^{\circ}\text{C}$]
U	velocidade do fluido medido pelo anemômetro [m / s]
U_{som}	velocidade do som local [m / s]
U_0	velocidade do fluido [m / s]
U_l	velocidade linear do pêndulo [m / s]
V	volume de gás ideal [m ³]
V_B	tensão de entrada da ponte de Wheatstone [V]
V_0	tensão de saída da ponte de Wheatstone [V]
y	amplitude do sinal de saída da função de transferência [V]
y_0	altura de referência para pressão [m]

 NÚMEROS ADIMENSIONAIS

a	razão de sobre-aquecimento (<i>overheat</i>)
A	constante de calibração
A_0	constante de calibração
B	constante de calibração
B_0	constante de calibração
C	constante de calibração
Gr	número de Grasshof
k	razão entre calor específico
K	ganho do circuito amplificador
K_s	constante de proporcionalidade da função de transferência
Kn	número de Knudsen
Ma	número de Mach
n	constante de calibração
Pr	número de Prandtl
RA	razão de aspecto da sonda
Re	número de Reynolds
St	número de Strouhal

 SÍMBOLOS GREGOS

ρ_f	resistividade do filamento [Ω / m]
σ	constante de Stefan-Boltzmann [$6,67051 \times 10^{-8} \text{ W} / \text{m}^2 \text{ K}^4$]
ε	emissividade do material
ρ	densidade do material [kg / m^3]
ρ_a	densidade da água destilada [kg / m^3]
ρ_s	densidade do fluido [kg / m^3]
β	coeficiente de expansão térmica do fluido [$1 / ^\circ\text{C}$]
μ_s	viscosidade dinâmica ou absoluta do fluido [$\text{kg} / \text{m s}$]

ν	viscosidade cinemática do fluido [m^2 / s]
α_s	difusividade térmica [m^2 / s]
λ_m	livre caminho médio molecular do fluido [m]
φ	orientação angular da sonda [rad]
ΔP	variação da pressão estática e de estagnação [N / m^2]
ΔR	variação da resistência elétrica [Ω]
α	coeficiente de resistividade térmica [$1 / ^\circ\text{C}$]
α_1	coeficiente de resistividade térmica [$1 / ^\circ\text{C}$]
ω_n	freqüência natural de oscilação [rad / s]
ω	velocidade angular [rad / s]
θ	ângulo de rotação [rad]

SÍMBOLOS GREGOS ADIMENSIONAIS

π	relação entre comprimento e diâmetro da circunferência
ξ	coeficiente de amortecimento
δ	incerteza associada à medição de uma variável
σ	desvio padrão da população

OPERADORES MATEMÁTICOS

df/dx	derivada da função f em relação a variável x
dt	diferencial de tempo
∂	derivada parcial
$-$	média temporal
u	função degrau unitário
s	variável de Laplace
S	variável de computo de incerteza

Lista de Citações

A

ANTONIA *et al.* (1981) 4, 37

B

BROWN (2003) 59

BRUUN (1985) 44, 45, 46

BRUUN (1995) 11, 14, 16, 21, 22, 24, 29, 30,
39, 61, 70, 101, 118, 150

BRUUN *et al.* (1988) 27, 28, 50, 51, 53, 54,
69, 92

BRUUN *et al.* (1989) 28, 56, 58

BUCHHAVE (1978) 23, 24

C

CHRISTMAN & PODZIMEK (1981) 29, 54, 55

CITRINITI & GEORGE (1997) 14

CITRINITI *et al.* (1994) 14, 41, 61, 71, 73, 98

COMTE - BELLOT (1976) 12, 21, 22, 30, 147

COMTE - BELLOT (1977) 12, 13, 30

E

EBERFORS *et al.* (1998) 16

EGUTI *et al.* (2002) 54, 71

ELSNER *et al.* (1993) 14, 21

F

FIEDLER (1978) 26, 67, 68, 100, 128, 151

FOX & MCDONALD (2001) 51, 60

FRANCO (1998) 126, 148

FREYMUTH (1979) 22

FREYMUTH (1997) 30, 44

G

GONÇALVES (2001) 7, 58

GOLDSTEIN (1983) 11, 14, 30, 39, 40, 115,
119

GRANGER (1988) 60

GUELLOUZ & TAVOULARIS (1995) 28, 56,
57, 58

GUPTA (1927) 30

GUY (1971) 30, 65

H

HINZE (1987) 6, 14, 21, 38

HIRAI (2003) 7

J

JIANG *et al.* (1992) 16, 30

JONES (1977) 22, 147

JØRGENSEN (1996) 16, 25, 27

JØRGENSEN (2002) 6, 14, 18, 36, 37, 70

K

KHOO *et al.* (2003) 30, 61

KING (1914) 12, 27, 28, 29, 147

KNUDSEN (1927) 147

L

- LANCASTER (1975) 47
- LANSPEARY (1997) 14, 25, 30, 55, 56, 58, 60, 119
- LEE & BUDWIG (1991) 28, 55, 56
- LEE & KAUH (1997) 21, 30
- LEKAKIS (1996) 16, 18, 24, 25, 26, 29, 30, 37, 61, 98
- LEMONIS & DRACOS (1996) 16
- LINDQUIST (2000) 7
- LIEPMANN & ROSHKO (1960) 64
- LOMAS (1986) 4, 6, 11, 13, 16, 19, 21, 22, 24, 29, 37, 39, 40, 41, 43, 44, 149
- LU (1979) 30, 42, 43, 48, 61, 64, 66, 71, 98, 152

M

- MORRIS & FOSS (2003) 30

N

- NEVES *et al.* (2000) 64

P

- PAI (1954) 52, 53
- PALLÁS-ARENY & WEBSTER (1991) 31, 33
- PERRY (1982) 11, 13, 16, 18, 21, 24, 28, 29, 30, 39, 41, 42, 45, 61, 70, 71, 73, 101, 116, 147, 149, 152
- PRANDTL & TIETJENS (1934) 11, 12, 31, 38, 39, 59
- PUPYSHEV *et al.* (2004) 29, 54, 55

S

- SAMWAYS *et al.* (1994) 18, 28, 37
- SEED & WOOD (1970) 18, 37, 150
- SEYED & VEERAVALLI (1996) 25, 151
- SHEPPARD (1941) 11, 12, 31, 41
- SHERLOCK & WYATT (1983) 30, 43, 44
- SILVA *et al.* (2005) 94, 96, 96, 122, 124
- STELLA *et al.* (1997) 25, 26, 27

W

- WATMUFF (1995) 13, 30, 42, 43, 44, 46, 48
- WEEKS *et al.* (1988) 68, 100
- WEIDMAN & BROWAND (1975) 18, 25, 30, 43, 45, 46, 48, 61, 98, 152
- WU & BOSE (1993) 18, 28
- WYATT (1952) 70
- WYNGAARD & LUMLEY (1967) 30, 43, 46, 61, 98

Z

- ZHE (2002) 14, 17

Resumo

Anemômetros de fio quente são sensíveis instrumentos capazes de medir variações de velocidade nos mais diversos tipos de escoamentos, sejam eles gasosos ou líquidos. Um delicado filamento metálico é aquecido por uma corrente elétrica a qual gera calor por efeito Joule e transfere parte dessa energia para o escoamento incidente, sendo esta troca de calor proporcional a velocidade do fluido, definindo assim o princípio básico de funcionamento da anemometria de fio quente. Quando este filamento é montado num circuito tipo ponte de Wheatstone, pode-se relacionar a troca de calor no filamento através da variação de sua resistência elétrica fazendo o uso de circuitos eletrônicos especiais. Este trabalho aborda os conceitos básicos da anemometria de fio quente, seus circuitos de controle principais e seus modos de operação, mostrando diferentes métodos para calibração de sondas de fio quente em escoamentos gasosos, além de apresentar uma metodologia completa para construção de um sistema básico de anemômetro de fio quente de temperatura constante. Dois dispositivos foram construídos e testados sendo avaliados quanto ao seu funcionamento e sua resposta em frequência.

Palavras Chaves: Anemometria de fio quente, Instrumentação Eletrônica, Calibração, Tubo de Pitot, Sensores.

Abstract

Hot wire anemometers are sensitive instruments capable of measuring fluctuation of speed in many fluid flows, gaseous or liquid. A delicate metallic filament is heated by an electric current (Joule effect) and cooled by incident flow, this heat exchange is proportional of the fluid speed, defining the basic phenomenon of hot-wire anemometry. When this filament is mounted on an arm of Wheatstone bridge, the heat lost by the filament can be related its electric resistance when special electronic circuits are used. This work presents the concepts of hot-wire anemometry, its main control circuits and its operation mode, showing the basic methods for hot wire calibration with gaseous flows, besides presenting a complete methodology for construction of a basic constant temperature hot-wire anemometer system, based on the tests of two experimental circuits which are evaluated by electronic tests and its frequency response.

Keywords: Hot-Wire Anemometry, Electronic Instrumentation, Calibration, Pitot Tube, Sensors.

Capítulo 1

Introdução

Diferentes setores de nossa sociedade utilizam de diversos instrumentos destinados a medir o deslocamento, velocidade ou quantidade de um determinado fluido. Esta movimentação de diferentes substâncias faz parte do nosso modo de vida, sendo a medição de sua velocidade importante para a análise e síntese de diversos produtos de engenharia. Estações de tratamento de água e esgoto, postos de combustíveis, supermercados, refinarias, escolas, indústrias e mais uma infinidade de outros exemplos, fazem o uso de tais instrumentos, seja ele para medir o consumo de água numa simples residência, quanto avaliar a quantidade de gás natural que entra numa usina termoeletrica.

Praticamente todos os sistemas de medição da velocidade de fluidos realizam uma operação de comparação, baseada num princípio físico bem definido e adequado ao fluido de trabalho, sendo este o propósito principal de uma medição.

Dentre dezenas de instrumentos diferentes destinados a medir a velocidade de fluidos, os medidores tipo térmicos (*thermal flowmeter*) destacam-se por apresentarem melhor precisão em relação a outros instrumentos que utilizam outro princípio físico como, por exemplo, os medidores de turbina, ultra-sônicos, etc. Dentro da classe de medidores térmicos, destacam-se aqueles que operam pelo balanço de energia e os chamados convectivos.

Os medidores que operam pelo balanço de energia geralmente utilizam-se de um fino e longo tubo para assegurar a mínima perturbação no escoamento e, em dois pontos distintos, mede-se a temperatura do escoamento, adicionando-se ao primeiro ponto, uma fonte de calor constante. O ganho de temperatura observado no escoamento é uma função do calor específico do fluido e do fluxo de massa e pode ser calculado simplesmente pela primeira lei da termodinâmica utilizando-se a conservação da energia. Geralmente este tipo de equipamento tem sua utilização limitada a fluidos isentos de contaminação, com baixos gradientes de

temperatura em escoamentos laminares. Tais medidores encontram grande utilização na indústria de semicondutores.

Os medidores do tipo convectivos, por sua vez, utilizam de um sensor aquecido introduzido no interior do escoamento o qual é o foco de atenção deste trabalho. A transferência de calor entre tal elemento aquecido e o meio fluido escoando ao redor dele define o fenômeno básico da anemometria de fio quente.

Dependendo das propriedades do fluido (densidade, viscosidade, condução térmica, calor específico) e dos parâmetros do escoamento (velocidade, temperatura, pressão) podemos estabelecer uma relação entre a velocidade do fluido e a taxa de transferência de calor dissipada pelo fio quente. Em virtude disso, um anemômetro de fio quente é basicamente um transdutor térmico, capaz de converter variações de temperatura em sinais elétricos.

Um típico sensor de um anemômetro de fio quente possui dimensões diminutas sendo constituído de um fino filamento metálico, o qual é exposto ao movimento de um fluido através de hastes suportes. Uma corrente elétrica controlada é inserida neste filamento e o calor gerado por efeito Joule é transferido ao fluido. A variação do equilíbrio térmico entre o filamento aquecido e o fluido modifica a resistência elétrica do fio metálico e tal variação pode ser quantificada através de circuitos elétricos específicos.

O circuito elétrico mais utilizado para avaliar variações de resistência elétrica é chamado de ponte de Wheatstone, composto por quatro resistências na forma de um quadrilátero. Este circuito é utilizado por inúmeros instrumentos eletrônicos, principalmente quando é desejado um sinal de erro proporcional à diferença entre um sinal variável e outro de referência.

Em sistemas convencionais de anemometria de fio quente (HWA – *Hot Wire Anemometry*), o controle da tensão de entrada da ponte de Wheatstone pode ser realizado de duas maneiras distintas, sendo chamados de:

- CCA – Anemômetro de Corrente Constante (*Constant Current Anemometer*);
- CTA – Anemômetro de Temperatura Constante (*Constant Temperature Anemometer*).

Os anemômetros de corrente constante (CCA), são assim chamados, pois fornecem uma potência constante de alimentação para o circuito da ponte de Wheatstone, enquanto que o circuito de temperatura constante (CTA) apresenta uma topologia de controle capaz de variar a tensão de alimentação da ponte de forma a manter a temperatura do filamento, exposto ao

deslocamento do fluido, constante. Os anemômetros de temperatura constante são capazes de fornecer uma compensação rápida e precisa para a inércia térmica do filamento aquecido, realizando assim um ajuste automático e contínuo para o ponto de operação do circuito quando as condições do fluido variam.

A Figura 1.1 mostra uma típica cadeia de medição da velocidade de um escoamento com o uso de um anemômetro de fio quente operando no modo CTA. O deslocamento do fluido, ao incidir sobre o filamento da sonda, altera sua resistência elétrica, que é parte de uma das arestas do circuito da ponte de Wheatstone. A diferença de tensão de saída da ponte é amplificada K vezes, sendo este valor proporcional à velocidade do fluido. O valor amplificado realimenta a ponte de Wheatstone através do amplificador de corrente I , corrigindo a temperatura da sonda pela variação de sua corrente elétrica de forma a manter o equilíbrio de corrente nas arestas opostas da ponte de Wheatstone. Para permitir a manipulação digital do valor da velocidade do escoamento, este sinal é convertido e armazenado num computador através de um dispositivo de aquisição de dados. O valor digitalizado é quantificado numa unidade de medida de velocidade apropriada mediante o uso de sua função de transferência, obtida após a calibração do anemômetro.

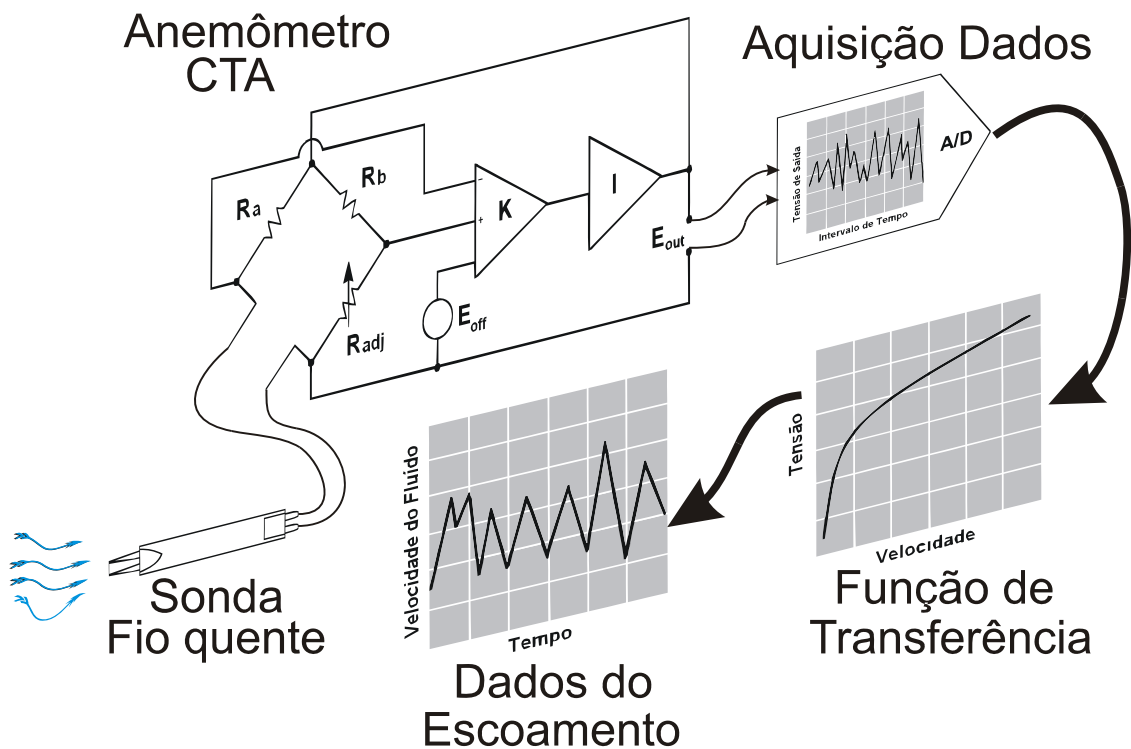


FIGURA 1.1 – Cadeia de medição típica para determinação da velocidade de fluidos com o uso da anemometria de fio quente.

Esta característica torna o anemômetro CTA o instrumento mais utilizado no estudo do escoamento de fluídos uma vez que sua operação se adapta melhor em vários tipos de escoamentos, ao contrário dos anemômetros CCA, os quais são utilizados em aplicações especiais.

Em geral, anemômetros de fio quente são utilizados para medir a velocidade média do escoamento e suas flutuações, contudo o sensor de fio quente também pode detectar a variação da temperatura do fluído, principalmente quando o modo CCA é utilizado. Na modalidade de um medidor das flutuações de temperatura do escoamento, muitos autores a exemplo de ANTONIA *et al.* (1981), referem-se a este instrumento como Anemômetro de Fio Frio (*Cold Wire*).

Os dados temporais da variação da velocidade do fluído podem fornecer uma série de informações a respeito do escoamento na região onde a sonda de fio quente está inserida, a exemplo do valor médio da velocidade, seu valor eficaz além de investigações no domínio da freqüência, com o uso de técnicas matemáticas de redução de dados a exemplo da transformada rápida de *Fourier* (FFT).

Os anemômetros de fio quente podem ser aplicados em diversos tipos de fluídos, a exemplo da água, água do mar, ar, soluções químicas ou poliméricas, sangue, mercúrio, glicerina, óleos, gases nobres e misturas de gases, inertes ou reativos. Obviamente o escoamento de gases com partículas de diferentes dimensões, os escoamentos bifásicos (gás-líquido) e os de líquidos condutores, exigem a utilização de sondas especiais, adequadas ao fluído em questão.

Anemômetros de fio quente, por sua vez, possuem a vantagem de apresentar uma resposta em freqüência relativamente elevada, próxima de 300 kHz em determinados equipamentos de laboratório, de acordo com LOMAS (1986).

Além de boa resposta em freqüência, HWA podem ser ainda aplicados em escoamentos permanentes ou não, tanto de baixa, quanto de altas velocidades, alcançando limites supersônicos com o uso de sondas com geometrias especiais.

Sua resolução espacial, ou seja, a região física do escoamento sob medição, também apresenta inúmeras vantagens quando comparada com outros instrumentos, principalmente devido às diminutas dimensões as quais suas sondas podem alcançar.

Em geral, os filamentos de uma sonda de fio quente apresentam comprimentos da ordem de 2 mm com diâmetros de até 0,5 μm , dependendo do material utilizado. A Figura 1.2 mostra o

aspecto típico de uma sonda de fio quente.

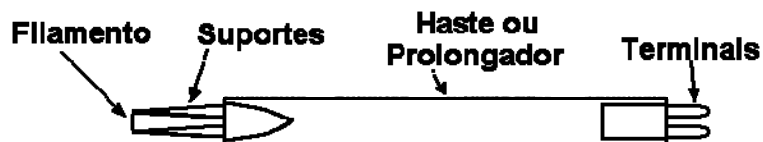


FIGURA 1.2 – Detalhes típicos de uma sonda de fio quente.

As dimensões dos sensores de fio quente fazem com que HWA obtenha grande sucesso na investigação de escoamentos próximos a paredes ou na medição da camada limite, nas mais diversas geometrias e formas.

Estas características revelam a grande versatilidade da anemometria de fio quente como instrumento de pesquisa para mecânica dos fluídos e exemplificam a preferência deste equipamento por diversos laboratórios, centros de pesquisa e indústrias espalhadas pelo mundo.

1.1 – Objetivos

Neste trabalho pretendem-se construir um equipamento simples de anemometria de fio quente de temperatura constante. As etapas de sua construção e seus circuitos eletrônicos de controle serão apresentadas e discutidas, com a descrição dos conceitos fundamentais da anemometria de fio quente, os tipos de sondas mais utilizadas, seus circuitos de controle, modos de operação e os procedimentos necessários para sua utilização prática. Pretende-se ainda apresentar as técnicas de calibração mais comuns para sondas mono - dimensionais, tanto para velocidade, quanto para calibração e averiguação da sua resposta em frequência, sendo estes resultados experimentais comparados com simulações numéricas específicas para cada teste.

1.2 – Justificativa e motivação

A investigação experimental do escoamento de fluídos possui uma elevada quantidade de instrumentos, métodos na qual a escolha da melhor técnica depende de inúmeros fatores intrínsecos ao escoamento.

Muitos desses métodos e instrumentos são específicos para escoamentos não –

turbulentos, incompressíveis e pouco susceptíveis a variação de temperatura. Somente uma pequena classe desses equipamentos é capaz de medir velocidade de escoamentos turbulentos ou que apresente elevada variação da temperatura.

A anemometria de fio quente constitui a principal ferramenta para o estudo de escoamentos não permanentes, com variação de temperatura e aplicável em escoamentos compressíveis, podendo estes ser turbulentos ou supersônicos, de acordo com HINZE (1987).

A turbulência por si só é um fenômeno muito importante para a mecânica dos fluidos uma vez que está diretamente ligada a diversas características físicas de um escoamento, tais como o transporte de quantidade de movimento, troca de calor e massa, viscosidade aparente do fluido e etc. Sua compreensão proporciona projetos aerodinâmicos mais eficientes, sejam eles para veículos terrestres ou aeroespaciais, além de otimização de projetos de motores, bombas, arquitetura e construção civil, etc, conforme expõe o trabalho de JØRGENSEN (2002).

A grande dificuldade de se medir a velocidade de escoamentos turbulentos reside no fato de que a turbulência é um fenômeno tridimensional, podendo apresentar elevada frequência de flutuação da velocidade do fluido, sendo esta uma dificuldade a ser vencida pelo equipamento de aquisição de dados, o qual deve estar adequado a registrar uma elevada quantidade de dados numéricos num dado intervalo de tempo.

Assim, mesmo quando comparada aos modernos sistemas de anemometria *laser* por efeito *Doppler* (LDA – *Laser Doppler Anemometry*) ou sistemas de medição de velocidade de partículas através de imagem (PIV – *Particle Image Velocimetry*), a anemometria de fio quente consegue destacar-se principalmente devido a sua elevada resposta em frequência.

Outro fator que justifica a utilização da HWA é o custo de aquisição e operação de instrumentos LDA e PIV, os quais apresentam um custo cerca de 5 até 10 vezes mais elevado em relação à HWA, de acordo com LOMAS (1986). Além disso, medidores LDA e PIV exigem uma quantidade mínima de partículas refletoras no fluido para efetuarem suas medições, característica esta inexistente para HWA.

Versões mais modernas da anemometria *laser* tais como LDA de alta resolução e PIV de múltiplos planos, fazem uso extenso de cálculos numéricos, aplicando extensa carga de análise estatísticas e probabilísticas na determinação da velocidade do escoamento, as quais inserem incertezas elevadas neste processo de medição.

A Figura 1.3 mostra a aplicação da anemometria de fio quente no trabalho de

LINDQUIST (2000), no qual tanto a velocidade do escoamento, quanto a frequência de emissão de vórtices puderam ser obtidas com este instrumento. Seu trabalho utilizou um túnel hidrodinâmico vertical tipo *blowdown*, no qual foi estudado o escoamento ao redor de cilindros de base quadrada e retangular. Torna-se importante ressaltar que o autor associa a visualização de escoamentos com a HWA, obtendo importantes informações quantitativas e qualitativas acerca desse tipo de escoamento.

Do mesmo modo, a junção de técnicas de visualização com a anemometria de fio quente nos trabalhos de GONÇALVES (2001) e de HIRAI (2003), foram realizadas com sucesso no estudo do escoamento em medidores de vazão a efeito vórtice, operando em água e ar.

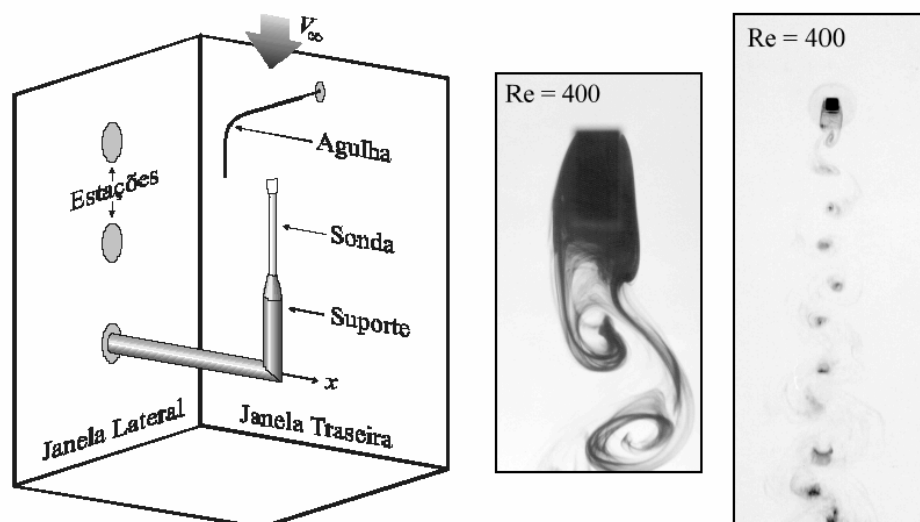


FIGURA 1.3 – Aplicação da HWA no trabalho de LINDQUIST (2000).

A Figura 1.4(a) mostra outra aplicação da anemometria de fio quente no estudo do movimento e da influência dos ventos numa plataforma de prospecção de petróleo marítima. O trabalho foi realizado no interior de um túnel de vento com o uso de um modelo em escala da plataforma. O detalhe da figura mostra a sonda do anemômetro, a qual é deslocada em diferentes posições no modelo.

A Figura 1.4(b) mostra a utilização da anemometria de fio quente na determinação das condições do vento que levaram a queda de um avião de passageiros nas Ilhas *Årøe*, no atlântico norte em 1996. A aeronave realizava sua aproximação para pouso, passando entre uma cadeia de montanhas, quando subitamente perdeu sustentação e caiu. Através da reprodução da geografia do trajeto de pouso, numa escala de 1:1500 construída dentro da seção de teste de um

túnel de vento, pode-se averiguar que um vento cruzado passando entre esta formação montanhosa em forma de cavidade, criou uma zona de elevada turbulência que levou a queda do avião.

Estas características revelam a grande versatilidade da anemometria de fio quente como instrumento de pesquisa para mecânica dos fluidos e exemplificam a preferência deste equipamento por diversos laboratórios, túneis de vento, centros de pesquisa e indústrias espalhadas ao redor do mundo.

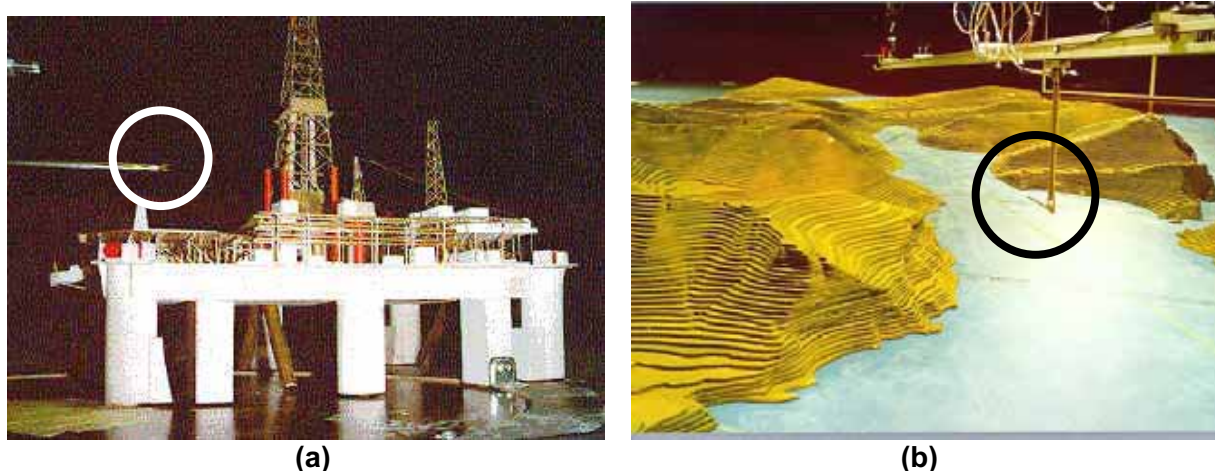


FIGURA 1.4 – Exemplos de aplicação da HWA no estudo do escoamento em maquetes.

1.3 – Apresentação do trabalho

Este trabalho está dividido em seis capítulos os quais descrevem as etapas e os procedimentos aplicados no desenvolvimento, construção e aplicação de um sistema básico de anemometria de fio quente com sondas mono-dimensionais.

O capítulo de introdução mostra de forma ampla os aspectos gerais da anemometria de fio quente, seu conceito fundamental e alguns exemplos de aplicação, de forma simplificada e resumida.

O segundo capítulo apresenta uma revisão bibliográfica relativamente abrangente para o presente trabalho, antecedida de uma breve introdução histórica dos instrumentos utilizados para medir a velocidade de fluidos. A utilização do tubo de Pitot é descrita em contraste com os primeiros artigos sobre HWA, seguido dos detalhes construtivos das sondas de fio quente, suas

leis de transferência de calor, formas de calibração e do circuito do anemômetro, com especial enfoque nos procedimentos experimentais para obtenção da curva de calibração e a verificação da resposta em frequência do circuito CTA. Ambos os tipos de circuitos, CTA e CCA, são explicados, porém o enfoque principal fica no modo CTA de operação.

O terceiro capítulo aborda conclusivamente os detalhes de projeto e construção do circuito eletrônico CTA, dos dois protótipos de anemômetro desenvolvidos neste trabalho, mostrando os seus circuitos eletrônicos completos. Este capítulo tem como objetivo promover um melhor entendimento do funcionamento eletrônico dos circuitos projetados, permitindo assim a reprodução deste trabalho por outros laboratórios ou instituições de pesquisas, as quais desejam utilizar um sistema simplificado de anemometria de fio quente.

A parte experimental do quarto capítulo está dividida nas etapas e procedimentos adotados para implementar a calibração estática e dinâmica dos protótipos dos anemômetros desenvolvidos e suas sondas, além dos testes numéricos e experimentais do circuito eletrônico do segundo protótipo. A metodologia e os equipamentos utilizados na obtenção do valor preciso da resistência elétrica das sondas também estão apresentados neste capítulo, com os resultados apresentados em forma de gráficos e tabelas.

Finalmente, o quinto capítulo discute os resultados obtidos com os dois protótipos de HWA, juntamente com os testes de suas sondas de fio quente.

A conclusão dos trabalhos e sugestões para trabalhos futuros com as possíveis melhorias dos resultados abordados são apresentadas no sexto e último capítulo deste trabalho, seguida das fontes de referências utilizadas e toda a bibliografia consultada, incluindo os manuais e outros textos.

Capítulo 2

Anemometria de Fio Quente

Em termos práticos, a utilização de anemômetros de fio quente é realizada há cerca de um século. Desse modo, a disponibilidade de artigos sobre o assunto é relativamente grande, justificando, assim, o número de referências consultadas para a realização do presente trabalho.

Dentre os textos selecionados, as referências LOMAS (1986), PERRY (1982) e BRUUN (1995), tratam exclusivamente de assuntos referentes à anemometria de fio quente. A referência GOLDSTEIN (1983) apresenta um capítulo destinado a dispositivos para medição da velocidade de fluídos, no qual expõe uma teoria de controle simplificada para anemômetros de fio quente.

A referência PRANDTL & TIETJENS (1934) é a terceira referência mais antiga utilizada neste trabalho, apresentando umas das primeiras utilizações de anemômetros de fio quente na investigação da velocidade de fluídos, até então limitada a utilização de diferentes tipos de tubos de Pitot, junto com as mais variadas geometria de manômetros.

De fato, segundo SHEPPARD (1941), os tubos de Pitot são considerados os instrumentos definitivos para medição da velocidade de fluídos, desde sua primeira utilização por Henri Pitot, no ano de 1732, sendo ainda muito utilizados em laboratórios de mecânica dos fluídos, túneis aerodinâmicos e principalmente em aeronaves como aviões, conforme mostram os exemplos da Figura 2.1.

De acordo com SHEPPARD (1941), a ciência da anemometria surgiu na Itália do século XVI, devido à necessidade do homem de medir a velocidade do vento e entender melhor o clima. Contudo, foi Robert Hooke quem realizou os primeiros estudos científicos acerca dos diversos princípios físicos utilizados na medida da velocidade do vento, no ano de 1667, na *Royal Society of London*.

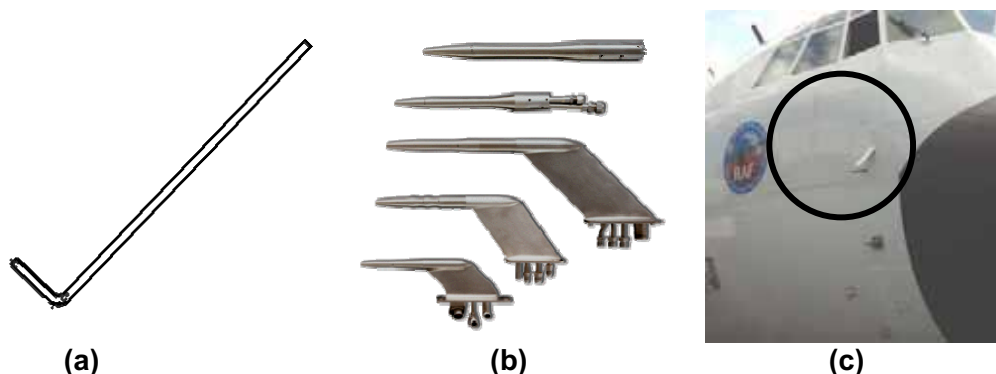


FIGURA 2.1 – (a) Tubo de Pitot simples, (b) modelos usados em aviões e (c), detalhe da sua localização.

Dois séculos mais tarde, nesta mesma instituição, o canadense Louis Vessot King publicaria o artigo que consolidou a anemometria de fio quente, descrevendo uma teoria para obtenção das constantes de convecção forçada para cilindros aquecidos imersos em meio fluido, apresentada em KING (1914). No entanto, para PRANDTL & TIETJENS (1934), o primeiro a sugerir o uso de anemômetros de fio quente para efetuar a medida da velocidade de fluídos foi o alemão L. Weber em 1894, mas foi L. V. King quem desenvolveu e aplicou a anemometria de fio quente com a obtenção de resultados práticos ainda no ano de 1914.

Estranhamente a edição de PRANDTL & TIETJENS (1934) refere-se ao artigo de King como sendo de R. O. King, porém percebe-se que estas iniciais estão erradas, pois todas as demais referências a King referem-se através das iniciais L. V. King. Com certeza, trata-se de um erro de impressão.

Todavia, os artigos de COMTE - BELLOT (1976) e COMTE - BELLOT (1977) enfatizam que a exata origem da anemometria de fio quente é muito difícil de se determinar. Ambos os artigos convergem para os trabalhos de L. V. King entre os anos de 1914 e 1915, os quais formam a base da anemometria de fio quente devido, principalmente, à dedução de sua lei de transferência de calor por convecção forçada em cilindros. Em consequência disso, o trabalho de SHEPPARD (1941) traça uma minuciosa linha do tempo a respeito de diversos tipos de anemômetros, confirmando a importância dos trabalhos de L. V. King para a anemometria de fio quente.

De acordo ainda com COMTE - BELLOT (1976), trabalhos anteriores de J. Boussinesq de 1905 e A. Russel de 1910, são citados em KING (1914), os quais apresentaram a teoria de que a transferência de calor por convecção forçada em cilindros de comprimento infinito é

proporcional à diferença de temperatura e a raiz quadrada da velocidade, sendo esta a base da conhecida “Lei de King”, detalhada no capítulo de metodologia de calibração de anemômetros.

2.1 – Sensor de fio quente

O sensor do anemômetro de fio quente pode ser comparado ao “coração” do instrumento, enquanto que o circuito CTA assume a função de “cérebro”, uma vez que este tem como tarefa interpretar as mínimas variações da corrente elétrica “sentidas” pelo filamento aquecido.

A referência PERRY (1982) apresenta um conteúdo muito valioso sobre o comportamento físico da sonda de fio quente, além de um estudo aprofundado das suas características construtivas e dimensionais. Tanto a geometria, quando as dimensões do filamento estão diretamente relacionadas com a resolução espacial do anemômetro, sendo que cada aplicação deve utilizar uma geometria de sonda específica.

Em escoamentos de elevada velocidade, com $Re > 1000$, a geometria da sonda de fio quente deve ser a mais aerodinâmica possível, de forma a introduzir o mínimo possível de perturbações no escoamento, além de suportar eventuais deformações aero-elásticas, conforme mostra PERRY (1982). Estas deformações são ocasionadas pela formação de vórtices tipo esteira de Von Karman quando o escoamento deixa o filamento, causando sua vibração na frequência natural de desprendimento de vórtices, introduzindo não-linearidades nos resultados. Este fenômeno é citado no trabalho de WATMUFF (1995) como efeito de *strain-gauging*, definido como uma forma de vibração de baixa amplitude e elevada frequência no filamento da sonda anemométrica. COMTE - BELLOT (1977) mostra ainda que estas perturbações aerodinâmicas introduzem erros sistemáticos na tensão de saída do anemômetro, sendo agravados a medida que as flutuações da velocidade do escoamento assumam comportamento periódico.

Uma característica construtiva muito importante em sondas de fio quente é a relação entre o comprimento nominal do filamento l , e seu diâmetro d , a qual recebe o nome de razão de aspecto, RA , definida conforme mostra a Equação (2.1).

$$RA = \frac{l}{d} \quad (2.1)$$

De acordo com LOMAS (1986), razões de aspecto práticas, ou seja, as mais eficientes e

empregadas na construção de sondas, estão dentro da faixa que varia de 200 até 400, para a maioria das sondas de circuitos CTA disponíveis comercialmente. No entanto, no trabalho de CITRINITI *et al.* (1994) foram utilizadas sondas com $RA = 1000$, com fios de tungstênio de $12,5 \mu\text{m}$ de diâmetro.

Para GOLDSTEIN (1983), estas dimensões interferem na resposta em frequência do anemômetro sendo que, em tese, quanto maior for a razão de aspecto do sensor, melhor será a resposta à variação das condições do fluido. Esta característica é reforçada no trabalho de ELSNER *et al.* (1993), no qual os efeitos das limitações físicas de sondas são avaliados no estudo de escoamentos turbulentos.

Interessante notar que sondas com elevados comprimentos ($l > 2 \text{ cm}$) são utilizadas em experimentos destinados a medir a velocidade média de escoamentos turbulentos. O trabalho de CITRINITI & GEORGE (1997) utilizou sondas de fio quente com $RA = 2000$ na determinação da energia turbulenta média e o número de onda de escoamentos que apresentam turbulência isentrópica tridimensional, mostrando que fios compridos atuam como filtros para avaliação da velocidade média, em determinadas faixas de frequências do comportamento turbulento do escoamento.

Este resultado contradiz a definição de BRUUN (1995) e HINZE (1987) nos quais enfatizam que as dimensões do sensor de fio quente devem ser as menores possíveis de forma a capturar as variações de velocidade das menores estruturas coerentes presentes num escoamento, permitindo assim a obtenção de um amplo espectro na escala média de turbulência de Kolmogorov.

De maneira geral, as sondas de fio quente são indicadas para uso em meio gasoso, ficando para as sondas de filme quente a recomendação para o uso em meio líquido, principalmente devido à melhor imunidade à contaminação que os sensores de fio metálico estão sujeitos. O trabalho de JØRGENSEN (2002) neste aspecto, apresenta um quadro prático de como proceder na escolha correta do tipo de sensor para cada tipo de aplicação. Por exemplo, a medida do perfil de velocidade da camada limite de escoamentos próximos de paredes exige sondas com geometrias especiais, capazes de inserir o mínimo possível de perturbações no escoamento, uma vez que, dependendo da espessura desta camada dentre outros fatores, a variação da velocidade é muito pequena, exigindo uma boa sensibilidade do instrumento neste tipo de investigação. Isto pode ser verificado no trabalho de LANSPEARY (1997) e ZHE (2002), os quais utilizaram sondas

especiais de fio quente para medir tanto a espessura, quanto o perfil de velocidade em camadas limites em escoamentos gasosos.

2.1.1 – Tipos de sensores

A escolha do sensor de fio quente depende de vários fatores intrínsecos ao fluido de trabalho e ao tipo de escoamento. Basicamente, devem-se levar em consideração os seguintes critérios:

- Tipo de fluido (água, ar, gás, sangue, óleo, etc.);
- Grau de liberdade (1, 2 ou 3 dimensões);
- Faixa de velocidade esperada (baixa, alta velocidades, supersônico, etc.);
- Resolução espacial requerida (nível de turbulência, camada limite, etc.);
- Risco de contaminação (sonda protegida, sonda de platina, etc.);
- Espaço disponível para medição (tamanho do prolongador, haste, etc.);

A Figura 2.2 ilustra três geometrias comuns de sondas de fio e de filme quente, enquanto a Figura 2.3 mostra três diferentes tipos de sondas, capazes de perceber tanto a magnitude, quanto à direção da velocidade do fluido em uma, duas e até três dimensões.

As sondas mono dimensionais são as mais comuns de uso geral e devem ser posicionadas de forma que o filamento permaneça perpendicular ao escoamento, enquanto que suas hastes e suportes devem permanecer, preferencialmente, paralelos com à direção do escoamento.

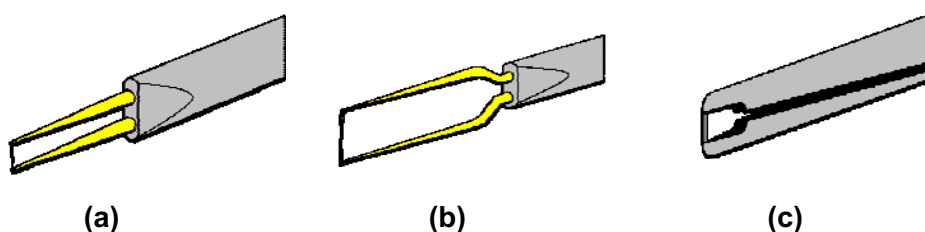


FIGURA 2.2 – Exemplos de sondas de fio quente de uma dimensão. (a) sonda de fio quente miniatura, (b) sonda de fio quente convencional, (c) sonda de filme quente.

Sondas tipo “X”, ilustrada na Figura 2.3(b), são capazes de decompor a velocidade do escoamento em duas direções ortogonais, quando o escoamento atravessa uma região cônica de $\pm 45^\circ$ em relação ao eixo axial da sonda.

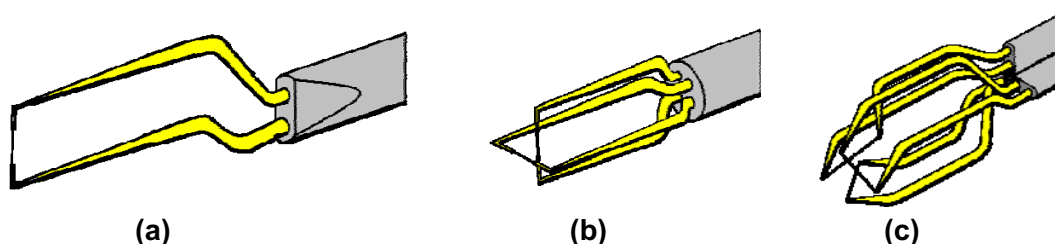


FIGURA 2.3 – Exemplos de sondas de fio quente: (a) de uma dimensão para camada limite, (b) tipo “X” para duas dimensões e (c), ortogonal para três dimensões.

Os sensores de três dimensões, conforme ilustrado na Figura 2.3(c), também são chamados de tri - axiais ou *split probe*. Para operação em duas dimensões, sua área de atuação é limitada a um cone de $\pm 70^\circ$ em relação ao eixo axial da sonda. Para decomposição do vetor velocidade em três componentes ortogonais, a resolução espacial é normalmente definida em uma esfera de diâmetro ligeiramente inferior ao comprimento de um dos filamentos.

As vantagens e desvantagens da utilização de sondas de duas ou três dimensões são exploradas nos trabalhos de LEMONIS & DRACOS (1996), LEKAKIS (1996), JIANG *et al.* (1992), EBERFORS *et al.* (1998), JØRGENSEN (1996), além dos livros do BRUUN (1995), LOMAS (1986) e PERRY (1982).

Tanto o trabalho de EBERFORS *et al.* (1998), quanto o de JIANG *et al.* (1992), apresentam dois tipos especiais de sonda de fio quente, as quais apresentam dimensões micrométricas, sendo construídas a partir de processos litográficos da indústria de semicondutores. No primeiro trabalho, uma sonda tridimensional foi construída com juntas de poliamida com filamento de polisilício, um material semicondutor com dimensões de $500 \times 5 \times 2 \mu\text{m}$, mostrado na Figura 2.4(a). Em JIANG *et al.* (1992), uma sonda anemométrica mono dimensional foi construída num substrato cerâmico através da deposição de polisilício, apresentando dimensões de $70 \times 1 \times 0.5 \mu\text{m}$, conforme mostra a Figura 2.4(b).

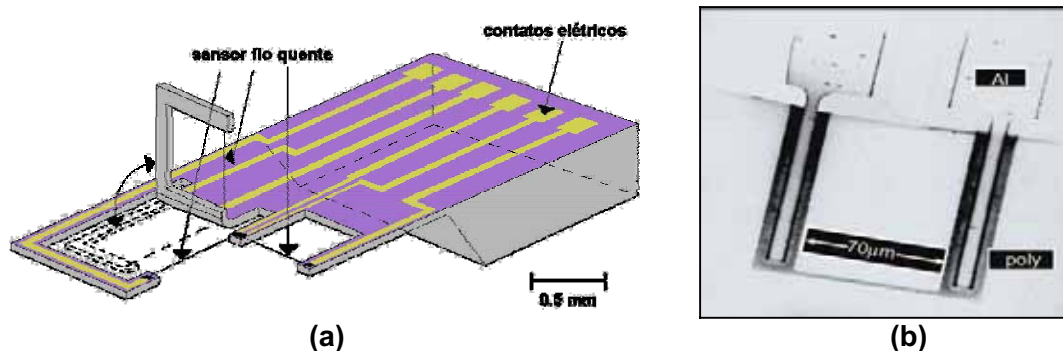


FIGURA 2.4 – (a) sensor miniatura 3D do trabalho de EBERFORS *et al.* (1998) e (b) sensor de polisilício de JIANG *et al.* (1992).

Estes dois trabalhos revelam o elevado grau de miniaturização possível para a construção de sondas de anemômetros de fio quente, inserindo HWA no campo dos dispositivos micrométricos ou chamados MEMS – *Micro Electro Mechanical Systems*. Além disso, estes sensores apresentam uma constante de tempo muito baixa ($< 160 \mu\text{s}$), permitindo assim sua aplicação nos mais diversos tipos de escoamentos, inclusive turbulentos e de elevada velocidade.

Sondas de dimensões mínimas são muito úteis na avaliação do escoamento próximo a superfícies, principalmente na medição da camada limite e da vorticidade, características que exigem apurada resolução espacial. Neste sentido, o trabalho de ZHE (2002) mostra uma aplicação da anemometria de fio quente que utiliza sensores construídos através de processos MEMS.

Com relação ao tipo de material do filamento da sonda, tanto sensor, quanto seus suportes podem ser fabricados de diferentes materiais, desde que sejam bons condutores de eletricidade e possuam algumas das características citadas abaixo:

- Elevado coeficiente de resistência à temperatura (α);
- Resistência à oxidação;
- Boa resistência mecânica;
- Baixo coeficiente de dilatação térmica (ρ).

Em geral, os filamentos são construídos de fios de tungstênio, platina, ligas de platina-irídio, platina-ródio ou níquel, podendo ou não ser revestido de uma fina camada de quartzo ou fibra, além de sensores especiais construídos de polisilício.

Alguns sensores também são construídos com filmes de níquel ou platina num substrato cerâmico ou de quartzo, recebendo assim a nomenclatura de anemômetros de filme quente (HFA – *Hot Film Anemometer*).

Filamentos de tungstênio apresentam um coeficiente de resistência à temperatura de valor elevado, além de considerável resistência mecânica, porém são facilmente oxidáveis. A platina é mais resistente à oxidação, possuindo um coeficiente α elevado, contudo é muito frágil na forma de fio. As ligas de platina apresentam uma resistência mecânica mais elevada em relação ao fio de platina pura, possuindo elevado α e excelente resistência à oxidação.

Os sensores de baixa resistência à oxidação, a exemplo do tungstênio, não são adequados para uso em meio líquido, sendo recomendado, para isso, o uso de sondas de filme quente, as

quais foram desenvolvidas principalmente para esta finalidade, conforme explica JØRGENSEN (2002). Vale a pena ressaltar que a grande maioria dos artigos selecionados para este trabalho utilizou, predominantemente, sondas de fio quente em escoamentos gasosos, principalmente o ar atmosférico.

Outro fator muito importante para a construção de boas sondas está na soldagem do filamento na haste prolongadora. Em PERRY (1982), dois procedimentos para soldagem dos filamentos são descritos. O primeiro através de soldagem por derretimento de estanho e outro com soldagem por fusão no interior de uma atmosfera química protetora. Deve-se evitar o aquecimento excessivo do filamento durante o processo de soldagem, uma vez que isto pode alterar as características físicas do material, tais como sua dureza e maleabilidade.

As hastes prolongadoras geralmente são feitas de cobre ou latão, revestidas de estanho ou ouro. Algumas sondas especiais utilizam o ouro tanto no suporte do filamento, quando nos terminais do prolongador, conforme mostra as Figuras 2.2 e 2.3.

Dentre os artigos estudados para este trabalho, dezessete deles construíram seus próprios circuitos e sondas. Dentre estes artigos, dez deles construíram sondas de fio quente com tungstênio, sendo que os demais utilizaram fios de platina.

Uma das grandes desvantagens de trabalhar com sondas de filme quente é o fato delas não permitirem seu concerto, ou seja, caso o filme venha a ser danificado, a sonda é inutilizada.

As referências SEED & WOOD (1970), WEIDMAN & BROWAND (1975), WU & BOSE (1993), SAMWAYS *et al.* (1994) e LEKAKIS (1996) tratam de HFA, principalmente no que diz respeito ao processo de calibração destas sondas.

O trabalho de SEED & WOOD (1969) aponta uma aplicação inusitada da anemometria de filme quente para medição da velocidade do escoamento do sangue em grandes artérias. Seus experimentos foram realizados em cães, através do uso de sondas de filme quente miniaturizadas da empresa *DISA*, atual *Dantec Dynamics*. Neste trabalho os autores mostram que o ajuste de temperatura de operação do filme (*overheat*) é decisivo para obtenção de resultados realísticos uma vez que o aquecimento do sangue, mesmo em porções diminutas, causa à destruição de seus componentes ativos, principalmente hemácias, inviabilizando a aplicação prática desta técnica em seres humanos. Uma solução encontrada para isso é utilizar baixas temperaturas de aquecimento da sonda, próximas da temperatura do sangue, corrigindo a tensão de saída do anemômetro para o baixo fator de sobre-aquecimento.

2.1.2 – Transferência de calor no filamento

O comportamento térmico de um filamento imerso no escoamento de um fluido pode ser determinado através dos diferentes modelos de transferência de calor, sendo a geometria cilíndrica a mais utilizada. A Figura 2.5 ilustra uma seção elementar do sensor de fio quente para análise infinitesimal.

Para as sondas de filme quente, modelos físicos mais apurados são utilizados devido aos efeitos preponderantes de troca de calor por condução entre o filme metálico e seu substrato. Contudo, o modelo para geometria cilíndrica, aqui apresentado, permite o estudo básico do comportamento físico destes sensores.

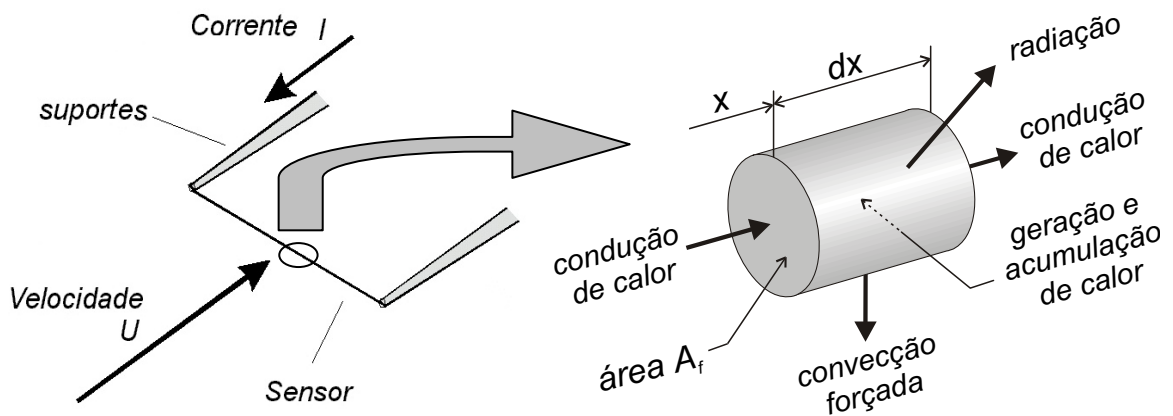


FIGURA 2.5 – Transferência de calor em uma seção infinitesimal de um fio aquecido.

De acordo com LOMAS (1986), o balanço térmico num infinitésimo do fio pode ser descrito através da Equação (2.2), sendo:

$$d\dot{Q}_e = d\dot{Q}_{cf} + d\dot{Q}_c + d\dot{Q}_r + d\dot{Q}_a \tag{2.2}$$

- ↑ Taxa de acumulação de energia térmica
- ↑ Taxa de transferência de energia por radiação
- ↑ Taxa de transferência de energia por condução
- ↑ Taxa de transferência de energia por convecção forçada
- ↑ Taxa de geração de energia térmica pelo efeito Joule

A taxa de geração de energia térmica pelo efeito Joule é obtida conforme Equação (2.3),

$$dQ_e = \frac{I^2 \rho_f}{A_f} dx \quad (2.3)$$

onde I é a corrente que atravessa o filamento, ρ_f a resistividade do material e A_f é a seção transversal do filamento, conforme Figura 2.5.

A taxa de transferência de energia térmica por convecção forçada é mostrada na Equação (2.4).

$$dQ_{cf} = \pi d h (T_f - T_s) dx \quad (2.4)$$

onde d é o diâmetro do sensor, h é o coeficiente de convecção térmica do filamento, T_s é a temperatura do fluido e T_f a temperatura do filamento.

A transferência de energia térmica por condução do suporte para o filamento, na região de entrada da corrente e do filamento para o outro suporte é obtida através da equação abaixo,

$$dQ_c = -k_f A_f \frac{\partial T_f}{\partial x} - A_f \frac{\partial}{\partial x} \left(k_f \frac{\partial T_f}{\partial x} \right) dx \quad (2.5)$$

onde k_f é o coeficiente de condutividade térmica do filamento.

A taxa de transferência de energia térmica por radiação do filamento aquecido é obtida conforme Equação (2.6),

$$dQ_r = \pi d \sigma \varepsilon (T_f^4 - T_{amb}^4) dx \quad (2.6)$$

onde σ é a constante de Stefan-Boltzmann, ε é a emissividade do material do filamento e T_{amb} , a temperatura ao redor do filamento.

Por fim, a taxa com que o filamento armazena energia térmica é dada pela equação abaixo,

$$dQ_a = \rho c A_f \frac{\partial T_f}{\partial t} dx \quad (2.7)$$

onde ρ é a densidade do material do filamento, c é o valor do seu calor específico e t , a variável para o tempo uma vez que a quantidade de energia térmica no interior do filamento varia com o tempo.

As Equações (2.3) até (2.7), quando substituídas na Equação (2.2), revelam o balanço de energia para o sensor de fio quente de um anemômetro típico, assim:

$$A_f \frac{\partial}{\partial x} \left(k_f \frac{\partial T_f}{\partial x} \right) + \frac{I^2 \rho_f}{A_f} - \rho c A_f \frac{\partial T_f}{\partial t} - \pi d h (T_f - T_s) - \pi d \sigma \varepsilon (T_f^4 - T_{amb}^4) = 0 \quad (2.8)$$

Através da Equação (2.8) pode-se obter a distribuição de temperatura ao longo do filamento, sua temperatura média e principalmente a característica da resposta em frequência da sonda.

Modelos simplificados da Equação (2.8) relacionam somente a perda por efeito Joule com a taxa de convecção entre o fio e o fluido. Abordagens mais sofisticadas podem utilizar a taxa de condução e acumulação térmica, sendo ambas mostradas nos trabalhos de BRUUN (1995), LOMAS (1986), HINZE (1987) e PERRY (1982).

Em tese, a energia térmica gerado no filamento também é transferida por condução para os prolongadores. Contudo, para razões de aspecto elevadas, este efeito pode ser desprezado, conforme LOMAS (1986). Os trabalhos de LEE & KAUH (1997), COMTE - BELLOT (1976) e ELSNER *et al.* (1993) mostram que, em certos casos, principalmente em escoamentos de baixa velocidade, os efeitos de troca de calor com os suportes prolongadores acentuam as incertezas nos resultados, principalmente pela diminuição da sensibilidade da sonda.

A transferência de energia térmica por radiação é também normalmente desprezada, uma vez que a temperatura de operação do filamento não é superior à 300°C, em escoamentos de velocidades moderadas (inferiores a 100 m/s).

A fim de permitir um modelo matemático prático para o estudo do comportamento da sonda, as seguintes hipóteses simplificativas podem ser utilizadas:

- Transferência de energia térmica por radiação desprezível;
- Condução do fio para os suportes desprezíveis;
- Temperatura e densidade constante no fluido;

Considerando as simplificações acima e desconsiderando o termo transiente de acumulação de energia térmica, foi levantado o perfil de temperatura ao longo de um filamento adimensional para diferentes razões de aspecto, obtidos por FREYMUTH (1979) e apresentados por BRUUN (1995), conforme mostra Figura 2.6.

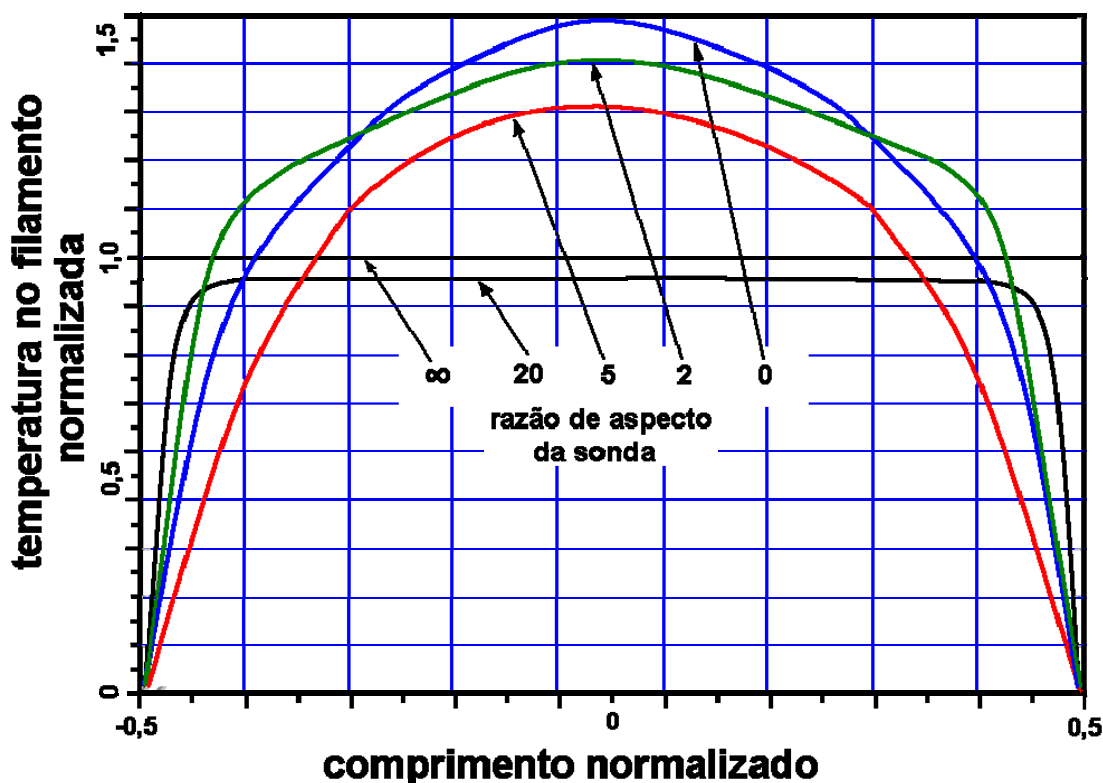


FIGURA 2.6 – Distribuição de temperatura no filamento para diferentes razões de aspecto.

Pode-se perceber que razões de aspecto elevadas contribuem para uma distribuição de temperatura mais uniforme ao longo do filamento do anemômetro. Neste gráfico, a temperatura e o comprimento do filamento estão normalizados. A referência LOMAS (1986) apresenta um resultado experimental no qual a distribuição da temperatura numa sonda de fio quente foi levantada com o auxílio de um termômetro infra-vermelho, confirmando os resultados teórico apresentados em BRUUN (1995), baseados numa solução analítica da Equação (2.8).

Assumindo uma razão de aspecto de valor infinito, ou seja, o comprimento do filamento muito maior que seu diâmetro, a distribuição de temperatura é completamente uniforme, desconsiderando-se a condução de calor para os suportes. Este resultado também é deduzido e apresentado em JONES (1977) e COMTE - BELLOT (1977), que utilizaram para isso as mesmas simplificações escolhidas por BRUUN (1995).

Um modelo físico mais detalhado do sensor de fio quente, mostrado no esquema da Figura 2.5, é apresentado no trabalho de BUCHHAVE (1978), que relaciona os efeitos de troca de calor no filamento em função dos grupos adimensionais mostrados abaixo:

$$Nu = f(Re, Gr, M, Pr, Kn, RA, \varphi, a) \quad (2.9)$$

onde:

$$Nu = \frac{h d}{k_f} \quad (2.10)$$

Número de Nusselt, relacionado com a transferência de calor do filamento com o meio.

$$Re = \frac{\rho_s U_0 d}{\mu_s} = \frac{U_0 d}{\nu_s} \quad (2.11)$$

Número de Reynolds, relacionado com as forças inerciais e viscosas do movimento do fluido.

$$Gr = \frac{g \rho_s^2 d^3 \beta (T_f - T_s)}{\mu_s^2} \quad (2.12)$$

Número de Grasshof, relacionado às forças de empuxo com as viscosas na convecção no filamento, uma vez que este se encontra imerso num meio fluido.

$$M = \frac{U_0}{U_{som}} \quad (2.13)$$

Número de Mach, relacionado com os efeitos da compressibilidade do escoamento, sendo considerável somente quando a sonda é exposta a elevadas velocidades.

$$Pr = \frac{c_s \mu_s}{k_s} = \frac{\nu}{\alpha_s} \quad (2.14)$$

Número de Prandtl, utilizado para relacionar as espessuras relativas da camada hidrodinâmica e térmica quando os efeitos da difusibilidade térmica do fluido são elevados.

$$Kn = \frac{\lambda_m}{d} \quad (2.15)$$

Número de Knudsen, relacionado com os efeitos não contínuos (*continuum*) do meio.

A razão de aspecto RA é definida conforme Equação (2.1). A orientação angular da sonda φ depende do posicionamento do filamento com a direção do escoamento e o fator de sobre-aquecimento a , define a temperatura de trabalho da sonda, sendo discutido no Capítulo 2.3.1. O Número de Grasshof é muitas vezes desprezado, principalmente quando a sonda opera com gases ou é posicionada próxima da superfície em líquidos.

Vários autores como LOMAS (1986), BRUUN (1995) e PERRY (1982), sugerem diversas leis de transferência de calor para a Equação (2.9). O modelo mais conhecido foi proposto por L. V. King em 1914, o qual descreve em termos adimensionais um modelo de troca de calor por convecção forçada através de um cilindro de comprimento infinito. Estes modelos de troca de calor são utilizados para descrever o comportamento térmico dinâmico da sonda de fio quente e são aplicados, sob diferentes abordagens, na obtenção de equações de calibração estática das sondas. Conforme mostra o trabalho de BUCHHAVE (1978), não é possível obter uma simples relação analítica que leve em conta todos os efeitos de resfriamento da sonda de fio quente em função da velocidade do fluido.

Algumas das diferentes simplificações e condições impostas à Equação (2.9) na obtenção da função de transferência estática são apresentadas e discutidas na seção seguinte.

2.2 – Curvas de calibração para anemômetros de fio quente **=====**

O objetivo principal do processo de calibração de anemômetros de fio quente consiste em determinar, com a maior precisão possível, a relação entre o sinal de saída do instrumento (em Volts) e a propriedade física que está sendo medida, em geral a velocidade do fluido (em m/s por exemplo).

Todos os anemômetros de fio quente devem ser calibrados de forma a permitir sua correta utilização na medida da velocidade de fluídos e na determinação da direção do escoamento. Quando sondas multi-dimensionais são utilizadas, estas necessitam ainda de serem calibradas com relação à direção do escoamento. Para isso, os trabalhos de LEKAKIS (1996),

JØRGENSEN (1996) e STELLA *et al.* (1997) utilizam, além de uma equação de calibração, um método para a extração da direção do fluido em contato com as sondas, baseado na decomposição dos co-senos diretores do valor da magnitude da velocidade obtida por cada uma das sondas.

A calibração de uma sonda de fio quente pode ser dispensada quando o anemômetro for utilizado na investigação do domínio da frequência como, por exemplo, medir a frequência de emissão de vórtices de um escoamento que incide sobre um cilindro. Esta aplicação é utilizada em LANSPEARY (1997), utilizando uma sonda não calibrada para isso.

Segundo WEIDMAN & BROWAND (1975), a análise de troca de calor, em uma dimensão, entre o filamento e o meio é suficiente para a maioria dos anemômetros de fio quente e de filme quente, fornecendo resultados idênticos aos obtidos com modelos de duas dimensões.

Em tese, a velocidade do escoamento obtida com o uso das equações de calibração, mostradas a seguir, representam valores pontuais. Porém, na prática, este valor é limitado pela resolução espacial da sonda, sujeita principalmente ao comprimento do filamento.

O aspecto do gráfico da tensão no filamento em função da velocidade do fluido é similar em todas as formulações de troca de calor apresentadas neste capítulo. Este gráfico também independe do tipo de circuito de controle utilizado para a obtenção da tensão no filamento e representa, ainda, o aspecto geral da curva de calibração para a maioria dos anemômetros de fio quente e filme quente, quando submetido a velocidades moderadas de escoamento.

De fato, as formulações de King, mostrada na seção 2.2.1, e Kramer, na seção 2.2.3, pressupõe troca de calor em uma única direção ao longo do filamento aquecido, considerando ainda que as dimensões do sensor possuem ordem de grandeza desprezível em relação ao escoamento. Devido a isso, o escoamento ao redor do filamento é sempre laminar, fato esse evidenciando pelo baixo valor de Re nas imediações do filamento, conforme mostra LEKAKIS (1996) e SEYED & VEERAVALLI (1996).

A calibração estática de anemômetros de fio quente diz respeito à obtenção da curva de calibração estática do instrumento, enquanto que a calibração dinâmica, ou em frequência, visa ajustar a resposta em frequência do circuito, de forma a atender os requisitos de desempenho temporal do sinal de saída do anemômetro. Os métodos de calibração estática e dinâmica de anemômetros de fio quente requerem o uso de dispositivos de calibração apropriados. A

metodologia empregada nestes aparatos pode ser estática (estacionária) ou dinâmica (móvel), conforme é mostrado nos Capítulos 2.4 e 2.5.

Para a realização da calibração de sondas, deve-se escolher com cuidado o sistema de aquisição de dados necessário para a coleta e armazenagem dos valores da tensão de saída do anemômetro em função do tempo. Esta preocupação é apresentada por LEKAKIS (1996), principalmente na realização da calibração em frequência, uma vez que a taxa de amostragem do dispositivo de aquisição de dados deve ser pelo menos duas vezes superior à frequência máxima de operação do anemômetro, de forma satisfazer o critério de amostragem de Nyquist.

Uma vez que o critério de Nyquist está satisfeito, os dados de saída ficam livres do efeito de *aliasing*, também chamado de “falseio”, conforme define FIEDLER (1978).

Considerando a calibração de uma sonda simples de fio quente, sua calibração estática pode ser obtida de duas formas, de acordo com STELLA *et al.* (1997). Uma primeira alternativa consiste em obter os valores da tensão de saída do anemômetro em função de cada velocidade do escoamento aos quais a sonda é exposta. Desta forma, monta-se uma tabela de interpolação ou chamada *look-up table* onde para cada leitura da tensão do anemômetro, obtém-se o respectivo valor da velocidade do fluido.

De acordo com LEKAKIS (1996), a calibração de sondas de fio quente através da confecção de tabelas de interpolação está em desuso, devido principalmente ao exaustivo e demorado trabalho de confecção destas tabelas. Por exemplo, a calibração de uma sonda tri-dimensional requer a coleta de dados tanto para magnitude, quanto para a direção do escoamento incidente, em cada um de seus filamentos.

Uma outra maneira de se realizar a calibração de sondas de fio quente consiste de obter uma série de dados da tensão de saída do anemômetro, em função de cada valor conhecido da velocidade do escoamento incidente na sonda. Desta forma, pode-se determinar a chamada curva de calibração, ajustando um polinômio ou uma equação de uma curva conhecida, aos dados do escoamento, obtendo, assim, seus coeficientes de ajuste.

Esta curva de calibração apresenta um formato típico, conforme ilustrado na Figura 2.7. Através de um processo de regressão linear, pode-se facilmente obter um polinômio interpolador de grau maior que dois ou outro tipo de equação, por exemplo, série de potência, curva exponencial, etc.

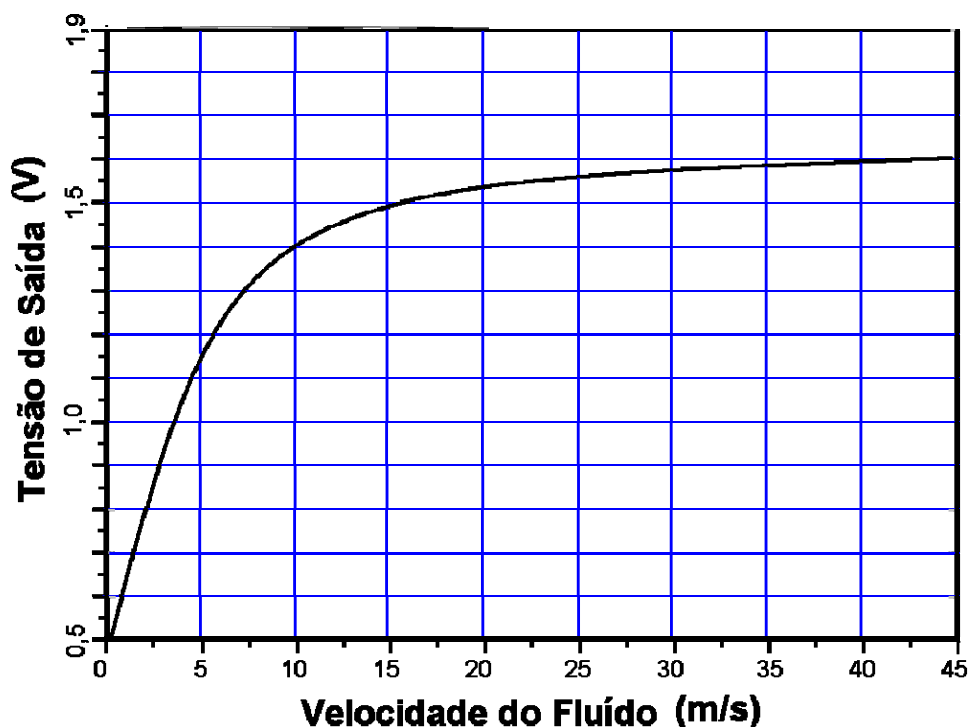


FIGURA 2.7 – Curva característica de calibração entre velocidade do fluido e o sinal de anemômetros de fio quente.

A utilização de polinômio interpolador não é recomendada no trabalho de JØRGENSEN (1996) devido à dificuldade em limitar a faixa de escoamento desejada. Contudo, o trabalho de STELLA *et al.* (1997) utiliza um ajuste polinomial de quinta ordem, enquanto que BRUUN *et al.* (1988) utiliza de um polinômio de terceira ordem, recomendando sempre ordem superior ou igual a 3.

A obtenção da curva de calibração e, conseqüentemente, da equação de calibração, é o melhor método de redução de dados utilizado na anemometria de fio quente, conforme relata STELLA *et al.* (1997), sendo este procedimento apresentado no Capítulo 2.3.

2.2.1 – Calibração “Lei de King”

De forma a prever o comportamento físico de sondas de fio quente, KING (1914) deduziu numa equação de recorrência baseada em simplificações impostas nas Equações (2.8) e (2.9), recebendo a denominação de “Lei de King”, sendo expressa conforme mostra a Equação (2.16), abaixo,

$$\frac{I^2 R_f}{T_f - T_s} = A_0 + B_0 \sqrt{Re} \quad (2.16)$$

Para anemômetros de fio quente, a “Lei de King” é usualmente escrita na forma mostrada na Equação (2.17),

$$E^2 = A + BU^n \quad (2.17)$$

onde A , B e n são constantes, obtidas experimentalmente e dependentes das propriedades do fluido e do escoamento. Nesta equação, a variável E indicada a tensão de saída do anemômetro e U , o valor da velocidade do fluido que atravessa o filamento.

O trabalho de KING (1914) sugere a utilização de $n = 0,5$ podendo ser aplicado numa ampla faixa de velocidades de escoamentos. Já em PERRY (1982), a Equação (2.17) foi novamente examinada para $n = 0,3$, $n = 0,4$, $n = 0,45$ e $n = 0,5$, mostrando um elevado grau de exatidão para a lei de potência com o uso desses expoentes, desde velocidades baixas, até velocidades moderadas, inferiores a 90 m/s.

O valor do expoente n também pode ser determinado iterativamente, utilizando para isso diversos algoritmos computacionais presentes em programas de ajuste de curvas em dados experimentais, tais como *Excell*[®] e *Origin*[®].

De acordo com BRUUN *et al.* (1988), a Equação (2.17) é a curva de ajuste mais utilizadas para calibração de anemômetros de fio quente, sendo este fato evidenciado em muitas das referências consultadas para este trabalho.

2.2.2 – Calibração “Lei de King” modificada

Os trabalhos de GUELLOUZ & TAVOULARIS (1995), BRUUN *et al.* (1989), BRUUN *et al.* (1988), LEE & BUDWIG (1991) e SAMWAYS *et al.* (1994), utilizaram a “Lei de King” para a calibração de seus anemômetros CTA, além de uma variação dessa lei, chamada tanto de “Lei de King” modificada, quanto de lei de potência estendida. Este procedimento é mostrado nos trabalhos de WU & BOSE (1993) e BRUUN *et al.* (1988), nos quais a Equação (2.18) assume a forma mostrada abaixo,

$$E^2 = A + B U^n + C U \quad (2.18)$$

onde C é uma outra constante a ser obtida experimentalmente.

Esta modificação da formulação sugerida por KING (1914) é utilizada quando a velocidade do escoamento sobre o sensor do anemômetro de fio quente atinge valores superiores a 90 m/s, proporcionando um melhor ajuste dos pontos de calibração, melhorando assim a precisão dos resultados.

2.2.3 – Calibração “Lei de Kramer”

Outra lei de transferência de calor para cilindros de comprimento infinito é a chamada “Lei de Kramer”, expressa conforme mostra a Equação (2.19),

$$Nu = Pr^{0,20} + 0,57 Pr^{0,33} Re^{0,50} \quad (2.19)$$

De acordo com BRUUN (1995), a “Lei de Kramer” é válida para escoamentos dentro da faixa de $0.1 < Re < 10\,000$, fornecendo resultados compatíveis com a “Lei de King” no entanto, esta relação é recomendada para escoamento de baixa velocidade (< 1 m/s), conforme mostra o trabalho de CHRISTMAN & PODZIMEK (1981), LEKAKIS (1996) e PUPYSHEV *et al.* (2004).

A “Lei de Kramer” leva em consideração algumas características físicas do fluido de trabalho tais como suas propriedades de troca de calor e difusibilidade térmica.

2.3 – Circuitos de controle para HWA

O texto escrito por BRUUN (1995) apresenta mais de 800 artigos relacionados à anemometria de fio quente os quais, segundo o autor, foram selecionados de outras centenas de trabalhos publicados nos últimos 70 anos. Mesmo as referências LOMAS (1986) e PERRY (1982), anteriores a BRUUN (1995), são ricas em referências bibliográficas, sendo ambas muito importantes para o presente trabalho.

O anemômetro de fio quente é o instrumento mais utilizado em sistemas de medição da velocidade de fluidos em muitos laboratórios de pesquisa ou empresas que fazem o uso deste

instrumento, principalmente operando no modo CTA, como pode ser verificado nos trabalhos de WYNGAARD & LUMLEY (1967), GUY (1971), WEIDMAN & BROWAND (1975), COMTE - BELLOT (1976), COMTE - BELLOT (1977), LANSPEARY (1997), LU (1979), SHERLOCK & WYATT (1983), JIANG *et al.* (1992), WATMUFF (1995), LEKAKIS (1996), FREYMUTH (1997), LEE & KAUH (1997), KHOO *et al.* (2003), MORRIS & FOSS (2003), não deixando de mencionar as referências GOLDSTEIN (1983) e novamente BRUUN (1995). Estes autores desenvolveram e aplicaram a anemometria de fio quente no modo CTA em circuitos baseados no modelo proposto por PERRY (1982), conforme é explicado no Capítulo 2.3.3.

A utilização do modelo de PERRY (1982) nas referências citadas acima só foi possível graças aos avanços tecnológicos da eletrônica no início dos anos 70, principalmente com o surgimento do transistor e os circuitos amplificadores operacionais. Antes disso, alguns dos primeiros anemômetros de fio quente, tanto de corrente constante, quanto de temperatura constante, utilizavam de válvulas termiônicas, conforme mostra o trabalho de GUPTA (1927), cujo circuito de anemômetro CCA reproduzido na Figura 2.8, foi construído com o uso de uma válvula triodo e quatro fontes de tensão contínua.

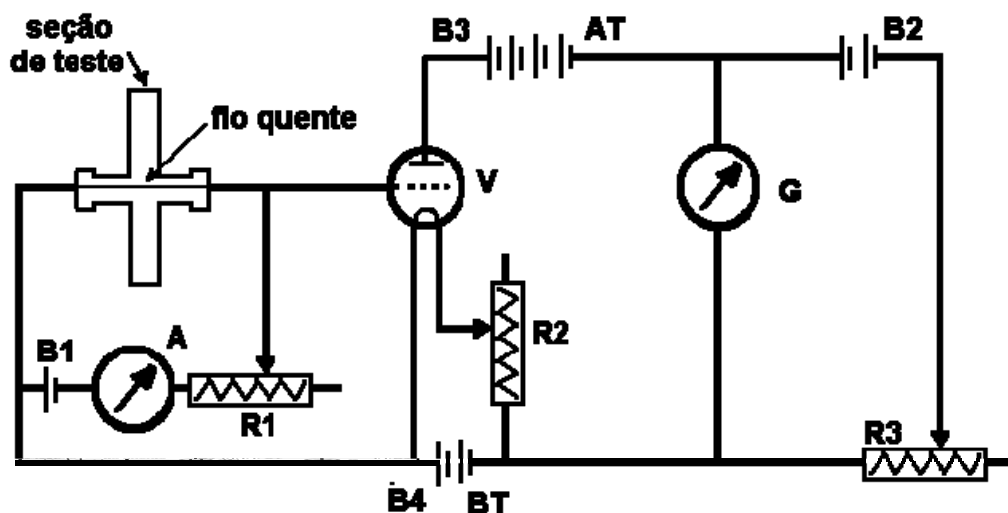


FIGURA 2.8 – Circuito anemômetro de fio quente tipo CCA com válvula termiônica do trabalho de GUPTA (1927).

Antes mesmo da invenção da eletrônica de estado sólido e das válvulas de efeito Edson, anemômetros de fio quente eram construídos utilizando delicados instrumentos de medida da passagem da corrente elétrica, tais como galvanômetros, micro amperímetros ou voltímetros de elevada sensibilidade. Vale ressaltar também que mesmo no início do século, ambos os modos de operação de anemômetros de fio quente (CCA e CTA) eram utilizados. No entanto, o controle

não era automático, quando no modo CTA, necessitando para isso a constante intervenção de um operador para manter a nulidade da tensão de saída da ponte de Wheatstone.

A Figura 2.9, extraída do livro de PRANDTL & TIETJENS (1934), mostra, à esquerda, um circuito básico de um HWA no modo CCA e, à direita, sua versão CTA.

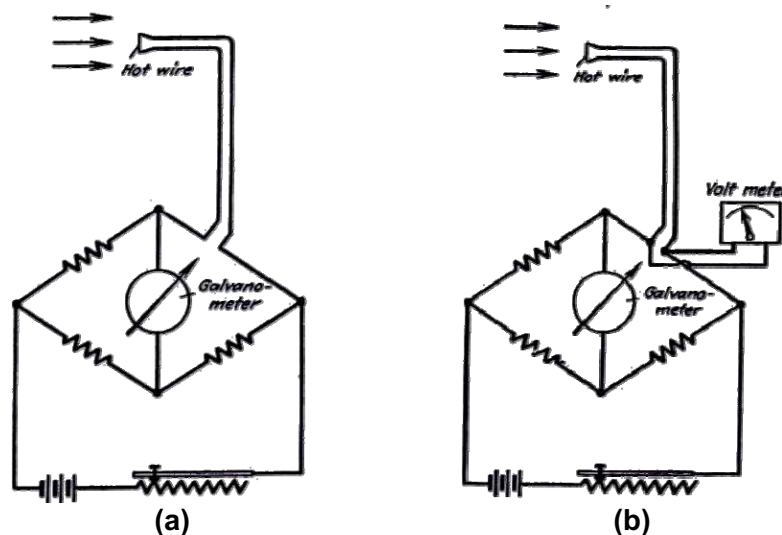


FIGURA 2.9 – Circuitos rudimentares de anemômetro de fio quente tipo CCA em (a) e CTA em (b), extraídos de PRANDTL & TIETJENS (1934).

É importante ressaltar que referências mais antigas tais como PRANDTL & TIETJENS (1934) e SHEPPARD (1941), fazem referência ao modo CCA como anemômetro de tensão constante (CVA – *Constant Voltage Anemometer*) e, ao modo CTA, como anemômetro de resistência constante (CRA – *Constant Resistance Anemometer*). O modo CCA é idêntico ao modo CVA, já que um circuito elétrico que apresente corrente constante possui, em consequência disso, tensão constante. Os modos CTA e CRA também são idênticos, uma vez que para manter a temperatura constante no filamento é necessária uma resistência elétrica constante, decorrentes da lei de Ohm.

2.3.1 – Ponte de Wheatstone

O circuito elétrico mais utilizado em instrumentos de medição é, sem dúvida, a chamada ponte de Wheatstone. De acordo com PALLÁS-ARENY & WEBSTER (1991), este circuito fora, na verdade, desenvolvido por Samuel Hunter Christie em 1833, que assim o denominou em

homenagem aos trabalhos do inglês Charles Wheatstone.

Basicamente, a ponte de Wheatstone é composta por quatro resistências na forma de um quadrilátero, conforme mostra Figura 2.10. Muitos instrumentos eletrônicos utilizam esta configuração de resistências em ponte, para obter um sinal de erro proporcional à diferença entre um sinal variável e outro de referência.

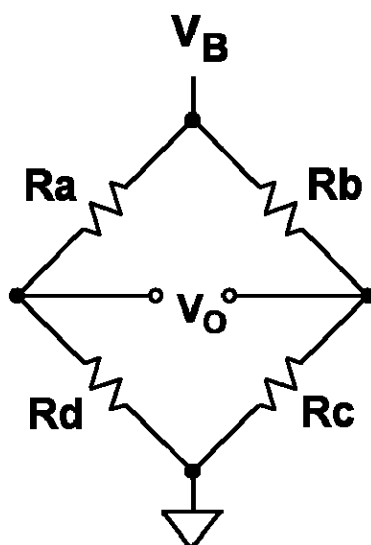


FIGURA 2.10 – Ponte de Wheatstone.

A alimentação do circuito é realizada pelo vértice V_B e seu vértice oposto, restando os outros dois vértices para a leitura da tensão V_o . Se todas as quatro resistências da ponte apresentarem o mesmo valor, a leitura da tensão na ponte é nula para qualquer tensão aplicada, conforme Equação (2.20).

$$\frac{R_a}{R_d} = \frac{R_b}{R_c} \quad (\text{válida somente quando } V_o = 0) \quad (2.20)$$

Desta forma, a ponte de Wheatstone permite medir resistência elétrica indiretamente, através da comparação com o valor das demais resistências que formam a ponte, não importando o valor da tensão de alimentação.

A ponte de Wheatstone permite ainda um controle elevado de sua sensibilidade à variação da resistência em qualquer aresta da ponte. A mínima perturbação da condição de equilíbrio mostrada na Equação (2.20) pode ser sentida por um detector de nulidade (*null detector*), ou mesmo um voltímetro ou amperímetro ligado aos vértices de saída da ponte.

A tensão de alimentação da ponte não participa da sua condição de equilíbrio. Contudo, sua tensão de saída é diretamente proporcional ao valor da tensão V_B . Quando é necessário medir a tensão de saída em função da variação de resistência em uma ou mais resistências da ponte, é necessário que o valor da alimentação seja constante e bem definido. Em termos gerais, a Equação (2.21) mostra a tensão de saída da ponte em função de seus parâmetros de entrada.

$$V_0 = \frac{Ra}{Ra + Rb} V_B - \frac{Rb}{Rb + Rc} V_B \quad (2.21)$$

O caso mais simples para utilização de uma ponte de Wheatstone consiste em medir a variação da resistência de um único elemento da ponte, conforme ilustra a Figura 2.11. Para uma variação ΔR de uma resistência R da ponte, a Equação (2.22) assume a forma mostrada a seguir, assim

$$V_0 = \frac{V_B}{4} \left(\frac{\Delta R}{R + \frac{\Delta R}{2}} \right) \quad (2.22)$$

De acordo com PALLÁS-ARENY & WEBSTER (1991), o erro de linearidade da ponte de Wheatstone, quando um único elemento varia, é da ordem de 0,5 % / % ou seja, ½ % da tensão de saída para cada variação de 1 % da resistência da ponte.

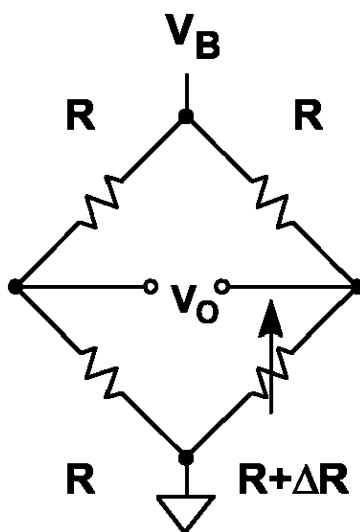


FIGURA 2.11 – Ponte de Wheatstone com variação de resistência de um elemento.

Em algumas aplicações, esta não linearidade pode ser aceitável. Porém, existem vários métodos disponíveis para linearizar a tensão de saída, uma vez que a relação entre a variação da resistência R e sua saída é fixa, conforme mostra a Equação (2.22).

Em circuitos digitais, um algoritmo computacional pode ser programado num microprocessador, de forma a corrigir o erro de linearidade para cada variação de resistência. Por outro lado, em circuitos analógicos, amplificadores operacionais são empregados em configurações específicas, as quais garantem uma tensão de saída bastante linear com a variação da resistência da ponte.

Em anemometria de fio quente, um dos elementos da ponte de Wheatstone é o próprio fio quente. A passagem da corrente elétrica através do filamento gera calor pelo efeito Joule e desta forma, quando um fluido qualquer, com uma temperatura diferente em relação ao elemento aquecido, entra em contato com esta superfície, sua resistência a passagem da corrente elétrica varia, modificando a tensão de saída V_o , conforme Figura 2.12.

Os valores das resistências empregadas na ponte recebem designações especiais e podem possuir valores diferentes, dependendo de como o circuito será controlado.

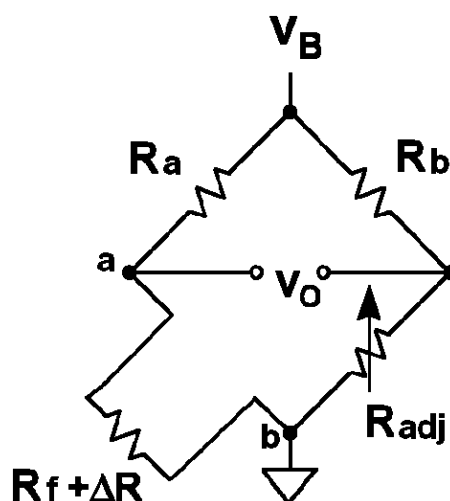


FIGURA 2.12 – Configuração típica dos elementos da ponte de Wheatstone em anemômetros de fio quente.

A relação entre as resistências R_a e R_b é chamada de razão da ponte (*bridge ratio*), sendo definida conforme a Equação (2.23).

$$BR = \frac{R_b}{R_a} \quad (2.23)$$

Outra relação importante é a corrente que atravessa a resistência que representa a sonda, R_f , assim:

$$I_f = \frac{V_B}{R_a + R_f} \quad (2.24)$$

O consumo total do circuito da ponte é obtido determinando-se o valor da de sua resistência equivalente, logo:

$$R_{eq} = \frac{(R_a + R_f)(R_b + R_{adj})}{R_a + R_b + R_f + R_{adj}} \quad (2.25)$$

O consumo, então, é obtido, conforme segue.

$$P_{ponte} = \frac{V_B^2}{R_{eq}} \quad (2.26)$$

A resistência R_{adj} constitui-se de um resistor ajustável, ou seja, o valor de sua resistência elétrica pode ser modificado através ajustes externos. Circuitos experimentais utilizam bancos de resistores chamados de décadas resistivas ou de resistências, as quais permitem definir um valor da resistência através de chaves comutadoras. Nestes equipamentos, os valores ajustáveis são múltiplos ou sub - múltiplos de 10.

Para circuitos de baixa potência, a utilização de simples potenciômetros ou reostatos permite o ajuste de R_{adj} , também designada de ajuste de sobre - aquecimento ou mais comumente chamado de *overheat* .

O valor da resistência de *overheat* permite ajustar a temperatura de operação do fio quente, através da intensidade da corrente que atravessa este ramo da ponte. Aumentado-se o seu valor, maior será a intensidade da corrente no outro ramo da ponte. Diminuindo-se seu valor, maior será a corrente no seu ramo e menor a do ramo oposto. O ajuste geralmente é feito em termos da temperatura desejada para o filamento em relação à temperatura do fluido.

Num anemômetro real, deve-se considerar o valor das resistências do cabo de interligação representada pelo resistor R_{cb} , do suporte do filamento R_{sp} , do conector elétrico R_{cn} e do

filamento R_f , conforme ilustra o esquema da Figura 2.13(a). Assim, o ajuste preciso do sobre aquecimento pode ser feito conforme propõe JØRGENSEN (2002).

$$R_{adj} = BR[(1 + a)R_f + R_{to}] \quad (2.27)$$

Inicialmente, deve-se medir a resistência total da sonda anemométrica R_{to} , (cabo, suporte e conector) na temperatura do ambiente de trabalho, com o auxílio de uma sonda em curto-circuito (*short probe*), conforme ilustra a Figura 2.13(b), assim:

$$R_{to} = (R_{cn} + R_{sp} + R_{cb}) \quad (2.28)$$

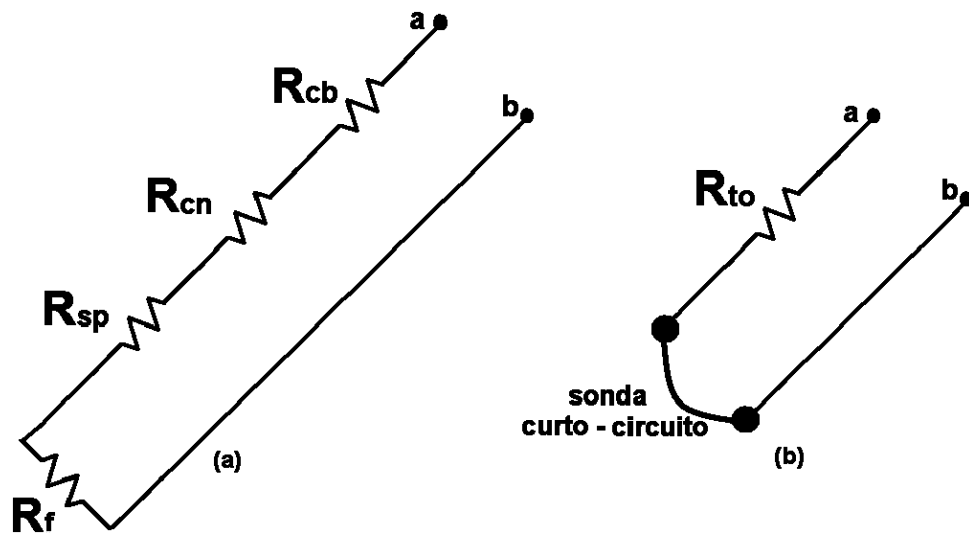


FIGURA 2.13 – Representação da resistência elétrica dos elementos que compõe o sensor do anemômetro. (a) Resistência do filamento, do seu suporte, conector e cabo. (b) Representação simplificada da sonda de fio quente.

Na Equação (2.27), a é a razão de sobre-aquecimento para temperatura do fluido, sendo definido:

$$a = \frac{R_w - R_0}{R_0} \quad (2.29)$$

onde R_w é o valor da resistência do filamento na temperatura de operação desejada e R_0 , o valor da resistência do filamento numa temperatura de referência. O valor de R_0 é igual ao valor de R_f quando ambos estiverem numa mesma temperatura.

De maneira geral, os seguintes coeficientes para temperatura do fluido podem ser

utilizados:

$\alpha = 0.8$ – recomendado para trabalho em ar, temperatura de trabalho da sonda próxima dos 220 °C.

$\alpha = 0.1$ – recomendado para trabalho em água, temperatura de trabalho da sonda próxima de 30 °C.

Estes valores de ajuste de sobre-aquecimento são recomendados no trabalho de JØRGENSEN (2002), baseado no sistema de anemometria de fio quente da empresa *Dantec Dynamics Inc.*. Desta forma, evita-se calcular o valor da resistência do filamento para cada temperatura de sobre-aquecimento desejada na sonda, conforme mostra Equação (2.30).

$$R_w = R_0[1 + \alpha(T_w - T_0) + \alpha_1(T_w - T_0)^2 + \dots] \quad (2.30)$$

onde T_w é a temperatura de trabalho desejada para o filamento e T_0 , a temperatura de referência tanto da sonda, relacionada com R_0 , quanto do material, que deve obedecer os coeficientes α e α_1 , também dependentes do material da sonda de fio quente, conforme mostrados na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Coeficientes de resistividade térmica

MATERIAL	α (1/°C)	α_1 (1/°C)
Platina	$3,5 \times 10^{-3}$	$-5,5 \times 10^{-7}$
Tungstênio	$5,2 \times 10^{-3}$	$7,0 \times 10^{-7}$

FONTE: LOMAS (1986)

O ajuste preciso da temperatura de trabalho do filamento é explorado nos trabalhos de LEKAKIS (1996), SAMWAYS *et al.* (1994), SEED & WOOD (1970) e ANTONIA *et al.* (1981), nos casos quando a medição ocorre em fluídos sensíveis a temperatura, a exemplo do sangue, o qual só pode ser submetido de alguns graus acima da sua temperatura normal, sem que ocorram danos aos seus elementos constituintes.

Em especial, o trabalho de ANTONIA *et al.* (1981) mostra mais detalhes deste ajuste, já que explora o uso do anemômetro de fio quente na medição da temperatura do escoamento e, para isso, baixos valores de sobre-aquecimento são aplicados na sonda, a qual recebe o nome de fio frio (*cold-wire*).

A Equação (2.30) apresenta um fator de segunda ordem, o qual, segundo HINZE (1987), pode ser desprezado, uma vez que $\alpha \gg \alpha_I$, assim.

$$R_w = R_0[1 + \alpha(T_w - T_0)] \quad (2.31)$$

A Equação (2.31) assume a forma linear, sendo válida para a maioria dos casos onde a temperatura de trabalho é inferior a 300 °C.

2.3.2 – Circuito de Corrente Constante

A maneira mais simples de operar um anemômetro de fio quente consiste em ajustar a tensão E_s de alimentação da ponte de Wheatstone e submeter o elemento aquecido, R_f , ao escoamento no qual deseja-se medir a velocidade, conforme esquematiza a Figura 2.14.

O circuito de alimentação deve manter uma tensão constante de saída e, conseqüentemente, uma potência constante durante todo o intervalo de medição, para cada ajuste de balanceamento da tensão de saída V_o da ponte. Esta é a principal característica deste instrumento, conforme mostram PRANDTL & TIETJENS (1934) e HINZE (1987).

Na Figura 2.14, a bateria possui uma tensão fixa E_s com uma resistência R_s em série com a ponte. O valor de R_s deve ser algumas vezes superior á resistência equivalente da ponte, obtida com o uso da Equação (2.6), de forma que pequenas variações na resistência equivalente sejam desprezíveis, quando comparada com a resistência total ($R_{eq} + R_s$) vista pela bateria E_s .

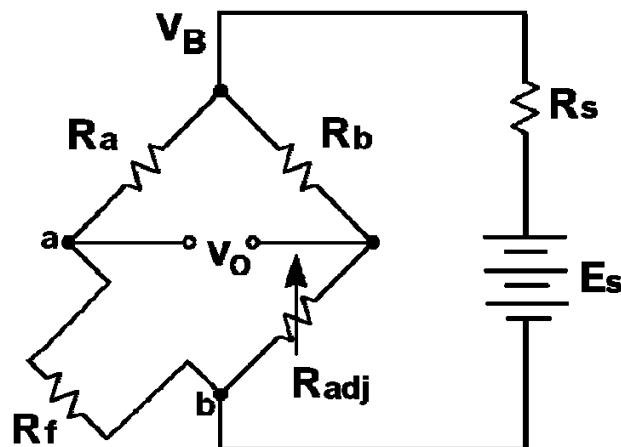


FIGURA 2.14 – Circuito básico de um anemômetro de corrente constante - CCA.

A operação básica de um anemômetro de corrente constante é descrita em PRANDTL & TIETJENS (1934), GOLDSTEIN (1983), PERRY (1982), BRUUN (1995) e LOMAS (1986), sendo basicamente constituída das seguintes etapas:

- colocar a sonda num escoamento,
- ligar a fonte de alimentação ao circuito da ponte,
- ajustar a temperatura de operação da sonda através de R_{adj} ,
- realizar medidas com o instrumento,
- desligar o instrumento,
- retirar a sonda do escoamento.

Os dados da tensão de saída em função do tempo são transformados em variações de velocidade em função do tempo, através do uso de uma curva de calibração, a ser explicada em detalhes no capítulo seguinte.

Uma vez que a corrente na sonda é definida pelo ajuste de *overheat*, ajustado através de R_{adj} , esta deve ser suficientemente elevada para manter o filamento aquecido quando submetido a elevadas velocidades. Um cuidado especial deve ser observado nesta condição, pois uma queda brusca na velocidade do escoamento pode causar a queima do filamento da sonda devido ao excesso desta corrente.

Este fato revela a grande limitação do modo de operação CCA, uma vez que a corrente na sonda deve ser continuamente monitorada, de forma a evitar a queima do sensor. O circuito deve ser posto em funcionamento sempre após o início do escoamento e desligado antes que o escoamento termine.

A resposta em frequência do circuito, ou seja, sua capacidade de sentir pequenas flutuações na velocidade do fluido, é limitada basicamente pela constante de tempo da sonda de fio quente, desconsiderando-se eventuais indutâncias no cabo de interligação. Em geral, anemômetros CCA apresentam uma elevada resposta em frequência, contudo, à medida que estas aumentam, a razão de amplitude do sinal de saída da ponte diminui, de maneira não linear, conforme mostra o gráfico da amplitude do sinal de saída da ponte em função da frequência do escoamento sentido pelo filamento da Figura 2.15(a).

A amplitude dessa variação pode ser corrigida através de uma rede passiva de compensação do tipo RL (resistor – indutor) ou RC (resistor – capacitor), na configuração

passa – altas, a qual atenua baixas frequências e favorece as altas, conforme gráfico da Figura 2.15(b).

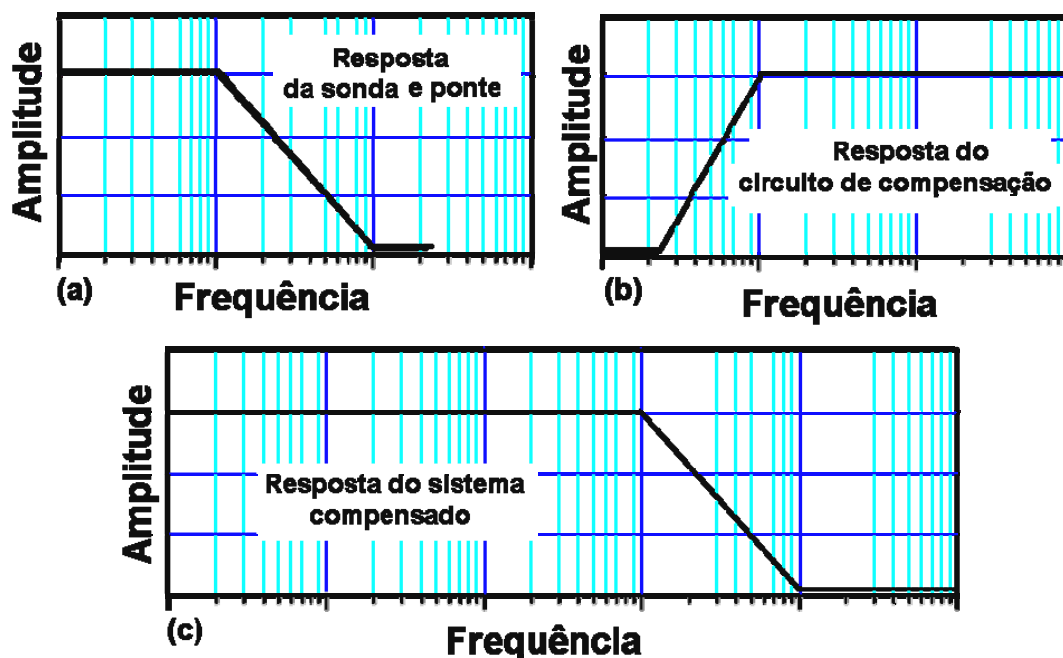


FIGURA 2.15 – Princípio de funcionamento do circuito de compensação em frequência. (a) razão de amplitude no sinal de saída em função da frequência de entrada. (b) resposta desejada para o circuito de compensação. (c) resposta em frequência desejada para o sinal de saída.

Após a passagem do sinal da ponte de Wheatstone pela rede de compensação, a resposta em frequência do sistema é ampliada ao custo de um relativo atraso de fase e atenuação da amplitude do sinal, principalmente quando componentes passivos são utilizados, conforme ilustra o gráfico da Figura 2.15(c). Os trabalhos de GOLDSTEIN (1983) e LOMAS (1986) apresentam sugestões de montagem do circuito de compensação e tabelas de valores dos componentes para algumas frequências de corte mais comuns, em função do diâmetro e material do filamento da sonda.

Para condicionar o sinal de saída da rede de compensação, amplificadores operacionais podem ser utilizados de forma a limitar os níveis mínimos e máximos desejados. Esse ajuste é necessário, por exemplo, quando o sinal de saída do anemômetro CCA alimenta um sistema de aquisição de dados.

Anemômetros CCA são atualmente pouco utilizados na medição da velocidade do escoamento. Suas limitações restringem seu uso em aplicações muito particulares, já que o risco de queima da sonda é proeminente em escoamentos com elevadas variações de velocidade. Por

outro lado, suas características construtivas e de operação são ainda muito estudadas, devido, principalmente, aos conceitos análogos presentes nos circuitos de temperatura constante, uma vez que o modo CTA evoluiu dos primeiros circuitos CCA, conforme evidencia o trabalho de SHEPPARD (1941).

Graças ao surgimento de componentes eletrônicos de baixo ruído, elevada potência e baixa suscetibilidade a variações de temperatura, os circuitos CCA puderam ser substituídos pelo modo CTA, o qual fornece resultados mais precisos e de menor incerteza, numa ampla faixa de escoamentos e condições de operação.

2.3.3 – Circuito de Temperatura Constante

O circuito da Figura 2.14 pode ser facilmente transformado num anemômetro de temperatura constante, caso a tensão de alimentação E_s seja continuamente ajustada, de forma a manter a tensão de saída V_o nula. Este ajuste caracteriza o modo de operação CTA, o qual é capaz de fornecer uma resposta rápida do sinal de saída quando as condições do fluido variam.

Em PERRY (1982), é apresentado um circuito eletrônico básico de um anemômetro de fio quente de temperatura constante, no qual o encadeamento dos componentes é chamado por CITRINITE *et al.* (1994), LOMAS (1986) e por outros autores como “*sketch of Perry’s anemometer*”. Este diagrama é mostrado na Figura 2.16.

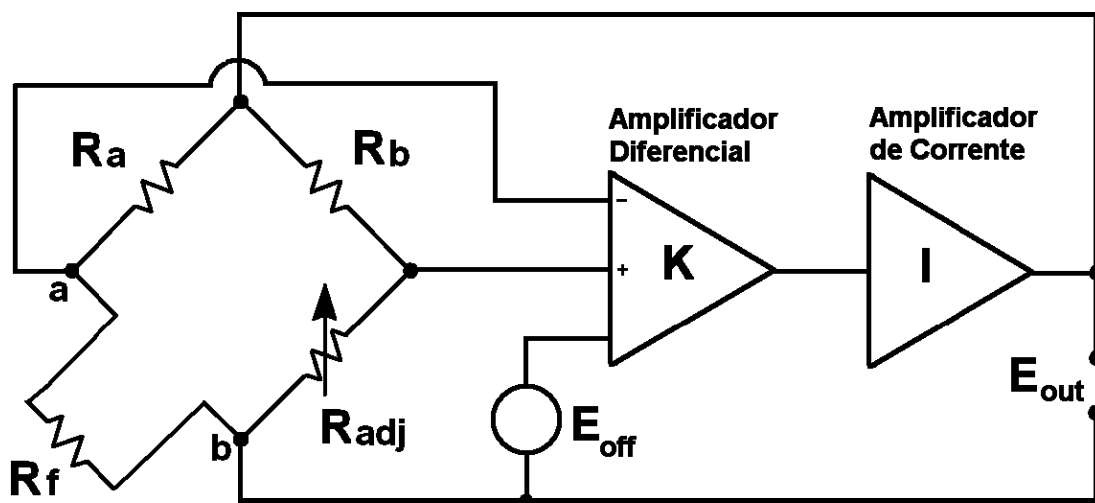


FIGURA 2.16 – Esquema básico de anemômetro de fio quente de temperatura constante.

O circuito constitui um esquema padrão para confecção de anemômetros do tipo CTA, o qual, segundo PERRY (1982), está presente em diversos centros de pesquisas no mundo, a exemplo da *University of Melbourne, Caltec - Graduate Aeronautical Laboratories, Imperial College, etc.*

A variação da tensão na saída da ponte de Wheatstone é amplificada por um amplificador diferencial ou de instrumentação, de ganho K , com a adição de uma tensão de ajuste E_{off} (*offset*), também chamada de tensão de *bias* ou de polarização, normalmente proveniente de outro circuito com amplificador operacional. Este ajuste permite ao circuito iniciar seu funcionamento, possuindo uma função importante para a resposta em frequência do circuito. Feito isso, o sinal de erro é reforçado em corrente de intensidade I , para servir de alimentação da ponte, através de componentes mais robustos como transistores e amplificadores de corrente. Este sinal já pode ser utilizado para a leitura do anemômetro, através do ponto E_{out} , conforme é mostrado na Figura 2.16.

Duas características muito importantes devem ser observadas no amplificador operacional utilizado no condicionamento do sinal de saída da ponte: elevado modo de rejeição de tensão comum (CMRR – *Common Mode Rejection Ratio*) e elevado ganho de malha aberta.

De acordo com LU (1979), a resposta em frequência de um circuito CTA é limitada pelo ganho de malha aberta do amplificador operacional utilizado. Valores típicos para o ganho de malha aberta estão na faixa de 10000 até 100000, na maioria dos componentes disponíveis comercialmente.

O valor do ganho de CMRR está intimamente ligado à relação sinal / ruído (SNR - *Signal to Noise Ratio*) do sinal amplificado. Quanto maior o ganho de CMRR de um amplificador operacional, menor será o ruído devido à amplificação, no seu terminal de saída. O valor de CMRR mede a capacidade do amplificador operacional de amplificar somente a diferença de tensão presente nos dois terminais de entrada, já que o valor da tensão comum não deve interferir no valor final do sinal de saída.

De acordo com WATMUFF (1995), a utilização de amplificadores operacionais de alta performance no primeiro estágio de amplificação é muito importante para garantir a boa concordância entre os modelos matemáticos de análise dinâmica do circuito, com seu comportamento experimental.

Ao contrário do modo CCA, um circuito CTA não necessita de procedimentos especiais

para iniciar o experimento. Mesmo se o sensor do anemômetro não estiver sob qualquer escoamento, o circuito CTA não permite a queima do filamento por excesso de corrente, uma vez que sua temperatura é constantemente ajustada às condições do escoamento.

Em escoamentos nos quais a temperatura do fluido varia, o modo CCA introduz erros nos dados de saída, pois não utiliza compensação, sendo sua calibração realizada para uma única temperatura de trabalho. Isto não acontece no modo CTA já que seu circuito de controle pode compensar eventuais variações na temperatura do fluido desde que seja devidamente projetado e calibrado para tal finalidade.

A resposta em frequência do circuito CTA pode ser também ajustada, tanto através da tensão de ajuste E_{off} , quanto através do ajuste de *overheat* no resistor R_{adj} da ponte. De acordo com WATMUFF (1995), é preferível que o ajuste em frequência ocorra sempre através de E_{off} .

Ao contrário de anemômetros CCA, a determinação da faixa de frequência ou da máxima frequência de operação requer uma modelagem mais sofisticada para os componentes mostrados na Figura 2.16, conforme explica LOMAS (1986). Tanto a constante de tempo do filamento, quando a constante de tempo do circuito amplificador influenciam a resposta em frequência geral do conjunto sonda e circuito CTA.

A elevada precisão dos sistemas de anemometria de fio quente deve-se, principalmente, à forte teoria embutida nos circuitos de controle do anemômetro. Um estudo detalhado do comportamento dinâmico do anemômetro no modo CTA é apresentado nos trabalhos de WYNGAARD & LUMLEY (1967), LU (1979), WATMUFF (1995), WEIDMAN & BROWAND (1975) e SHERLOCK & WYATT (1983). Todos estes autores basearam seus estudos no circuito eletrônico mostrado na Figura 2.16, apresentando uma modelagem matemática baseada na teoria de controle de malha fechada para funções de transferência de segunda ordem. Tal teoria tem como objetivo determinar as faixas de valores ótimas para os componentes do circuito, de forma a estabilizar seu funcionamento, quando submetido a diferentes frequências de excitação, inseridas através do sensor de fio quente.

A modelagem do circuito da Figura 2.16 num sistema de segunda ordem facilita de sobremaneira o estudo da estabilidade do anemômetro CTA submetido aos mais diferentes tipos de escoamentos. Contudo, as simplificações impostas na teoria nem sempre correspondem aos resultados obtidos na prática, principalmente devido à elevada não linearidade do comportamento térmico do filamento e, também, devido à utilização de modelos ideais para os componentes da ponte de Wheatstone e seu circuito amplificador.

Uma tentativa de melhor prever o funcionamento do circuito CTA consiste na utilização de modelos matemáticos mais apurados ou de ordem mais elevada para o circuito eletrônico proposto. Para isso, FREYMUTH (1997) propõe o uso da teoria de controle para circuitos de malha fechada de terceira ordem no estudo da estabilidade e resposta em frequência do circuito CTA mostrado na Figura 2.16. Contudo, seus resultados são pouco práticos e suas considerações também limitam as escolhas dos componentes do circuito, pois muitos são tratados como ideais.

Autores como LOMAS (1986) e BRUUN (1995) apresentam uma modelagem para o circuito CTA, semelhante à proposta por SHERLOCK & WYATT (1983), a qual considera tanto o circuito da ponte de Wheatstone, quanto o circuito do amplificador diferencial, como sistemas de primeira ordem. Desta forma, o sistema global do anemômetro CTA apresenta um comportamento de segunda ordem, permitindo assim sua análise pela teoria clássica de controle linear de localização dos pólos dessa função de transferência, conforme ilustra a Figura 2.17.

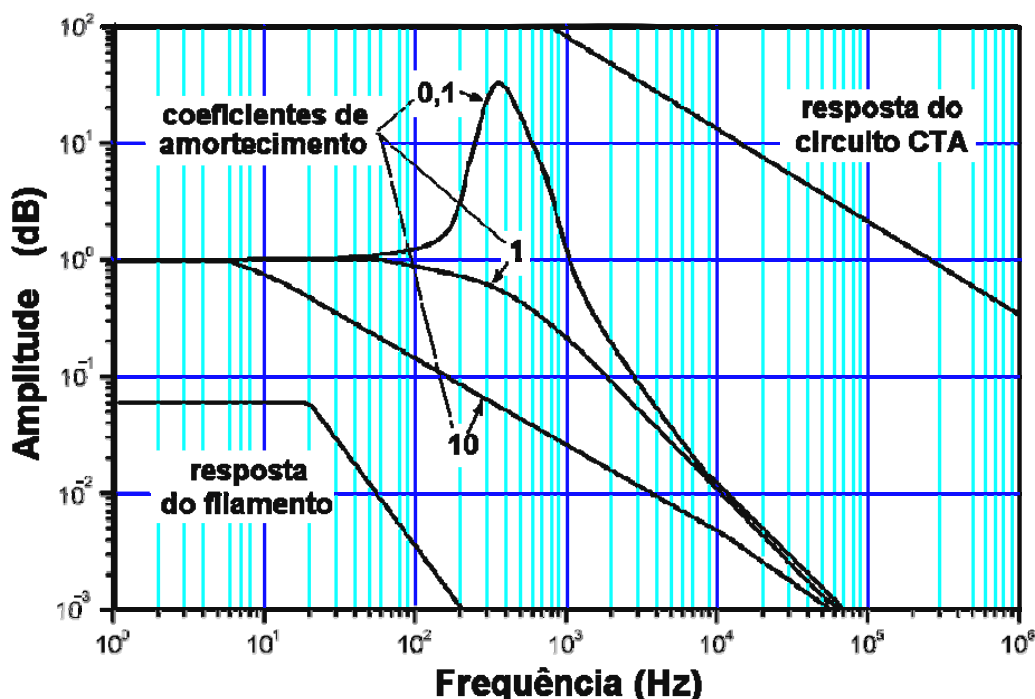


FIGURA 2.17 – Relação da amplitude do sinal de saída em função de uma excitação degrau unitário de entrada para modelagem dinâmica de um circuito CTA em um sistema de segunda ordem.

O mapeamento dos pólos de uma função de transferência de segunda ordem baseada no circuito eletrônico da Figura 2.16 é realizado no trabalho de WATMUFF (1995). No entanto, seus resultados são baseados em teste com gerador de sinais, de forma a simular sinais de entrada no

circuito CTA. Uma análise muito parecida é realizada por WEIDMAN & BROWAND (1975), porém com resultados mais práticos, onde foi realizada uma comparação com um circuito CTA experimental, baseado no esquema de PERRY (1982).

Os modelos de sistemas de segunda e de terceira ordem tem como finalidade prever o comportamento dinâmico e teórico no domínio da frequência do circuito CTA, principalmente quando o sistema físico é estimulado por uma entrada degrau unitário, ou seja, simulando o evento no qual o sensor de fio quente sofrer uma brusca variação de sua temperatura devido a mudança da velocidade do fluido.

Desta forma, a modelagem do circuito CTA em sistemas de segunda ordem apresenta três características, as quais devem ser exploradas, sendo:

- Frequência máxima de operação do circuito e sonda, representados pela frequência de corte;
- Tempo de estabilização do sinal de saída;
- Oscilação do sinal, relacionada com o tipo de amortecimento escolhido;

Estas características são baseadas no modelo geral da função de transferência para sistemas de segunda ordem para entrada degrau unitário, apresentada na Equação (2.32), conforme explica WEIDMAN & BROWAND (1975).

$$\frac{y}{u} = \frac{K_s \omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad (2.32)$$

onde y é a amplitude de do sinal de saída, u é a excitação degrau unitário, K_s é uma constante que depende das características físicas do anemômetro, ω_n é a frequência natural do circuito eletrônico de controle, ξ é o coeficiente de amortecimento e s a variável de Laplace.

Com relação ao tipo de amortecimento, o sinal de saída de sistemas de segunda ordem apresenta uma dependência com o coeficiente do amortecimento, sendo:

- Sub-amortecido (*under damping*), quando $0 < \xi < 1$;
- Amortecido crítico (*critical damping*), quando $\xi = 1$;
- Super-amortecido (*over damping*), quando $\xi > 1$.

O sinal de saída será instável se $\xi = 0$, situação esta pouco desejada para ampla maioria dos circuitos de controle. A Figura 2.18 mostra a forma do sinal de saída de um sistema de segunda ordem para seis valores possíveis do coeficiente de amortecimento.

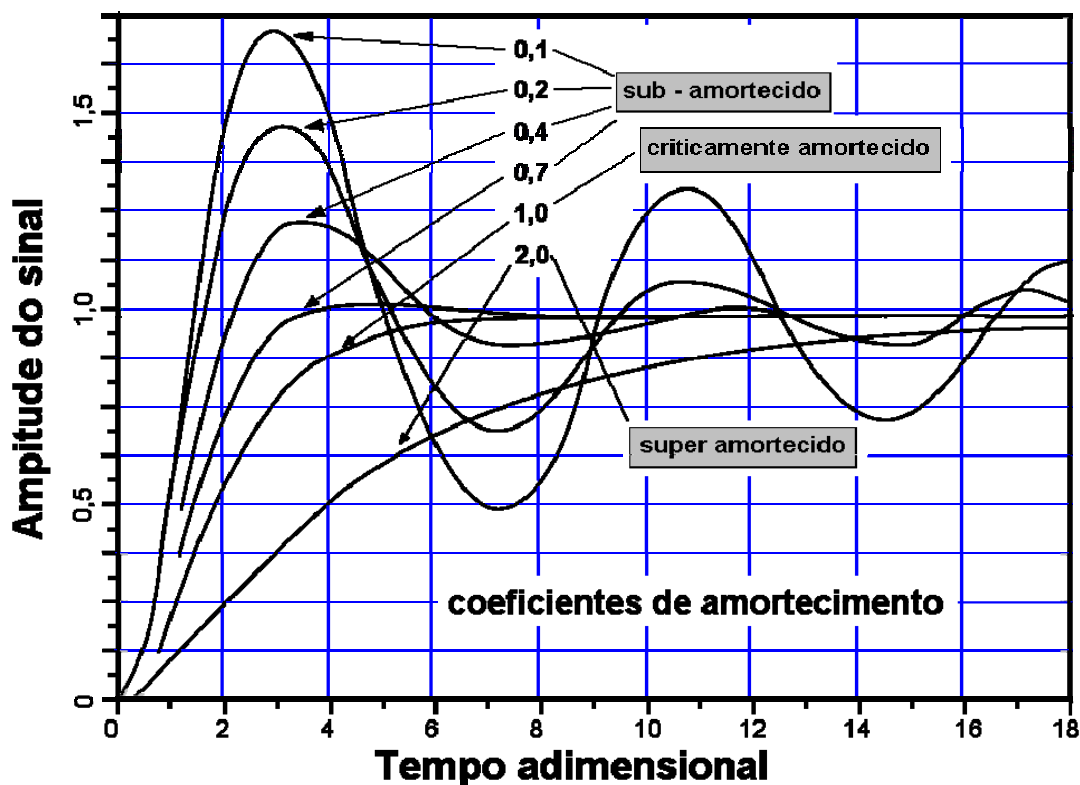


FIGURA 2.18 – Exemplos do tipo do sinal de saída em função do coeficiente de amortecimento em sistemas de segunda ordem.

A maioria dos anemômetros de fio quente do tipo CTA disponíveis comercialmente, apresentam um sinal de saída tipicamente superamortecido. No entanto, conforme BRUUN (1985), a característica ideal seria um circuito com amortecimento crítico ($\xi = 1$) porém, nem sempre isso pode ser obtido na prática.

Os trabalhos de WYNGAARD & LUMLEY (1967), WEIDMAN & BROWAND (1975) e WATMUFF (1995), apontam para sinais de saída com características de subamortecimento, os quais devem ser otimizados para minimizar o tempo de estabelecimento, sobre e sub-sinais, conforme ilustra a Figura 2.19.

A primeira elevação na amplitude de saída é chamada de sobre - sinal (*overshoot*). A sua posterior queda recebe o nome de sub - sinal (*undershoot*). Quando as oscilações diminuem para uma faixa definida, obtém-se o chamado tempo de estabelecimento do sinal - t_s , tipicamente

quando as variações do sinal são inferiores a 2%. Alguns autores a exemplo de LANCASTER (1975) referem-se ao tempo de estabelecimento como tempo de estabilização, não havendo quaisquer diferenças técnicas sobre estas definições.

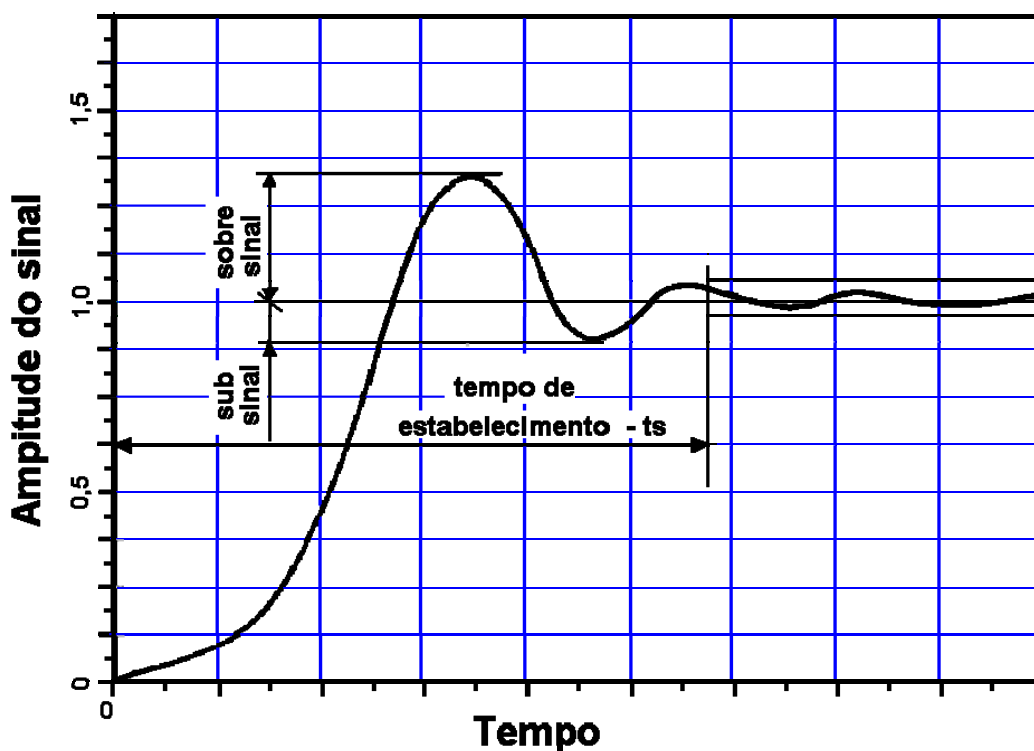


FIGURA 2.19 – Características típicas de sinais de saída tipo sub-amortecidos em sistemas de segunda ordem.

Para o caso de anemômetros de fio quente, o sinal de entrada é representado pela velocidade do fluido em contato com o filamento da sonda e a frequência de corte determina a máxima variação do sinal de entrada na qual o circuito apresente um sinal de saída estável e coerente. Desta forma, a frequência de corte do circuito CTA determina a máxima frequência de variação na flutuação do escoamento a qual o anemômetro pode detectar.

Por exemplo, no estudo de alguns tipos de escoamentos turbulentos, é importante determinar quantas e quais as frequências de emissão ou geração de vórtices associados a uma geometria ou região no espaço no interior do fluido. Um anemômetro de fio quente ajustado para uma frequência máxima de 20 kHz é capaz, portanto, de sentir variações na velocidade do escoamento dentro de um período mínimo de $1/20\,000$ ou seja, 5×10^{-5} s (50 μ s).

O gráfico superior da Figura 2.20 ilustra o caso teórico no qual a sonda de fio quente é exposta a uma variação brusca da velocidade do fluido no instante de tempo t_0 . Um circuito

idealizado de um anemômetro CTA deveria responder instantaneamente à esta variação porém, circuitos práticos apresentam um pequeno atraso e alguma oscilação do sinal de saída, conforme ilustra o gráfico inferior da Figura 2.20.

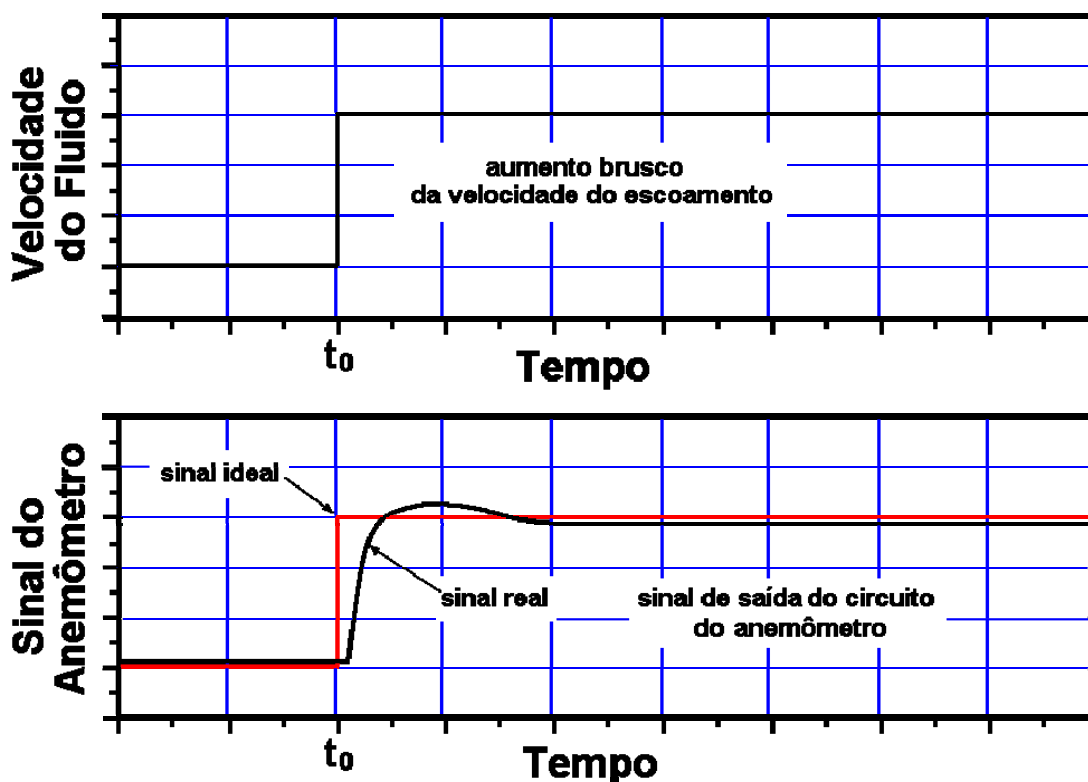


FIGURA 2.20 – Sinais típicos de entrada, gráfico superior, e saída (gráfico inferior) de um anemômetro de fio quente.

O processo de calibração em frequência deve avaliar e medir estas características, as quais influenciam os resultados da medida da velocidade do escoamento com o anemômetro. Este processo é explorado nos trabalhos de LU (1978), WATMUFF (1995) e WEIDMAN & BROWAND (1975).

O ajuste do amortecimento e tempo de estabilização do sinal de saída pode também ser realizado através do teste com o gerador de sinais, sendo este teste suficiente para a calibração dinâmica do anemômetro, de acordo com LU (1978). Este efeito é muito parecido com o fenômeno físico real de aquecimento e resfriamento da sonda de fio quente devido à passagem do fluido, fornecendo, desta forma, dados muito realísticos do comportamento em frequência do anemômetro.

2.4 – Calibração estática de anemômetros de fio quente

O objetivo principal da calibração estática de anemômetros de fio quente, conforme já mencionado, consiste em obter a respectiva curva de calibração estática para cada sonda utilizada em conjunto com o circuito do anemômetro.

O levantamento da curva de calibração é feito após a coleta de valores pontuais da tensão de saída do anemômetro em função de um valor conhecido da velocidade do escoamento, incidente sobre a sonda de fio quente. Feito isso, uma equação de correlação é escolhida de forma a ajustar, com a melhor correlação possível, os valores experimentais obtidos.

A histerese da calibração também deve ser avaliada, principalmente se a técnica de calibração escolhida utiliza manômetros de tubo. A inércia e a tensão superficial de muitos fluidos manométricos, utilizados nesta classe de instrumentos, podem gerar resultados com relativo atraso de leitura, transformando o procedimento de leitura da pressão numa fonte de erros considerável.

De forma a quantificar a histerese, a calibração deve avaliar tanto os acréscimos de velocidades, quanto os seus respectivos decréscimos, dentro da faixa de valores requerida para o experimento, conforme ilustra a Figura 2.21.

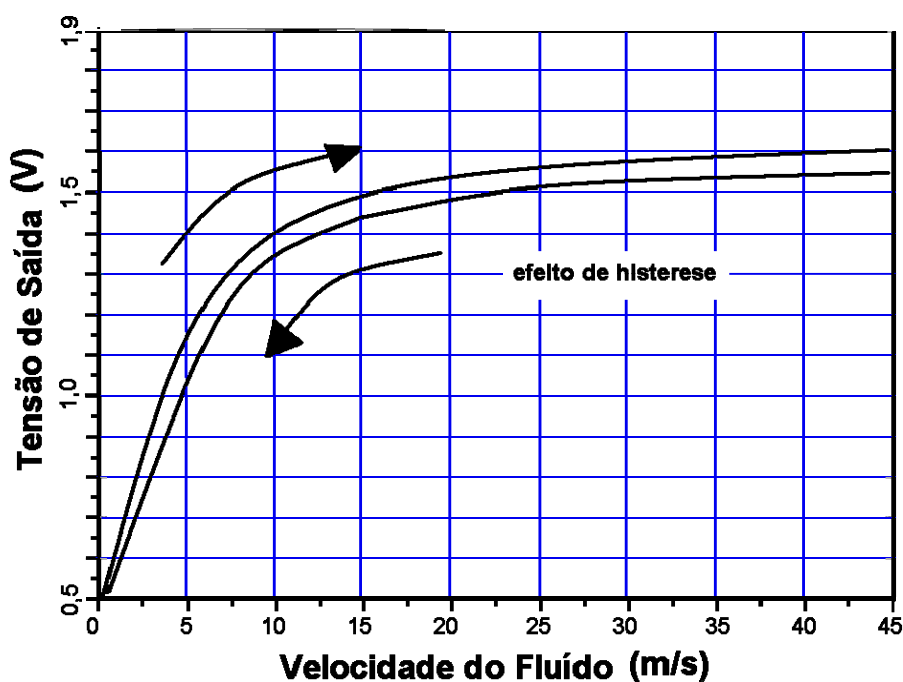


FIGURA 2.21 – Efeito de histerese presente na calibração estática de anemômetros.

Os dados de saída são normalmente apresentados em gráficos velocidade \times tensão de saída do anemômetro, onde uma curva de tendência e sua respectiva equação devem ser extraídas. Em geral, os pontos obtidos seguem o aspecto do gráfico mostrado na Figura 2.7. Esta curva é característica da grande maioria dos anemômetros de fio quente, conforme já relatado.

Existem diversos métodos para a realização da calibração estática. Neste trabalho, são apresentados cinco procedimentos, com ênfase no método da calibração por jato livre, por se tratar da técnica mais utilizada para esta finalidade.

2.4.1 – Calibração por jato livre

Dentre os métodos para calibração estática de sondas de fio quente, o mais utilizado é a chamada calibração em velocidade por jato livre, esquematicamente mostrado na Figura 2.22. Neste caso, o valor da diferença de pressão medida com o uso de um manômetro tipo diferencial é convertido para velocidade do jato na saída de um orifício calibrado.

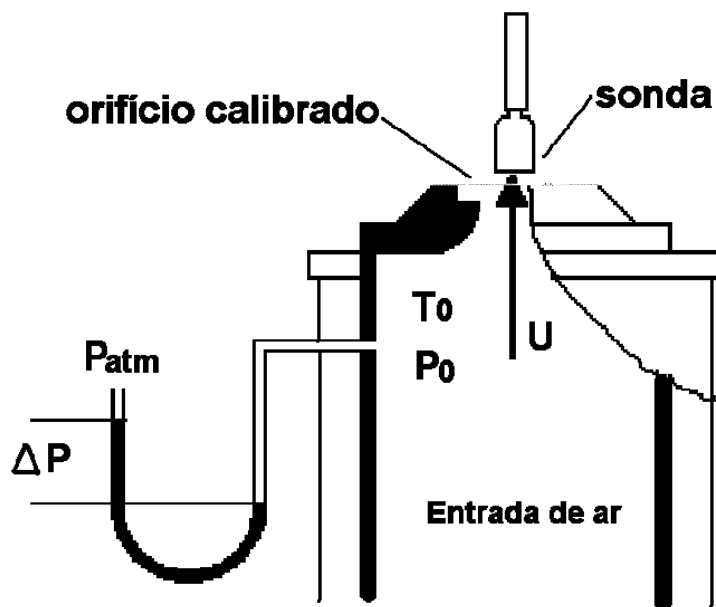


FIGURA 2.22 – Calibração estática de velocidade para HWA por jato livre.

Um manômetro recomendado para este procedimento é o chamado Betz, uma vez que possui uma incerteza da ordem de 0,02 mm de H₂O. Quando operado em velocidades inferiores a 4 m/s, seus resultados apresentam incerteza de até 1 %. Velocidades na faixa de 13 m/s, a incerteza no resultado cai para 0,1 %, conforme mostra o trabalho de BRUUN *et al.* (1988).

O método do jato livre permite a calibração estática de sondas, em regime permanente, (*steady-state*), sob velocidades moderadas (de 2 até 90 m/s), com boa precisão e poucas limitações, de acordo com BRUUN *et al.* (1988).

A razão entre uma dada velocidade U_0 e a velocidade local do som U_{som} é chamada de número de *Mach* (Ma), estabelecendo-se assim um parâmetro adimensional que caracteriza o escoamento, conforme já mostrado na Equação (2.13).

A velocidade do som localmente pode ser obtida fazendo-se,

$$U_{som} = \sqrt{k R T_{ar}} \quad (2.33)$$

onde R é a constante universal dos gases ideais, T_{ar} a temperatura absoluta do ar e k , é a razão entre o calor específico do ar para temperatura constante c_p e volume constante c_v , sendo,

$$k = \frac{c_p}{c_v} \quad (2.34)$$

De acordo com FOX & MCDONALD (2001), a velocidade do som no ar foi medida por diversos pesquisadores e todos os resultados convergiram para o valor obtido com o uso da Equação (2.33). Para $Ma < 0,3$, o escoamento pode ser tratado como um fluido incompressível, permitindo assim que o ar atmosférico apresente um comportamento muito parecido como de um gás ideal. De acordo com BRUUN *et al.* (1988) e SEYED & VEERAVALLI (1996), esta característica é atendida para velocidades do escoamento inferiores a 100 m/s.

Uma equação que relaciona pressão e velocidade em vários tipos de escoamentos incompressíveis é mostrada abaixo.

$$\frac{dP}{\rho_s} + U_0 dU_0 + g dy_0 = 0 \quad (2.35)$$

Integrando a equação acima, mantendo a aceleração da gravidade constante, obtém-se uma relação muito importante entre a pressão e a velocidade do fluido, conhecida como Equação de Bernoulli.

$$P + \frac{1}{2} \rho_s U_0^2 + \rho_s g y_0 = cte \quad (2.36)$$

onde P é a pressão manométrica na altura de referência y .

Na Figura 2.22, o jato livre apresenta uma simetria axial e está descarregando num meio infinito quiescente, ou seja, na atmosfera. A velocidade do escoamento na saída do orifício pode ser facilmente obtida re-agrupando dois lados da Equação (2.36), obtendo assim.

$$U_0 = \sqrt{\frac{2}{\rho_s} (P_{atm} - P_0)} \quad (2.37)$$

No esquema da Figura 2.22, o manômetro está medindo justamente a diferença entre a pressão atmosférica e a pressão estática dentro da câmara. Assim, a Equação (2.37) fica:

$$U_0 = \sqrt{\frac{2 \Delta P}{\rho_s}} \quad (2.38)$$

Desta forma, anemômetro e sonda são calibrados, variando-se a pressão de entrada, geralmente proveniente de uma fonte de ar comprimido, e medindo a diferença de pressão, juntamente com sua respectiva tensão de saída do anemômetro. Este procedimento deve ser repetido dentro da faixa de velocidades admitidas ou desejadas para o instrumento.

A sonda deve ser posicionada na linha de simetria axial do jato, imediatamente após o orifício, numa região cônica na saída, chamada de núcleo potencial (*potential core*), conforme mostra a Figura 2.23.

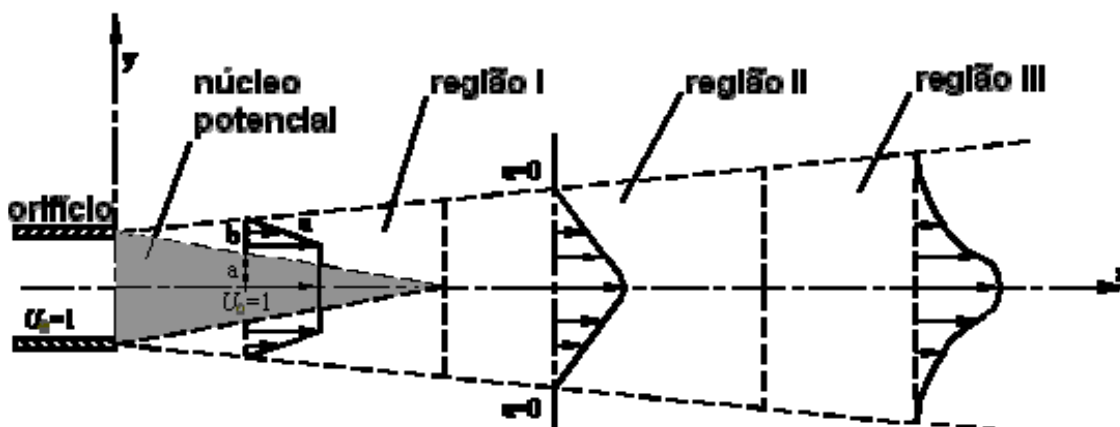


FIGURA 2.23 – Região internas de um jato livre e seus perfis de velocidade característicos. PAI (1954).

A região I é chamada de região de mistura e é caracterizada pelo aumento linear da

velocidade média do jato. A região II é chamada de mistura e transição, apresentando uma distribuição linear da velocidade média do jato. Por último, a região III é chamada por PAI (1954), de solução de Tollmien, com um perfil de velocidade média parabólico, conforme mostra a Figura 2.23.

De acordo com PAI (1954), a velocidade do fluido dentro do núcleo potencial é a mesma da saída do orifício e pode ser obtida com o uso da Equação (2.38), para escoamentos incompressíveis, conforme a montagem experimental da Figura 2.22. As incertezas deste procedimento foram analisadas em BRUUN *et al.* (1988), no qual observa que a maior fonte de erros está na leitura da pressão pelo manômetro e posterior conversão para velocidade.

Empresas que trabalham com equipamentos para anemometria de fio quente, a exemplo da *Dantec Dynamics* e *TSI Incorporated*, disponibilizam dispositivos de calibração baseados no princípio ilustrado na Figura 2.22, os quais simplificam de sobre maneira a calibração de sondas de fio quente e a obtenção das constantes de calibração. A Figura 2.24 mostra dois modelos de calibradores de sonda de fio e filme quente por jato livre comercializados por destas empresas.

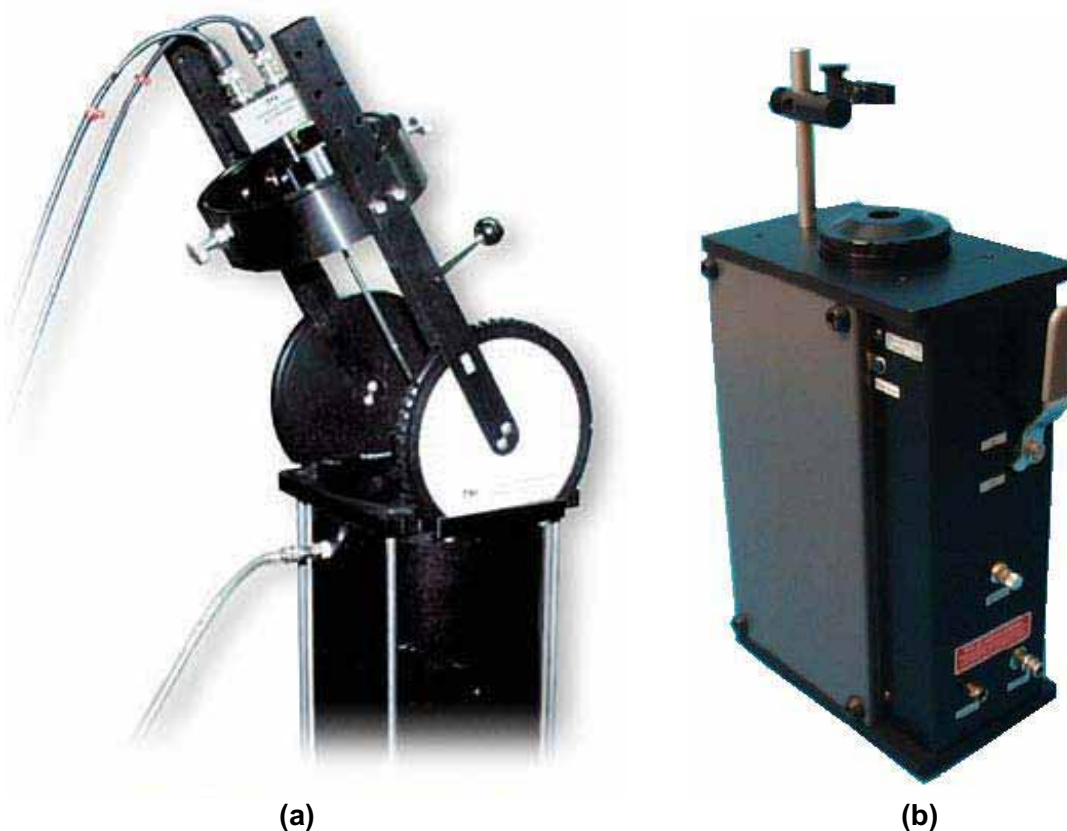


FIGURA 2.24 – Calibradores de velocidade para sondas de fio e filme quente por jato livre. (a) TSI modelo 1129 e (b) Dantec modelo 54H10.

Jatos livres são freqüentemente utilizados para calibração de sondas de filme quente em meio líquido, os quais são altamente incompressíveis, sendo esta técnica explorada no trabalho de EGUTI *et al.* (2002). Neste trabalho, um procedimento de calibração de anemômetros de fio quente é apresentado, baseado na medida da velocidade de saída de um jato livre de água.

O método de calibração em velocidade através de jato livre apresenta uma limitação para calibração de sondas em baixas velocidades, conforme explica BRUUN *et al.* (1988). Baixas velocidades, inferiores a 2 m/s, acarretam em baixas pressões na câmara de estagnação, conforme Figura 2.22. Nestas condições, mesmo utilizando manômetros de elevada sensibilidade, os resultados apresentam uma elevada incerteza já que a Equação (2.38) não é indicada para pequenas variações de pressão.

2.4.2 – Calibração por deslocamento de líquidos

Para a calibração de sondas de fio quente em velocidades baixas, os trabalhos de PUPYSHEV *et al.* (2004) e CHRISTMAN & PODZIMEK (1981), apresentam a construção de um dispositivo mais sofisticado, baseado no escoamento contínuo de água de um reservatório selado. Este dispositivo é capaz de reduzir significativamente as incertezas na calibração de sondas de ar, numa faixa de velocidades de 0,01 até 5 m/s, sendo reproduzido na Figura 2.25.

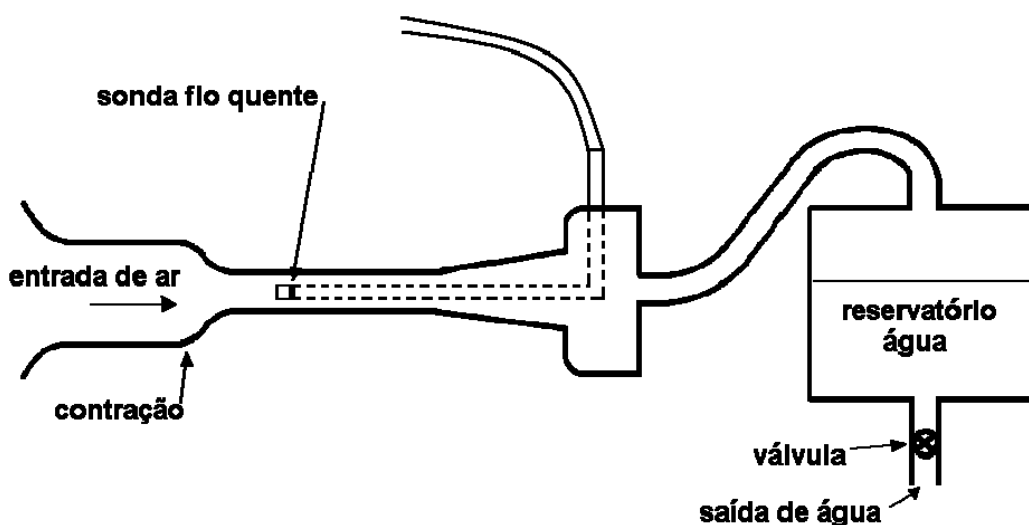


FIGURA 2.25 – Calibrador de sondas de fio quente para baixas velocidades de CHRISTMAN & PODZIMEK (1981).

O princípio de funcionamento do dispositivo de PUPYSHEV *et al.* (2004) é similar ao

utilizado por CHRISTMAN & PODZIMEK (1981), no qual a velocidade do ar na entrada do dispositivo é igual ao volume de ar deslocado no interior do reservatório de água, medido através do volume de água deslocado para fora do dispositivo. Uma válvula de controle de fluxo permite o ajuste da velocidade do escoamento dentro da faixa de interesse.

O dispositivo de PUPYSHEV *et al.* (2004) é homologado pelo OKBA – (*Barnaul Experimental Design Bureau*), sendo capaz de calibrar sondas de fio quente no ar atmosférico numa faixa de velocidades de 0,026 até 4,65 m/s com incerteza de $\pm 0,65\%$.

2.4.3 – Calibração por esteira de vórtices

Uma outra maneira de efetuar a calibração estática de sondas de fio quente em baixas velocidades é apresentada em LEE & BUDWIG (1991) e aplicado no trabalho de LANSPEARY (1997). Seu dispositivo utiliza uma seção de teste de um túnel de vento de baixa turbulência e dois sensores unidimensionais de fio quente, sendo que somente um deles será calibrado.

Este processo é chamado de calibração por esteira de vórtice (*vortex-shedding calibration*), pois utiliza a frequência de emissão de vórtices devido à passagem do escoamento ao redor de um cilindro, conforme esquema da Figura 2.26.

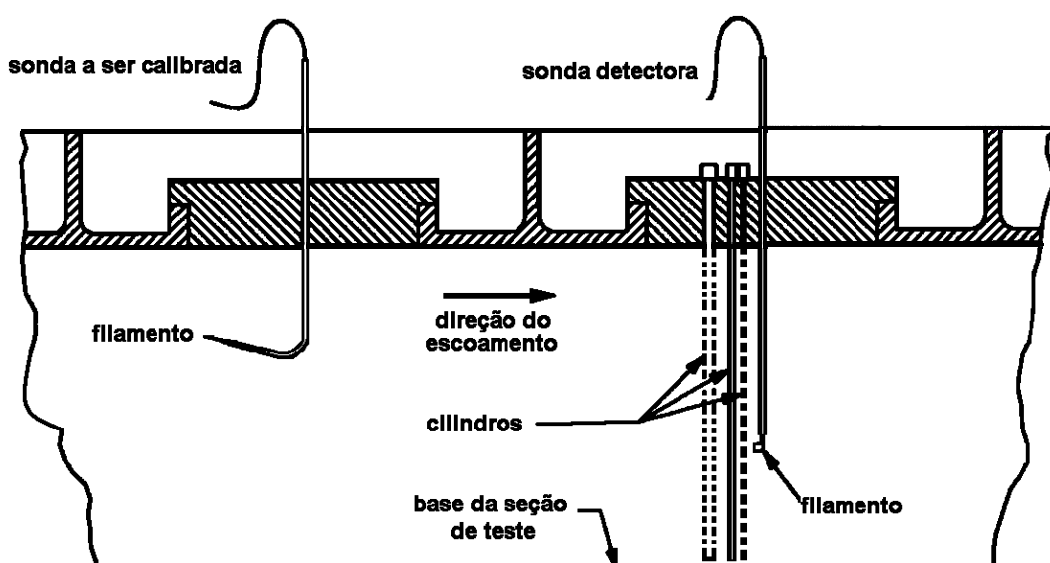


FIGURA 2.26 – Metodologia de calibração de sonda de fio quente para baixas velocidades de LANSPEARY (1997).

A sonda à jusante do escoamento é posicionada paralela ao cilindro, numa distância de quatro diâmetros do cilindro, funcionando como detector dos vórtices, não precisando estar calibrada. A sonda à montante é a sonda que será calibrada, baseada na equação abaixo,

$$St = 0,212 \left(1 - \frac{21,2}{Re} \right) \quad (2.39)$$

onde St é o número de Strouhal, definido conforme Equação (2.40), na qual f_s é a frequência de emissão dos vórtices sentidos pela sonda detectora, d_c o diâmetro do cilindro e U_0 , a velocidade do escoamento. Para o cálculo do número de Reynolds, o diâmetro do cilindro é utilizado como dimensão característica.

$$St = \frac{f_s d_c}{U_0} \quad (2.40)$$

A frequência dos vórtices é determinada através da análise espectral dos dados temporais registrados na sonda detectora, usualmente obtido através do uso da transformada rápida de Fourier – FFT.

Os dados da tensão de saída de ambos os anemômetros utilizados devem ser armazenados simultaneamente para várias tomadas de velocidade, com a permutação da posição dos cilindros, conforme explica LANSPEARY (1997). A Equação (2.39) é válida para uma faixa de velocidade definida para $50 < Re < 150$, para cilindros de seção constante, de acordo com LEE & BUDWIG (1991).

2.4.4 – Calibração com pêndulo

Os trabalhos de GUELLOUZ & TAVOULARIS (1995) e BRUUN *et al.* (1989), apresentam uma outra metodologia de calibração estática de sondas de fio quente, baseadas no movimento oscilatório de pêndulos.

Este método permite a obtenção da curva de calibração estática do anemômetro e sua respectiva sonda. Contudo, é considerado um método dito dinâmico, pois a variação da velocidade no sensor é obtida através do movimento do sensor de fio quente, fixado num pêndulo.

A sonda a ser calibrada é posicionada a uma distância r do eixo de rotação, sendo a velocidade linear U_l , obtida através da velocidade angular ω do pêndulo, conforme Equações (2.41) e (2.42).

$$U_l = \omega r \quad (2.41)$$

$$\omega = \frac{d\theta}{dt} \quad (2.42)$$

Como o pêndulo é dimensionado para não completar uma volta em torno do seu eixo de rotação, a velocidade angular ω fica limitada ao valor do ângulo inicial e final de oscilação.

O sistema de GUELLOUZ & TAVOULARIS (1995) é mostrado na Figura 2.17, no qual realizaram a calibração de sondas de fio quente unidimensionais para velocidades de 0,45 até 4,8 m/s, obtendo incertezas inferiores a 5%.

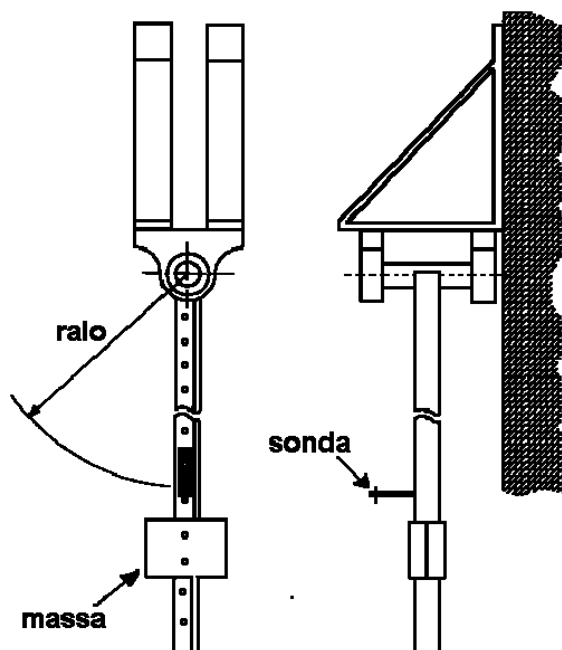


FIGURA 2.27 – Método do braço oscilante para calibração estática de sonda de fio quente. GUELLOUZ & TAVOULARIS (1995).

De forma a reduzir os erros do valor da velocidade do pêndulo durante os instantes iniciais e finais de oscilação, GUELLOUZ & TAVOULARIS (1995) um método iterativo para obter as constantes A , B e n durante $\frac{1}{4}$ do período de oscilação do pêndulo. Estas constantes são provenientes da calibração com a “Lei de King”, mostrada na Equação (2.17):

$$B = \left(\frac{\int_0^{\frac{T}{4}} \left(\frac{E^2 - A}{r} \right)^{1/n} dt}{\theta_{T/4} - \theta_0} \right)^n \quad (2.43)$$

onde T é o período de oscilação e $\theta_{T/4}$ e θ_0 , são os ângulos de máxima velocidade e de lançamento do pêndulo.

Interessante notar que o dispositivo de GUELLOUZ & TAVOULARIS (1995) foi baseado numa máquina de ensaio de impacto tipo Charpy, destinada a avaliar a tenacidade e fragilidade de diferentes materiais, através da energia absorvida no impacto de um martelo contra corpos de prova construídos com o material sob teste. Tanto as dimensões físicas do martelo, quanto às dimensões dos corpos de prova, são normalizados e definidos pela ASTM - *American Society for Testing and Materials*.

Já o trabalho de BRUUN *et al.* (1989) utiliza praticamente a mesma metodologia, porém faz o uso de um dispositivo eletrônico capaz de realizar o lançamento e ancoragem do pêndulo além de, simultaneamente durante todo o intervalo de teste, realizar a aquisição dos dados da velocidade angular, juntamente com os valores da tensão de saída do anemômetro. Assim, a calibração em velocidade de uma sonda de fio quente é realizada baseada na lei de potência estendida, conforme mostra a Equação (2.18).

2.4.5 – Calibração com tubo de Pitot

Convencionalmente, a calibração estática de um anemômetro de fio quente pode também ser realizada com o uso de um tubo de Pitot, conforme é utilizado nos trabalhos de LANSPEARY (1997) e GONÇALVES (2001).

Um tubo de Pitot é capaz de sentir a pressão total ou de estagnação de um escoamento num determinado ponto do fluido em movimento e relacioná-la com sua velocidade relativa, quando a densidade desse fluido é conhecida. Desta forma, a velocidade do escoamento pode ser obtida através do uso da Equação (2.37) ou (38), na forma apresentada abaixo,

$$U_0 = \sqrt{\frac{2}{\rho_s} (P_{\text{total}} - P_{\text{estática}})} \quad (2.44)$$

onde o valor da pressão estática é obtida nas proximidades do orifício de entrada do tubo de Pitot, conforme esquema da Figura 2.28(a).

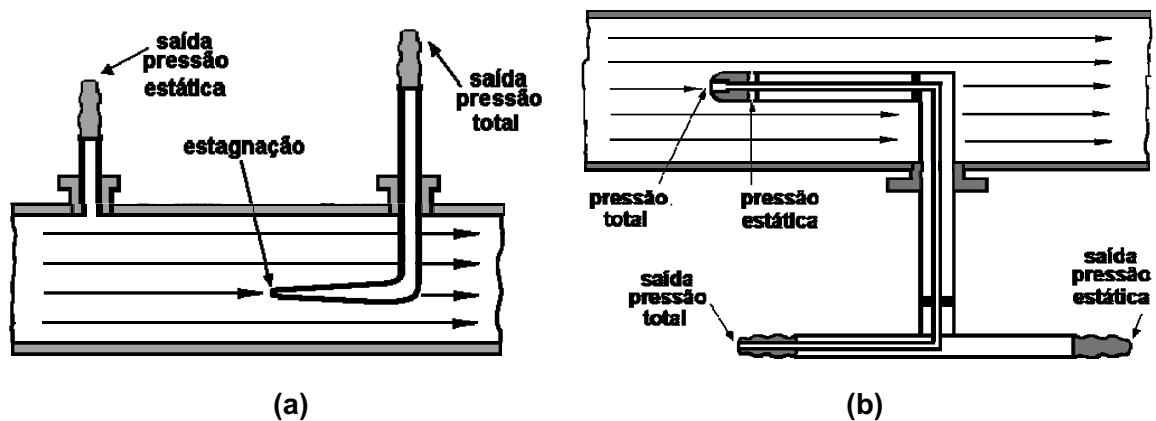


FIGURA 2.28 – (a) Tubo de Pitot e (b), tubo de Prandtl.

Alguns modelos de tubos de Pitot apresentam uma geometria adaptada para permitir a tomada da pressão estática junto á tomada da pressão total, conforme ilustra a Figura 2.28(b). Este tubo de Pitot modificado é chamado por PRANDTL & TIETJENS (1934) de *Prandtl's design*, ou simplesmente de tubo de Prandtl, em homenagem ao seu próprio inventor Ludwig Prandtl, sendo o mesmo autor da referência PRANDTL & TIETJENS (1934).

Uma vez que a densidade do fluido depende tanto de sua temperatura, quanto da pressão a que está submetido, a medida precisa da velocidade do escoamento com o uso da Equação (2.44) depende, ainda, de valores bem definidos das condições físicas do fluido.

Outra fonte de erros considerável na medida da velocidade com tubos de Pitot está no alinhamento do tubo em relação à direção do escoamento. Esta precaução é evidenciada no trabalho de BROWN (2003), o qual ressalta também a utilização de um fator de correção para a Equação (2.44), relacionado com a geometria da ponta do tubo. Este fator de correção está diretamente ligado à sensibilidade do tubo de Pitot, devendo ser levantado experimentalmente quando utilizado em meio líquido.

Uma limitação do uso de tubos de Pitot reside no fato deles apresentarem um determinado atraso na transmissão da pressão, sentida pelo orifício de estagnação, até o

dispositivo de medição do manômetro. O comprimento de mangueiras de interligação e suas características físicas, tais como plasticidade e rigidez, também podem influenciar o valor medido pelo manômetro, aumentando assim o tempo de estabilização da leitura.

Devido a isso, a utilização de tubos de Pitot para calibração de anemômetros de fio quente exige que sua utilização seja feita em escoamentos com velocidades moderadas, elevada constância no escoamento e mínima variação de temperatura. De acordo com FOX & MCDONALD (2001), tubos de Pitot podem ser aplicados em qualquer faixa de Re , exceto para baixas velocidades (< 3 m/s), onde a baixa pressão de estagnação pode causar resultados imprecisos, principalmente quando os efeitos viscosos tornam-se significativos. Desta forma, LANSPEARY (1997) indica que a calibração de anemômetros de fio quente com tubos de Pitot só deve ser realizada numa faixa de escoamentos que apresente velocidades superiores à 5 m/s, posicionando o sensor do anemômetro a mais próximo possível do orifício de tomada de pressão do tubo, conforme esquema da Figura 2.29.

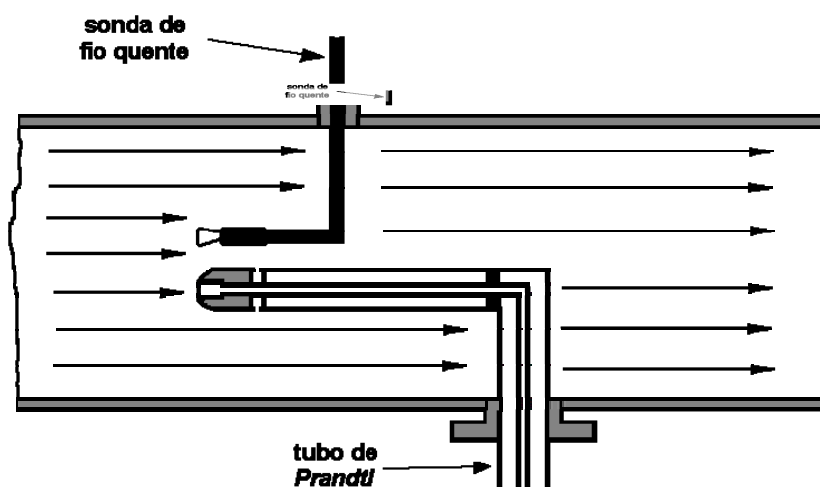


FIGURA 2.29 – Calibração de HWA com tubo de Prandtl.

Este mesmo procedimento experimental é mostrado em GRANGER (1988) para realização da calibração estática de um anemômetro de fio quente. Para isso foi utilizado um jato livre proveniente da saída de um reservatório de ar comprimido, onde o tubo de Pitot foi posicionado imediatamente atrás da sonda de fio quente, ambos no eixo de simetria axial do jato de saída.

2.5 – Calibração em frequência de anemômetros de fio quente

Conforme já discutido no Capítulo 2.3.3, a calibração em frequência de anemômetros de fio quente no modo CTA, está relacionada aos ajustes eletrônicos necessários ao circuito do anemômetro de forma a otimizar as características dinâmicas do sinal de saída do instrumento em função do tempo. Esta otimização pode ser realizada submetendo-se o sensor de fio quente a um escoamento com flutuações periódicas de sua velocidade, com amplitude conhecida, dentro da faixa de frequências de interesse. No entanto, devido às dificuldades práticas na geração e controle deste tipo de escoamento, principalmente para frequências elevadas, este processo é muitas vezes substituído pela inserção de sinais elétricos periódico no circuito de controle do anemômetro.

Da mesma forma que a calibração estática de anemômetros de fio quente, a calibração em frequência possui diferentes metodologias. Neste capítulo são mostrados quatro métodos diferentes de calibração em frequência, sendo o mais utilizado, inclusive pelos principais fabricantes de anemômetros de fio quente, o método que utiliza um gerador de sinais em conjunto com o circuito do anemômetro.

2.5.1 – Calibração com gerador de sinais

A calibração com gerador de sinais é a metodologia mais utilizada para realizar a calibração em frequência de anemômetros de fio quente, de acordo com BRUUN (1995).

Um sinal periódico, proveniente de um gerador de sinais, ou gerador de funções, é inserido em paralelo com os terminais do sensor de fio quente, indicado pelos pontos *a* e *b* no circuito da ponte de Wheatstone, conforme mostra a Figura 2.30.

A variação da tensão de saída da ponte de Wheatstone é fisicamente idêntica os efeitos de aquecimento e resfriamento do filamento, graças ao princípio da superposição de efeitos.

Este método é apresentado nos trabalhos de WYNGAARD & LUMLEY (1967), WEIDMAN & BROWAND (1975), LU (1979), CITRINITI *et al.* (1994), LEKAKIS (1996) e KHOO *et al.* (2003), além das referências de PERRY (1982), BRUUN (1995) e LOMAS (1986). LEKAKIS (1996) e KHOO *et al.* (2003) recomendam a injeção de sinais do tipo senoidais, os quais são indicados para investigação do comportamento dinâmico do circuito do anemômetro.

Contudo, os sinais de onda quadrada são capazes de fornecer maior quantidade de informação a respeito do sinal de saída, uma vez que permite a verificação do amortecimento em sistemas de malha fechada, conforme mostrado na Figura 2.20.

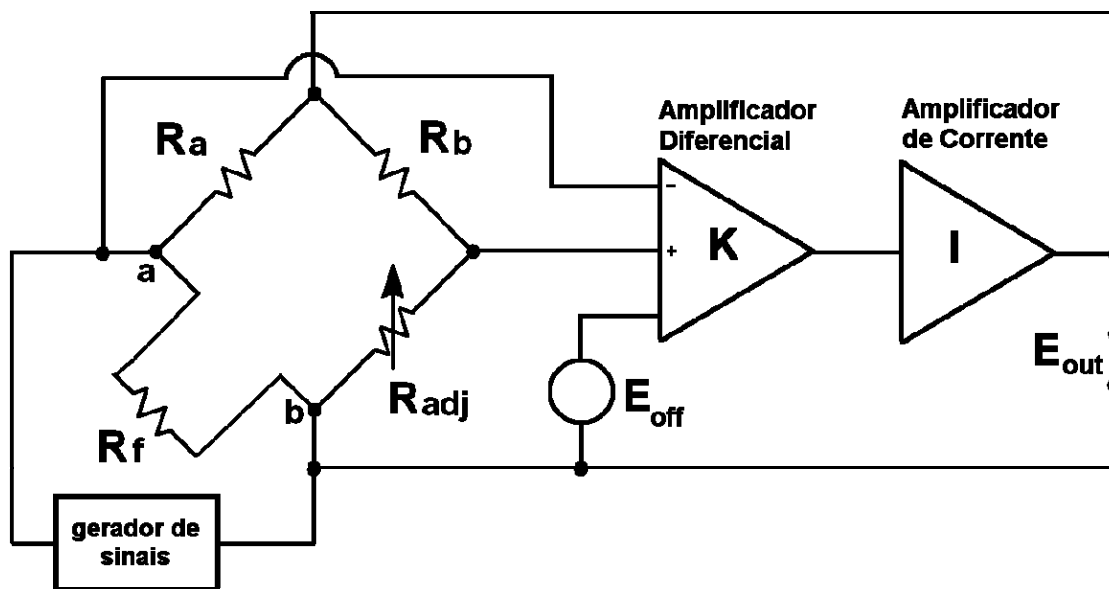


FIGURA 2.30 – Inserção de um gerador de sinais em paralelo com o sensor do anemômetro para realização de testes em frequência.

A carga espectral de um sinal puramente senoidal apresenta uma única componente em frequência, bem definida e de amplitude fixa. No gráfico inferior da Figura 2.31, é mostrado uma análise espectral com o uso da transformada rápida de *Fourier* – FFT do sinal senoidal mostrado no gráfico superior da Figura 2.31, apresentando frequência de 1kHz e amplitude $2V_{p-p}$. Pode-se notar que o espectro de frequências deste sinal apresenta uma única componente na respectiva frequência fundamental de oscilação.

Para um sinal periódico de onda quadrada, ilustrado no gráfico superior da Figura 2.32, sua decomposição espectral apresenta, além de uma componente principal na frequência fundamental de oscilação do sinal, outras componentes harmônicas de amplitudes menores, múltiplas ímpares da frequência fundamental de oscilação, conforme mostra o gráfico inferior da Figura 2.32.

Desta forma, o sinal senoidal testa a resposta em frequência do sistema de malha fechada para uma única componente espectral, enquanto que o sinal de onda quadrada insere um espectro mais amplo, testando a resposta do circuito para múltiplas frequências simultaneamente.

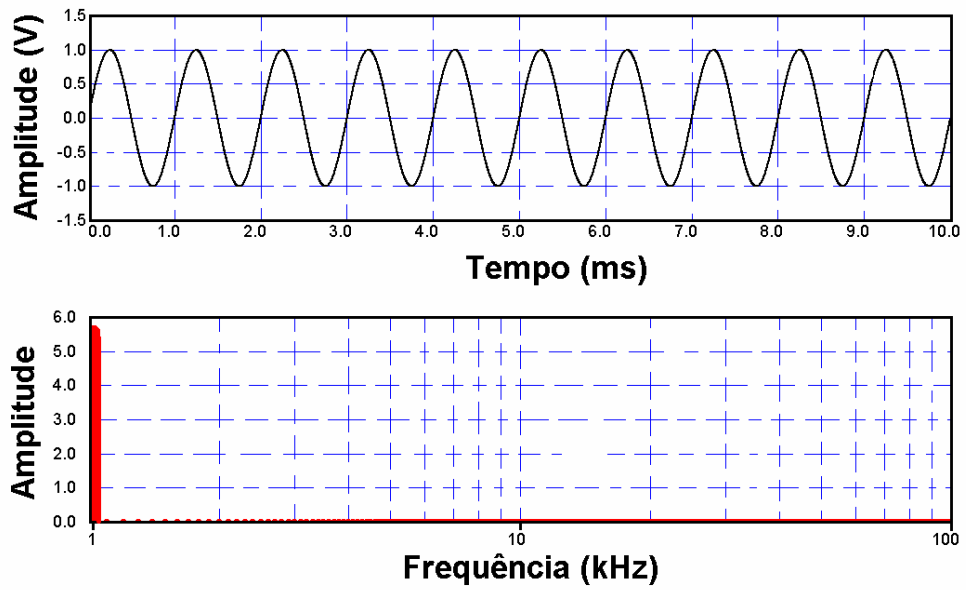


FIGURA 2.31 – Sinal senoidal de 1 kHz e sua respectiva carga espectral.

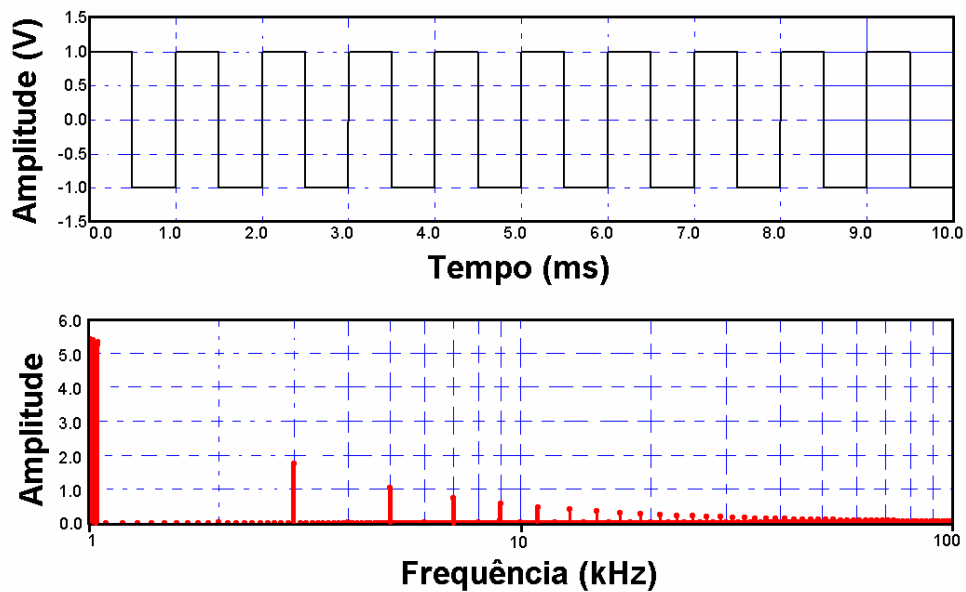


FIGURA 2.32 – Onda quadrada de 1 kHz e sua respectiva carga espectral.

2.5.2 – Calibração com tubo de choque

A excitação do sistema com um único sinal de onda quadrada (pulso) é equivalente ao teste do sistema de malha fechada com uma função degrau unitário, a qual permite a análise completa do sinal de saída sob a ótica da resposta temporal de sistemas de segunda ordem. Esta

teoria está exposta no Capítulo 2.3.3, permitindo assim, testar as características dinâmicas do sinal de saída de anemômetros, conforme ilustra o gráfico da Figura 2.19.

De forma a reproduzir o efeito físico de uma entrada degrau num anemômetro de fio quente, LU (1979) propõe a calibração em frequência deste instrumento com o auxílio de um tubo de choque, destinado a simular uma brusca variação da velocidade do escoamento, excitando, assim, a sonda de fio quente com um sinal muito próximo de uma entrada degrau. Desta forma, através dos ajustes de E_{off} e R_{adj} , (tensão de *off-set* e *overheat*, respectivamente) o sinal de saída do circuito CTA pode ser modificado de forma a se obter amortecimento crítico e mínimo tempo de estabelecimento possível, com o objetivo de manter o circuito estável dentro de uma ampla faixa de escoamentos.

De acordo com NEVES *et al.* (2000), um tubo de choque é capaz de gerar ondas de choque bem definidas sob as mais variadas condições de temperatura e pressão, sendo freqüentemente utilizado no estudo de reações químicas ou em processos físicos em meio gasoso. Esta onda de choque pode simular uma entrada degrau num sensor conectado no lado de baixa pressão e devidamente posicionado no interior da seção de teste do tubo. Espera-se que este sinal seja o mais próximo possível do gráfico superior da Figura 2.20, livre de ruídos e com amplitude e duração bem definida.

A análise presente em NEVES *et al.* (2000) aponta que algumas flutuações do sinal obtido com o uso do tubo de choque podem ocorrer, dada a maneira pela qual o diafragma é rompido, além de outras perturbações decorrentes dos efeitos viscosos e termodinâmicos no escoamento dentro do tubo.

Basicamente, tubos de choque são construídos com tubos metálicos de seção transversal constante no formato circular, quadrado ou triangular, possuindo duas câmaras seladas. A primeira com conteúdo gasoso sob alta pressão e outra, de pressão mais baixa, separadas por um diafragma, conforme mostra o esquema da Figura 2.33.

A maneira mais comum para o rompimento do diafragma é através de um eletroímã que atua como um perfurador mecânico, controlado muitas vezes por computador, paralelamente ao disparo de um sistema de aquisição de dados. Os materiais empregados variam de acordo com a diferença de pressão entre as câmaras de alta e baixa pressão, sendo folhas (ou chapas) de alumínio o material mais empregado. Maiores detalhes do funcionamento de um tubo de choque podem ser obtidos na referência LIEPMANN & ROSHKO (1960).

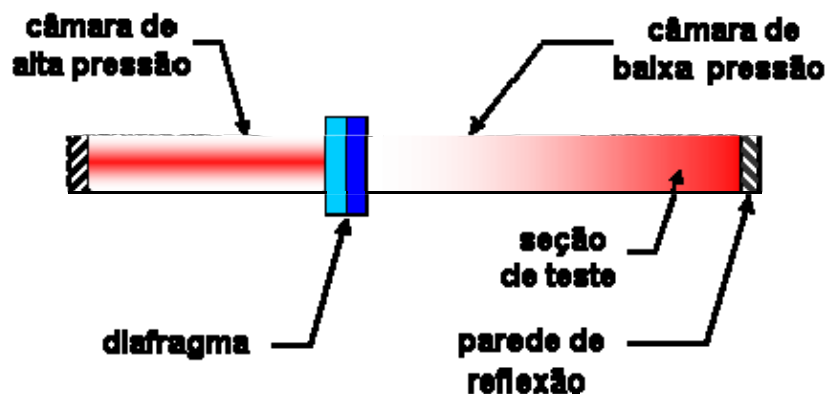


FIGURA 2.33 – Esquema simplificado de um tubo de choque.

Uma instrumentação básica para determinação da velocidade e duração da onda no interior do tubo de choque consiste no posicionamento estratégico de dois transdutores de pressão de rápida resposta em frequência, separados por uma distância conhecida ao longo da seção de teste. O primeiro transdutor atua com sinal de disparo (*trigger*) para um sistema de cronometragem controlado pelo segundo transdutor, o qual efetua o desligamento deste cronômetro.

A brusca variação da pressão na seção de teste do tubo de choque ocorre devido à passagem da onda de choque, podendo esta ocorrer com ou sem compressibilidade do gás que fora aprisionado na câmara de alta pressão. Esta velocidade depende exclusivamente da diferença de pressão nas câmaras de alta e baixa pressão, tornando possível assim estabelecer uma relação entre essa diferença de pressão e a velocidade da onda de choque, prevendo desta forma, as condições do escoamento no interior do tubo, de acordo com GUY (1971).

Institutos como o *National Institute of Standards and Technology* (NIST - USA) e o *Bureau National de Métrologie* (BNM- França) adotam o tubo de choque como o principal equipamento de calibração dinâmica, em elevadas frequências, na aferição e testes de transdutores de pressão e outros sensores que necessitam de investigação precisa do seu comportamento dinâmico.

O procedimento experimental para calibração de um anemômetro de fio quente com o uso de um tubo de choque é apresentado no trabalho de GUY (1971). Foi utilizado um anemômetro no modo CTA com sua sonda posicionada no centro da seção de teste de um tubo de choque, com filamento na posição normal ao escoamento, especialmente preparada para

suportar elevados perfis de velocidade (> 90 m/s).

No trabalho de LU (1979), um gerador de onda quadrada foi utilizado para analisar o coeficiente de amortecimento da resposta em frequência de um anemômetro de fio quente, juntamente com os resultados provenientes de um tubo de choque e sua previsão analítica. O gráfico da Figura 2.34 mostra os resultados de LU (1979), sendo obtidos com um circuito eletrônico de um anemômetro CTA, equivalente ao desenvolvido neste trabalho, em conjunto com uma sonda de fio de platina com 2,3 mm de comprimento e 5,1 μ m de diâmetro. O fluido utilizado foi o ar atmosférico num tubo de choque de aço com seção transversal quadrada de 35 \times 35 mm.

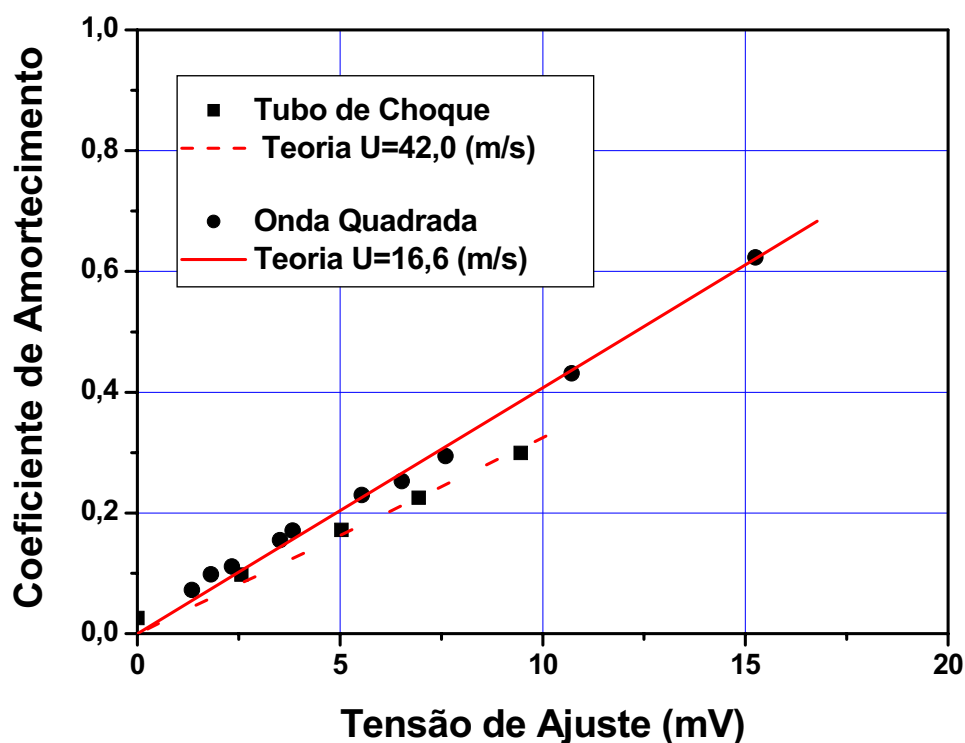


FIGURA 2.34 – Resultados da calibração em frequência de um anemômetro CTA obtidos por LU (1978).

Os resultados de LU (1979) concluem que os testes realizados com o tubo de choque podem ser substituídos pelo teste com gerador de sinais, os quais apresentam resultados equivalentes, sendo desnecessário o uso do tubo de choque na calibração em frequência de anemômetros CTA, na maioria dos casos.

2.5.3 – Calibração com *laser*

Uma outra metodologia utilizada pra calibração em freqüência de um anemômetros CTA é apresentada no trabalho de FIEDLER (1978), no qual utiliza-se de um *laser* pulsante para aquecer o filamento da sonda de fio quente e assim, simular o efeito de aquecimento e resfriamento desta sonda devido a passagem do fluido. O esquema desta montagem experimental é mostrado na Figura 2.35.

De acordo com FIEDLER (1978), a incidência do *laser* sobre o filamento do anemômetro, modulado através de um disco perfurado rotatório (*chopper*), é equivalente ao teste com gerador de sinais de onda quadrada, podendo ser considerado como uma entrada degrau inserida externamente ao circuito do anemômetro.

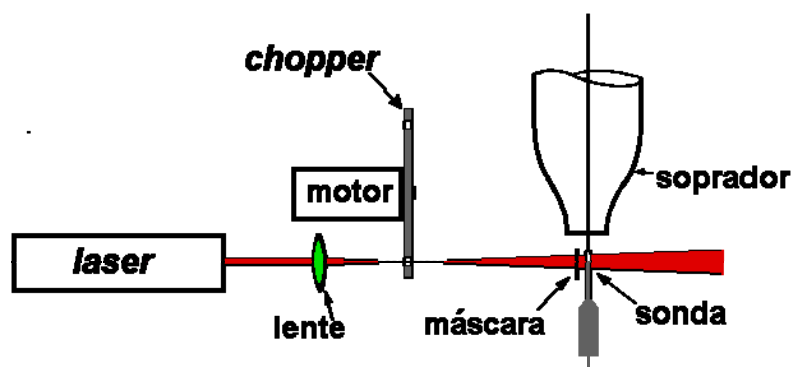


FIGURA 2.35 – Montagem experimental para calibração em freqüência de um anemômetro CTA proposto por Fiedler (1978).

Desta forma pode-se obter um valor realístico e de boa precisão para a constante de tempo da sonda de fio quente e, conseqüentemente, para o conjunto sonda / circuito CTA. Uma máscara metálica ajustável é posicionada conforme o esquema da Figura 2.35, a qual fornece o ajuste do local de incidência do feixe *laser*.

Quando somente o filamento do anemômetro é aquecido pelo *laser*, Figura 2.36(a), o sinal de saída do circuito apresenta um formato simétrico de onda quadrada, na freqüência de controle do disco perfurado (*chopper*). No entanto, quando ambos são aquecidos (filamento e suportes), Figura 2.36(b), o formato do sinal de saída do anemômetro apresenta algumas distorções, principalmente devido a transferência de calor do filamento para os suportes.

A colocação da lente na saída do *laser* possibilita a abertura do seu feixe e,

conseqüentemente, a diminuição da sua potência concentrada, uma vez que o experimento de FIEDLER (1978) utilizou um *laser* de alta potência (5 W), não sendo necessário todo este poder de aquecimento para excitar o circuito do anemômetro. Devido a elevada potência do laser utilizado por FIEDLER (1978), um soprador de ar foi utilizado para resfriar a sonda durante o período de aquisição de dados do experimento.

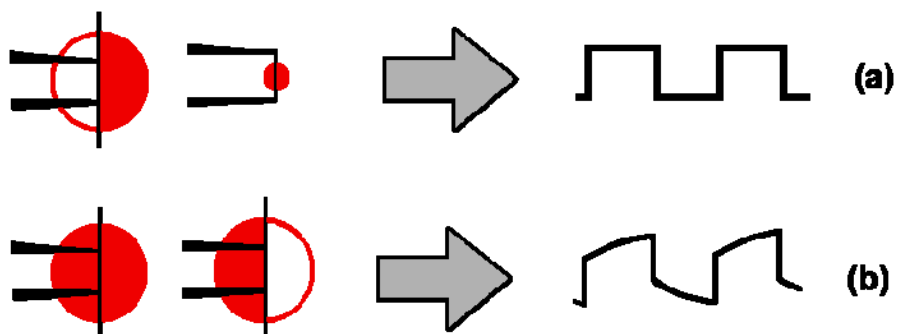


FIGURA 2.36 – Sinal de saída desejável quando somente o filamento é aquecido pelo *laser*, caso (a), e sinal de saída quando filamento e suportes são aquecidos pelo *laser*, caso (b). FIEDLER (1978).

2.5.4 – Calibração com ar aquecido

Um processo de calibração em frequência, similar ao apresentado por FIEDLER (1978), é realizado no trabalho de WEEKS *et al.* (1988).

Trata-se de uma estimulação externa da sonda de um anemômetro através de um jato de ar quente, modulado através de um disco perfurado giratório, ou um *chopper*, conforme mostra o esquema da Figura 2.37.

O comportamento intermitente do jato aquecido sobre a sonda provoca uma estimulação física compatível com o fenômeno enfrentado pela sonda quando submetida a variações brusca da velocidade do escoamento, similar ao teste eletrônico de injeção do sinal de onda quadrada.

Uma vez que o jato aquecido simula uma entrada degrau, o sinal de saída do anemômetro, observado através da tela de um osciloscópio, deve apresentar as características já mostradas nas Figuras 2.19 e 2.20, permitindo assim que o instrumento seja otimizado em frequência, através da visualização dos resultados experimentais.

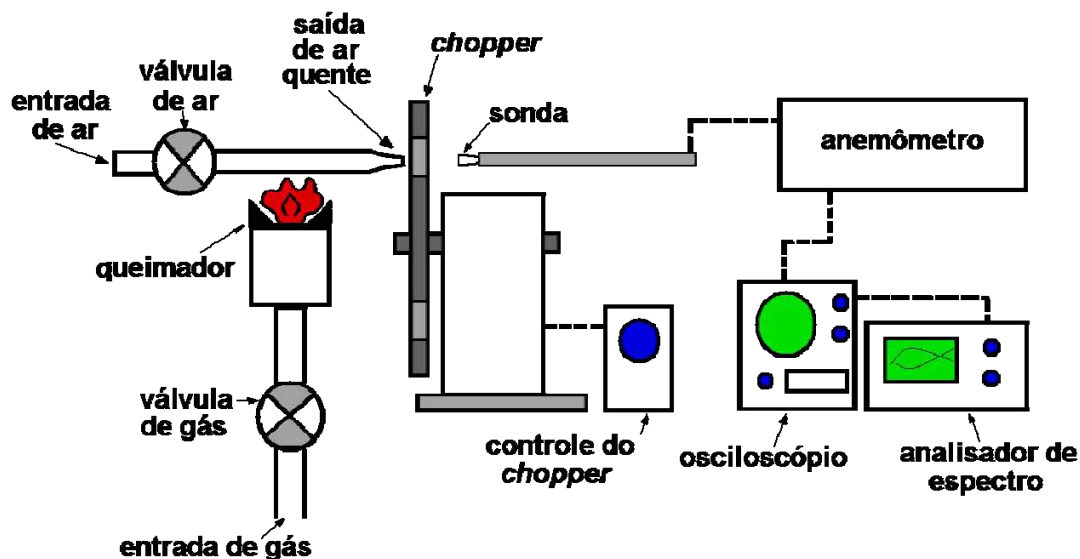


FIGURA 2.37 – Montagem experimental para calibração em frequência de um anemômetro CTA proposto por WEEKS *et al.* (1988).

2.6 – Limpeza de sondas de fio quente

Sondas de fio quente e de filme quente devem ser constantemente calibradas, pois ambas sofrem com o problema da contaminação de suas superfícies de contato pelas partículas do fluido. Mesmo devidamente armazenadas em locais apropriados, tanto sondas de fio quente, quanto sondas de filme quente, perdem suas características de transferência de calor devido o efeito de auto-contaminação da superfície do filamento.

A perda da calibração é ainda maior quando sondas de filme quente são submetidas a escoamentos em meio líquido - água, sangue, substâncias compostas, etc - nos quais o processo de oxidação é muito acentuado, ocorrendo substancial troca iônica de sais dissolvidos em água, provocando diversas incrustações na sonda.

A manutenção e limpeza de sondas são atividades periódicas e devem estar sempre acompanhada de novo processo de calibração, conforme explica BRUUN *et al.* (1988). De maneira geral, cada fabricante de equipamentos de anemometria de fio quente fornece soluções integradas para a realização da limpeza e manutenção de sondas de fio quente.

Uma maneira de verificar se a sonda deve, ou não ser limpa, consiste em comparar sua calibração, após o término do experimento, com alguns dos valores obtidos antes da sua utilização. Em geral, a limpeza de sondas de fio e filme quente deve ser efetuada após cada

utilização ou ao término de uma seção completa de um experimento, conforme explica BRUUN (1995).

No trabalho de WYATT (1952) é apresentado uma técnica simples de realizar a limpeza automática de sondas de fio e filme quente. Uma vez que, a manipulação de sondas constitui um processo delicado e muitas vezes demorado, seu dispositivo utiliza um auto-falante comum onde um pequeno recipiente com líquido de limpeza é fixado no centro, conforme mostra a Figura 2.38. Foram utilizados os seguintes líquidos para limpeza: Acetona, éter, bisulfato de carbono e álcool desnaturado, este último sendo uma mistura de álcool etílico e metílico.

O auto-falante é excitado com um sinal senoidal com frequência entre 15 até 60 Hz, durante diferentes intervalos de tempo, variando conforme um fator qualitativo de contaminação das sondas.

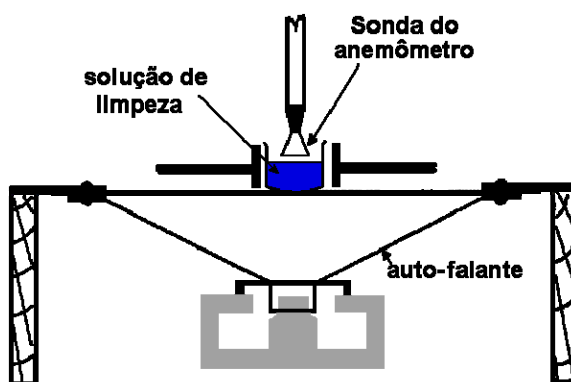


FIGURA 2.38 – Dispositivo de limpeza de sondas proposto por WYATT (1952).

Uma maneira convencional de realizar a limpeza de sondas tanto de fio quente, quanto filme quente, consiste em utilizar um pincel muito delicado, umedecido com alguma das substâncias de limpeza propostas por WYATT (1952) e, cuidadosamente, efetuar a limpeza manual da sonda. Este procedimento é apresentado por BRUUN (1995), JØRGENSEN (2002) e PERRY (1982), onde enfatizam o extremo cuidado a ser tomado durante todo o processo.

Também no ambiente industrial, os anemômetros de fio quente são amplamente utilizados. Nesse contexto, sua aplicação é restrita para escoamentos gasosos e na medição de vazão mássica e volumétrica, onde suas sondas são protegidas por um invólucro cerâmico ou metálico, apresentando uma construção robusta e rígida. Mesmo fazendo o uso de sondas protegidas, a limpeza destes sensores se faz necessária, na periodicidade recomendada pelo fabricante.

Capítulo 3

Circuito Eletrônico CTA

O Capítulo 2.3 apresentou os aspectos gerais dos circuitos eletrônicos de controle presentes num anemômetro de fio quente, mostrando tanto o funcionamento do modo CCA, quanto do modo CTA de operação, além das principais definições técnicas presentes nestes circuitos e na ponte de Wheatstone.

O circuito eletrônico do anemômetro CTA desenvolvido e utilizado neste trabalho foi baseado no encadeamento dos componentes proposto por PERRY (1982), sendo também utilizado e apresentado em diversas referências selecionadas para este trabalho, a exemplo de WEEDMAN & BROWAND (1975), LU (1979), WATMUFF (1995) e outros.

O trabalho de CITRINITI *et al.* (1994) expõe a construção de um sistema completo de anemometria de fio quente de 138 canais, incluindo sondas e sistema de aquisição de dados. Contudo, o circuito eletrônico mostrado está numa forma esquemática, apresentando somente os componentes principais do circuito.

Este projeto é resultante dos estudos iniciais apresentados em EGUTI *et al.* (2002), o qual realiza uma abordagem didática do assunto, culminando na montagem de um circuito CTA simplificado, inclusive com a construção de sondas experimentais com fios de platina e tungstênio de 25 μm de diâmetro.

Dois novos protótipos foram desenvolvidos e aplicados neste trabalho estando ambos funcionais e com circuitos eletrônicos compatíveis. Ambos possuem o mesmo princípio de funcionamento. No entanto, diferem com relação à qualidade dos componentes utilizados, na potência elétrica fornecida ao sensor de fio quente e em sua resposta em frequência.

Os capítulos que se seguem descrevem o funcionamento de cada um dos protótipos desenvolvidos, justificando as escolhas dos componentes utilizados e suas respectivas finalidades dentro do circuito.

3.1 – Primeiro protótipo

O circuito eletrônico do primeiro protótipo é mostrado nas Figuras 3.1 e 3.3.

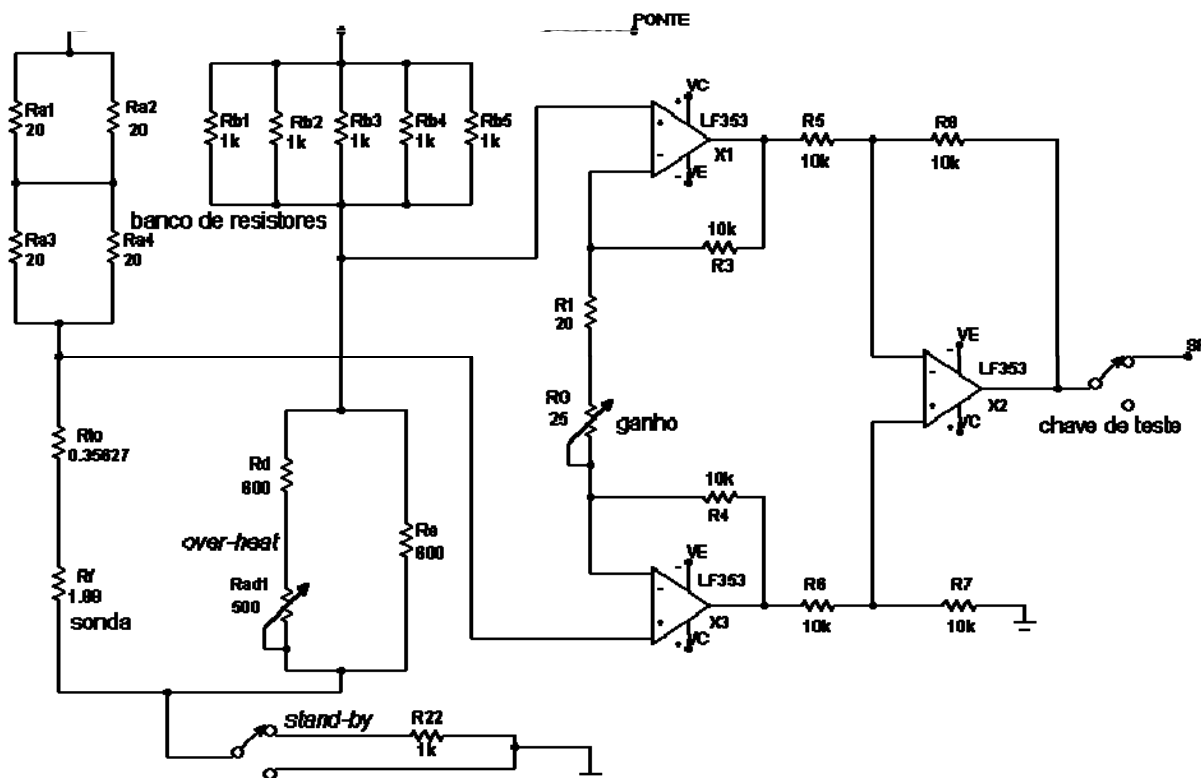


FIGURA 3.1 – Circuito experimental do anemômetro CTA desenvolvido – parte 1/2.

Na Figura 3.1, são apresentados o circuito da ponte de Wheatstone e seu amplificador de instrumentação, formado por três amplificadores operacionais modelo LF 353. Cada circuito integrado do LF 353 possui internamente dois amplificadores operacionais, sendo representado pelos componentes X1 até X7. O ganho desta etapa de amplificação é determinado através do resistor ajustável RG do tipo trim-pot multi-voltas. Este ganho está dimensionado para uma faixa entre 1 até 1000.

Todos os demais resistores do circuito são do tipo metal-filme de 1% de tolerância, exceto para os resistores da ponte, os quais são resistências de fio de 5 e 10 W de potência, com 5 % de tolerância.

As resistências Ra1 até Ra4 são resistores de fio de 20 Ω e 10 W cada, formando um banco de resistores de 40 W de dissipação total de calor, montados em série e paralelo de forma

que a resistência equivalente total seja de 20Ω .

O banco de resistores $Rb1$ até $Rb5$ é formado por cinco resistores de $1 \text{ K}\Omega$ com 5 W de potência cada, resultando numa resistência final próxima de 200Ω e aproximadamente 25 W de potência final.

O objetivo da montagem de ambos os bancos de resistores consiste em minimizar os efeitos da variação da resistência devido o acréscimo de temperatura pela passagem de corrente nestes componentes. Assim, o circuito apresenta melhor estabilidade térmica durante seu pleno funcionamento, ou seja, um banco de resistências permite uma melhor dissipação térmica do que um único componente isolado. Estas considerações são tratadas no trabalho de PERRY (1982) e ressaltadas no trabalho de CITRINITI *et al.* (1994).

O resistor de ajuste de sobre-aquecimento (*overheat*), indicado na Figura 3.1, foi construído no primeiro protótipo numa configuração série-paralelo. Esta montagem permite limitar a faixa de ajuste, através do potenciômetro linear $Rad1$, com resistência máxima de 500Ω e 2 W de dissipação. Circuitos de controle de anemômetros mais rudimentares, conforme explica PERRY (1982), utilizavam-se das chamadas décadas resistivas para o ajuste do valor de sobre aquecimento da sonda. Este equipamento consiste numa série de resistores padronizados, selecionáveis através de chaves seletoras, as quais permitem o ajuste do valor da resistência, em geral, através de múltiplos e sub-múltiplos de 10Ω . A Figura 3.2 mostra um exemplo deste tipo de equipamento.



FIGURA 3.2 – Exemplo de uma década resistiva.

A resistência elétrica da sonda de fio quente está representada pelo resistor R_f , sendo as demais resistências do cabo, conectores e suportes do filamento pelo resistor R_{to} .

Na saída da ponte foi inserida uma chave de espera (*stand-by*), destinada a reduzir a corrente na sonda de fio quente quando o circuito não estiver em operação, minimizando, desta

forma, o desgaste natural de operação deste filamento quanto aquecido.

A chave de teste presente na saída do amplificador operacional *X2*, mostrado na Figura 3.1, é utilizada para realizar testes no circuito da ponte e no conjunto do amplificador de instrumentação, além de permitir a utilização do circuito como um anemômetro tipo CCA, já que permite a abertura da malha do circuito.

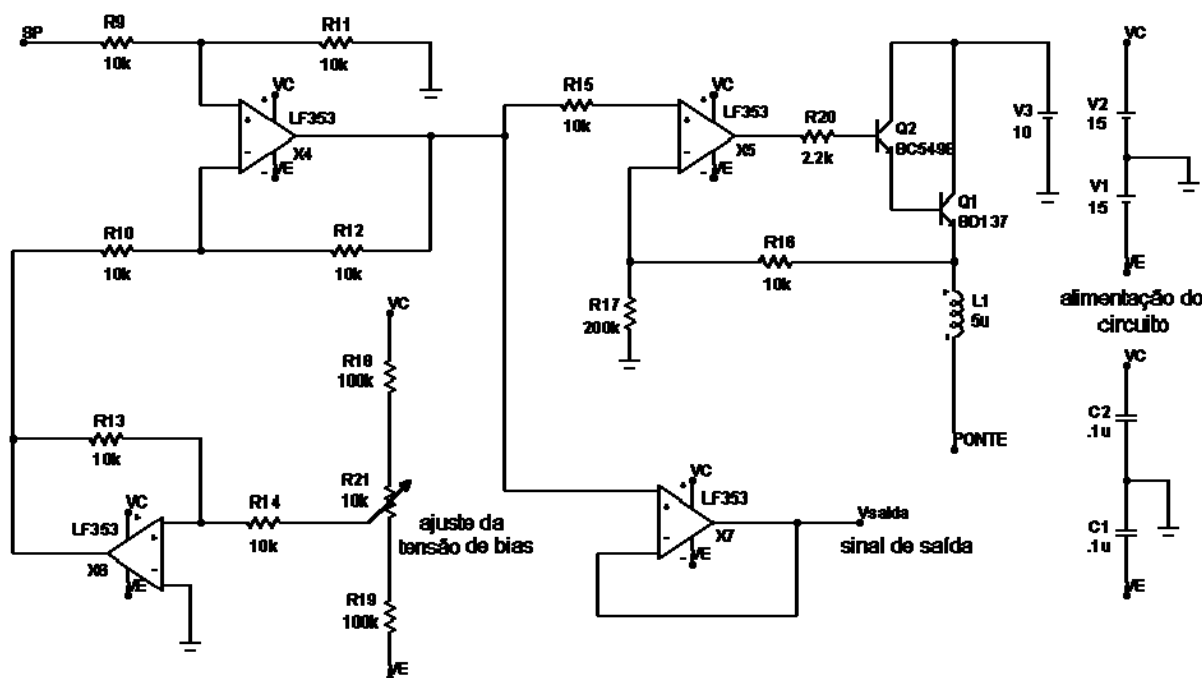


FIGURA 3.3 – Circuito experimental do anemômetro CTA desenvolvido – parte 2/2.

A alimentação do circuito da ponte de Wheatstone no primeiro protótipo é realizada através de um amplificador de corrente, formado pelo amplificador operacional *X5* e pelos transistores tipo NPN *Q1* e *Q2*, dispostos na configuração *Darlington*. Esta configuração ocorre quando dois transistores são conectados em cascata, a exemplo dos transistores *Q1* e *Q2* da Figura 3.3.

Um ajuste importante deste circuito é a tensão inicial de operação, ou tensão de *bias*, sendo ajustada através do *trim-pot* *R21*. Esta tensão é inserida no circuito através do amplificador operacional *X6*.

O sinal de saída é desacoplado do restante do circuito através do amplificador *X7*, o qual está na configuração de seguidor de tensão (*buffer*).

Uma segunda etapa de amplificação para o circuito deste protótipo é realizada através de

um amplificador operacional na configuração dita diferencial, formada pelo componente *X4*. No entanto, seu ganho é fixo, com valor unitário, sendo esta etapa de amplificação responsável em somar a diferença de tensão da ponte de Wheatstone com a tensão inicial de operação, ou de polarização (*bias*). Esta diferença de tensão é entregue ao amplificador de corrente para realimentar o circuito da ponte de Wheatstone, fechando a malha do circuito CTA.

Todos os amplificadores operacionais, ou A.O., são alimentados com tensão simétrica de $\pm 15V$, proveniente de uma fonte chaveada de tensão. A alimentação da ponte de Wheatstone e conseqüentemente do fio quente, é feita através de outra fonte chaveada, isolada da alimentação do resto do circuito. Estas fontes não estão mostradas por se tratarem de fontes de alimentação convencionais.

A Figura 3.4 e 3.5 mostra duas imagens do protótipo P1 em sua caixa de proteção, com a indicação das funções dos ajustes externos. Sua caixa de proteção foi confeccionada com chapas de aço 1010 e serve tanto de proteção mecânica do circuito, quanto de blindagem eletromagnética, aumentando a imunidade do circuito a ruídos e de outras fontes de interferência. Para isso, um aterramento de baixa resistência deve ser ligado no terminal de terra, conforme indicado na Figura 3.4.



FIGURA 3.4 – Primeiro protótipo do anemômetro de fio quente – vista frontal.

A Figura 3.5 mostra o transistor Q1 montado externamente ao circuito num dissipador de calor de alumínio de forma a minimizar os efeitos do seu aquecimento. Com o uso contínuo do

circuito, este componente apresenta uma temperatura típica de trabalho de 85 °C, a qual deve ser dissipada para o ambiente a fim de não danificá-lo.



FIGURA 3.5 – Primeiro protótipo do anemômetro de fio quente – vista traseira.

A Figura 3.6 apresenta uma vista interna do primeiro protótipo do anemômetro, revelando seus componentes internos.

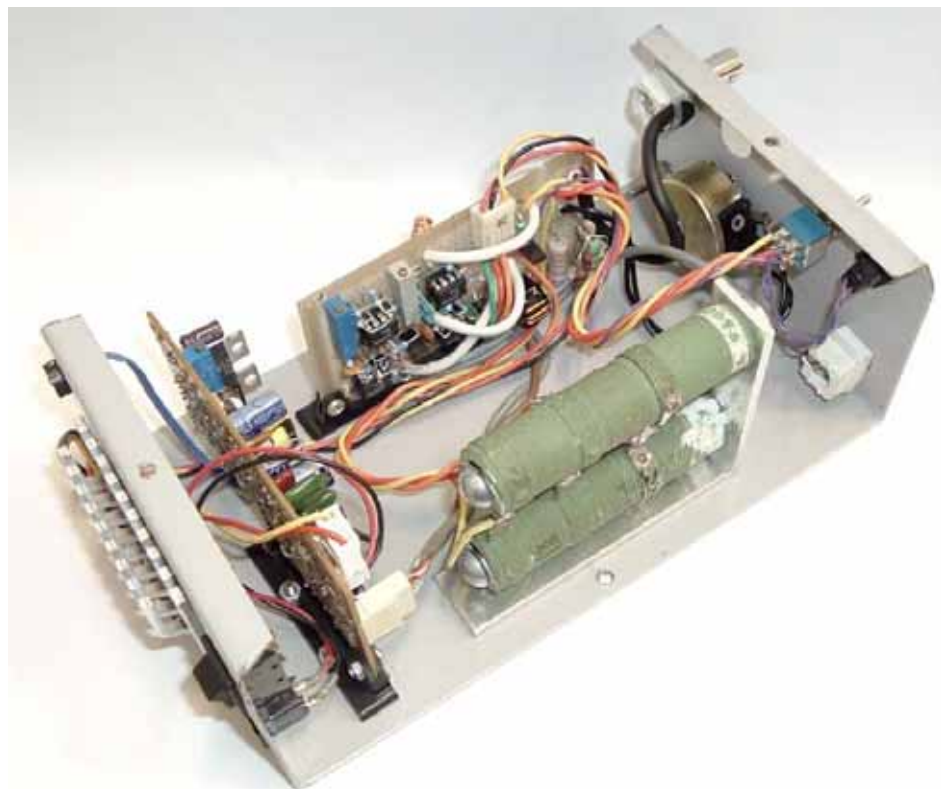


FIGURA 3.6 – Vista interna dos circuitos eletrônicos do primeiro protótipo.

O circuito eletrônico do primeiro protótipo, mostrado nas Figuras 3.1 e 3.3, foi inicialmente simulado numericamente com o uso do programa *MicroCap*[®], versão 7.0 para estudantes, da empresa *Spectrum Microsystems Inc.*. Este programa permitiu a realização de boa parte dos testes funcionais necessários para a construção dos protótipos, evitando assim o uso de matriz de testes e montagens preliminares dos componentes com o uso de solda de fusão de estanho.

A Figura 3.7 mostra um gráfico da simulação numérica da tensão de saída do amplificador da ponte de Wheatstone (Ponto SP indicado na Figura 3.1) e da corrente na sonda, em função da variação do valor da resistência R_f , o qual representa a sonda de fio quente.

Para efetuar a simulação da Figura 3.7, é necessário definir o valor da temperatura de operação da sonda, neste ensaio, ajustada para 200 °C. Utilizando a Equação (2.31), obtemos o valor para a resistência da sonda R_f , para um filamento de tungstênio na temperatura de operação. Feito isso, ajusta-se o valor da resistência R_{ad1} de forma que a resistência equivalente do conjunto R_d , R_e e R_{ad1} apresentem o valor definido pela Equação (2.27). Foi escolhido um valor aproximado da resistência elétrica da sonda R_o , numa dada temperatura de referência T_0 , de forma a permitir uma estimativa adequada dos valores obtidos nesta simulação.

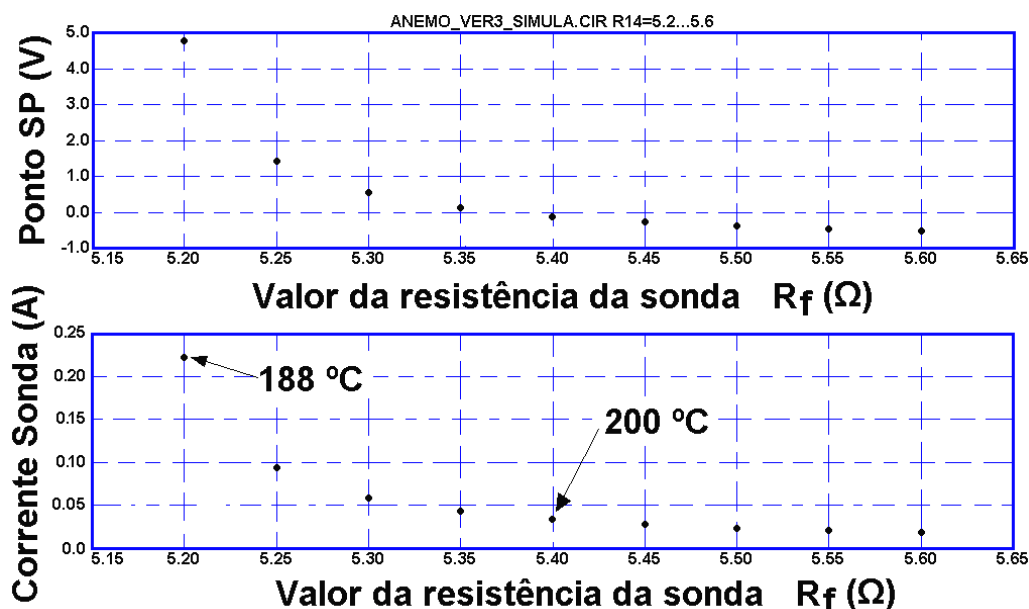


FIGURA 3.7 – Simulação da variação da resistência da sonda de fio quente.

O programa é ajustado para variar o valor da resistência da sonda R_f , deste o valor R_o , na temperatura de referência, até o seu valor na temperatura de operação. O gráfico superior da

Figura 3.7 mostra que a tensão de saída da ponte de Wheatstone é próxima de zero, quando a sonda alcança sua temperatura de trabalho. Neste resultado não está sendo considerado nenhuma ação de troca de calor sobre a sonda, simulando somente o período inicial de operação do anemômetro (transiente), momento este em que a sonda encontra-se na temperatura de referência. Vale ressaltar que, mesmo em se tratando de uma simulação, é necessário utilizar valores precisos da resistência da sonda, da razão da ponte, do coeficiente de resistividade térmica do material da sonda, além da resistência dos conectores e cabos de interligação. Os procedimentos utilizados para medir estes valores são descritos no Capítulo 4.5.

3.2 – Segundo Protótipo

O desenvolvimento de um segundo circuito experimental de anemômetro de fio quente CTA teve como objetivo sanar parte das deficiências técnicas detectadas no primeiro protótipo. A principal diferença entre estes protótipos está nos componentes eletrônicos utilizados em seus circuitos. Boa parte destes componentes não é de uso comum, sendo sua disponibilidade comercial limitada, por se tratar de componentes destinados à instrumentação eletrônica.

O circuito do segundo protótipo é baseado no mesmo circuito do primeiro. Esta característica pode ser verificada nas Figuras 3.8, 3.10 e 3.11, as quais apresentam seu circuito eletrônico completo, incluindo a fonte de alimentação.

A Figura 3.8 apresenta os sub-circuitos da ponte de Wheatstone e o primeiro estágio de amplificação do anemômetro. Na ponte de Wheatstone, o recurso de banco de resistores utilizado na ponte do primeiro protótipo - Figura 3.9(b) - foi substituído por um resistor mais robusto, de dimensões reduzidas e elevada dissipação de calor, conforme mostra a Figura 3.9(a). Este resistor possui uma resistência de $22\ \Omega$ e dissipação térmica de 50 W, sendo construído num encapsulamento de epóxi tipo TO-220. Sua indutância é desprezível, sendo esta uma característica muito importante, ao contrário dos resistores de fio utilizados no banco de resistores *Ra1* até *Ra4* do primeiro protótipo.

O resistor *Rb*, utilizado no segundo protótipo, substitui o banco de resistores *Rb1* até *Rb5* do primeiro protótipo. Este componente é construído num invólucro de silicone com material de baixa indutância e reduzido coeficiente de resistividade térmica, apresentando uma resistência de $220\ \Omega$ com dissipação de 13 W.

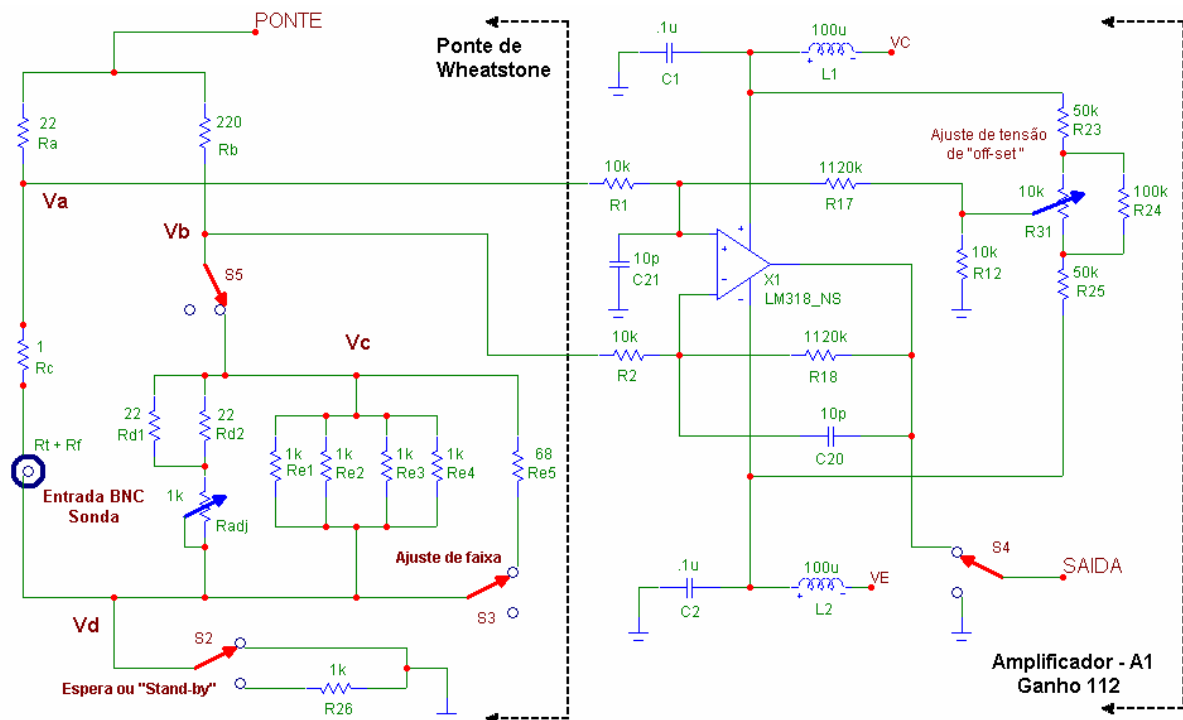
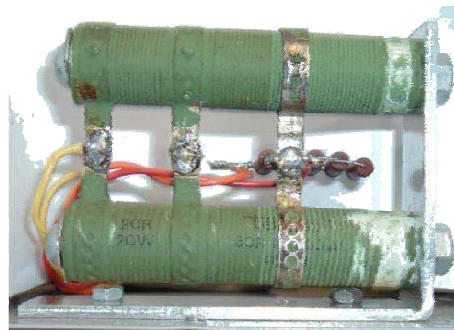


FIGURA 3.8 – Circuito eletrônico do segundo anemômetro CTA desenvolvido – parte 1/3.



(a)



(b)

FIGURA 3.9 – (a) resistor de 22 Ω de alto desempenho e (b), banco de resistores série-paralelo de 20 Ω.

De forma a limitar a faixa de ajuste dos valores de sobre-aquecimento da sonda, o resistor de ajuste do *overheat* foi construído numa configuração série-paralelo com o uso de um potenciômetro de precisão multi-voltas, modelo 534 da *Vishay-Spectrol*. Este componente possui uma resistência total de 1 kΩ, com potência de dissipação de 2W. Esta faixa de ajuste de sobre-aquecimento pode ser estendida para valores mais elevados de sobre-aquecimento quando a chave S3 é aberta, retirando assim o resistor Re5 do circuito paralelo de resistências.

A chave *S2* mostrada na Figura 3.8, quando acionada, coloca o circuito da ponte no modo de espera, (*stand-by*), reduzindo a corrente que atravessa a sonda e, conseqüentemente, aumentando seu tempo de vida útil.

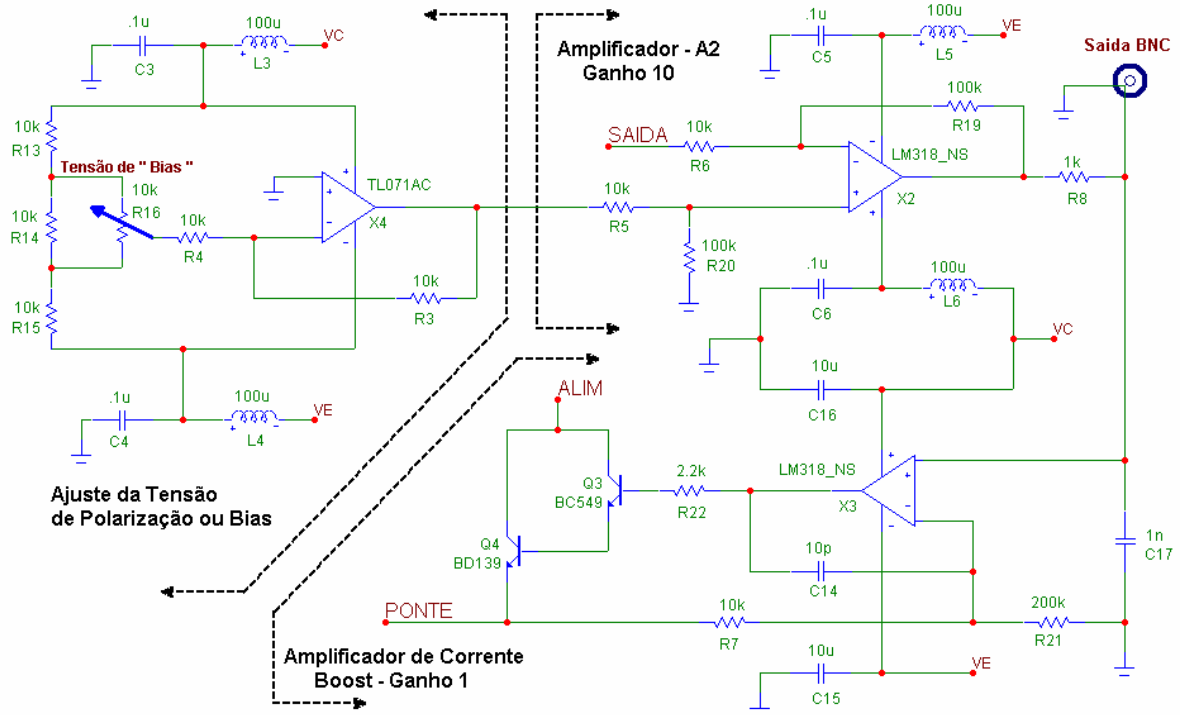


FIGURA 3.10 – Circuito eletrônico do segundo anemômetro CTA desenvolvido – parte 2/3.

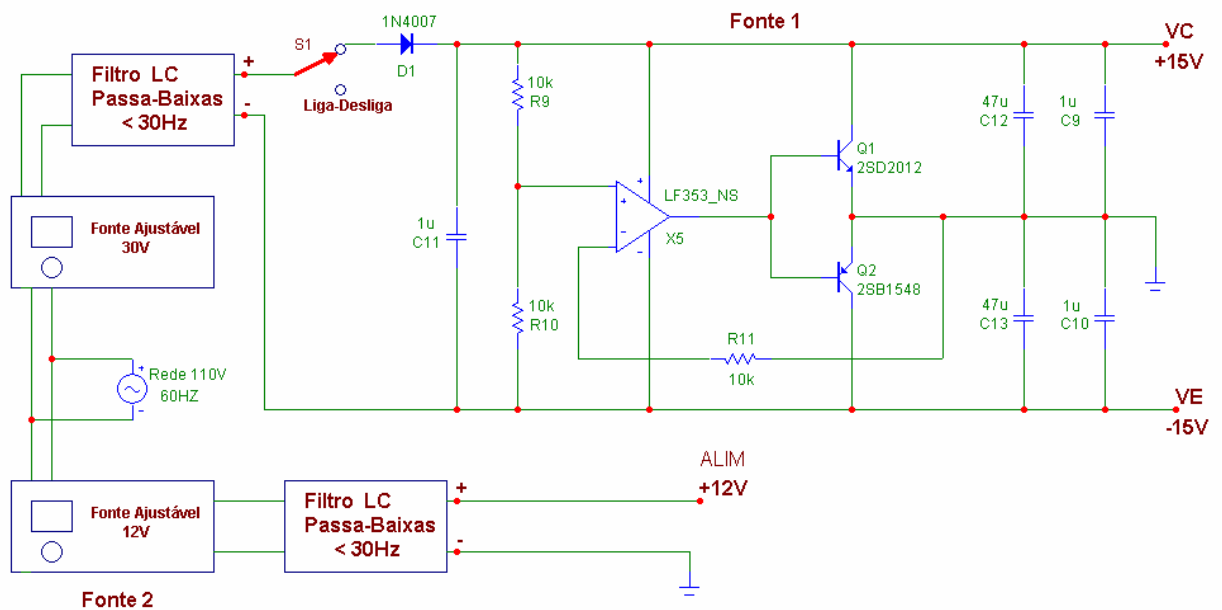


FIGURA 3.11 – Esquema completo das fontes de alimentação do segundo anemômetro CTA desenvolvido – parte 3/3.

O primeiro estágio de amplificação, delimitação A1 na Figura 3.8, utiliza um único amplificador operacional com ganho fixo em 112, sendo implementado na configuração de amplificador diferencial. Para isso, foi utilizado o A. O. modelo LM 318 da empresa *National Semiconductor Inc.*, o qual apresenta características dinâmicas superiores em relação ao modelo LF 353, utilizado no circuito do primeiro protótipo. Os benefícios destas características são discutidas e comparadas no Capítulo 5.1. O LM 318 requer compensação em frequência através de componentes externos, sendo realizada pelos capacitores $C20$ e $C21$, no entanto, não é obrigatória.

Este primeiro estágio de amplificação permite a correção da tensão de saída residual (*offset*) do A. O. $X1$, sendo este procedimento realizado unindo-se os pontos Va e Vb , desconectados do circuito da ponte de Wheatstone, e ligando-os ao ponto de tensão nula (GND). Com o auxílio de um mili-voltímetro, ajusta-se $R31$ até que a tensão de saída de $X1$ seja nula (0 V), ou a mais próxima de zero possível.

O Segundo estágio de amplificação – delimitação A2 da Figura 3.10 – e o amplificador de corrente para alimentação da ponte – delimitação *boost* – também utilizam o A. O. LM 318, sendo necessário para manter as mesmas características de tempo de resposta e estabilização para o circuito de malha fechado do anemômetro. Este segundo estágio de amplificação foi implementado na configuração de amplificador diferencial, o qual soma a tensão do primeiro estágio de amplificação – A1, com a tensão de polarização (*bias*) proveniente do circuito formado pelo A. O. $X4$, modelo TL 071 – ponto SAIDA. Uma vez que o segundo estágio de amplificação possui um ganho fixo de 10 e o primeiro estágio um ganho fixo de 112, juntos apresentam um ganho geral de 1120.

Novamente foi utilizado uma etapa *Darlington* de amplificação em corrente (montagem em cascata de dois transistores), formada pelos transistores $Q3$ e $Q4$. A alimentação da ponte é realizada com uma fonte de tensão de maior potência, já que este segundo protótipo permite a utilização de sondas em velocidades mais elevadas.

Cada amplificador operacional deste novo circuito também utiliza uma alimentação simétrica de ± 15 V, desacoplada do restante do circuito com o uso dos indutores $L1$ até $L6$ de 100 μ H cada, juntamente com os capacitores $C1$ até $C6$ de 0.1 μ F. O desacoplamento da alimentação dos A. O. reduz consideravelmente a passagem de ruídos de altas frequências para estes componentes, permitindo sua operação dentro de níveis toleráveis de ruído da fonte.

A tensão simétrica de ± 15 V é produzida com a divisão da tensão total de entrada (30 V),

a partir de uma fonte simples de alimentação. Esta montagem tem como objetivo evitar o uso de uma fonte dupla, uma vez que o consumo em corrente dos componentes alimentados com tensão simétrica é muito baixo, da ordem de poucos miliampéres. Este circuito é apresentado na Figura 3.11. A fonte de alimentação 2, proveniente de um equipamento externo, é responsável em alimentar o circuito da ponte de Wheatstone e, conseqüentemente, o sensor de fio quente. Sua característica principal é de suportar grandes variações de corrente com o mínimo de flutuação de sua tensão de saída.

Ambas as fontes de alimentação utilizadas nesta montagem são de corrente contínua, convertida a partir da rede elétrica de 110/220 V de 60 Hz. Devido a isto, foi utilizado um filtro passivo tipo LC (indutor e capacitor), dimensionado para deixar passar somente baixas freqüências, não superiores a 40 Hz, de forma a minimizar ao máximo os ruídos espúrios e freqüências harmônicas provenientes da rede elétrica local. Este filtro está ilustrado na Figura 3.11.

Quanto maior a velocidade do escoamento sobre a sonda, maior será também a corrente elétrica que deverá atravessar o filamento de forma a manter sua temperatura constante. Assim, o transistor *Q4* deve ser montado num dissipador de calor, apropriado para minimizar os efeitos da temperatura neste componente.

A chave *S1*, mostrada na Figura 3.11, atua como chave geral do sistema, colocada em série com o diodo *D1*. Este componente é responsável em evitar que erros de inversão de polaridade da fonte venham a danificar o circuito do anemômetro.

As chaves *S3*, *S4* e *S5* são *jumpers*, possuindo funções diversas no circuito mostrado na figura 3.8. A chave *S3*, como já explicado, coloca ou não o resistor *Re5* no circuito da ponte. A chave *S4* é responsável em abrir o circuito de malha fechada do anemômetro, permitindo assim a sua utilização no modo CCA e ajustar a tensão de polarização ou de *bias*, através do resistor ajustável *R16*. A chave *S5* permite o ajuste do valor da resistência de sobre-aquecimento (*overheat*), abrindo o circuito da ponte de Wheatstone. Para realizar este ajuste, basta acoplar um ohmímetro entre os pontos *Vc* e *Vd* e ajustar o potenciômetro de precisão *Radj*, mostrado na Figura 3.8.

A Figura 3.12 mostra a vista externa do segundo protótipo em sua caixa construída com chapas de alumínio. Na Figura 3.13 temos uma vista de sua parte traseira interna, sem sua tampa de proteção, mostrando seus circuitos e interligações.

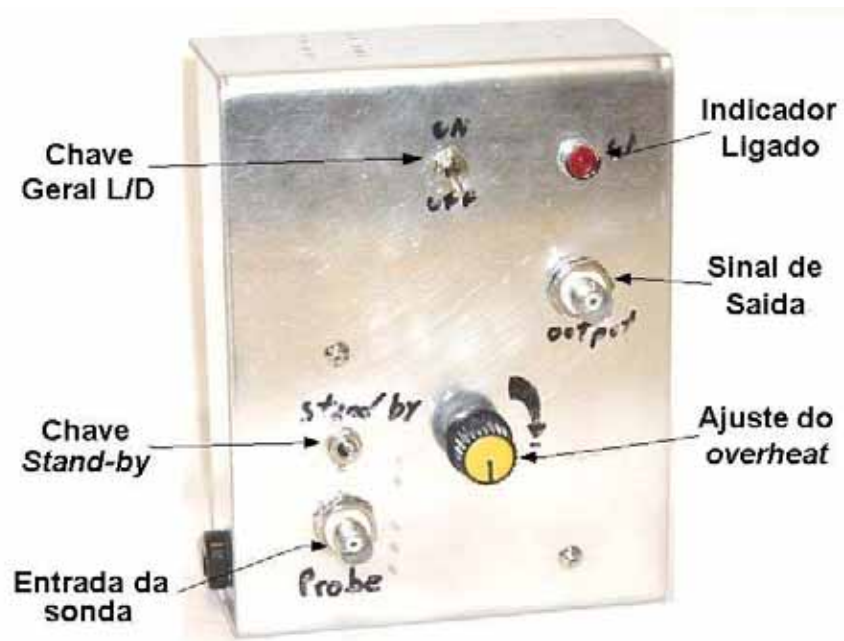


FIGURA 3.12 – Segundo protótipo do anemômetro de fio quente – vista frontal.



FIGURA 3.13 – Segundo protótipo do anemômetro de fio quente – vista traseira interna.

De forma ilustrativa, a Figura 3.14 mostra uma vista em detalhe da montagem dos componentes eletrônicos do segundo protótipo numa placa padrão para montagens definitivas. Esta placa reduz o tempo de projeto de placas de circuito impresso exclusivas. Na placa de circuito impresso mostrada na Figura 3.15 estão montados o circuito da ponte de Wheatstone e seu amplificador de corrente.

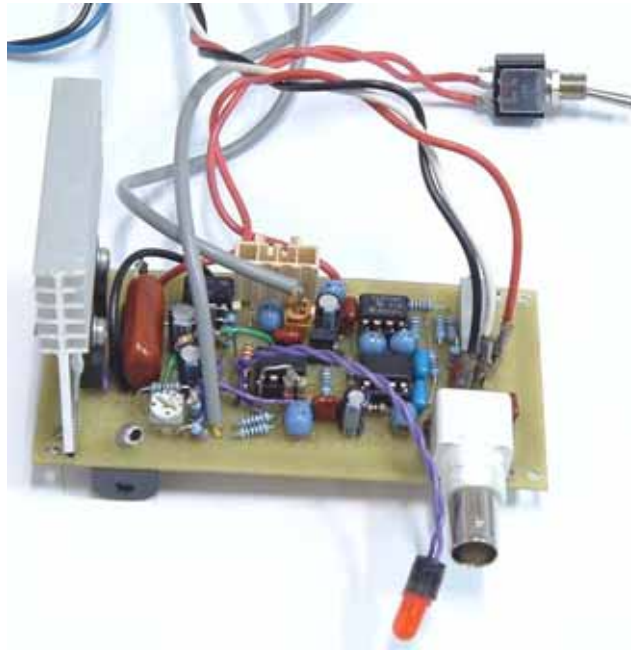


FIGURA 3.14 – Placa de circuito impresso do segundo protótipo do anemômetro – Parte 1/2.



FIGURA 3.15 – Placa de circuito impresso do segundo protótipo do anemômetro – Parte 2/2.

Capítulo 4

Metodologia Experimental

O desenvolvimento do anemômetro CTA neste trabalho contou com a realização de diferentes testes visando sua calibração estática e dinâmica, além de sua aplicação na medida do perfil de velocidade de um túnel de vento tipo soprador. Estes procedimentos experimentais são apresentados nos capítulos seguintes.

4.1 – Segundo protótipo do anemômetro CTA

Uma alternativa para a análise dinâmica de circuitos eletrônicos complexos, a exemplo do anemômetro trabalhando no modo CTA, consiste em utilizar programas de computadores destinados a simular numericamente o comportamento transiente de todo o circuito, ou em partes, visando prever e testar seu funcionamento.

Tanto o primeiro, quanto o segundo protótipo dos anemômetros de fio quente desenvolvidos neste trabalho, foram projetados com o auxílio do programa *MicroCap*® v7.0, já apresentado nos Capítulos 3.1 e 3.2. Este programa, no entanto, foi mais utilizado no projeto e durante os testes com o segundo protótipo do anemômetro.

A simulação dos sub-circuitos do segundo protótipo teve como objetivo principal facilitar o dimensionamento de alguns componentes eletrônicos, além de permitir a comparação dos resultados simulados com os dados obtidos experimentalmente, principalmente com relação a sua resposta em frequência.

Para a realização dos testes simulados, foi utilizado um computador convencional, tipo PC, com processador *Intel Pentium*® III, trabalhando na frequência de 550 MHz com 256 MB de memória RAM.

Os ensaios experimentais do circuito eletrônico do segundo protótipo do anemômetro

foram realizados com um gerador de sinais *EMG*, de fabricação Húngara, modelo TR-0458/D, juntamente com um osciloscópio digital *Tektronix*, modelo TDS 220.

Os estágios de amplificação A1 e A2, representados pelos circuitos delimitados pelas linhas tracejadas nas Figuras 3.8 e 3.10, apresentam juntos um ganho total próximo de 1120, ou seja, a diferença de tensão na ponte de Wheatstone entre os pontos V_a e V_b é, portanto, amplificada 1120 vezes em amplitude (tensão), sendo posteriormente reforçada em corrente pelo estágio *boost*, também delimitado na Figura 3.10. Este reforço permitir a realimentação do circuito da ponte, promovendo assim, a temperatura constante desejada para o fio quente.

De forma a validar o funcionamento dinâmico dos estágios de amplificação A1 e A2, estes circuitos foram simulados através da inserção de sinais senoidais e de onda quadrada, ambos de amplitude constante e frequências de oscilação de até 5 kHz. Os resultados simulados estão confrontados com resultados experimentais, sendo estes últimos obtidos através de procedimentos compatíveis com as condições impostas na simulação numérica.

Outro sub-circuito importante do segundo protótipo do anemômetro CTA é a amplificador de corrente (*boost*), mostrado na Figura 3.10. Este estágio é formado pelo amplificador operacional $X3$ e pelos transistores NPN $Q3$ e $Q4$, ligados na configuração de operação dita Darlington, já comentada. Este sub-circuito deve apresentar ganho próximo de um (unitário) e mínimo atraso de fase possível, uma vez que uma defasagem elevada entre a fase do sinal de entrada e a do sinal inserido na ponte de Wheatstone, pode desestabilizar o circuito em malha fechada do anemômetro.

Tanto para realizar a simulação numérica, quanto o teste experimental, o resistor $R8$, mostrado no circuito da Figura 3.10, foi desconectado do amplificador operacional $X2$, passando a receber assim um sinal senoidal e outro de onda quadrada, ambos com frequências de 100 kHz, conforme indica a Figura 4.1.

Os testes do circuito do segundo anemômetro com sua malha fechada também foram realizados numérico e experimentalmente. Contudo, os testes experimentais que visam sua calibração em frequência são obrigatoriamente realizados com o circuito operando em malha fechada. Devido a isso, os resultados apresentados na seção 5.5 promovem tanto o teste do circuito trabalhando em malha fechada, quanto sua calibração em frequência, baseado nos conceitos teóricos apresentados no Capítulo 2.5.1.

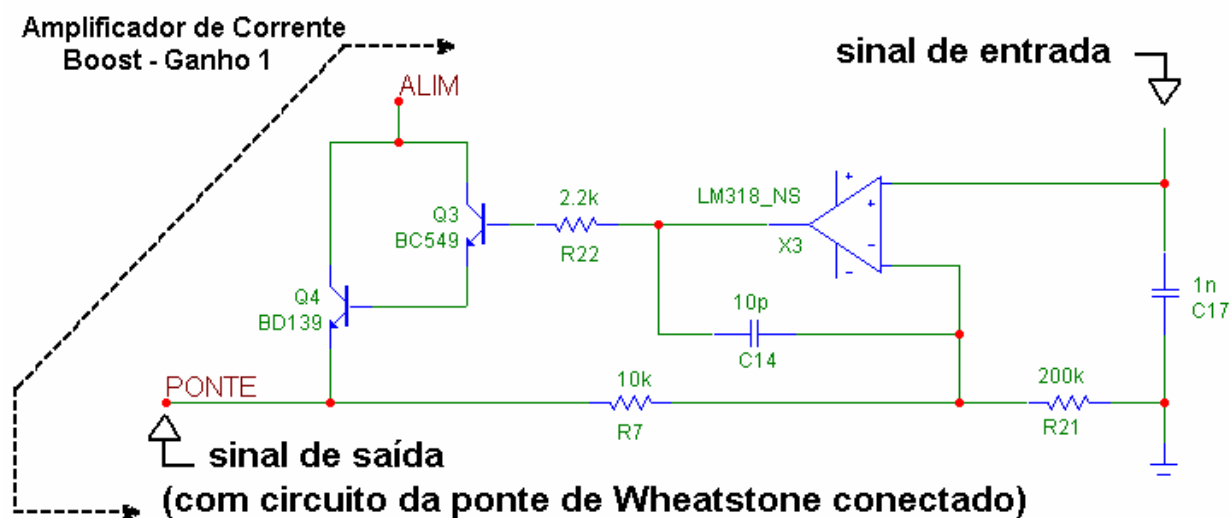


FIGURA 4.1 – Esquema de teste e simulação do circuito amplificador de corrente do segundo protótipo do anemômetro.

4.2 – Calibração estática

Foram utilizadas efetivamente três sondas, de um total de cinco sondas, todas construídas com fios de tungstênio. Estas sondas são modelos comerciais, originalmente produzidas pela empresa *Dantec Dynamics Inc.*. Os filamentos destas sondas foram recondicionados, sendo substituídos através de um processo de solda por contato, exceto na sonda da Figura 4.2(a), que apresenta filamento original. Esta sonda possui um fino revestimento (*plated*) de platina, característica essa típica das sondas originais da *Dantec*.

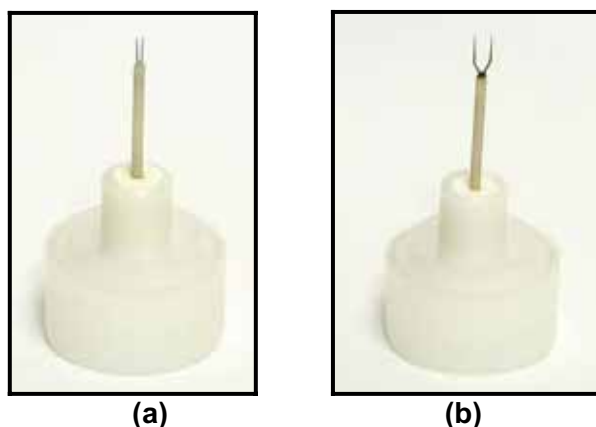


FIGURA 4.2 – Sondas com fio de tungstênio (a) de 5 μm de diâmetro e (b) de 12 μm .

A sonda da Figura 4.2(b) foi recondicionada com fio de 12 μm de diâmetro, possuindo 3 mm de comprimento. A sonda da Figura 4.3(a) é parecida com a sonda da Figura 4.2(a), sendo

recondicionada com fio de 5 μm e 1,25 mm de comprimento. A sonda da Figura 4.3(b) foi recondicionada com fio de 5 μm e 3 mm de comprimento, sendo muito parecida com a sonda da Figura 4.2(b). A sonda mostrada na Figura 4.3(c) possui uma geometria adequada para medição da camada limite, apresentando um filamento com comprimento de 3 mm. Esta sonda foi calibrada com o uso de um tubo de Pitot no interior da seção de testes de um túnel de vento, conforme detalhado no Capítulo 5.3.

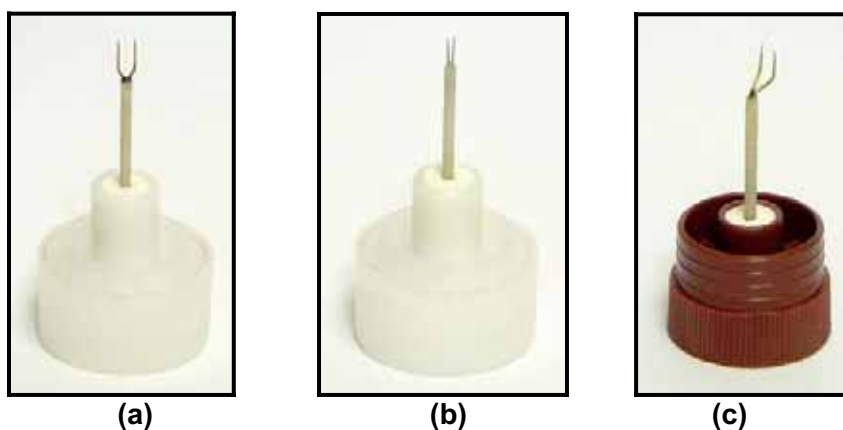


FIGURA 4.3 – Sondas com fio de tungstênio (a) de 5 μm de diâmetro e (b) de 12 μm .

As sondas da Figura 4.2 foram utilizadas junto com o primeiro protótipo do anemômetro e calibradas através do método do jato livre. As sondas da Figura 4.3(a) e 4.3(b) não foram calibradas, já que também não foram efetivamente utilizadas neste trabalho.

Todas as sondas foram caracterizadas de forma a obter o valor preciso de sua resistência elétrica, conforme os procedimentos detalhados no Capítulo 4.4.

4.2.1 – Calibração por jato livre

Para realizar a calibração estática das sondas de fio quente, foi utilizado um dispositivo de calibração de sondas construído durante os trabalhos de GONÇALVES (2001). Este dispositivo, juntamente com um manômetro diferencial, foram aplicados na calibração estática das sondas de fio quente utilizadas junto com o primeiro protótipo do anemômetro, conforme mostra a Figura 4.4.

O manômetro diferencial é acoplado na tomada de pressão representado pelo ponto 3 da Figura 4.5. Esta figura ilustra as partes constituintes do dispositivo de calibração, sendo este

baseado no modelo 1125 comercializado pela empresa *TSI Incorporated*. Desta forma, é possível obter o valor da pressão de estagnação e, conseqüentemente, o valor da velocidade do jato na saída do orifício calibrado com o uso da Equação (2.38).



FIGURA 4.4 – Manômetro diferencial eletrônico e dispositivo de calibração por jato livre.

O manômetro utilizado é o modelo EJ - 120 da empresa *Yokogawa Electric Corp.*, possuindo uma pressão diferencial máxima de 100 mm H₂O e precisão de 0,1 % de fundo de escala. De forma a permitir uma confiabilidade maior dos dados de pressão obtidos com o uso do manômetro diferencial da *Yokogawa*, sua calibração de fábrica foi conferida através da comparação de seu sinal de saída com a leitura da pressão de um manômetro de coluna de água. Este procedimento e suas incertezas estão descritos no Apêndice A.

A sonda é posicionada na saída do orifício do calibrador, conforme Figura 4.6. Feito isso, o dispositivo é alimentado com ar-comprimido, sendo a pressão de saída ajustada através da válvula controladora de fluxo, (ponto 20 da Figura 4.5).

Para cada pressão ajustada pela válvula e medida pelo manômetro diferencial, o respectivo valor da tensão de saída do anemômetro e a leitura do manômetro são anotados para que, assim, o valor da velocidade do jato livre possa ser correlacionado com a tensão de saída do anemômetro. Este procedimento levou a construção de um gráfico velocidade \times tensão para a sonda da Figura 4.2(a) e outro para a sonda da Figura 4.2(b), o qual permitiram ainda, a extração de suas respectivas curvas de calibração estática.

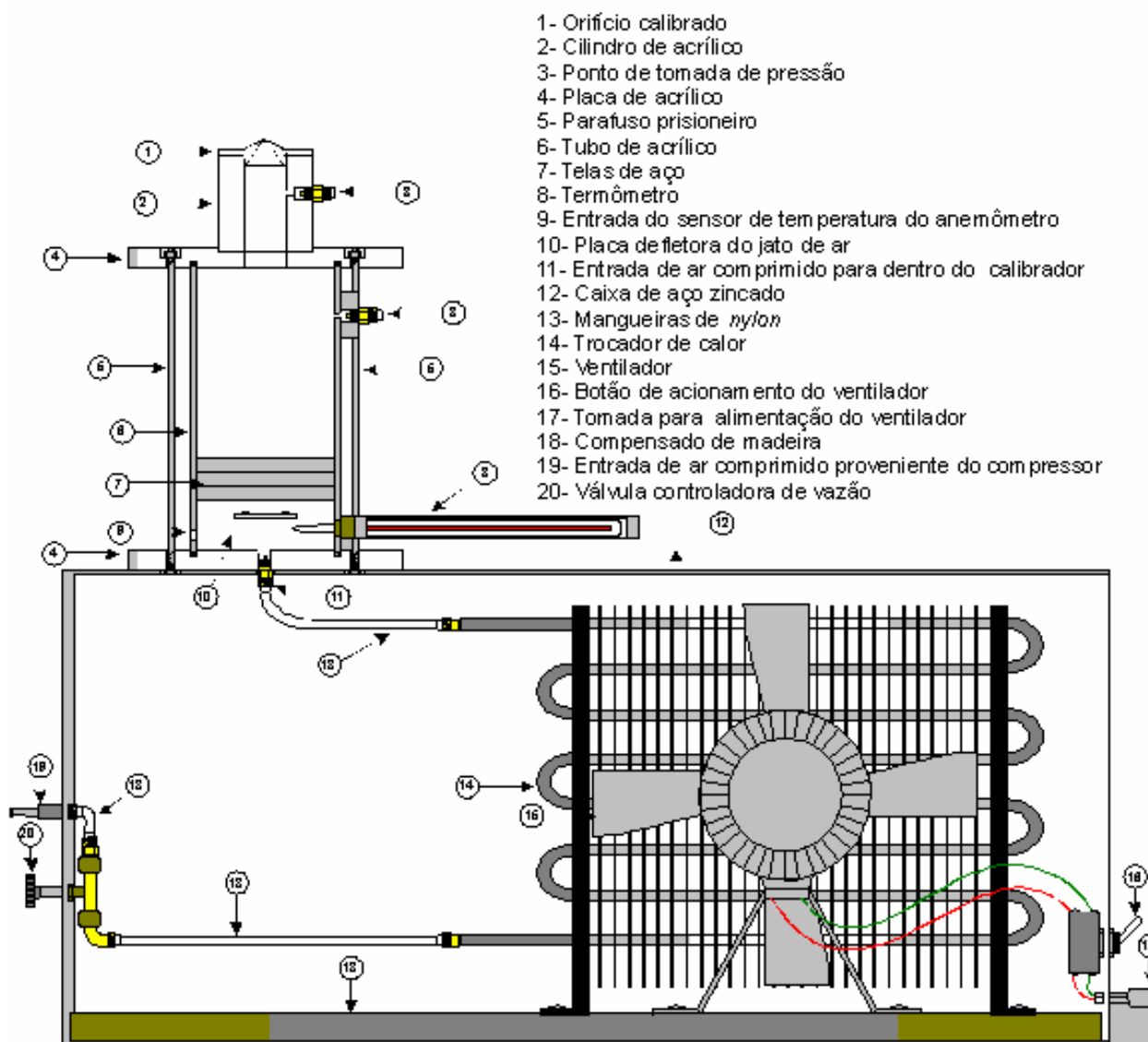


FIGURA 4.5 – Vista esquemática do calibrador de sondas de fio quente baseado no modelo 1125 da *TSI Incorporated*.

A velocidade de saída do jato obtida com a Equação (2.38) é também dependente do valor preciso da densidade do ar no momento em que é realizado o processo de calibração. Desta forma, as incertezas associadas na determinação da densidade do ar em função da temperatura ambiente do ambiente de trabalho e da pressão atmosférica local estão descritas no Apêndice B.

Eventualmente, este procedimento de calibração de sondas de fio quente pode também ser realizado para diferentes temperaturas do fluido de trabalho. Esta metodologia é possível, já que o calibrador de sondas da Figura 4.5 pode controlar a temperatura do ar que toca a sonda através do seu trocador de calor (item 14 da Figura 4.5) e seu ventilador (item 15), sendo a temperatura monitorada com o uso de um termômetro, apropriadamente dimensionado e inserido

no calibrador (ponto 8 da Figura 4.5). Neste trabalho, a temperatura do fluido foi mantida e considerada constante, não sendo necessário, desta maneira, realizar a correção de temperatura na curva de calibração.

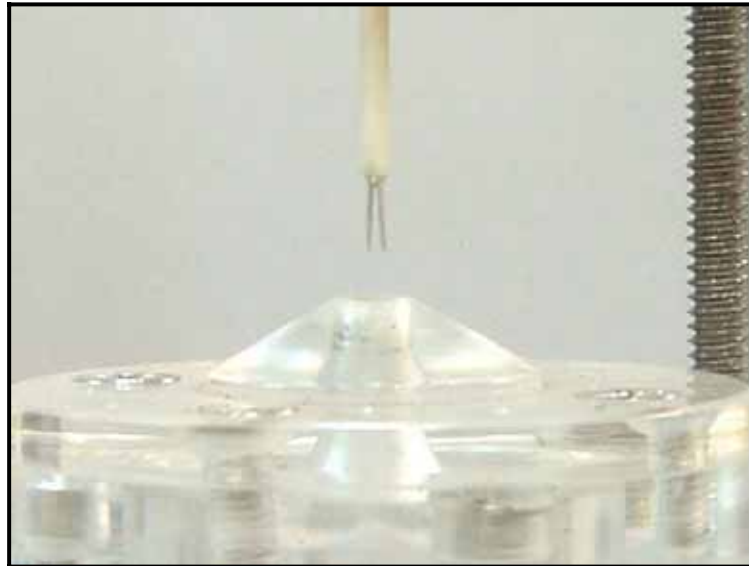


FIGURA 4.6 – Detalhe do posicionamento da sonda de fio quente na saída do orifício do jato livre do dispositivo de calibração.

4.2.2 – Calibração com tubo de Pitot

A sonda para camada limite mostrada na Figura 4.3(c) foi calibrada através do procedimento de calibração estática de sondas de fio quente com tubo de Pitot, (ou de Prandtl), apresentados no Capítulo 2.4.5. Esta calibração foi realizada com o segundo protótipo do anemômetro de fio quente.

A utilização desta sonda permitiu a determinação do perfil de velocidade do escoamento, em pontos específicos a jusante de uma esfera, posicionada na seção de testes de um túnel aerodinâmico. Estes resultados são apresentados no Capítulo 5.3.

Sonda e tubo de Pitot foram posicionados lado-a-lado na região central da seção de testes do túnel, conforme mostra as Figuras 4.7(a) e 4.7(b).

Os valores da tensão de saída do segundo protótipo do anemômetro de fio quente foram registrados simultaneamente com a tensão de saída do manômetro diferencial, o mesmo equipamento utilizado na calibração com jato livre da seção 4.2.1.

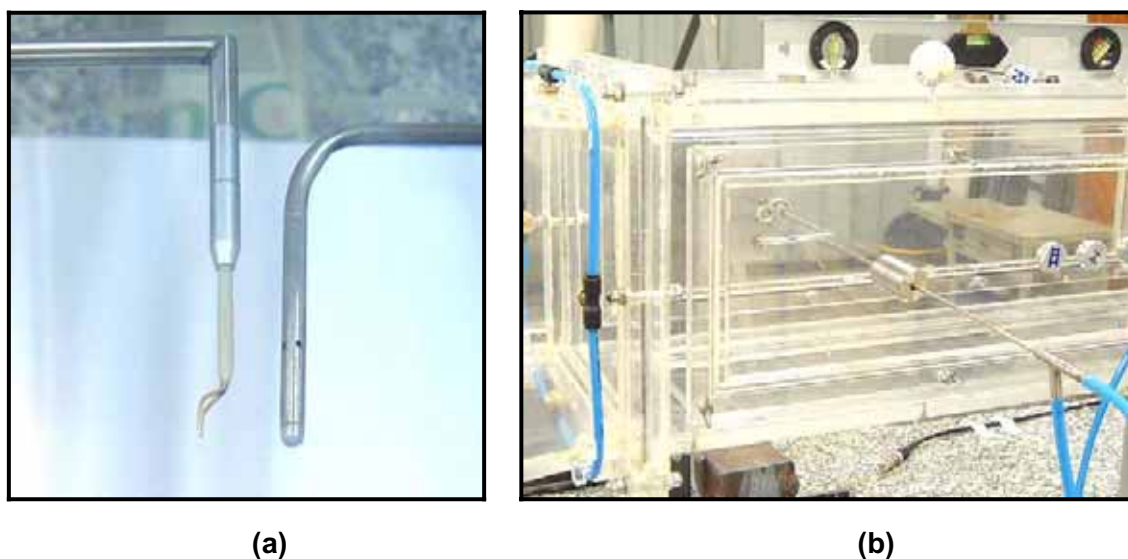


FIGURA 4.7 – Posicionamento da sonda de fio quente e tubo de Pitot no interior da seção de testes do túnel aerodinâmico. (a) vista superior e (b), vista lateral externa.

As duas entradas do manômetro diferencial são acopladas na tomada de pressão estática e total do tubo de Prandtl, conforme esquema da Figura 2.28(b). A leitura da tensão de saída do manômetro diferencial é convertida para valores da diferença de pressão, sendo a velocidade do escoamento obtida com o uso da Equação (2.44). A conversão da tensão de saída do manômetro para valores de pressão diferencial está apresentada no Apêndice A.

A incerteza da velocidade do escoamento medida com o tubo de Pitot também é dependente da densidade do ar, da mesma forma que acontece com a calibração com jato livre. Desta forma, as incertezas associadas ao uso deste método, juntamente com a Equação (2.44), são apresentadas e discutidas no Apêndice B.

Conforme BRUUN *et al.* (1988), esta metodologia não é adequada para calibração de sondas de fio quente em escoamentos de baixas velocidades, fato este reforçado por LANSPEARY (1997), o qual utilizou este procedimento em seu trabalho. Seus resultados mostram que as incertezas no valor da velocidade do escoamento crescem à medida que a diferença de pressão obtida com o tubo de Pitot fica menor. Para este experimento, o limite mínimo de velocidade ficou a cargo da sensibilidade do manômetro diferencial da *Yokogawa*.

Um cuidado especial deve ser tomado para posicionar o tubo de Pitot na direção paralela em relação à direção do escoamento, além de posicionar a sonda o mais próximo possível do orifício de tomada de pressão do tubo de Pitot.

4.3 – Ensaios no túnel aerodinâmico

Para o levantamento do perfil de velocidade do escoamento ao redor de uma esfera, foi utilizado um túnel de vento tipo soprador de circuito aberto. A Figura 4.8 mostra uma vista geral do túnel de vento em sua bancada de granito de base metálica.

Praticamente todas as partes deste túnel de vento foram construídas com chapas de acrílico de 10 mm de espessura. Seu comprimento total é de 3,25 m com largura máxima, na câmara de suavização, de 0,8 m.



FIGURA 4.8 – Vista geral do túnel aerodinâmico da Unesp - IS.

Este túnel é impulsionado por um turbo ventilador radial da marca OTAM – Ventiladores Industriais Ltda, modelo LMS-355, de fabricação nacional, com motor trifásico de 4 CV e rotação nominal de 3450 rpm. De forma a permitir o controle preciso do fluxo de ar na seção de

teste, este motor é controlado com o uso de um inversor de frequência da marca WEG – Motores S/A, modelo CFW-08, o qual modifica a frequência da tensão na entrada do motor, permitindo, assim, o ajuste de sua velocidade de rotação. A Figura 4.9 mostra duas vistas deste impulsor e seu controlador de velocidade.

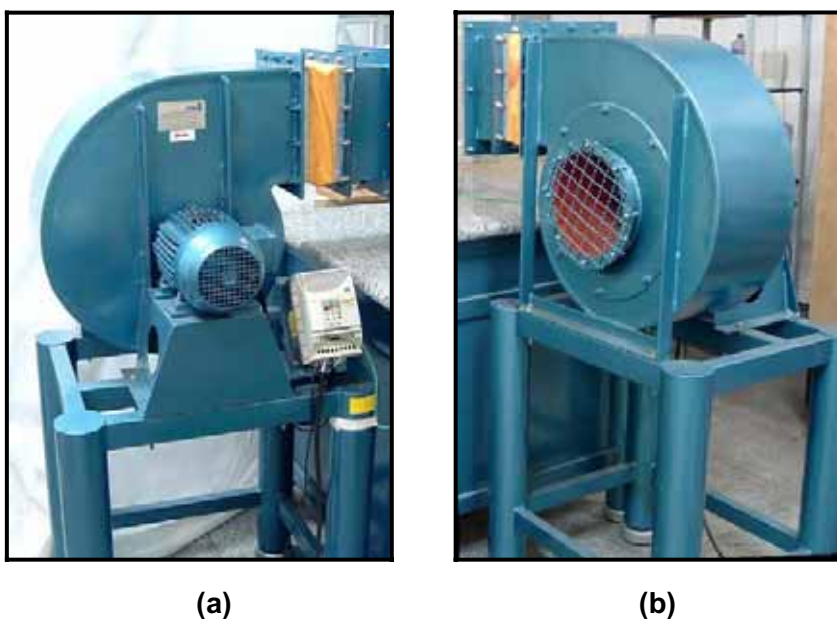


FIGURA 4.9 – (a) vista lateral do ventilador radial e inversor de frequência para o controle da velocidade de rotação e (b), vista posterior mostrando a tomada de ar.

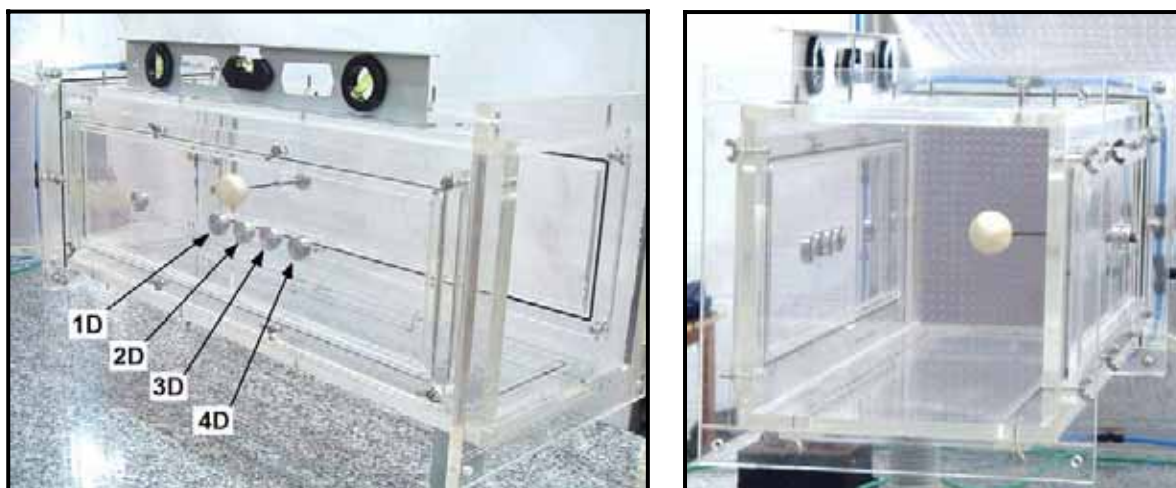
A seção de testes deste túnel de vento é quadrada, com paredes paralelas na horizontal, com dimensões de 200×200 mm por 600 mm de profundidade. Este túnel permite ensaios com velocidade de até 50 m/s quando o motor é submetido a sua frequência máxima de operação.

Durante os trabalhos de SILVA *et al.* (2005), realizado neste túnel de vento, a seção de teste foi preparada para permitir a fixação de um corpo de prova esférico, fixado através de uma pequena haste cilíndrica. Este corpo de prova é posicionado no centro geométrico da seção de teste, conforme mostra a Figura 4.10(b).

Na parede lateral, oposta ao corpo de prova, foram realizados quatro furos, espaçados regularmente com o valor nominal do diâmetro da esfera. Deste modo, cada furo abriga uma escotilha roscável, sendo denominadas de escotilhas 1D, 2D, 3D e 4D, permitindo o posicionamento de instrumentos na razão de 1, 2, 3 e 4 vezes o diâmetro da esfera. A Figura 4.10(a) mostra estas escotilhas e as suas respectivas indicações usadas no texto.

Devido as diferenças construtivas entre o comprimento do tubo de Pitot e o comprimento da haste / suporte da sonda de fio quente, a razão do espaçamento entre as escotilhas para a

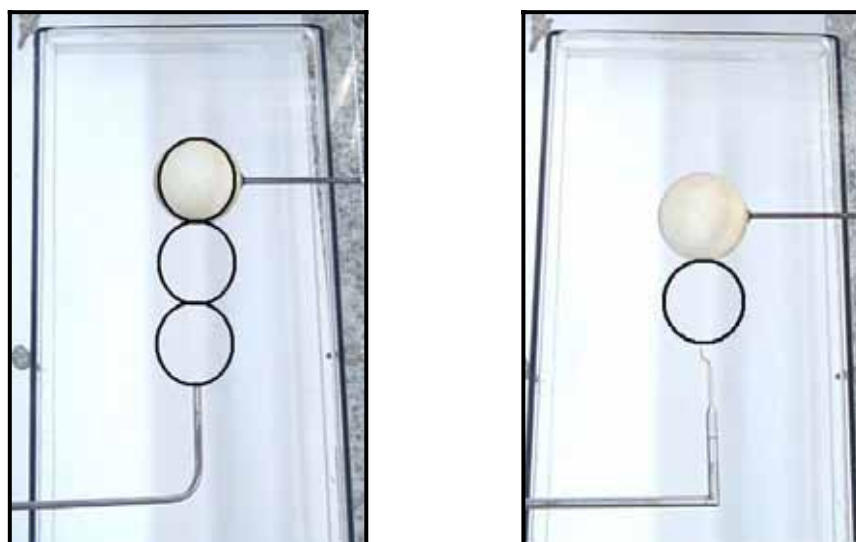
sonda de fio quente segue a proporção de 1, 2, 3 e 4 vezes o diâmetro da esfera. A Figura 4.11(a) ilustra o posicionamento do tubo de Pitot na escotilha D1, estando, assim, numa distância de aproximadamente duas vezes o diâmetro da esfera. Já a Figura 4.11(b) mostra a situação em que a haste / suporte da sonda de fio quente está fixada na escotilha 1D, deixando seu filamento a uma distância de um diâmetro da esfera.



(a)

(b)

FIGURA 4.10 – Detalhe dos quatro pontos de fixação de instrumentação na seção de teste. (a) vista lateral externa e (b), vista da saída do túnel.



(a)

(b)

FIGURA 4.11 – Vista da seção de teste com ilustração da diferença do espaçamento para (a) tubo de Pitot situado a duas vezes o diâmetro da esfera e (b), sonda de fio quente situada a uma distância de um diâmetro da esfera, ambos fixados na primeira escotilha (1D).

No trabalho de SILVA *et al.* (2005), foi levantado o perfil de velocidades médias na jusante (esteira) da esfera, para três velocidades distintas do escoamento, sendo $Re = 30000$, 46000 e 55000 . Estas tomadas de velocidade foram obtidas com o tubo de Pitot, acoplado num manômetro de tubo inclinado, posicionado nas escotilhas 2D, 3D e 4D.

Uma vez que esta distribuição de velocidades é simétrica em relação à seção de teste do túnel, somente foram registradas as velocidades de uma metade da seção.

De forma a obter resultados compatíveis com o trabalho de SILVA *et al.* (2005), o segundo protótipo do anemômetro de fio quente, juntamente com a sonda da Figura 4.3(c) de geometria para camada limite, foram aplicados na medição do perfil de velocidades na esteira da esfera.

Inicialmente, foi necessário levar o perfil de velocidades na seção de teste do túnel aerodinâmico sem a influência da esfera, para $Re = 30\ 000$. Desta forma, a sonda foi posicionada nas escotilhas 2D e 4D sem a presença da esfera, partindo do centro até uma distância muito próxima da parede da seção de testes, sem que ocorra o toque da sonda. Este procedimento foi realizado com o auxílio de um posicionador milimétrico, mostrado na Figura 4.12. Este equipamento permite o posicionamento preciso, tanto do suporte de sondas de fio quente, quanto o tubo de Pitot.



FIGURA 4.12 – Posicionador milimétrico para deslocamento da sonda de fio quente e tubo de Pitot na seção de testes do túnel aerodinâmico.

A aquisição dos valores da tensão de saída do segundo protótipo do anemômetro foi realizada com o uso de um osciloscópio digital da empresa *Tektronix Inc.*, modelo TDS 220.

Estes valores foram descarregados num computador, via porta serial RS-232, com o uso do programa *WaveStar*[®], destinado exclusivamente para a operação e controle dos osciloscópios da empresa *Tektronix Inc.*.

Simultaneamente com a aquisição de dados pelo osciloscópio, a tensão de saída do anemômetro foi monitorada a todo instante através de um multímetro da empresa *Protek Inc.*, modelo 506, capaz de mostrar o valor eficaz da tensão (RMS) no seu mostrador. Estes instrumentos são apresentados na Figura 4.13.

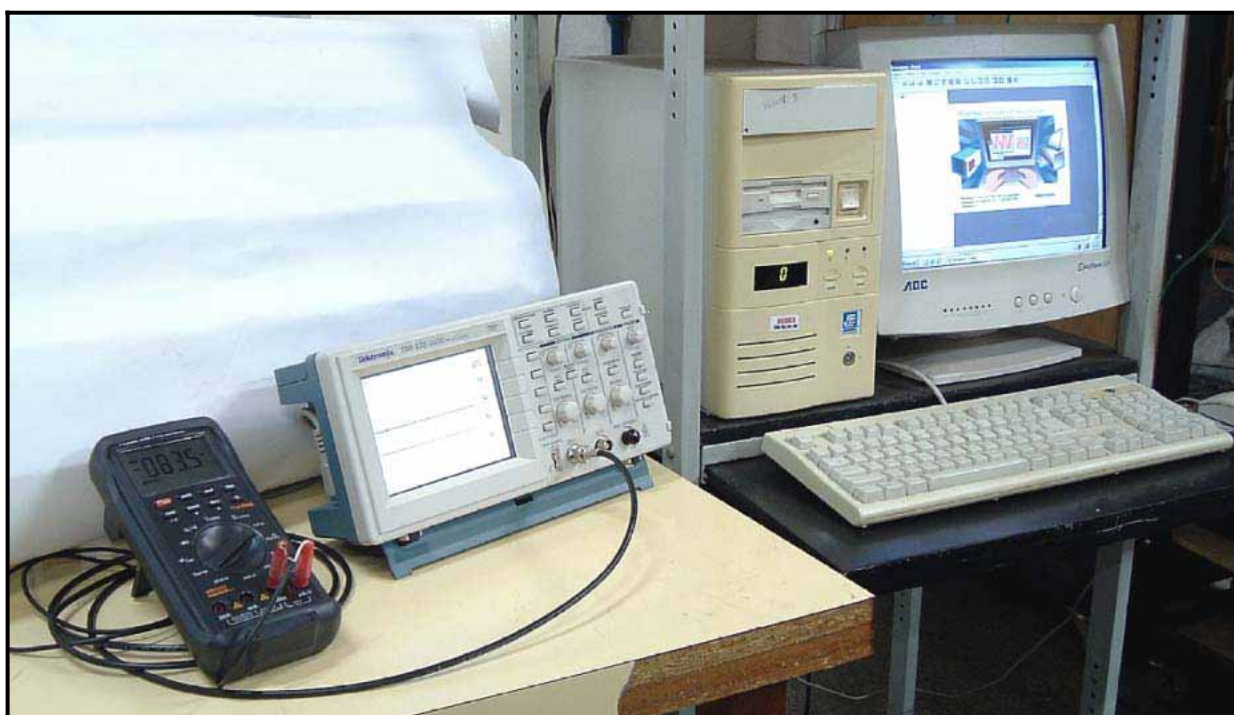


FIGURA 4.13 – Multímetro e osciloscópio digital conectado num micro computador, utilizados para realização de aquisição de dados para o experimento.

4.4 – Verificação da resposta em frequência

A verificação da resposta em frequência do primeiro e do segundo protótipo de anemômetro de fio quente desenvolvido neste trabalho foi realizada de duas formas distintas, porém compatíveis entre si.

A resposta em frequência do circuito eletrônico do primeiro protótipo foi avaliada num experimento implementado seguindo a metodologia proposta em FIEDLER (1978), sendo descrita na seção 4.4.1.

Ambos os protótipos também foram avaliados em frequência baseados no teste com gerador de sinais, apresentado no Capítulo 2.5.1, seguindo uma metodologia padrão aplicada em várias referências, por exemplo WYNGAARD & LUMLEY (1967), WEIDMAN & BROWAND (1975), LU (1979), CITRINITI *et al.* (1994) e LEKAKIS (1996), dentre outros. Os procedimentos experimentais para esta análise são apresentados na seção 4.4.2, para ambos os protótipos.

4.4.1 – Verificação com *laser*

Para a realização do experimento de calibração em frequência do primeiro protótipo do anemômetro, foi utilizado um *laser* de 15 mW do tipo He-Ne com feixe gaussiano de 1,5 mm de diâmetro e comprimento de onda em aproximadamente 663 nm, sendo esta a frequência de propagação da luz vermelha visível.

Um disco óptico perfurado (*optical chopper disk*), utilizado na modulação em frequência de feixes contínuos de luz, foi aplicado conjuntamente com um sistema de lentes focalizadoras de forma a concentrar o feixe modulado do *laser* diretamente na superfície do filamento da sonda de fio quente. O esquema da montagem experimental com estes equipamentos está ilustrado na Figura 4.14, sendo apresentado na Figura 4.15. Estes equipamentos estão dispostos numa placa de granito padrão, destinada exclusivamente ao posicionamento de instrumentos ópticos.

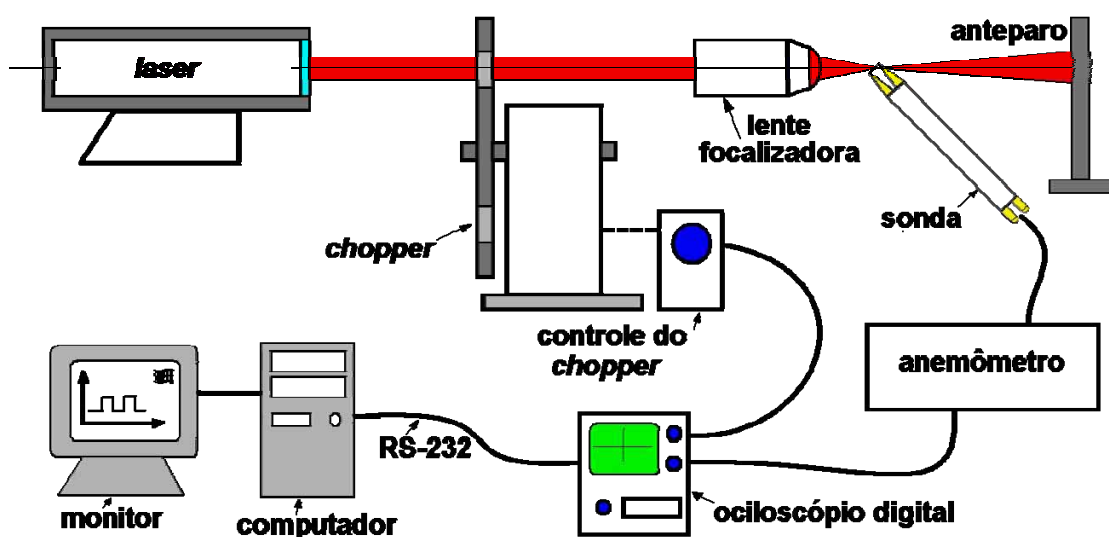


FIGURA 4.14 – Esquema da montagem experimental para calibração em frequência do primeiro protótipo do anemômetro.

O *chopper* utilizado é de fabricação norte americana da empresa *Thor Labs Inc.*, modelo MC 1000, capaz de alcançar frequências de até 10 kHz, ajustáveis digitalmente, com precisão de ± 1 Hz.

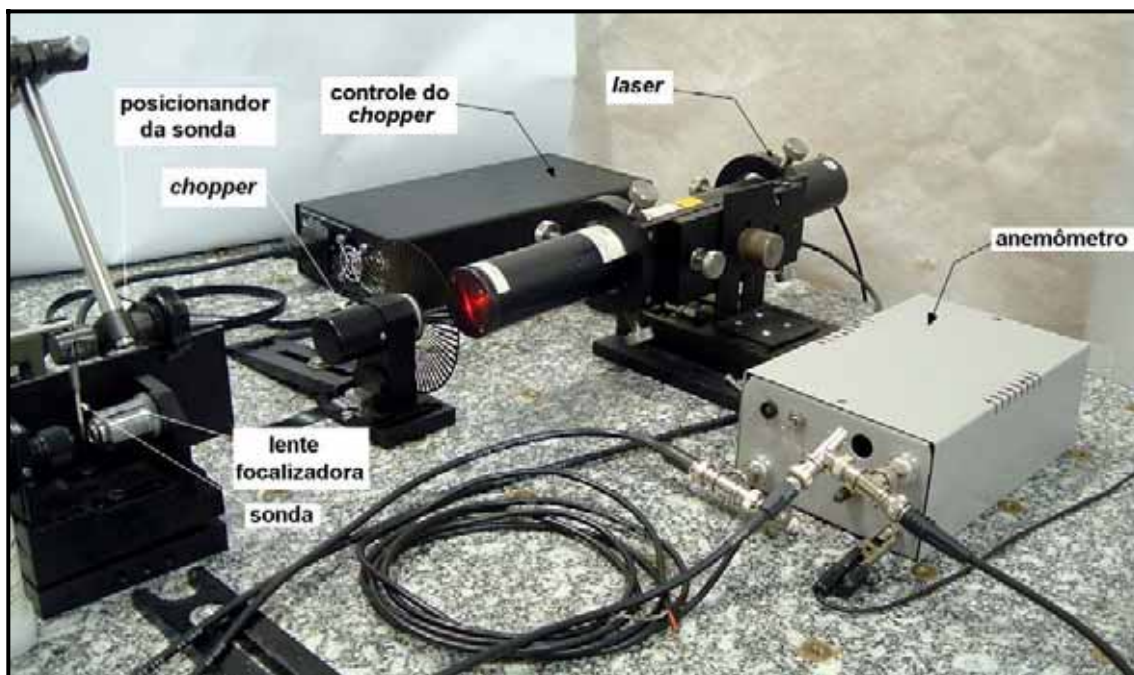


FIGURA 4.15 – Montagem experimental para calibração em frequência do primeiro protótipo do anemômetro de fio quente.

Tanto para a visualização do sinal de saída do anemômetro, quanto para o armazenamento destes dados, foi utilizado um osciloscópio digital colorido de duplo traço da empresa *Tektronix Inc.*, modelo TDS 2022. Este equipamento é capaz de realizar aquisição de dados numa taxa de amostragem de 2 GS/s (2×10^9 amostras por segundo) em uma frequência de aquisição de até 200 MHz, além de permitir a análise espectral, em tempo real, através da transformada rápida de Fourier - FFT. Estes dados são armazenados temporariamente em sua memória interna e, posteriormente, transferidos para um computador através da suas portas de comunicação serial no protocolo RS-232.

A Figura 4.16 mostra, com detalhes, alguns dos equipamentos utilizados neste experimento. A Figura 4.16(a) apresenta a lente focalizadora, responsável em concentrar o feixe do laser num ponto central do filamento da sonda. A focalização é obtida com a ajuda de um dispositivo de posicionamento – Figura 4.16(b) - com alcance ajustável. A Figura 4.16(c) mostra uma imagem detalhada do *chopper*, utilizado para transformar o feixe de luz contínua do *laser* em um sinal intermitente, tipo onda quadrada.

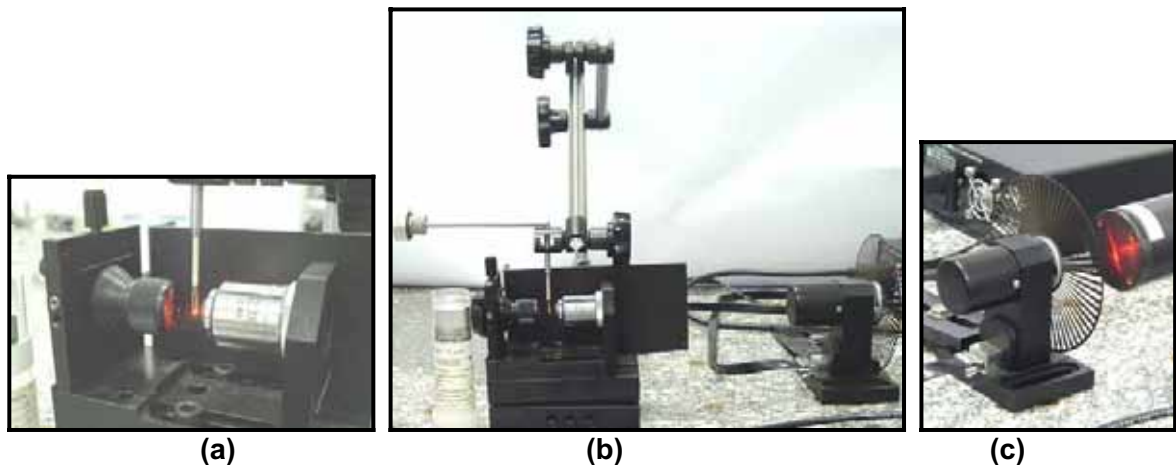


FIGURA 4.16 – Detalhes da montagem experimental: (a) lente focalizadora, (b) posicionador da sonda e (c), disco do *chopper* em frente a saída do *laser*.

A Figura 5.17 mostra o painel frontal de controle do osciloscópio e do controlador digital do disco do *chopper*.



FIGURA 4.17 – Detalhes da montagem experimental: (a) osciloscópio digital e (b), controlador digital do *chopper*.

O objetivo desta calibração consiste em obter um sinal de saída do anemômetro o mais próximo possível de um sinal de onda quadrada. A passagem do feixe do *laser* pelas ranhuras do disco do *chopper* causa sua interrupção na mesma freqüência do disco. Desta forma, o filamento da sonda é aquecido periodicamente pelo feixe concentrado do *laser*, sendo resfriado eletronicamente pelo circuito CTA do anemômetro, destinado a manter a temperatura no filamento constante. Este efeito é relatado no trabalho de FIEDLER (1978) e WEEKS *et al.* (1988).

O sinal de saída do anemômetro deve ser ajustado até que apresente um amortecimento crítico no mínimo tempo de estabelecimento possível, já que o efeito do *laser* modulado sobre a sonda equivale a uma entrada degrau no sistema, conforme ilustram as Figuras 2.19 e 2.20. Este

ajuste é realizado preferencialmente através do resistor ajustável $R21$ do primeiro protótipo, sendo este o ajuste da tensão de *bias* do circuito mostrado na Figura 3.3.

O ajuste inicial da tensão de *bias* foi obtido através da simulação numérica do circuito completo do anemômetro. Foram realizados vários testes experimentais de forma a verificar este ajuste para uma ampla faixa de frequências.

Dois canais de entrada do osciloscópio são utilizados. Um canal destinado a verificar o sinal de saída do anemômetro e ou outro, recebendo o sinal de saída do controlador do *chopper*. O sinal do *chopper* fornece a frequência com que o feixe do laser é modulado, sendo utilizado também para sincronizar (*trigger*) os sinais na tela do osciloscópio.

Para verificar qual a faixa de frequências que o circuito experimental do primeiro protótipo do anemômetro está habilitado para produzir um sinal de saída coerente, a sonda da Figura 4.2(a) foi submetida às frequências de 500, 700, 1000, 1250 e 1500 Hz. Estas frequências são ajustadas através do controle do *chopper*.

Além da verificação da forma do sinal de saída do anemômetro, uma análise espectral foi realizada, simultaneamente, com o uso da função FFT do osciloscópio digital. Estes resultados foram obtidos através da digitalização da tela do osciloscópio.

4.4.2 – Verificação com gerador de sinais

O teste com gerador de sinais constitui o procedimento mais utilizado na verificação da resposta em frequências de anemômetros CTA, de acordo com PERRY (1982), BRUUN (1995) e LOMAS (1986), dentre outras referências citadas neste trabalho.

Esta verificação em frequência foi realizada tanto no primeiro, quanto no segundo protótipo do anemômetro. O sinal é inserido no circuito da ponte de Wheatstone com o uso de um gerador de sinais, conforme esquema de ligação mostrado na Figura 2.30.

4.4.2.1 – Primeiro protótipo CTA

A ligação do gerador de sinais no primeiro protótipo do anemômetro CTA obedeceu ao esquema mostrado na Figura 4.18.

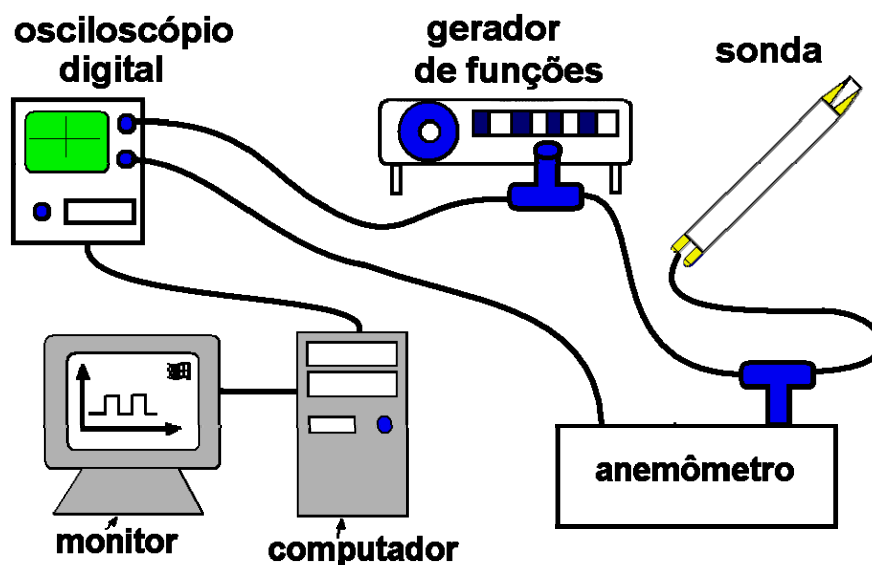


FIGURA 4.18 – Esquema da montagem experimental para calibração em frequência do anemômetro de fio quente com o uso de um gerador de sinais.

Devido ao sinal de saída do gerador de sinais apresentar uma impedância de 50Ω , típica de muitos instrumentos eletrônicos de bancada, uma atenuação em sua intensidade se faz necessária de forma a evitar o desbalanceamento da impedância da ponte de Wheatstone. Desta forma, foi utilizado um conector com uma resistência de $10 \text{ k}\Omega$ em série com o sinal de saída do gerador de sinais, introduzindo assim uma atenuação aceitável no circuito da ponte de Wheatstone, já que sua resistência equivalente é próxima de 25Ω . Este recurso reduz em aproximadamente 50 % a intensidade do sinal de saída do gerador de sinais, no entanto, não insere qualquer atraso de fase ou distorções no sinal produzido.

Para verificação da resposta em frequência, foi utilizado o mesmo osciloscópio da Figura 4.17(a), juntamente com um gerador de sinais da empresa *Tektronix Inc.* modelo CFG 253 de frequência máxima de 3 MHz. Estes equipamentos são mostrados na Figura 4.19.

Foram inseridas frequências de 500, 1000, 5000 e 10 000 Hz, tanto na forma de onda quadrada, quanto no formato de sinais senoidais, sendo estes resultados transferidos para um computador pessoal de duas maneiras: Uma através de uma rotina em Linguagem C que realiza a leitura da porta serial do osciloscópio e conforme para uma figura gráfica comum e outra, através de fotografia digital da tela do osciloscópio. O programa *WaveStar*[®] não pode ser utilizado durante este experimento.

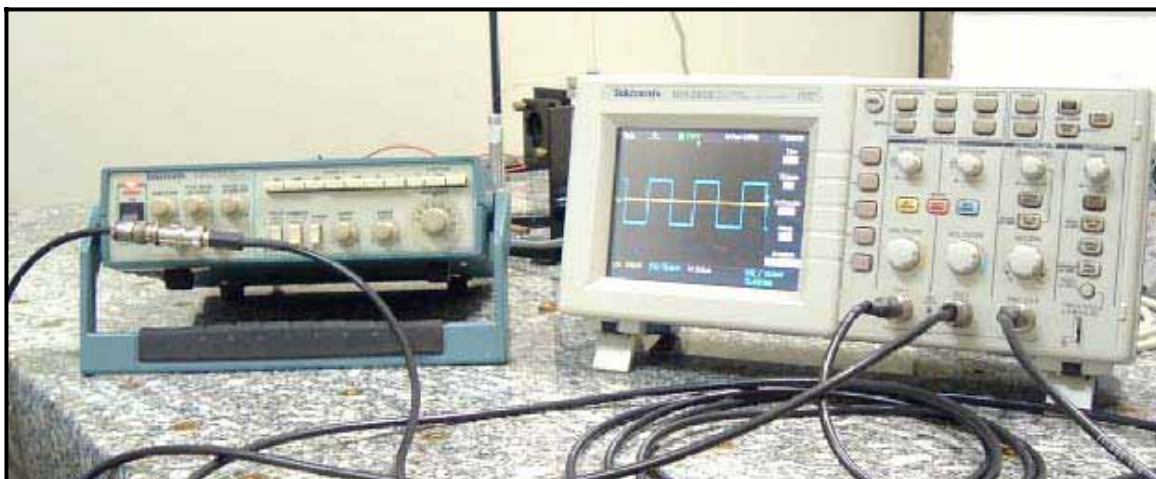


FIGURA 4.19 – Detalhe do gerador de funções e do osciloscópio utilizados no teste com gerador de sinais no circuito da ponte de Wheatstone do primeiro anemômetro.

4.4.2.2 – Segundo protótipo CTA

Os mesmos procedimentos da seção 4.4.2.1 também foram realizados na calibração em frequência do segundo protótipo de anemômetro de fio quente. Estes testes experimentais são acompanhados de sua respectiva simulação numérica, realizada com o uso do programa MicroCap®, já apresentado no desenvolvimento do circuito CTA no Capítulo 3.

Seguindo o mesmo esquema da montagem experimental da Figura 4.17, foi utilizado gerador de sinais *EMG* de fabricação Húngara, modelo TR-0458/D e um osciloscópio digital *Tektronix*, modelo TDS-220, apresentados na Figura 4.20.

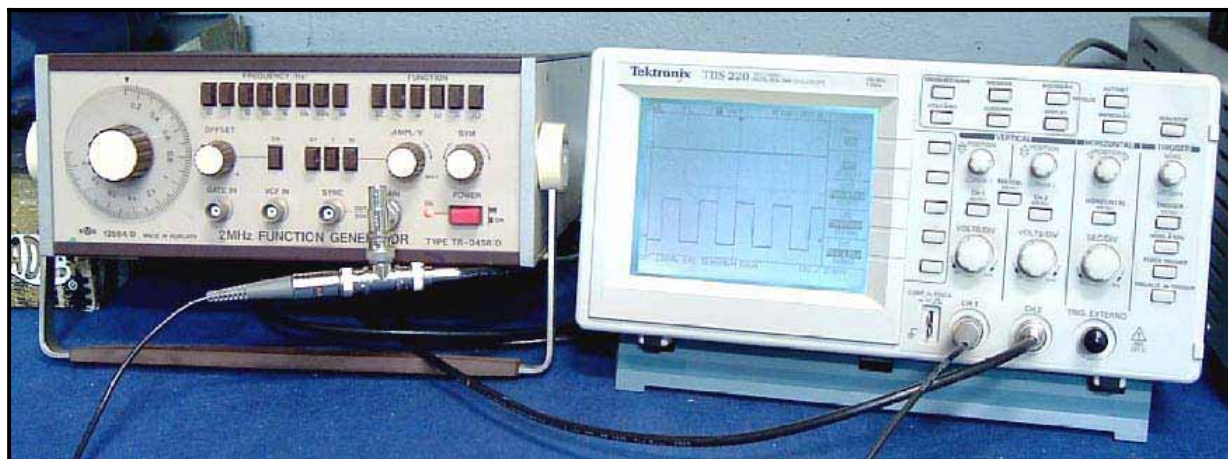


FIGURA 4.20 – Detalhe do gerador de funções e do osciloscópio utilizados no teste com gerador de sinais no circuito da ponte de Wheatstone do segundo protótipo.

O circuito CTA do segundo protótipo foi testado numa faixa de frequências de até 2 kHz, tanto para sinais senoidais, quanto de onda quadrada. Os resultados experimentais e simulados estão confrontados e discutidos no Capítulo 5.4.

4.5 – Caracterização das sondas de fio quente

De forma a obter resultados mais precisos dos ajustes de sobre-aquecimento da sonda e dos resultados simulados com os protótipos desenvolvidos, a resistência elétrica das sondas de fio quente utilizadas neste trabalho foi levantada com o uso de equipamentos exclusivos para caracterização física de filmes supercondutores. Estes resultados apresentam uma elevada precisão e confiabilidade, principalmente devido a qualidade dos instrumentos de medição utilizados. O processo de medição da resistência das sondas é esquematicamente mostrado na Figura 4.21.

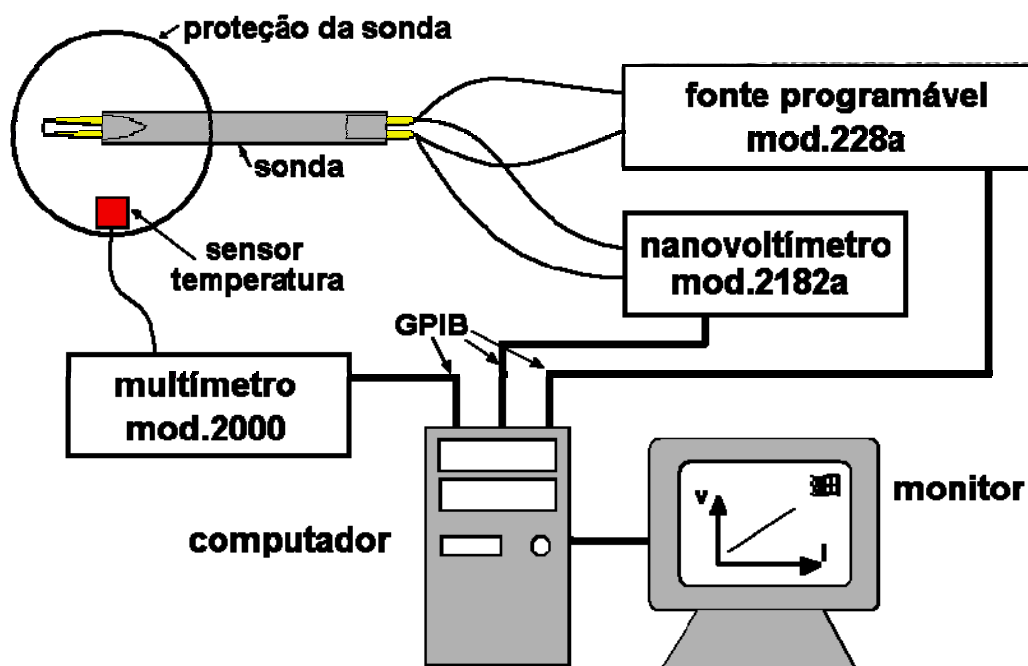


FIGURA 4.21 – Esquema simplificado do processo de medição da resistência elétrica da sonda de fio quente.

A sonda sob teste é montada numa câmara protetora de forma que a ventilação ambiente não atinja diretamente seu filamento. Um sensor de temperatura é colocado dentro desta cápsula de forma a monitorar a temperatura do filamento, já que o valor da resistência é função da temperatura.

Todos estes instrumentos são controlados por computador via barramento GPIB e programáveis, inclusive com aquisição de dados, com o uso do programa *TestPoint*[®].

A medida da resistência elétrica das sondas de fio quente é realizada de forma automatizada através de um programa especializado desenvolvido em *TestPoint*[®]. A interface gráfica deste programa é apresentada na Figura 4.22. Esta rotina comanda a fonte de alimentação programável, fazendo circular na sonda uma faixa discreta de correntes, definida pelo programa. A cada corrente inserida na sonda pela fonte, a tensão é medida pelo nanovoltímetro e imediatamente armazenada num arquivo de dados. Simultaneamente à coleta de dados, estes valores são desenhados num gráfico tensão \times corrente, permitindo o acompanhamento simultâneo da medição e de sua temperatura.

A resistência elétrica da sonda é obtida pela inclinação da reta dos dados da tensão e corrente. As incertezas deste procedimento são apresentadas no Apêndice C.

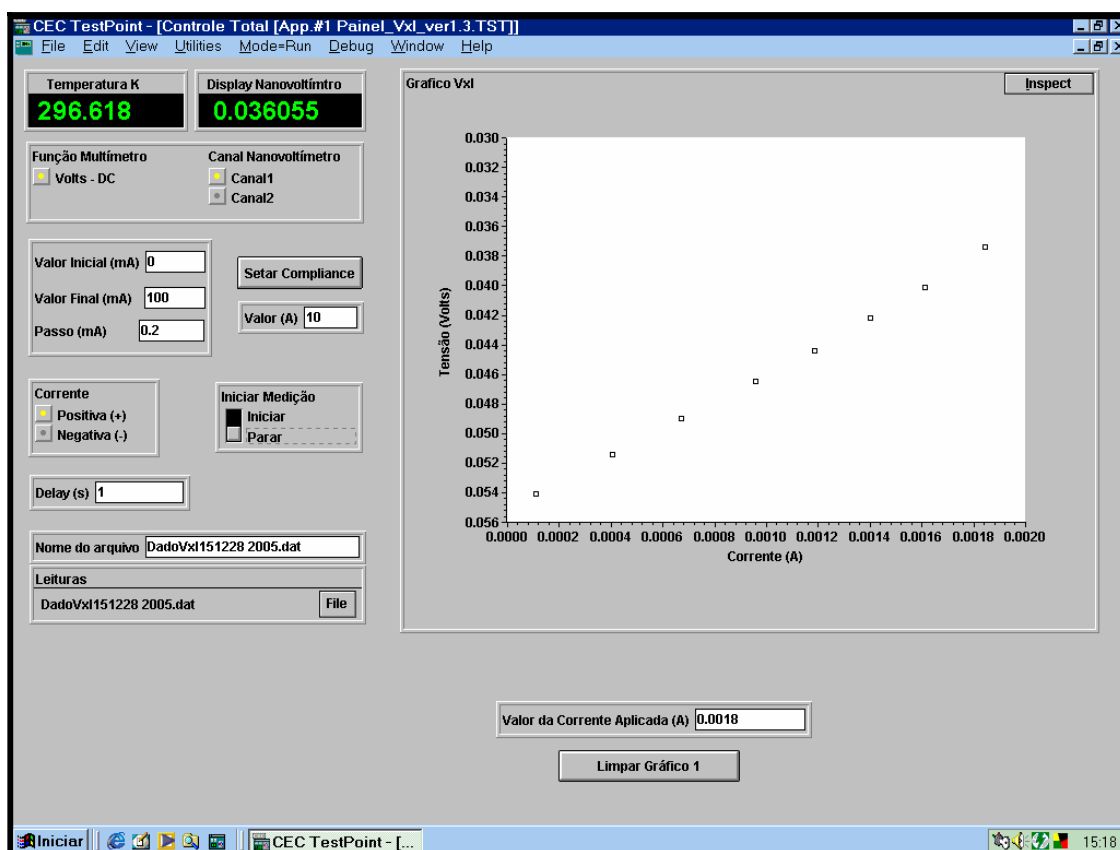


FIGURA 4.22 – Rotina implementada no programa *TestPoint* para medição automática da resistência elétrica da sonda de fio quente.

A Figura 4.23 mostra a bancada de instrumentos utilizada para a realização da medida da resistência elétrica das sondas de fio quente.



FIGURA 4.23 – Bancada de caracterização de filmes supercondutores do Laboratório de Vidros e Cerâmicas – Depto. Física e Química da Unesp - IS.

Esta bancada é composta de instrumentos da empresa *Keithley Instruments Inc.*, sendo:

- 2 multímetros digitais de 6 ½ dígitos, modelo 2000 com resolução de tensão de 1 μV e precisão de 0.002% na menor escala;
- 1 nanovoltímetro digital modelo 2182a com resolução de tensão de 1 nV e precisão de 0.001% na menor escala;

- 1 fonte de alimentação digital programável de corrente e tensão, modelo 228a com resolução de 1 mV e 1 mA com precisão de 0.1% na menor escala;
- 2 computadores de última geração; um para o controle dos instrumentos e outro para armazenamento e transmissão de dados.
- 1 *no-break* para suporte de energia em casos de interrupção da rede elétrica.

As faixas e os valores da precisão dos instrumentos mostrados na Figura 4.24 foram extraídos diretamente de seus respectivos manuais do fabricante. A Figura 4.24 mostra, em detalhes, a fonte de alimentação programável (abaixo), um multímetro de 6 ½ dígitos (acima à esquerda) e o nanovoltímetro (acima à direita).

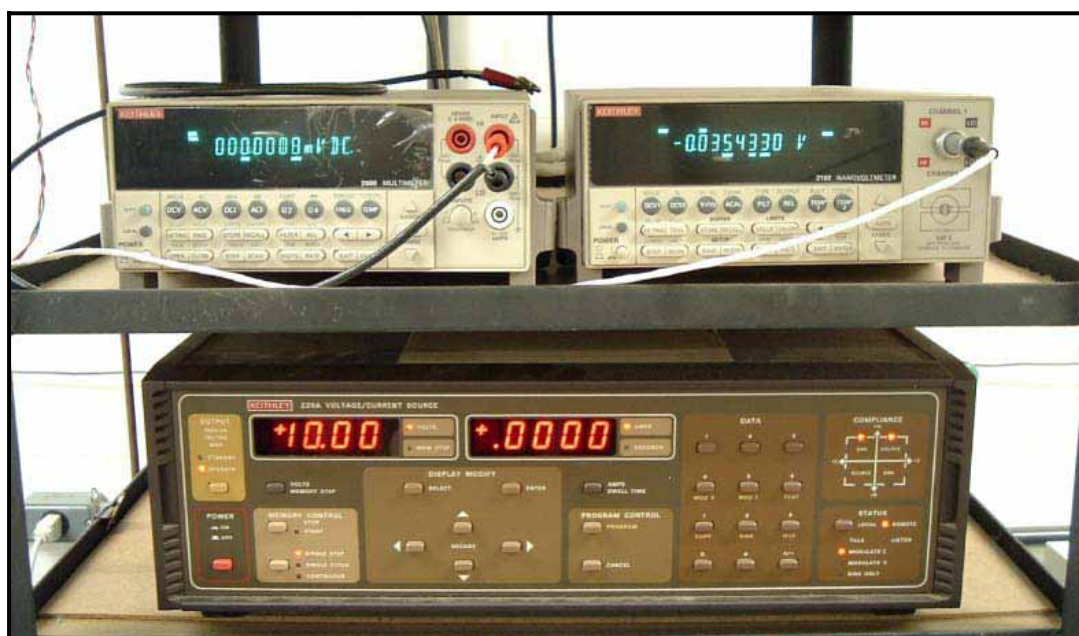


FIGURA 4.24 – Detalhe dos instrumentos utilizados na medição da resistência da sonda.

Além da resistência das sondas mostradas nas Figuras 4.2 e 4.3, foram também avaliados a resistência do cabo de interligação da sonda, do suporte de sondas e dos seus respectivos conectores. Estes acessórios são apresentados na Figura 4.25.

O cabo coaxial flexível, mostrado na Figura 4.25(a), possui 4 m de comprimento. Sua impedância característica é puramente resistiva, possuindo um valor aproximado de 50Ω , conforme especificações da *Dantec*. O suporte para sondas também é um modelo comercial da empresa *Dantec Dynamics*, modelo 55H22, mostrados na Figura 4.25(c).

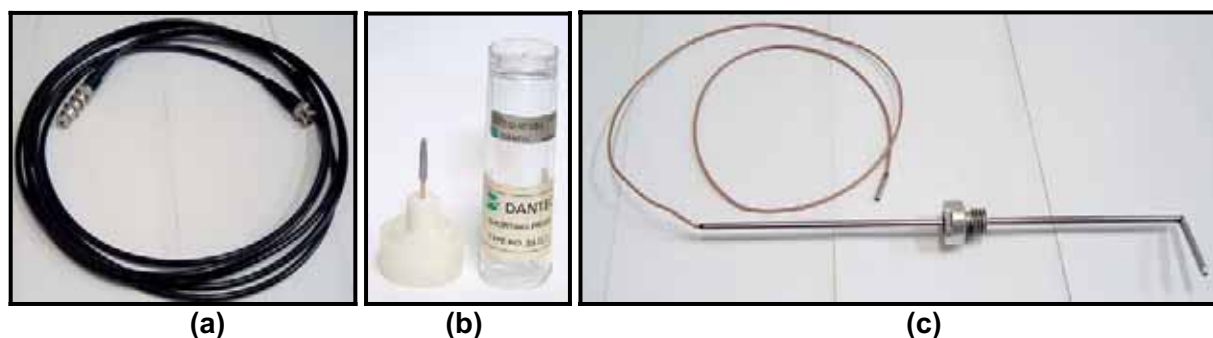


FIGURA 4.25 – Acessórios utilizados no experimento: (a) cabo de interligação de 4m e (b), sonda de curto-circuito e (c), suporte para sondas 55H22.

Ambos estes equipamentos foram analisados com relação à medida do valor de suas resistências elétricas através da mesma metodologia utilizada para medir a resistência das sondas.

Para medir a resistência elétrica do cabo coaxial de 4 m, uma de suas extremidades foi ligada ao sistema de medição e a outra ponta foi curto-circuitada. Para medir a resistência elétrica do suporte de sondas 55H22, foi utilizado uma falsa sonda, chamada de sonda de curto-circuito (*shunting probe*), mostrada na Figura 4.25(b), também da empresa *Dantec Dynamics*, modelo 55H30. Esta sonda permite medir a resistência do suporte de sondas até no ponto onde a sonda está conectada. Estes procedimentos também são descritos no Capítulo 2.3.1.

Resultados e Discussão

Os resultados dos experimentos realizados neste trabalho são apresentados e discutidos na mesma seqüência exposta no capítulo anterior.

5.1 – Segundo protótipo do anemômetro CTA

O gráfico inferior da Figura 5.1 mostra um sinal senoidal com amplitude de $5\text{ mV}_{\text{p-p}}$ e frequência de 5 kHz. Este sinal foi inserido nos amplificadores A1 e A2 do circuito do segundo protótipo através no ponto Vb indicado no circuito da Figura 3.8. Este ponto está desconectado do circuito da ponte de Wheatstone com o ponto Va conectado ao GND. Nestas condições, o circuito amplificador do anemômetro fica com sua malha aberta. O gráfico superior da Figura 5.1 mostra o sinal de saída do anemômetro (saída BNC), sendo esta uma simulação em frequência.

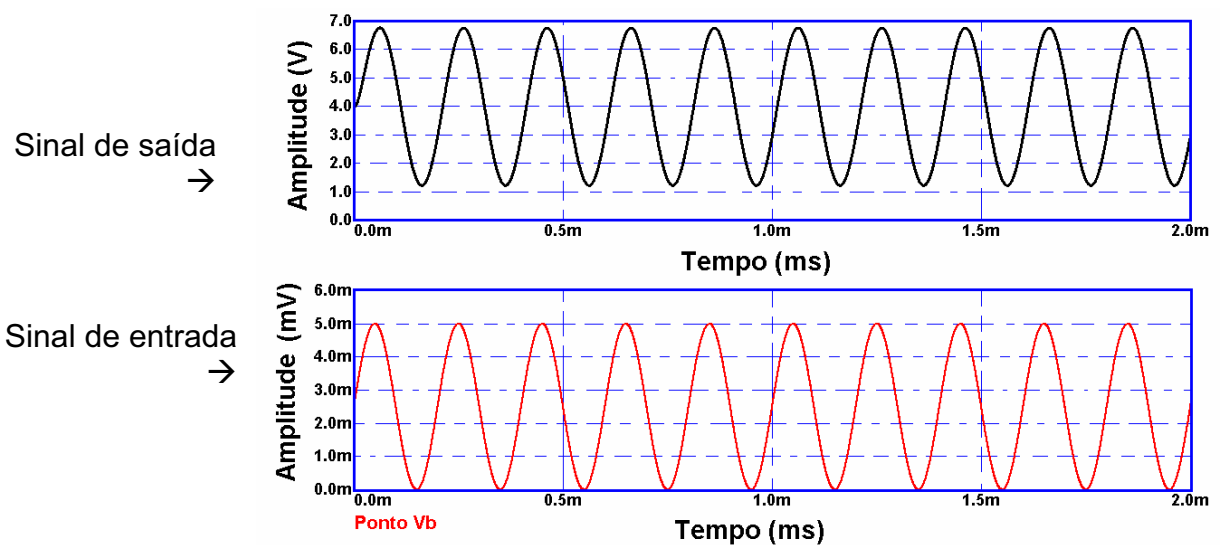


FIGURA 5.1 – Simulação dos amplificadores A1 e A2 com sinal de onda senoidal de 5 kHz.

Pode-se notar que o gráfico superior da Figura 5.1 apresenta um *off-set* de pouco mais de 1V, fornecendo, assim, uma amplitude máxima de aproximadamente 6 V. Desta forma, o ganho simulado dos amplificadores A1 e A2, juntos, é próximo de 1200. Pode-se notar ainda que a forma de onda do sinal de saída não apresenta distorções ou atrasos consideráveis, mostrando que, até a frequência de 5 kHz, o amplificador opera dentro de sua região linear.

Para uma entrada com sinal de onda quadrada de mesma amplitude e frequência (5 mV_{p-p} e 5 kHz), os amplificadores A1 e A2 também respondem satisfatoriamente na amplificação de sinais com frequências inferiores a 5 kHz. O gráfico superior da Figura 5.2 apresenta a forma de onda resultante desta simulação, com o sinal de entrada mostrado no gráfico inferior. As mesmas condições de simulação imposta a simulação com sinal senoidal foram utilizadas neste ensaio.

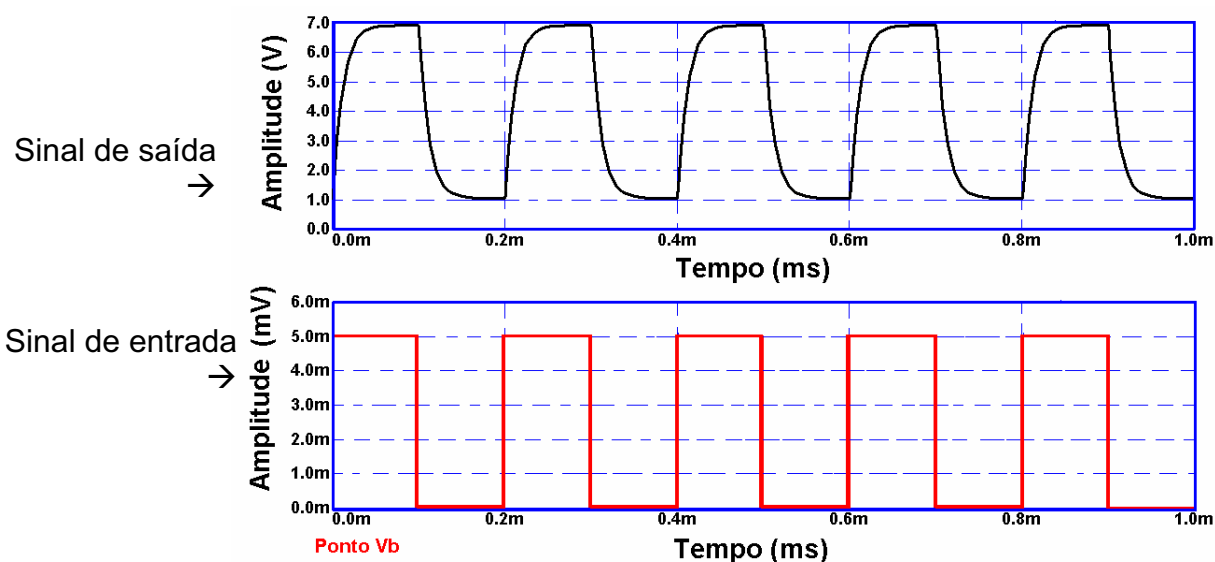


FIGURA 5.2 – Simulação dos amplificadores A1 e A2 com sinal de onda quadrada de 5 kHz.

Pode-se notar que o sinal de saída do anemômetro para um sinal de entrada de onda quadrada apresenta um pequeno amortecimento crítico. Novamente temos um ganho de malha aberta muito próximo de 1200, obtido pela razão da amplitude do sinal de saída pelo sinal de entrada. Esta simulação indica um perfeito funcionamento destes amplificadores em sinais com carga espectral de até 5 kHz.

Estes ensaios também foram implementados experimentalmente através do uso de um gerador de sinais, nas mesmas condições utilizadas no programa de simulação - circuito com malha aberta, pontos V_a e V_b desconectados no circuito da ponte de Wheatstone e sinal de

entrada no ponto V_b . Os resultados obtidos são apresentados na Figura 5.3(a), para a entrada senoidal, e na Figura 5.3(b), para sinal de onda quadrada.

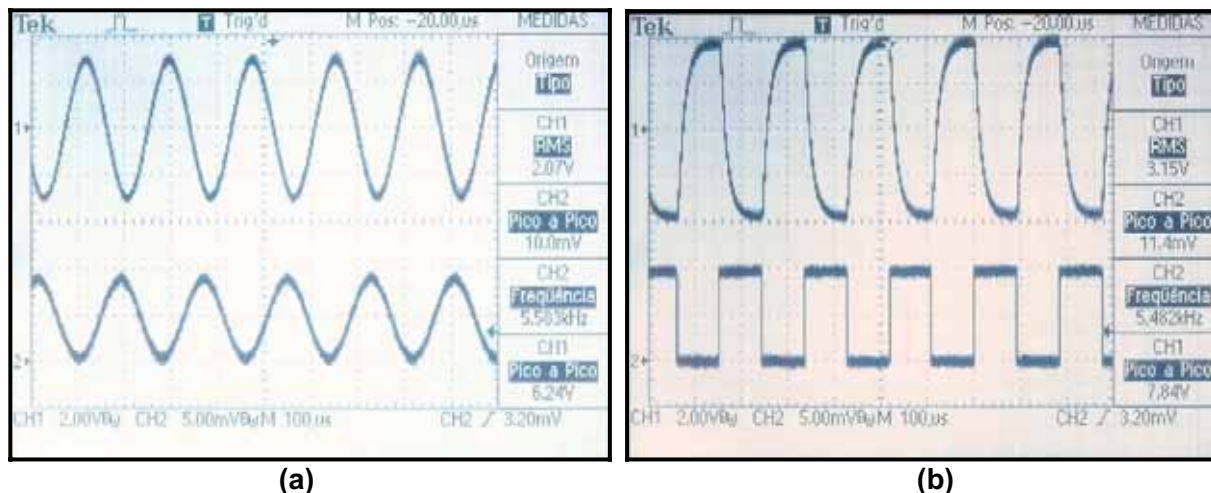


FIGURA 5.3 – Resultados do ganho dos amplificadores A1 e A2 com sinal de onda senoidal (a), e quadrada (b), ambos de mesma amplitude e frequência de 5,5 kHz.

O canal 2 do osciloscópio mostra o sinal de entrada (forma de onda inferior da Figura 5.3) e o canal 1, o sinal de saída do anemômetro (forma de onda superior da Figura 5.3). Os sinais de entrada apresentam amplitude próxima de $10 \text{ mV}_{\text{p-p}}$ e frequência de aproximadamente 5,5 kHz.

Para a entrada senoidal, o sinal resultante não apresenta distorções, possuindo uma amplitude 624 vezes maior que o sinal de entrada. Inesperadamente, o sinal inserido no canal 2 do osciloscópio digital foi conectado antes da passagem pelo conector de atenuação. Este procedimento é necessário para que a impedância de saída do sinal do gerador de sinais não cause desbalanceamento da ponte de Wheatstone. Assim, sua amplitude nominal medida com o osciloscópio foi de $5 \text{ mV}_{\text{p-p}}$, resultando um ganho real muito próximo de 1200, conforme o esperado.

Para a entrada com sinal de onda quadrada, a forma de onda resultante é mostrada no canal 1 (gráfico superior) da Figura 5.3(b). Novamente pode-ser perceber uma ligeira distorção devido à compensação interna dos amplificadores operacionais $X1$ e $X2$ do circuito do segundo protótipo. O sinal de saída apresentou uma amplitude máxima de 7,84 V para um entrada com sinal próximo de 6 mV, resultando num ganho próximo de 1200 vezes.

Ambos os resultados mostrados na Figura 5.3 atestam o funcionamento dos amplificadores A1 e A2 na amplificação de sinais com frequências de aproximadamente

5,5 kHz, podendo este valor máximo ser estendido, com relativa segurança, para valores de até 6 kHz.

A máxima frequência do amplificador de ganho 1200 do segundo protótipo está diretamente ligada à qualidade dos amplificadores operacionais utilizados. Nesta montagem, foi utilizado o A. O. modelo LM 318 que apresenta uma banda larga de frequência (típica de 15 MHz) e elevada taxa de variação – *slew rate* – (típica de 50 V/ μ s). Estas características, principalmente o *slew rate* do amplificador, estão diretamente ligadas à máxima frequência de operação do circuito do anemômetro. Contudo, amplificadores operacionais com elevado *slew rate* (> 100 V/ μ s) apresentam custos consideráveis, além de difícil obtenção no mercado nacional.

O gráfico superior da Figura 5.4 mostra o resultado da simulação em frequência do amplificador de corrente (*Boost*) para uma entrada senoidal de 3 V_{p-p} e frequência de 100 kHz. O sinal de entrada está mostrado no gráfico inferior da Figura 5.4.

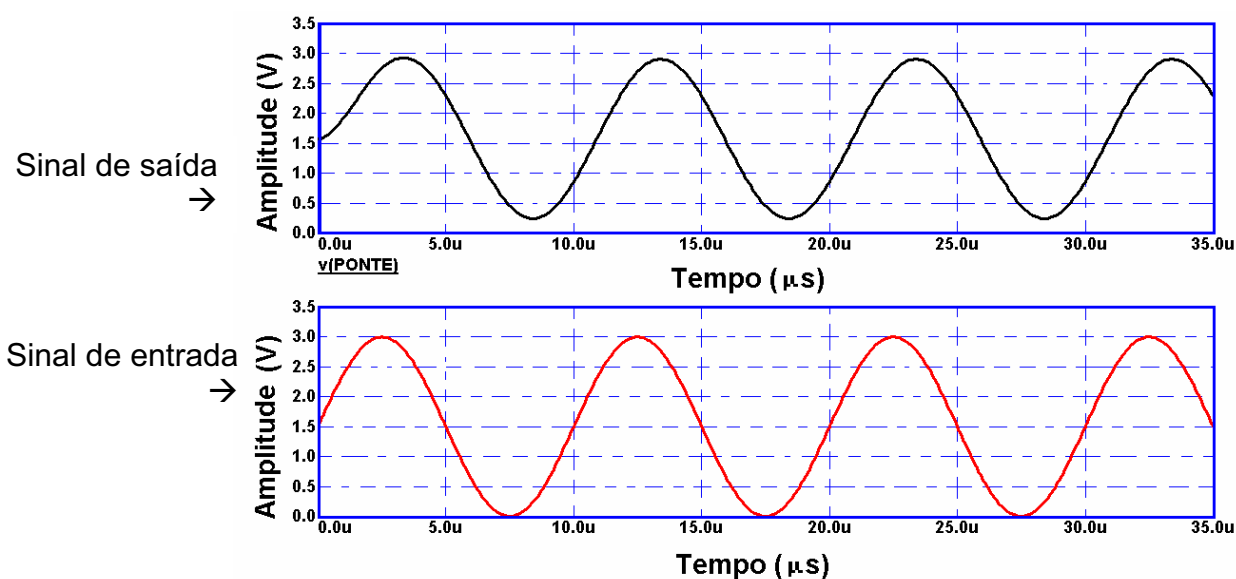


FIGURA 5.4 – Simulação do amplificador de corrente com sinal senoidal de 100 kHz.

O mesmo procedimento foi replicado no amplificador de corrente com o uso de um sinal de onda quadrada de 100 kHz e 2 V_{p-p}, sendo estes resultados apresentados na Figura 5.5.

O sinal de entrada é mostrado no gráfico inferior da Figura 5.5. O sinal de saída do circuito do amplificador de corrente apresenta um amortecimento crítico, caracterizado pela forma do sinal mostrado no gráfico superior da Figura 5.5. Até a frequência de 100 kHz, o

circuito simulado do amplificador de corrente não apresentou atrasos significativos entre a fase do sinal de entrada e a fase do sinal de saída.

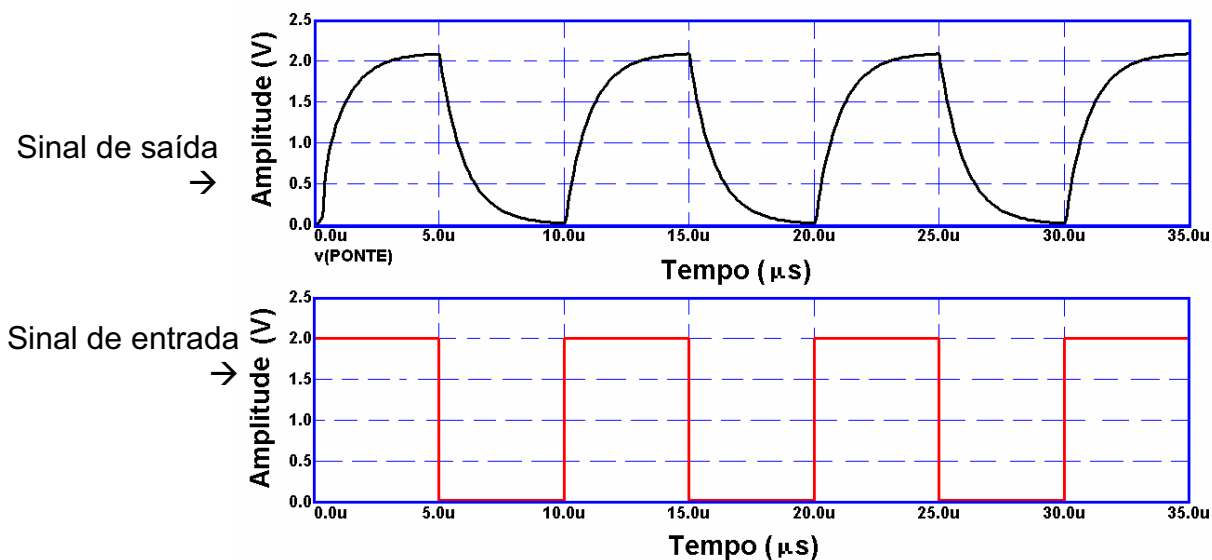


FIGURA 5.5 – Simulação do amplificador de corrente com onda quadrada de 100 kHz.

O ensaio experimental do circuito do amplificador de corrente foi realizado dentro das condições impostas na análise simulada. O circuito da ponte de Wheatstone foi balanceado com o uso da sonda de fio quente mostrada na Figura 4.2(a), recebendo assim uma excitação senoidal e de onda quadrada.

O resultado para a estimulação com uma onda senoidal de $2,84 V_{p-p}$ e frequência de 159,0 kHz é apresentado na Figura 5.6(a). O resultado para estimulação com um sinal de onda quadrada de $1,8 V_{p-p}$ e frequência de 101,9 kHz é apresentado na Figura 5.6(b). Em ambas as figuras, o sinal de entrada do circuito do amplificador de corrente está conectado no canal 2 do osciloscópio, sendo o canal 1 conectado na saída do circuito. Estes dois ensaios são mostrados na Figura 5.6, obtida com a digitalização da tela de cristal líquido (LCD) do osciloscópio.

Pode-se notar que a excitação senoidal, aplicada do circuito do amplificador de corrente, com resultado mostrado no gráfico superior da Figura 5.6(a), apresenta a frequência de 159,0 kHz e praticamente nenhum atraso de fase. Da mesma forma para o sinal de onda quadrada, mostrado no gráfico superior da Figura 5.6(b), com frequência de 101,9 kHz, apresentando amortecimento crítico e atraso de fase desprezível. Nestes gráficos, a forma de onda indicada na parte inferior (canal 2), mostra o sinal de entrada no circuito, sendo o forma de onda superior (canal 1), o sinal de saída do estágio do amplificador de corrente. Estes testes

foram realizados com o circuito da ponte de Wheatstone conectado ao amplificador, conforme ilustrado na Figura 4.1.

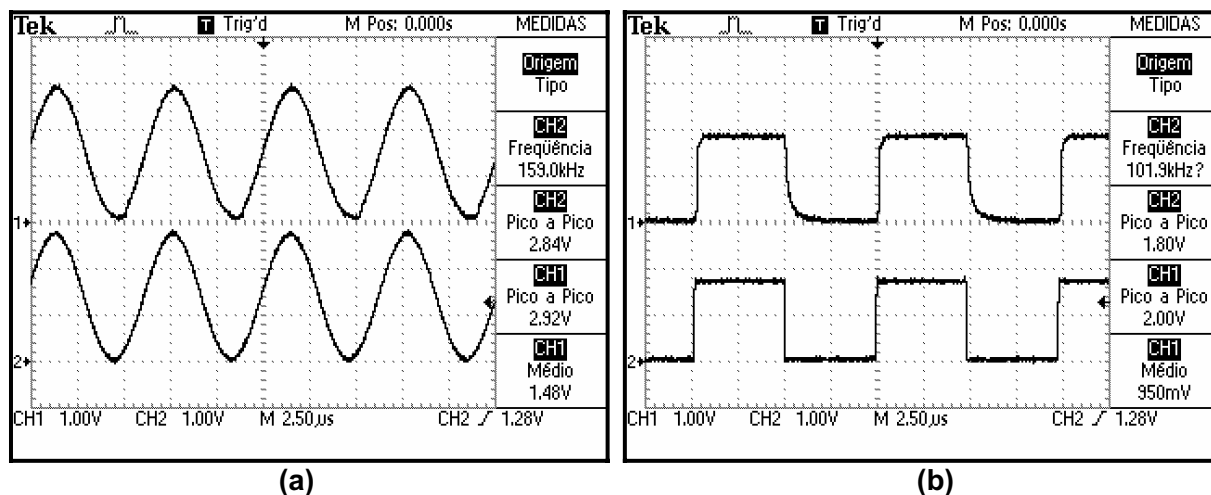


FIGURA 5.6 – Resultados da resposta em frequência do amplificador de corrente com (a), sinal senoidal e (b), onda quadrada.

Frequências superiores a 150 kHz apresentaram resultados insatisfatórios, principalmente com relação à forma do sinal de saída e sua amplitude, esta última, muito reduzida em comparação à amplitude do sinal de entrada. Contudo, a frequência de 100 kHz é satisfatória para a operação deste sub-circuito, apresentando excelente estabilidade, amortecimento crítico e baixo nível de ruído.

5.2 – Calibração estática das sondas de fio quente

Das cinco sondas disponíveis para este trabalho, somente três foram calibradas, já que somente estas três sondas foram efetivamente utilizadas em experimentos. Conforme mencionado na seção 2.6, sondas perdem continuamente sua calibração e a cada experimento, novo processo de calibração deve ser realizado de forma a garantir confiabilidade para os dados obtidos.

Devido a isso, empresas do ramo de anemometria, a exemplo da americana *TSI Incorporated* e da alemã *Dantec Dynamics*, disponibilizam soluções automatizadas para calibração de suas sondas conforme os exemplos mostrados na Figura 2.24. Vale ressaltar que o calibrador da *Dantec* - Figura 2.24(b) - é chamado no catálogo técnico da empresa como “*two points calibrator*”, ou calibrador de dois pontos, indicando que a calibração de suas sondas com

este equipamento pode ser realizada facilmente obtendo-se somente dois valores de velocidade distintos.

5.2.1 – Calibração por jato livre

Com o uso da sonda de tungstênio de 5 μm – mostrada na Figura 4.2(a) - e do primeiro protótipo do anemômetro de fio quente, a seguinte curva de calibração foi obtida, mostrada no gráfico da Figura 5.7. Os coeficientes A , B e n da equação de calibração foram obtidos da curva de tendência extraída deste gráfico com o uso do programa Origin® v5.0. A equação obtida, baseada na calibração da “Lei de King”, é mostrada abaixo.

$$E = 1,26875 + 0,27022 \cdot U^{0,4} \quad (5.1)$$

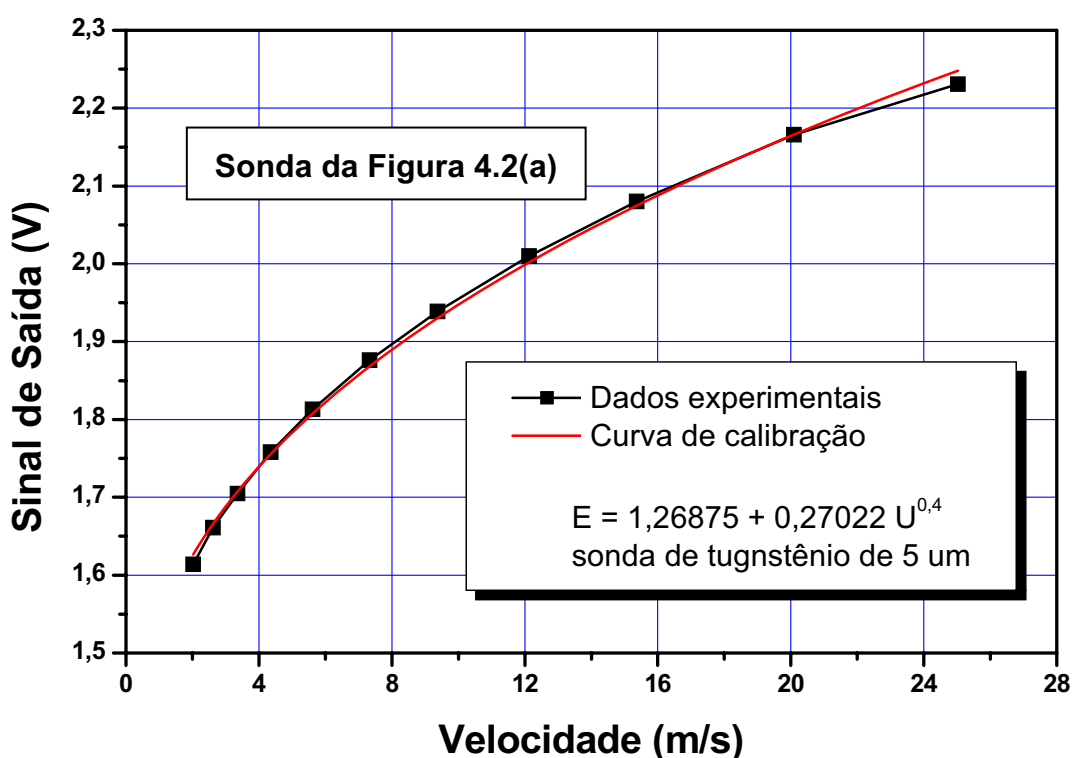


FIGURA 5.7 – Curva de calibração estática da sonda de tungstênio de 5 μm .

Uma vez obtidos os dados da tensão de saída do anemômetro e a respectiva velocidade, duas mudanças de variáveis podem ser realizadas, extraindo-se a raiz quadrada da velocidade e o respectivo quadrado da tensão. Estes dados são transferidos para um novo gráfico e desta forma, o surgimento de uma reta atestam o ganho da curva de calibração, conforme GOLDSTEIN (1983).

O gráfico da Figura 5.8 apresenta o resultado dessa troca de variáveis para os mesmos dados do gráfico da Figura 5.7.

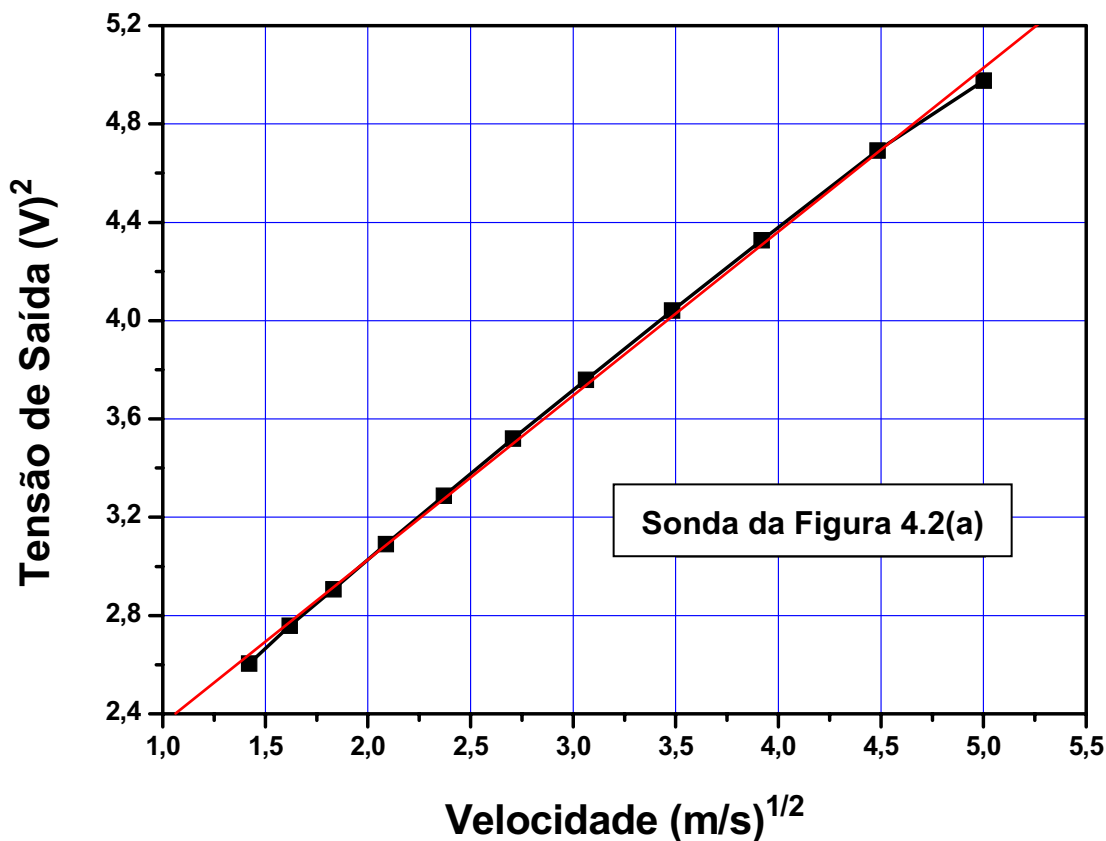


FIGURA 5.8 – Extração da raiz quadrada da velocidade e obtenção do quadrado da tensão de saída da curva de calibração da sonda de 5 μm da Figura 4.2(a).

O mesmo procedimento foi aplicado para os dados da calibração da sonda de tungstênio de 12 μm da Figura 4.2(b), conforme mostra o gráfico da Figura 5.9.

A equação de calibração da sonda de tungstênio de 12 μm é mostrada na Equação (5.2), extraída da mesma forma que a curva anterior com exceção da constante n , onde o melhor ajuste foi obtido para $n = 0,3$.

$$E = 1,22026 + 0,42198 \cdot U^{0,3} \quad (5.2)$$

O índice n das Equações (5.1) e (5.2) foi determinado previamente, fixando um valor dentro da faixa sugerida por PERRY (1982) para velocidades inferiores a 100 m/s. Desta forma, o programa de extração de curvas determinou somente as constantes A e B . Contudo, através de algoritmos especiais do *software* Origin[®], tanto as constantes A e B , quanto o índice n , podem ser

obtidos interativamente, de forma que a curva de ajuste atenda a uma faixa de confiabilidade previamente determinada para os dados experimentais e a curva obtida.

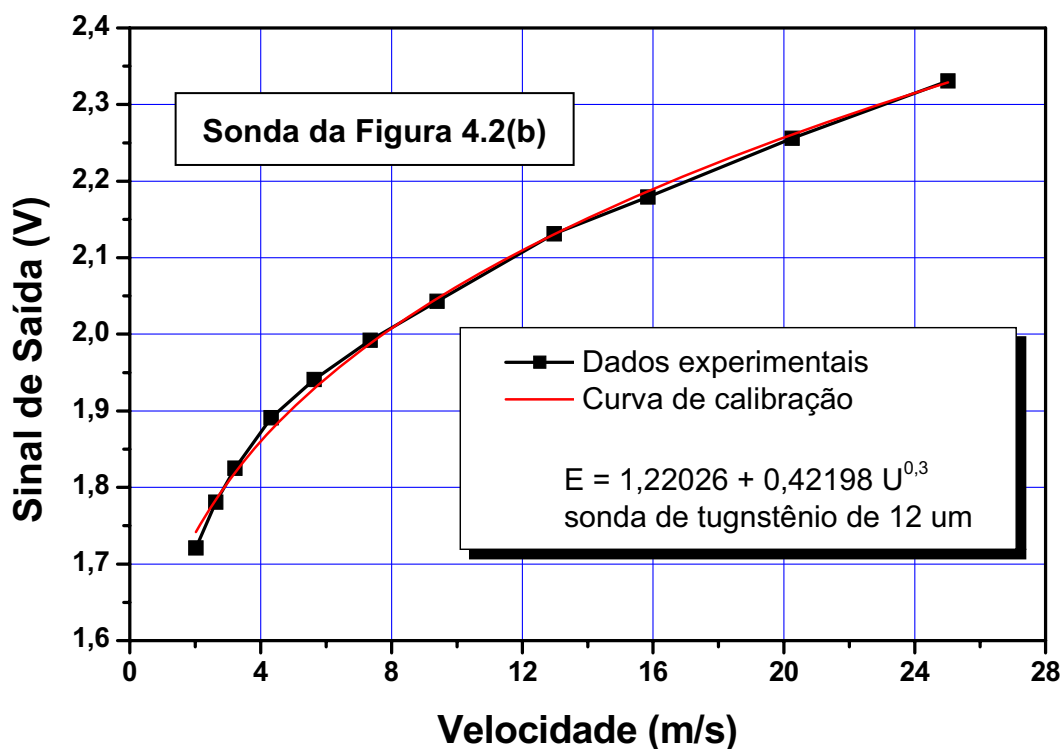


FIGURA 5.9 – Curva de calibração estática da sonda de tungstênio de 12 μm.

O procedimento de troca de variáveis utilizado nos dados de calibração da sonda da Figura 4.2(a) foi novamente aplicado nos dados da sonda de 12 μm da Figura 4.2(b), conforme é mostrado no gráfico da Figura 5.10.

Através do gráfico da Figura 5.8, podemos perceber uma reta bem definida entre os pontos experimentais obtidos para a sonda da Figura 4.2(a). Esta sonda possui o filamento original da *Dantec*, sendo construída de tungstênio, recoberto com uma fina camada de platina. Esta característica confere para esta sonda uma grande imunidade contra a contaminação de sua superfície, favorecendo sua calibração e principalmente seu uso.

O gráfico da Figura 5.10 apresenta uma reta com boa correlação com os valores experimentais, porém, a calibração desta sonda – Figura 4.2(b) – em comparação a sonda original da *Dantec* – Figura 4.2(a) – apresenta uma sutil diferença, caracterizada principalmente pela qualidade do material e o processo de acondicionamento do filamento. Sem dúvida, a sonda original possui comportamento superior, sugerindo, desta maneira, que melhorias devem

ser introduzidas no processo de recondicionamento para aprimorar os resultados com esta sonda.

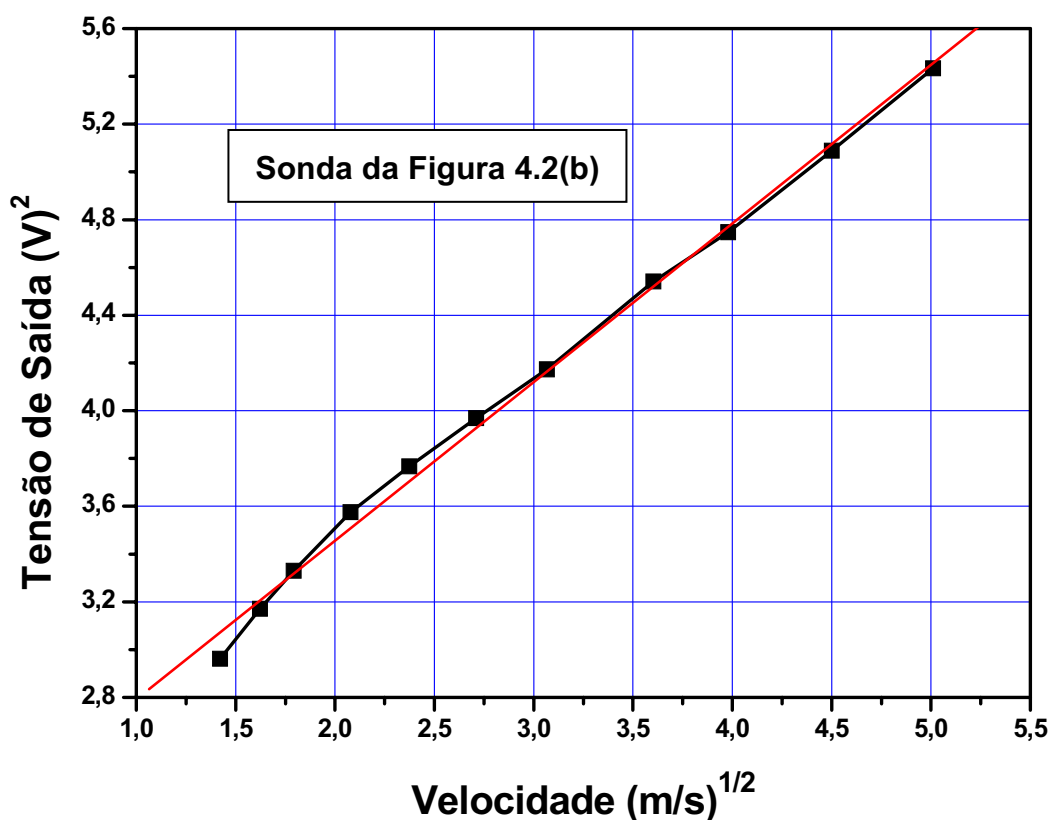


FIGURA 5.10 – Extração da raiz quadrada da velocidade e obtenção do quadrado da tensão de saída da curva de calibração da sonda de 12 μm da Figura 4.2(b).

A Tabela 2 resume as equações de calibração das sondas da Figura 4.2(a) e 4.2(b), obtidas com o método do jato livre e o primeiro protótipo do anemômetro de fio quente.

Tabela 2 – Equações de calibração obtidas.

Sonda de 5 μm	$E = 1,26875 + 0,27022 \cdot U^{0,4}$
Sonda de 12 μm	$E = 1,22026 + 0,42198 \cdot U^{0,3}$

5.2.2 – Calibração com tubo de Pitot

Este processo de calibração foi realizado somente com o segundo protótipo do anemômetro de fio quente e com a sonda de 5 μm com geometria para camada limite, mostrada na Figura 4.3(c).

O gráfico da Figura 5.11 mostra os dados experimentais obtidos e sua respectiva curva de calibração no formato da “Lei de King”. Utilizando os algoritmos de ajuste de curvas do programa *Origin*[®], o índice n da equação foi fixado em 0,5, obtendo assim a seguinte equação de calibração.

$$E = 0,37305 + 0,7444 \cdot U^{0,5} \quad (5.3)$$

O índice $n=0,5$ foi escolhido por apresentar melhor resultado para este tipo de calibração, conforme aplicado no trabalho de LANSPEARY (1997).

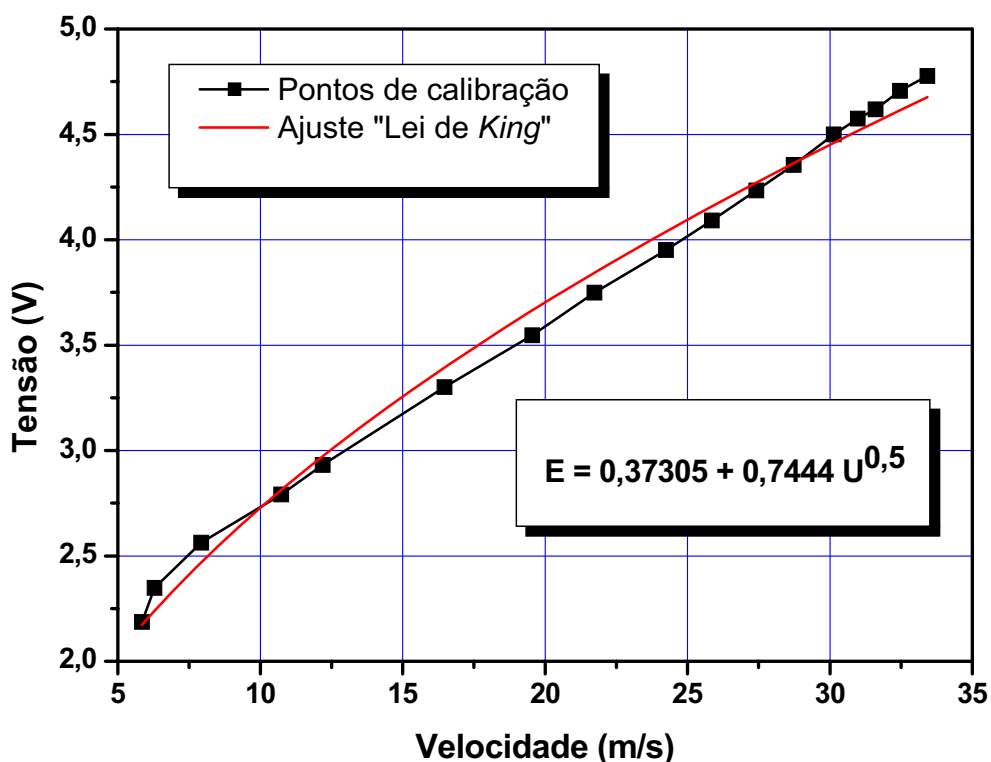


FIGURA 5.11 – Curva de calibração estática da sonda de camada limite de 5 μm da Figura 4.3(c).

O mesmo processo de linearização descrito por GOLDSTEIN (1983), e aplicado na calibração das sondas da seção 5.2.1, foi também utilizado nos dados de calibração do gráfico da Figura 5.11, sendo extraída a raiz quadrada da velocidade e o quadrado da tensão respectivamente. Este resultado é mostrado no gráfico da Figura 5.12.

De forma comparativa, os pontos de calibração da sonda de camada limite da Figura 4.3(c) também foram ajustados numa regressão linear com um polinômio de interpolação

do primeiro grau. Este resultado é apresentado no gráfico da Figura 5.13, sendo sua respectiva equação de calibração linear apresentada na Equação (5.4).

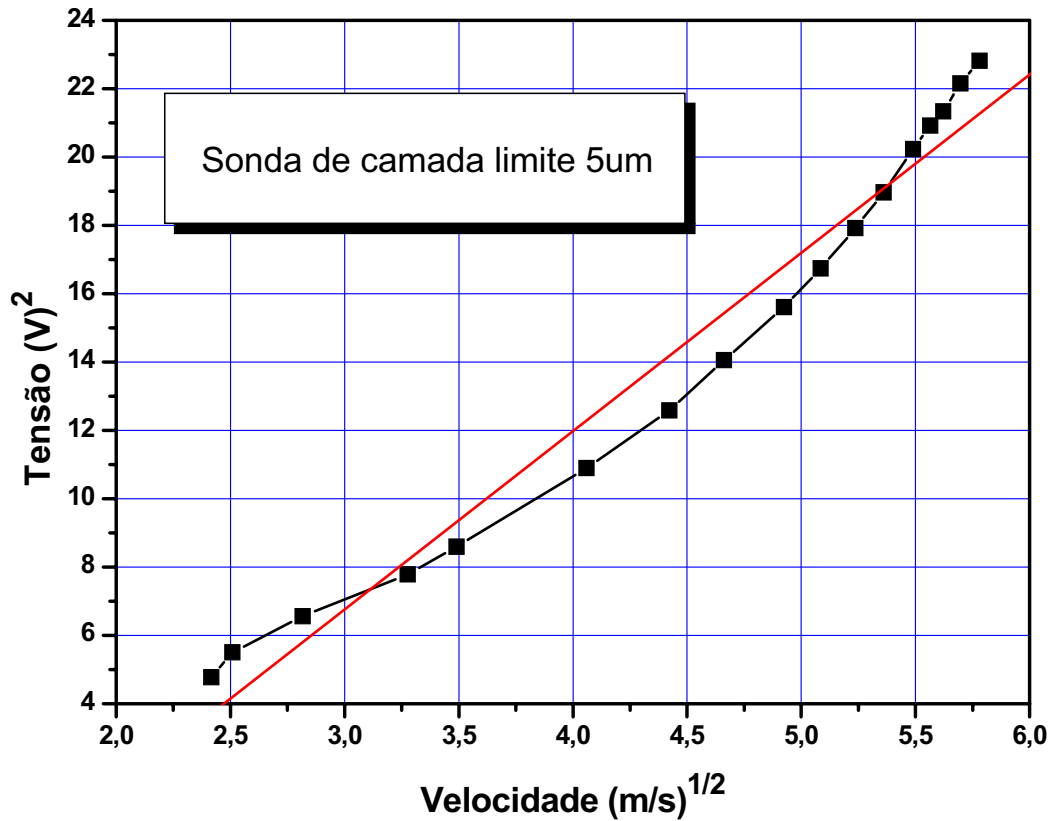


FIGURA 5.12 – Extração da raiz quadrada da velocidade e obtenção do quadrado da tensão de saída da curva de calibração da sonda de camada limite de 5 μm da Figura 4.3(c).

$$E = 1,79113 + 0,08964 \cdot U \quad (5.4)$$

É interessante notar que, para a sonda de camada limite da Figura 4.3(c), o ajuste com um polinômio do primeiro grau apresentou melhor correlação no ajuste, conforme se pode notar numa comparação visual entre os gráficos das Figuras 5.11 e 5.13. Esta característica linear foi verificada diversas vezes durante a realização dos experimentos com esta sonda.

Apesar da calibração com tubo de Pitot empregar uma montagem experimental diferente da calibração por jato livre, ambos estes processos possuem um princípio físico equivalente, utilizando a mesma equação para obter o valor da velocidade do escoamento. Desta maneira, estes processos de calibração gozam das mesmas faixas de incertezas no computo da velocidade do escoamento, indicando assim a mesma confiabilidade dos dados, já que utilizaram o mesmo instrumento para medir a diferença de pressão.

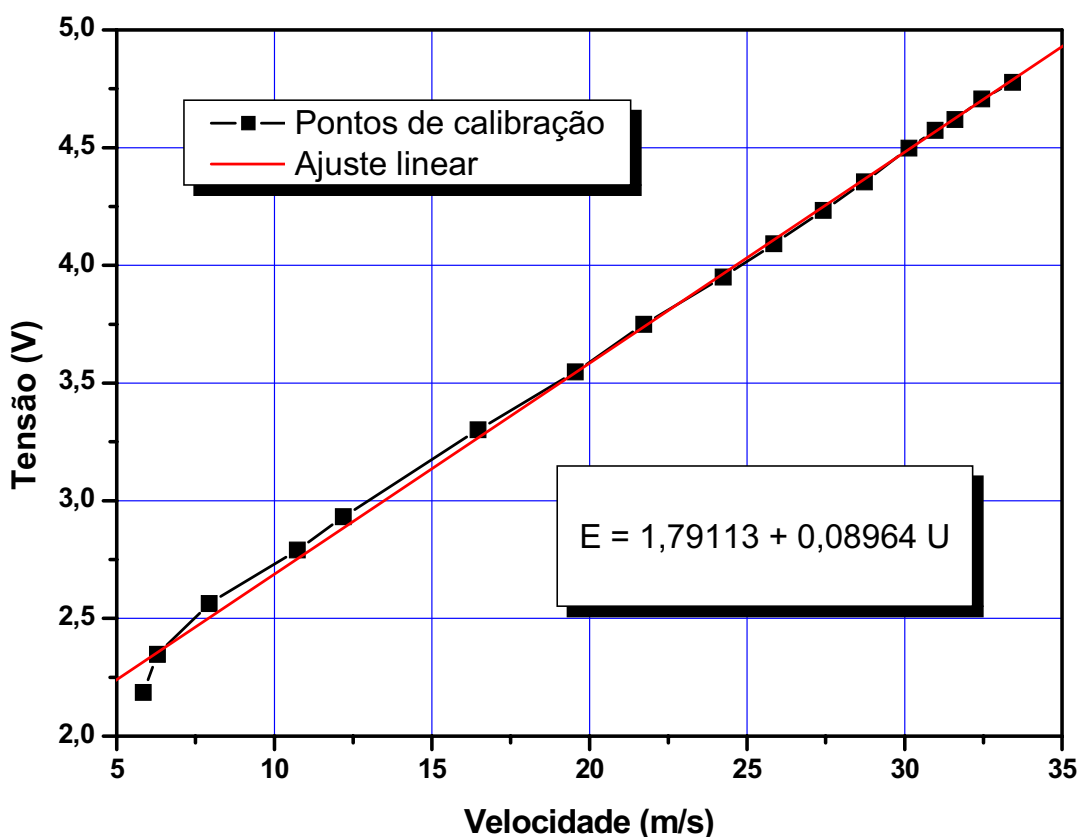


FIGURA 5.13 – Curva de calibração estática da sonda de camada limite de 5 μm por regressão linear.

A Tabela 3 apresenta as duas equações de calibração obtidas para a sonda de camada limite, realizada com o uso do segundo protótipo do anemômetro de fio quente.

Tabela 3 – Equações de calibração para sonda de camada limite.

“Lei de King”	$E = 0,37305 + 0,7444 \cdot U^{0,5}$
Linear	$E = 1,79113 + 0,08964 \cdot U$

O circuito do primeiro protótipo não permite sua utilização em escoamentos gasosos em velocidades superiores a 25 m/s por causa da potência de sua fonte de alimentação, limitada em 300 mA. Em velocidades superiores a 25 m/s, a corrente na sonda de fio quente é relativamente elevada, tipicamente próxima de 500 mA para escoamentos de ar atmosférico na faixa dos 40 m/s. Para o segundo protótipo do anemômetro de fio quente, foi utilizada uma fonte de alimentação profissional, com tensão e corrente de saída ajustáveis, modelo PS 3003 da marca *Dawer* de fabricação nacional. Seu funcionamento foi satisfatório para alimentar o circuito da ponte de Wheatstone durante todos os testes com o segundo protótipo.

5.3 – Ensaio no túnel aerodinâmico

O trabalho de SILVA *et al.* (2005) foi totalmente realizado no túnel de vento descrito no Capítulo 4.3. Foi utilizando para isso um único tubo de Pitot e um manômetro de coluna inclina com álcool isoamílico, ideal para o uso como fluido manométrico. A Figura 5.14 mostra o resultado de SILVA *et al.* (2005) para $Re = 46\,000$, num gráfico adimensionalizado para a velocidade na seção de teste, sem a influência da esfera, em função da posição do tubo de Pitot em três escotilhas diferentes.

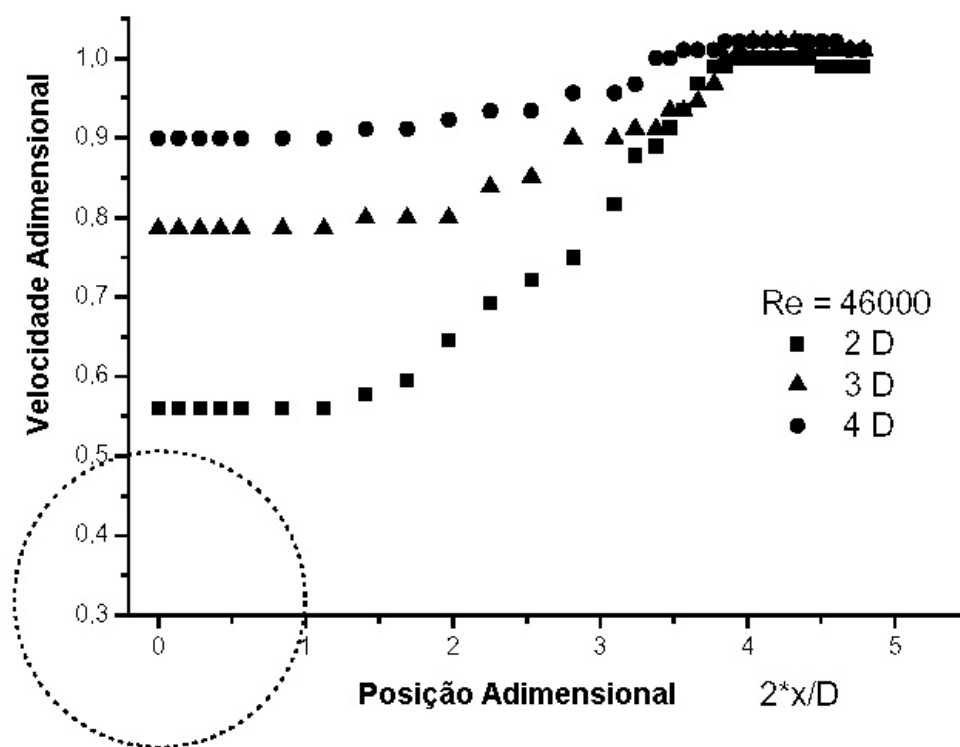


FIGURA 5.14 – Distribuição de velocidades de um escoamento ao redor de uma esfera, obtidas com tubo de Pitot, no trabalho de SILVA *et al.* (2005).

O gráfico da Figura 5.15 mostra o perfil de velocidade para duas posições distintas da seção de teste do túnel de vento, sem a influência da esfera. Este resultado permite obter várias informações a respeito da seção de testes do túnel aerodinâmico, a exemplo da medida da espessura de sua camada limite e os níveis de flutuação da velocidade do escoamento na seção média de interesse. Para Re próximo de 50 000, a seção de teste apresentou uma camada limite de no máximo 4 mm de espessura e baixos níveis de turbulência.

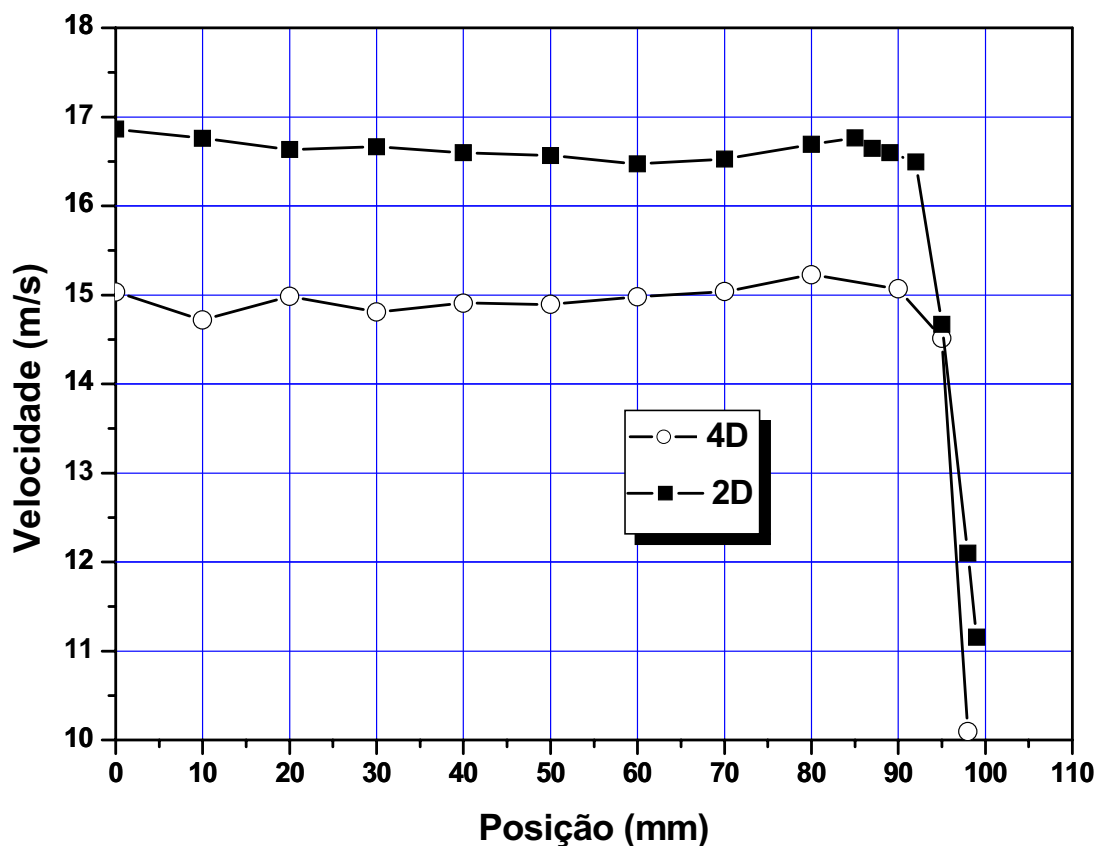


FIGURA 5.15 – Medição do perfil de velocidade do escoamento no interior da seção de testes do túnel aerodinâmico para as escotilhas 2D e 4D, sem a presença da esfera.

Os dados experimentais da Figura 5.15 foram obtidos com o uso do segundo protótipo do anemômetro de fio quente, juntamente com a sonda para camada limite da Figura 4.3(c). Os valores de velocidade foram determinados com a calibração linear da Equação (5.4). Este ensaio foi realizado logo após a conclusão do processo de calibração desta sonda.

Mantendo a mesma velocidade do escoamento na seção de teste, com a sonda posicionada na mesma escotilha de medição, a esfera é devidamente posicionada e, após alguns segundos de espera, os dados da tensão de saída do anemômetro são registrados com o osciloscópio digital. Para cada posição da respectiva escotilha da seção de testes, foi obtida a média de 2500 valores instantâneos da velocidade do escoamento na esteira da esfera. Estes resultados são mostrados no gráfico da Figura 5.16.

Devido à simetria da seção de teste do túnel de vento, os dados mostrados tanto na Figura 5.14, quanto nas Figuras 5.15 e 5.16, representam as tomadas de velocidade em uma metade da seção de teste apenas.

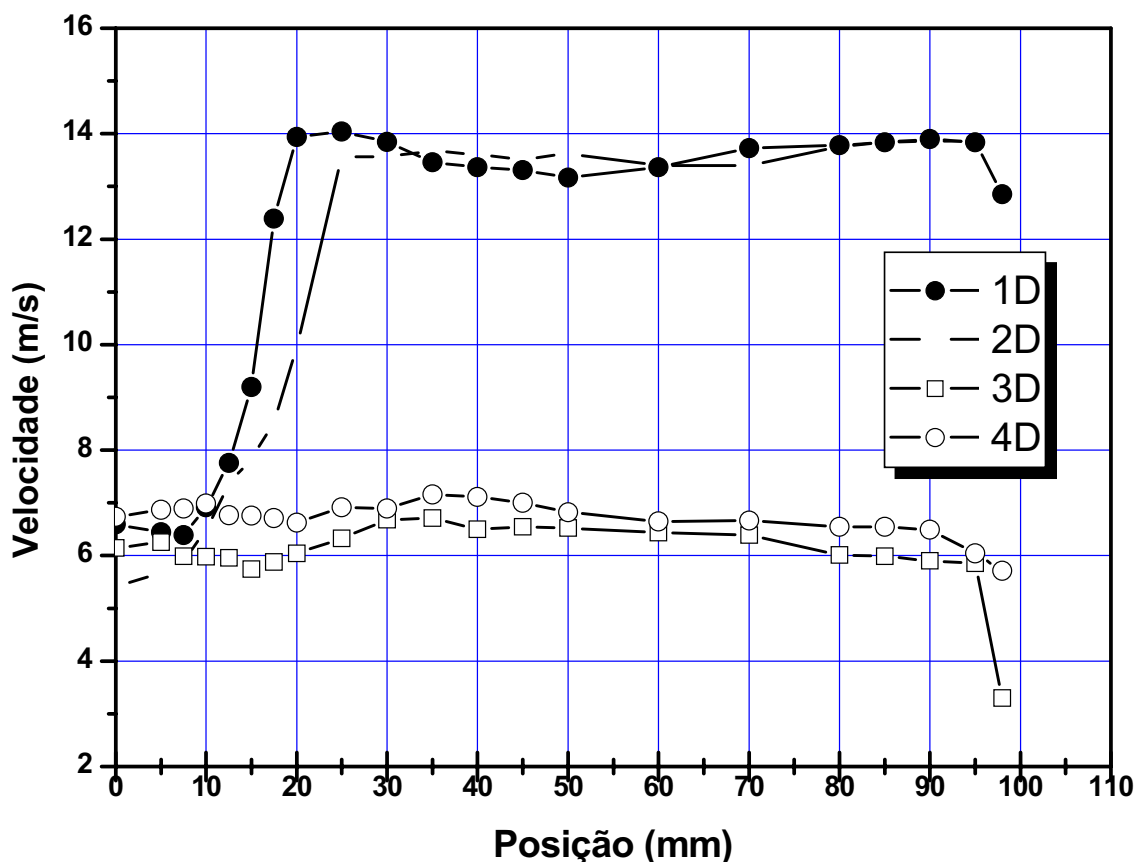


FIGURA 5.16 – Distribuição de velocidades nas respectivas escotilhas de teste para o escoamento ao redor de uma esfera, obtidas com o segundo protótipo do anemômetro de fio quente e a sonda para camada limite.

Os ensaios com o segundo protótipo do anemômetro e a sonda para camada limite da Figura 4.3(c) foram realizados nas escotilhas 1D, 2D, 3D e 4D, nesta seqüência, sem que o túnel de vento fosse desligado. Para cada posição deslocada pela sonda de fio quente dentro da seção de teste, o período de amostragem para cada medida foi de aproximadamente 30 s. Desta forma, a sonda ficou exposta ao escoamento num período muito prolongado de tempo dentro da seção de testes do túnel, ocorrendo assim uma grave contaminação de seu filamento. Este fato ocasionou uma perda acentuada de sua calibração, sendo verificada no gráfico da Figura 5.16 para as escotilhas 3D e 4D.

Podemos perceber que os valores da velocidade do escoamento no gráfico da Figura 5.16 para as escotilhas 1D e 2D, com $Re = 50\,000$, estão condizentes com os resultados de SILVA *et al.* (2005) reproduzidos na Figura 5.14 para $Re = 46\,000$. Nas escotilhas 3D e 4D, a sonda de fio quente apresentou queda de sensibilidade, desfigurando assim o dados obtidos.

O túnel de vento da Unesp – IS é de circuito aberto, não possuindo nenhum tipo filtro para partículas em sua entrada de ar. Esta característica prejudica a utilização de sondas de fio

quente neste túnel, principalmente em escoamento em velocidades elevadas. A tomada de ar do impulsor do túnel aerodinâmico está mostrado na Figura 4.9(b). Estes resultados não foram refeitos devido ao fim do prazo de empréstimo do osciloscópio digital.

A contaminação da sonda para camada limite utilizada nesta etapa do experimento também foi agravada devido às suas características não lineares com relação a sua resistência elétrica, conforme é discutido na seção 5.5. Esta não linearidade da resistência elétrica da sonda para camada limite prejudicou, em partes, os ensaios no túnel aerodinâmico. Para manter constante a temperatura de trabalho nesta sonda, foi necessária uma corrente elétrica elevada no filamento da sonda, agravando, assim, os problemas de oxidação do fio de tungstênio. Além disso, a severa contaminação de sua superfície ocasionou uma perda precoce de sua calibração, também relacionada com a qualidade do material utilizado e possíveis problemas durante o processo de recondicionamento e soldagem do seu filamento.

Para dar continuidade ao levantamento do perfil de velocidade na esteira da esfera com o uso da anemometria de fio quente é altamente recomendado à utilização de um filtro de partículas na tomada de ar do túnel de vento. Um projeto especial de filtro deve ser realizado de forma a minimizar a perda de carga na seção de testes, além de permitir a operação do túnel para longos períodos com mínima troca do elemento de filtração.

5.4 – Verificação da resposta em frequência =====

5.4.1 – Verificação com *laser* =====

Este teste fornece um resultado bastante realístico da resposta em frequência do conjunto sonda e circuito CTA, sendo realizado para as duas sondas apresentadas na Figura 4.2(a) e 4.2(b). Entretanto, os resultados apresentados pertencem somente à sonda original da *Dantec*, Figura 4.2(a), por apresentar melhores resultados devido sua elevada sensibilidade em relação à sonda recondicionada com fio de 12 μm , mostrada na Figura 4.2(b).

Os resultados esperados para estes testes apontam para uma forma de onda resultante conforme mostra Figura 2.36(a). A forma do sinal de saída obtido com o osciloscópio deve estar o mais próximo possível de um sinal de onda quadrada cuja frequência de oscilação deve ser a

mesma com a qual o feixe *laser* é modulado. Desta forma, a máxima freqüência de estimulação da sonda, capaz de ser observável no osciloscópio, mostra o quão o circuito do anemômetro está ajustado em freqüência. Caso o sinal de saída não apresente as características desejadas, um novo ajuste deve ser introduzido na tensão de *bias* do circuito e nova bateria de teste deve ser realizada para verificar a máxima freqüência de operação.

A Figura 5.17(a) mostra o sinal de saída do primeiro protótipo do anemômetro com sua sonda estimulada pelo *laser* numa freqüência de interrupção do feixe de 500 Hz. A Figura 5.17(b) mostra a tela do osciloscópio com a FFT deste sinal, adquirida com a aplicação de uma janela retangular no sinal temporal. Este tipo de janelamento apresenta resultados realísticos para um banda larga de freqüências, sendo indicado para sinais periódicos do tipo onda quadrada, de acordo com FRANCO (1998).

Este mesmo procedimento foi aplicado repetidas vezes no conjunto sonda e primeiro protótipo, para as freqüências de 700 Hz, 1000 Hz, 1250 Hz e 1500 Hz. Seus resultados apresentados nas Figuras 5.18, 5.19, 5.20 e 5.21 respectivamente.

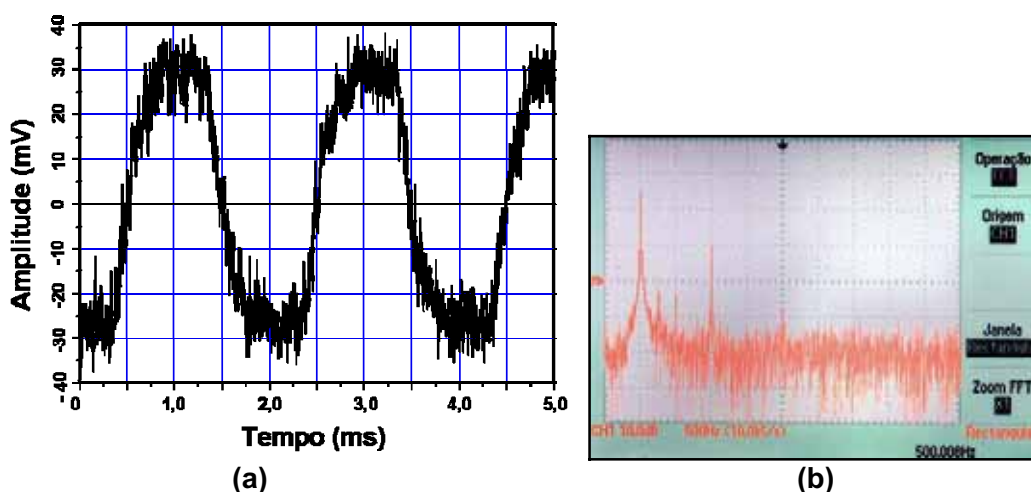


FIGURA 5.17 – Dados de saída do anemômetro adquiridos pelo osciloscópio digital (a) sinal temporal da sonda para estimulação da sonda de 5 μm em 500 Hz e (b), FFT desse sinal.

Os resultados apresentados nas Figuras 5.17 até 5.21 mostram que a sonda e o circuito CTA do primeiro protótipo puderam detectar, na respectiva freqüência de estimulação, o pequeno aquecimento da sonda devido à presença do feixe do *laser* em seu filamento.

O gráfico em freqüência da Figura 5.17(b) apresenta dois picos principais sendo o primeiro na freqüência principal de estimulação em 500,008 Hz e o segundo próximo de 1500 Hz, sendo esta a primeira harmônica ímpar de 500 Hz.

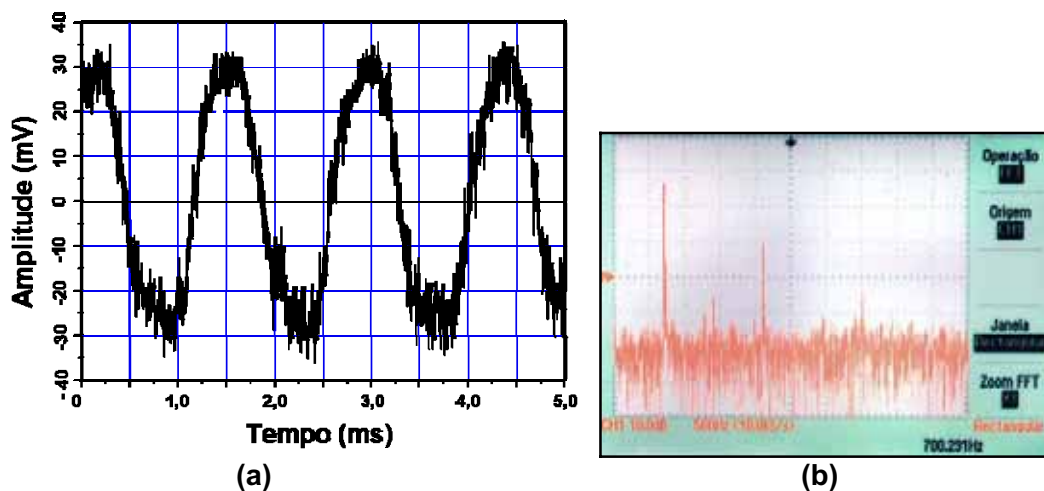


FIGURA 5.18 – Dados de saída do anemômetro adquiridos pelo osciloscópio digital (a) sinal temporal da sonda de 5 μ m para estimulação em 700 Hz e (b), FFT desse sinal.

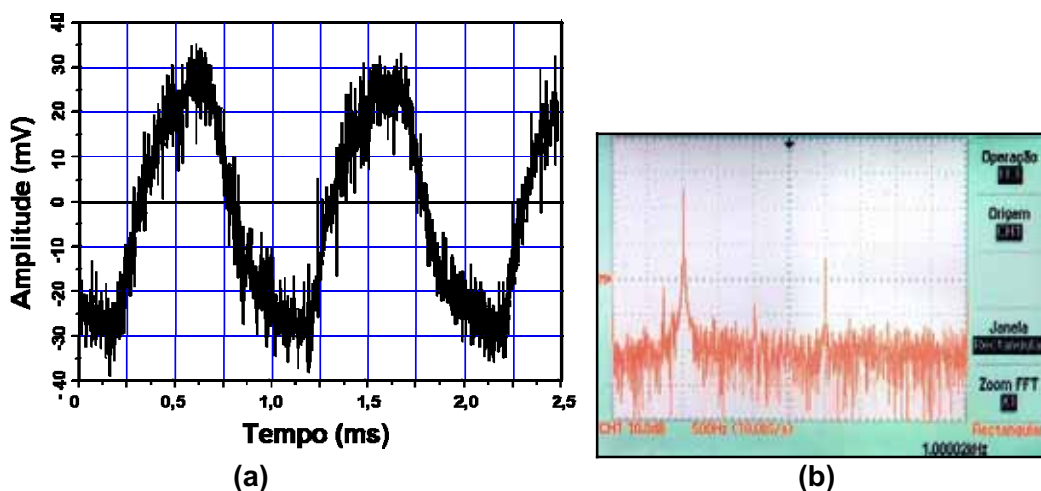


FIGURA 5.19 – Dados de saída do anemômetro adquiridos pelo osciloscópio digital (a) sinal temporal da sonda para estimulação de 1 kHz e (b), FFT desse sinal.

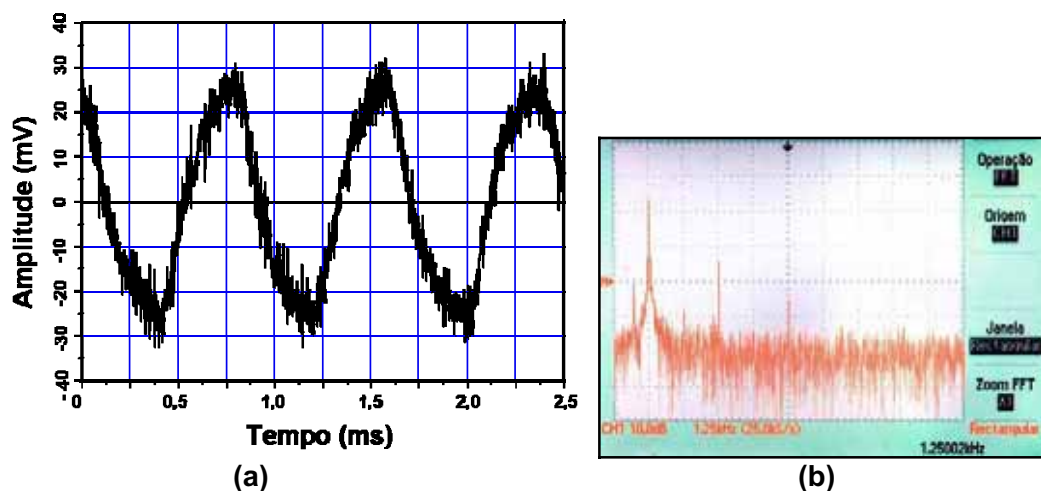


FIGURA 5.20 – Dados de saída do anemômetro adquiridos pelo osciloscópio digital (a) sinal temporal da sonda para estimulação de 1250 Hz e (b), FFT desse sinal.

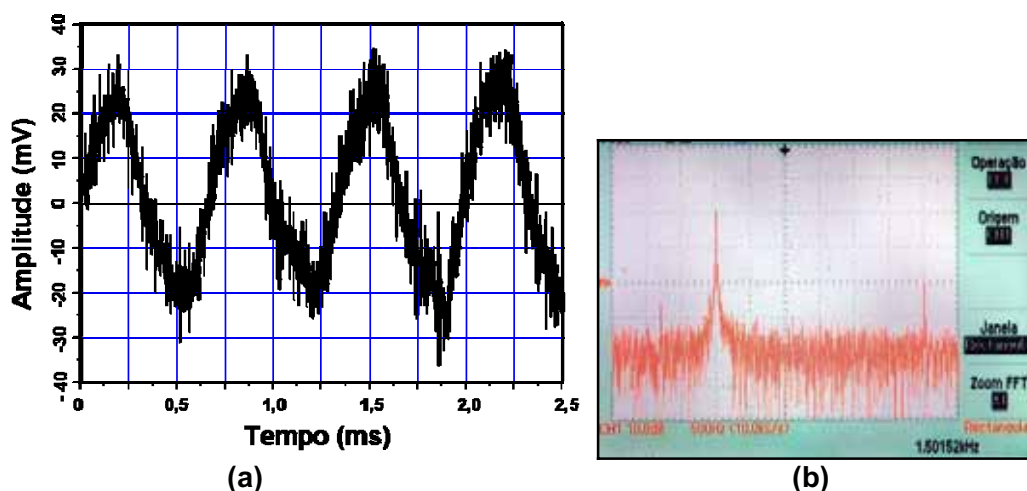


FIGURA 5.21 – Dados de saída do anemômetro adquiridos pelo osciloscópio digital (a) sinal temporal da sonda para estimulação de 1500 Hz e (b), FFT desse sinal.

Novamente podemos perceber no gráfico da FFT mostrado na Figura 5.18(b) a presença de uma componente em freqüência fundamental em 700,291 Hz e suas harmônicas ímpares. A primeira em aproximadamente 2100 Hz e uma segunda próxima de 3500 Hz.

A FFT mostrada na Figura 5.19(b) apresenta um pico de intensidade pouco maior que 25 dB em 1 kHz e um segundo pico em aproximadamente 3 kHz, podendo ser visualizado ainda uma segunda harmônica ímpar em aproximadamente 5 kHz.

Ambos os sinais em freqüência das estimulações da sonda de 5 μ m em 1250 e 1500 Hz apresentam picos de aproximadamente 20 dB em suas freqüências principais e picos não superiores a 5 dB para suas primeiras freqüências harmônicas ímpares em 3750 e 4500 Hz, mostradas nas Figuras 5.20(b) e 5.21(b), respectivamente.

Vale ressaltar que a máxima freqüência de operação do circuito CTA é melhor verificada através da análise espectral do sinal de saída do anemômetro. Existindo uma freqüência fundamental bem definida e com poucas componentes harmônicas diferentes das freqüências ímpares, o circuito CTA, e sua sonda, são capazes de detectar as variações da velocidade do escoamento dentro da faixa de freqüência ajustada.

No trabalho de FIEDLER (1978), o diâmetro do feixe do *laser* utilizado foi ampliado com o uso de uma lente divergente, reduzindo assim sua intensidade sobre o filamento de fio quente. Este procedimento foi necessário devido à utilização de um equipamento *laser* de elevada potência. Nos experimentos deste trabalho, o feixe do *laser* foi concentrado através de uma lente focalizadora - Figura 4.16(a) - já que a potência do *laser* utilizado foi relativamente baixa, 15 mW contra 1 W de FIEDLER (1978). Esta diferença de potência não influenciou os resultados

obtidos uma vez que a sensibilidade do circuito do anemômetro e a sonda utilizada é muito elevada.

O teste com a estimulação *laser* da sonda de 5 μm – Figura 4.2(a) - e o ajuste imposto ao circuito do primeiro protótipo do anemômetro, mostrou resultados coerentes até a máxima frequência de 1,5 kHz. O ruído associado ao sinal de saída do primeiro protótipo do anemômetro é relativamente elevado, sendo esta uma característica pouco desejada para este tipo de equipamento. Uma solução para isso consiste em utilizar um filtro tipo passa-baixa para o sinal de saída, porém, esta medida não foi aplicada neste circuito. Vale ressaltar que, mesmo com um nível de ruído relativamente elevado, o sinal obtido pode ser reconhecido, apresentando uma carga espectral típica para sinais de onda quadrada.

O procedimento de verificação da resposta em frequência com o uso de *lasers* não pôde ser repetido para o segundo protótipo do anemômetro. Os equipamentos utilizados neste experimento pertencem a outro laboratório, sendo sua disponibilidade limitada.

5.4.2 – Verificação com gerador de sinais

De forma a complementar os resultados obtidos com o *laser*, o mesmo circuito e sonda do primeiro protótipo foram testados em frequência com o uso de um gerador de sinais. Este procedimento é amplamente utilizado em anemômetros comerciais, a exemplo da linha *StreamLine* da *Dantec Dynamics*, o qual possui um circuito interno dedicado para gerar sinais de onda quadrada e introduzi-los em sua sonda. Para o segundo protótipo do anemômetro, este procedimento foi realizado também numericamente, permitindo uma melhor comparação com os resultados experimentais.

5.4.2.1 – Primeiro protótipo CTA

A Figura 5.22(a) mostra somente o sinal de saída do primeiro protótipo do anemômetro de fio quente com a estimulação da sua ponte de Wheatstone com um sinal de onda quadrada de 500 Hz e amplitude de aproximadamente 100 mV_{p-p}. A Figura 5.22(b) mostra a digitalização da tela do osciloscópio mostrando o sinal de entrada (canal 2) e o sinal de saída (canal 1). O mesmo

procedimento anterior é mostrado na Figura 5.23(a) e 5.23(b) para uma entrada senoidal de 500 Hz e amplitude muito próxima de $100 \text{ mV}_{\text{p-p}}$.

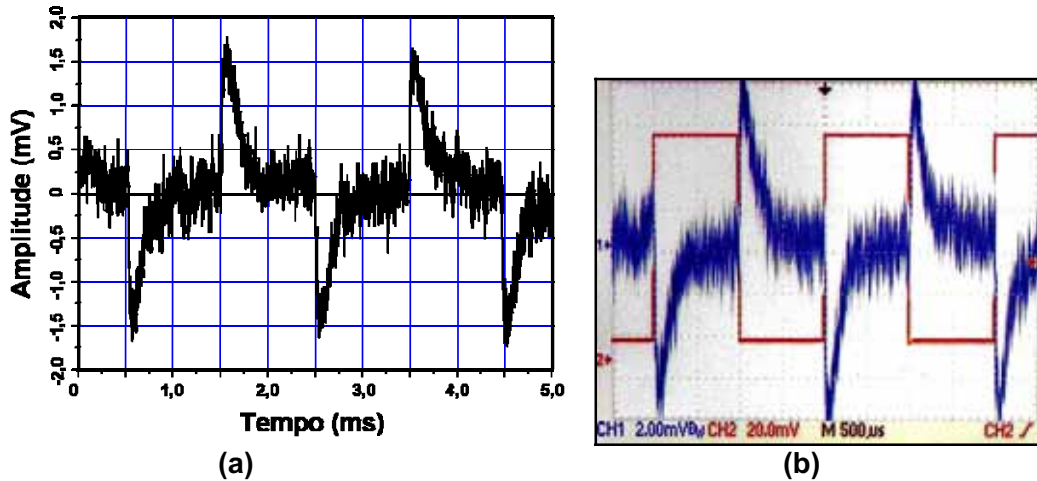


FIGURA 5.22 – Dados de saída do anemômetro adquiridos pelo osciloscópio digital (a) sinal temporal da sonda para onda quadrada de 500 Hz e (b), a visualização deste sinal junto ao sinal de entrada.

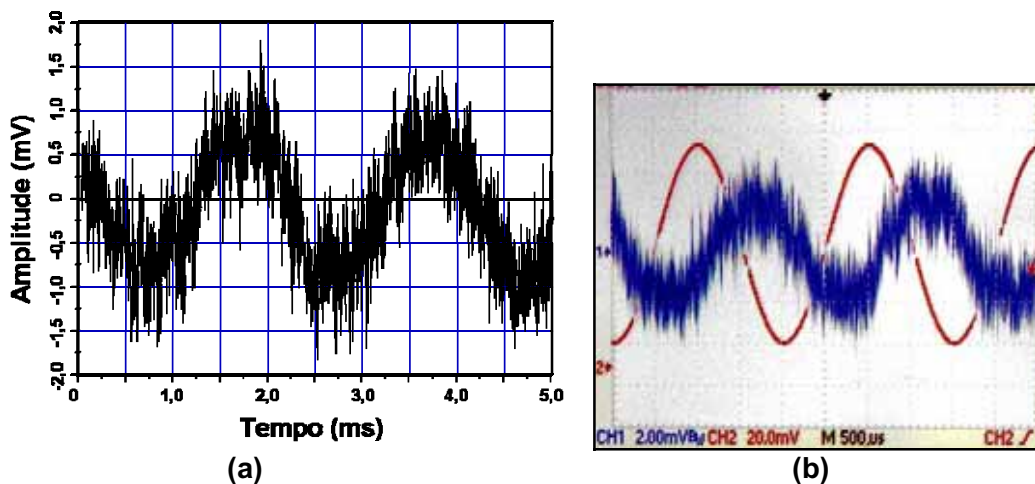


FIGURA 5.23 – Dados de saída do anemômetro adquiridos pelo osciloscópio digital (a) sinal temporal da sonda para onda senoidal de 500 Hz e (b), a visualização deste sinal junto ao sinal de entrada.

As Figuras 5.24 e 5.25 apresentam os resultados da tensão de saída do anemômetro para uma entrada de onda quadrada e senoidal de amplitude próxima de $100 \text{ mV}_{\text{p-p}}$ em 1 kHz, respectivamente.

As Figuras 5.26 e 5.27 apresentam os resultados da tensão de saída do anemômetro para uma entrada de onda quadrada e senoidal de amplitude próxima de $100 \text{ mV}_{\text{p-p}}$ em 5 kHz, respectivamente.

E finalmente, as Figuras 5.28 e 5.29 apresentam os resultados da tensão de saída do anemômetro para uma entrada de onda quadrada e senoidal de amplitude $100\text{ mV}_{\text{p-p}}$ em 10 kHz , respectivamente.

As Figuras 5.22(b) até 5.29(b) foram obtidas diretamente da tela de cristal líquido do osciloscópio digital, no qual o fundo é preto com linhas de grade brancas. De forma a permitir uma imagem impressa mais nítida e evitar o fundo preto para figuras, suas cores foram invertidas, transformando os tons mais escuros em tons claros, não havendo alteração das escalas ou dos valores medidos.

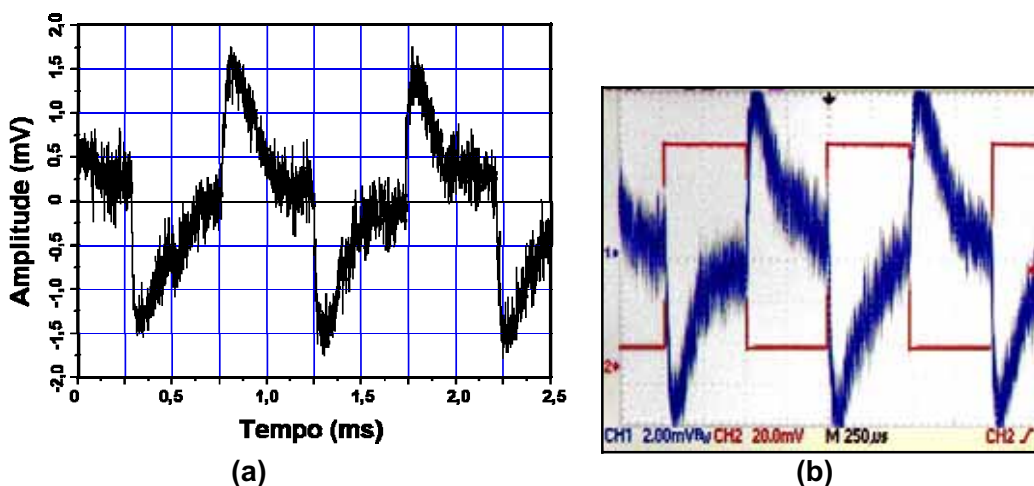


FIGURA 5.24 – Dados de saída do anemômetro adquiridos pelo osciloscópio digital (a) sinal temporal da sonda para onda quadrada de 1 kHz e (b), a visualização deste sinal junto ao sinal de entrada.

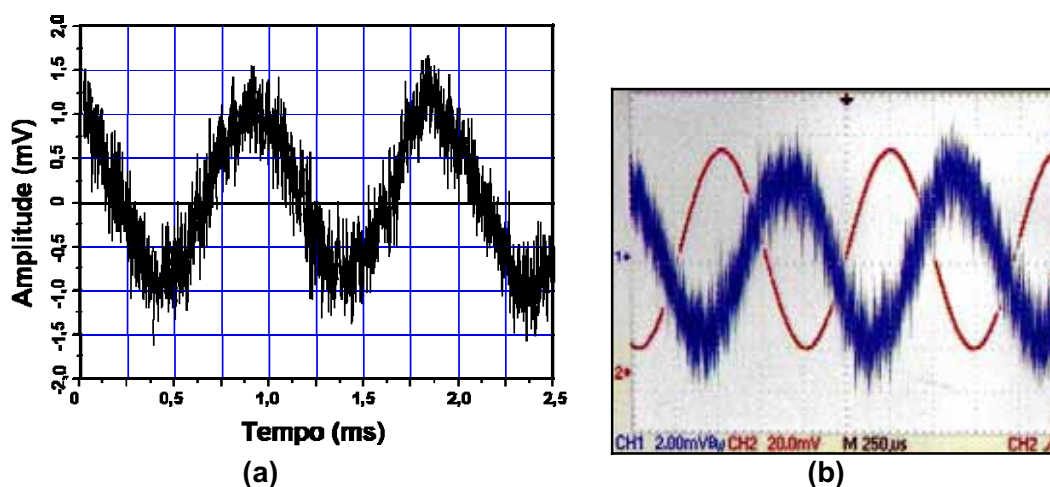


FIGURA 5.25 – Dados de saída do anemômetro adquiridos pelo osciloscópio digital (a) sinal temporal da sonda para onda senoidal de 1 kHz e (b), sua visualização.

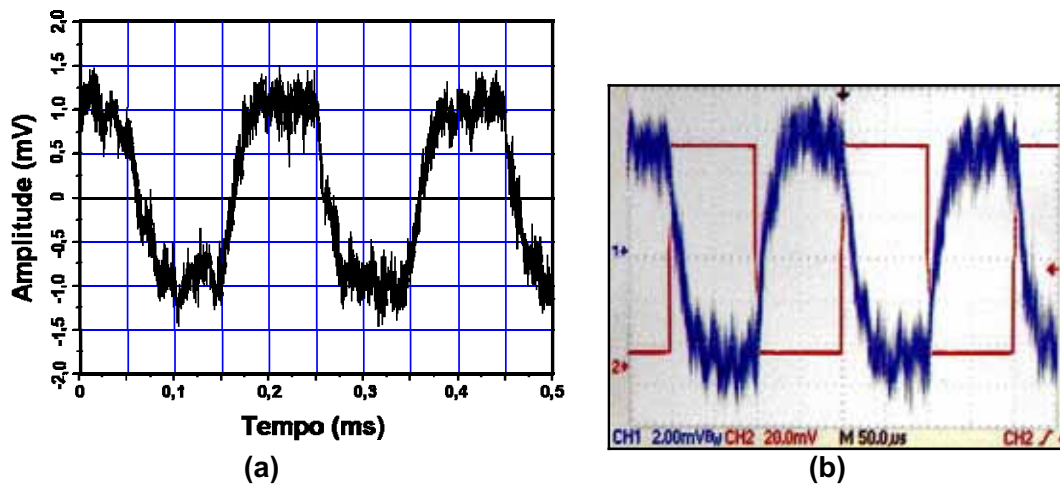


FIGURA 5.26 – Dados de saída do anemômetro adquiridos pelo osciloscópio digital (a) sinal temporal da sonda para onda quadrada de 5 kHz e (b), sua visualização.

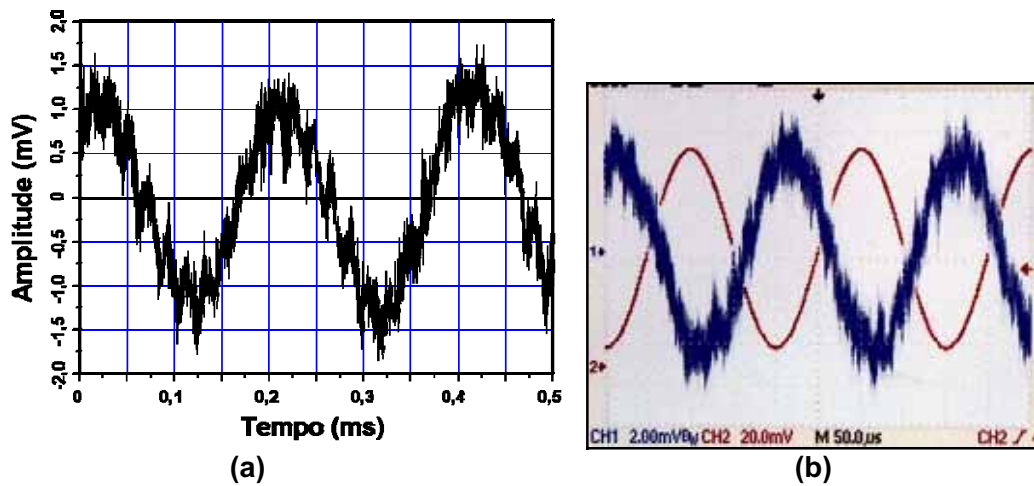


FIGURA 5.27 – Dados de saída do anemômetro adquiridos pelo osciloscópio digital (a) sinal temporal da sonda para onda senoidal de 5 kHz e (b), sua visualização.

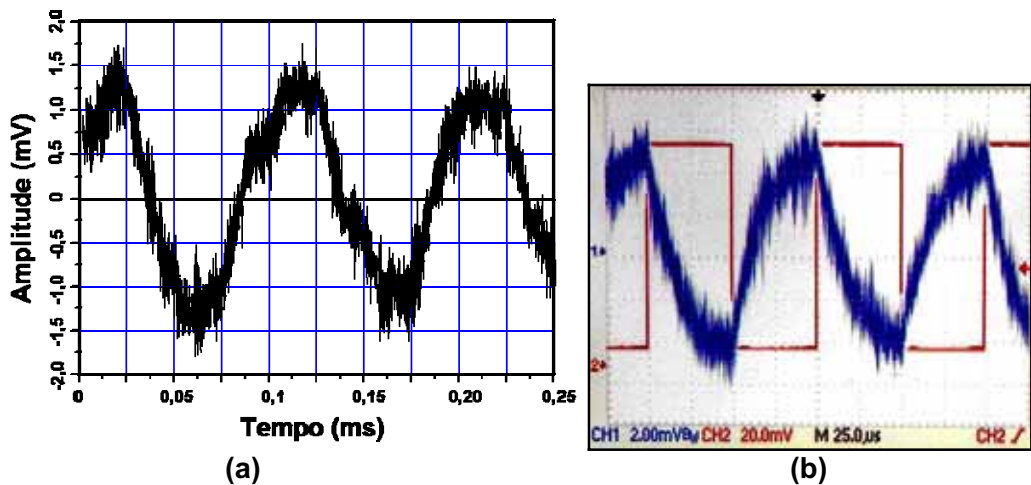


FIGURA 5.28 – Dados de saída do anemômetro adquiridos pelo osciloscópio digital (a) sinal temporal da sonda para onda quadrada de 10 kHz e (b), a visualização deste sinal junto ao sinal de entrada.

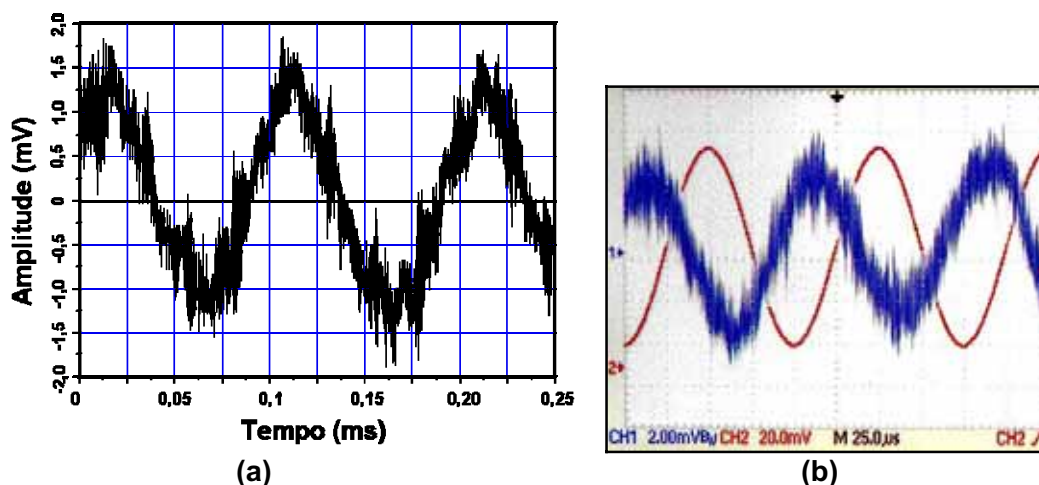


FIGURA 5.29 – Dados de saída do anemômetro adquiridos pelo osciloscópio digital (a) sinal temporal da sonda para onda senoidal de 10 kHz e (b), a visualização deste sinal junto ao sinal de entrada.

Os sinais obtidos no teste com gerador de sinais, apresentados nas Figuras 5.22(a) e 5.24(a), para as frequências de 500 Hz e 1 kHz respectivamente, apresentaram um sobre-sinal relativamente elevado, indesejado para o circuito do anemômetro.

O melhor resultado foi obtido na frequência de 5 kHz, mostrado na Figura 5.26, já que o circuito foi ajustado para operar na proximidade desta frequência. Quando estimulado na frequência de 10 kHz, ocorreu uma pequena deformação do sinal de saída, conforme mostra a Figura 5.28. Contudo, até 10 kHz, o ajuste realizado satisfaz os requisitos necessários para sua operação no teste com onda quadrada.

Todos os testes com a entrada senoidal, desde a frequência de 500 Hz até 10 kHz, não apresentaram distorções perceptíveis na forma, no entanto, a partir da frequência de 10 kHz, a amplitude do sinal começa a ficar comprometida (reduzida), mostrando a limitação do circuito e do referido ajuste, na operação do circuito em frequências superiores a 10 kHz.

Os sinais obtidos com o primeiro protótipo do anemômetro através do teste com gerador de sinais, mostrado nas Figuras 5.22 até 5.29, apresentaram algum ruído, porém, o aspecto geral da forma de onda resultante está bem definido e pode ser identificado com relativa segurança. Novamente, vale lembrar que o ruído no sinal de saída pode ser reduzido com o uso de filtros passa-baixa limitado na máxima frequência desejada de operação para este circuito. Contudo, o circuito eletrônico do primeiro protótipo do anemômetro desenvolvido para este trabalho não utilizou filtros em seu sinal de saída. Propositalmente, nenhum recurso ou função de redução de ruído do osciloscópio digital foi utilizado nestes resultados.

5.4.2.2 – Segundo protótipo CTA

O ajuste em freqüência imposto ao circuito do segundo protótipo teve como objetivo otimizar o sistema para uma freqüência máxima de 2 kHz. Esta freqüência também é determinada pelo resistor $R21$ e pelo capacitor $C17$, mostrados no esquema da Figura 3.9, os quais limitam a freqüência do sinal na entrada do amplificador de corrente – *boost*. A escolha desta freqüência máxima de operação foi escolhida e o circuito foi projetado para trabalhar próximo desse valor, devido a possibilidade de construir um sistema de conversão de dados analógico para digital (A/D), acoplado diretamente na saída do segundo protótipo. Assim, os dados resultantes poderiam ser diretamente inseridos num computador pessoal para realizar a aquisição e tratamento destes dados. Contudo, não foi possível concluir esta etapa do desenvolvimento deste instrumento neste trabalho. A freqüência desse sistema de conversão de dados seria de no máximo 5 kHz e desta forma, para atender o critério de amostragem de Nysquit, o sinal de entrada neste sistema de conversão não poderia ser superior a duas vezes esta freqüência. Esta medida justifica o projeto do circuito do segundo protótipo para operar com um sinal de saída otimizado em 2 kHz.

O sinal superior da Figura 5.30 – canal 1 – mostra o resultado experimental do segundo protótipo do anemômetro quando o circuito da ponte de Wheatstone é submetido a um sinal de onda quadrada de aproximadamente $1 V_{p-p}$ e 1,031 kHz de freqüência, mostrado no sinal inferior da Figura 5.30 – canal 2. Este mesmo procedimento foi realizado para um sinal senoidal de 1,59 kHz e amplitude de aproximadamente $1,5 V_{p-p}$, obtendo o resultado mostrado na Figura 5.31, nas mesmas condições do sinal de onda quadrada.

Grande parte do ruído do sinal de saída das Figuras 5.30 e 5.31 puderam ser visualmente eliminadas da tela do osciloscópio com o uso da função de média de aquisição. Neste modo, o osciloscópio adquire diversas formas de onda, calcula a média entre elas e exibe a forma de onda resultante, sendo utilizada para reduzir ruídos aleatórios. Contudo, o sinal de saída do circuito do segundo protótipo apresenta menor nível de ruído em relação ao circuito do primeiro protótipo, principalmente devido à limitação em freqüência imposta ao circuito do segundo protótipo.

Neste trabalho, não houve a necessidade explícita de comparar o nível de ruído entre os sinais de saída dos protótipos desenvolvidos, já que o propósito fundamental era de construir anemômetros funcionais para atender critérios de calibração e uso. Contudo, esta análise se fez

necessária devido a realização de comparações quantitativas entre os dois circuitos eletrônicos produzidos.

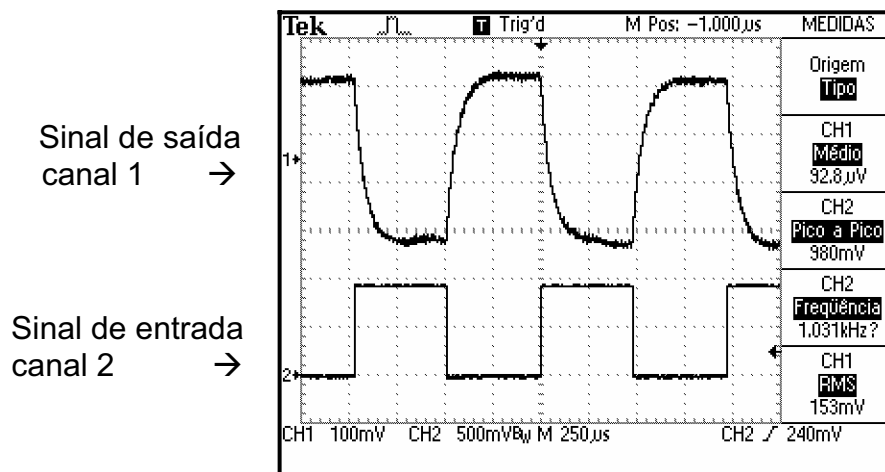


FIGURA 5.30 – Resultado do teste com gerador de sinais. Canal 1 - sinal de saída do anemômetro e canal 2 – sinal de entrada tipo onda quadrada de 1 kHz.

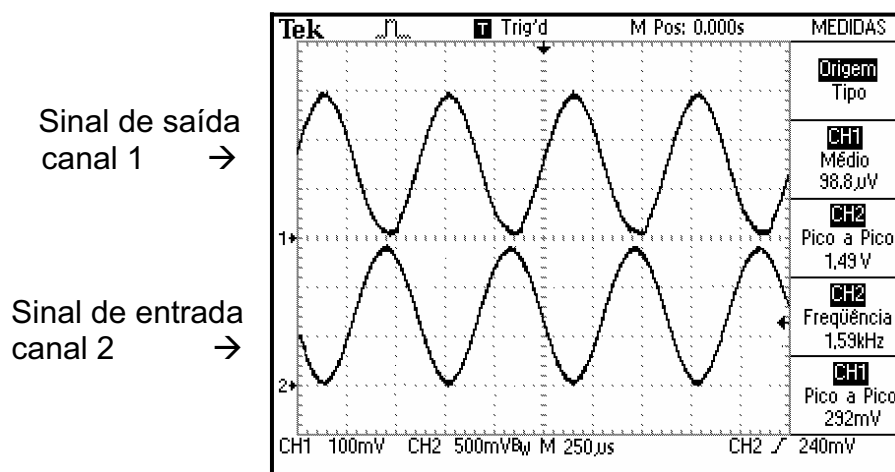


FIGURA 5.31 – Resultado do teste com gerador de sinais. Canal 1 - sinal de saída do anemômetro e canal 2 – sinal de entrada tipo onda senoidal de 1,6 kHz.

De forma a explorar uma faixa de frequências entre 1 kHz até 2,5 kHz, o osciloscópio digital foi configurado para memorizar o último sinal presente em seus canais de entrada, mantendo fixo estes dados em sua tela de cristal líquido. Essa função é chamada de persistência de duração infinita. Desta forma, uma faixa de frequências contínuas foi inserida seqüencialmente no segundo protótipo do anemômetro através do gerador de sinais e estes resultados são mostrados, todos e simultaneamente. A Figura 5.32 mostra este procedimento para o sinal de onda quadrada e a Figura 5.33, para o sinal senoidal. Para uma amplitude fixa de 1 V_{p-p}, a frequência destes sinais foram variadas de 1 até 2,5 kHz.

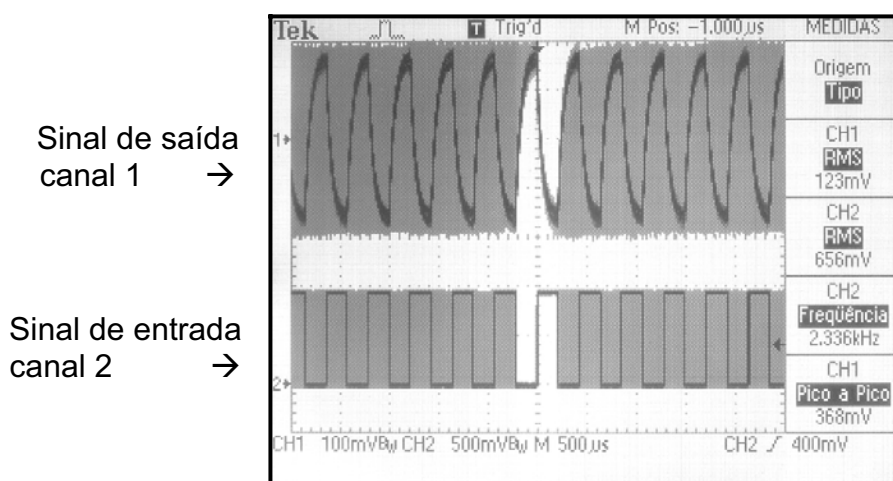


FIGURA 5.32 – Variação contínua de 1 até 2,5 kHz da frequência do sinal de onda quadrada inserido do anemômetro, visto na tela do osciloscópio digital com persistência infinita.

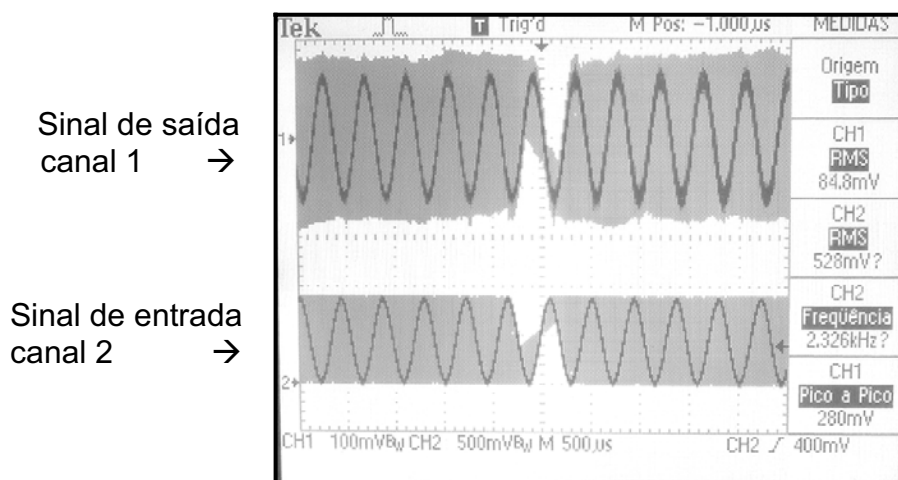


FIGURA 5.33 – Variação contínua de 1 até 2,5 kHz da frequência do sinal senoidal inserido do anemômetro, visto na tela do osciloscópio digital com persistência infinita.

Este procedimento agiliza o teste em frequência deste equipamento, reduzindo o tempo de duração do experimento. Esta variação contínua da frequência do sinal inserido na ponte de Wheatstone no segundo protótipo apresentou pouca redução em sua amplitude, tanto para entrada de onda quadrada, mostrado na Figura 5.32, quanto para senoidal, mostrado na Figura 5.33. Isto pode ser verificado observando a área sombreada no canal 1 (forma de onda superior) dessas figuras.

Uma queda de amplitude significativa é percebida quando o segundo protótipo recebe frequências acima de 2,3 kHz, para ambos os sinais de onda quadrada e senoidal.

A Figura 5.34 mostra a simulação numérica da estimulação do circuito da ponte de

Wheatstone do segundo protótipo do anemômetro de fio quente através de um sinal de onda quadrada de 1 kHz e amplitude de 2 V_{p-p}. O mesmo procedimento foi aplicado na simulação do circuito do segundo protótipo para uma entrada senoidal de 1 kHz com amplitude de 2 V_{p-p}, conforme é mostrado na Figura 5.35.

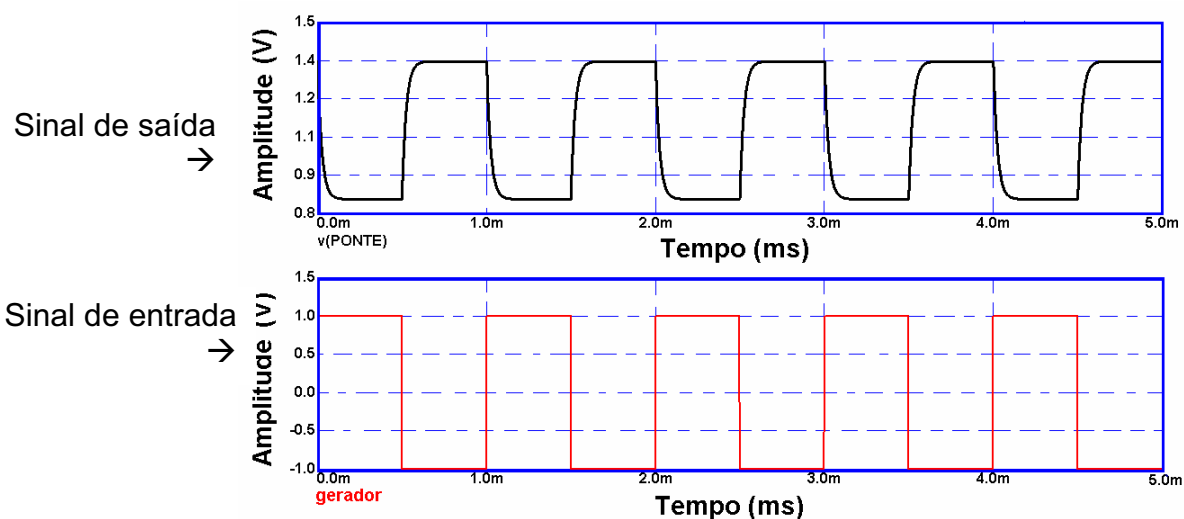


FIGURA 5.34 – Simulação do sinal de saída do circuito do anemômetro para uma estimulação de onda quadrada de 1 kHz.

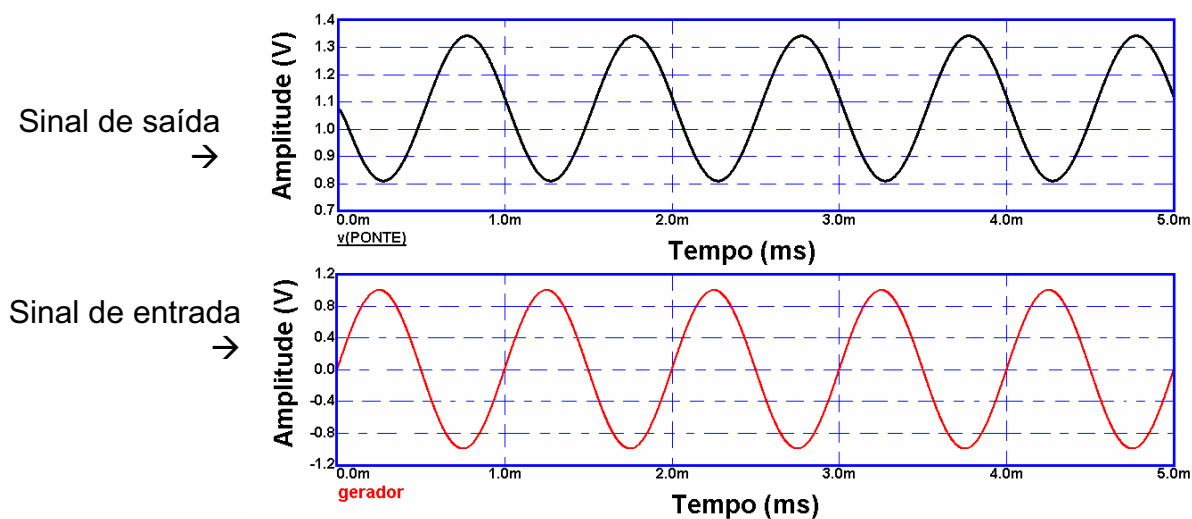


FIGURA 5.35 – Simulação do sinal de saída do circuito do anemômetro para uma estimulação senoidal de 1 kHz.

De forma a verificar numericamente a máxima frequência de estimulação na qual o circuito do anemômetro responde coerentemente, foi simulado também sinais com as frequências de 2,5 kHz, sendo estes resultados apresentados nos gráficos das Figuras 5.36 e 5.37, para entrada de onda quadrada e senoidal, respectivamente.

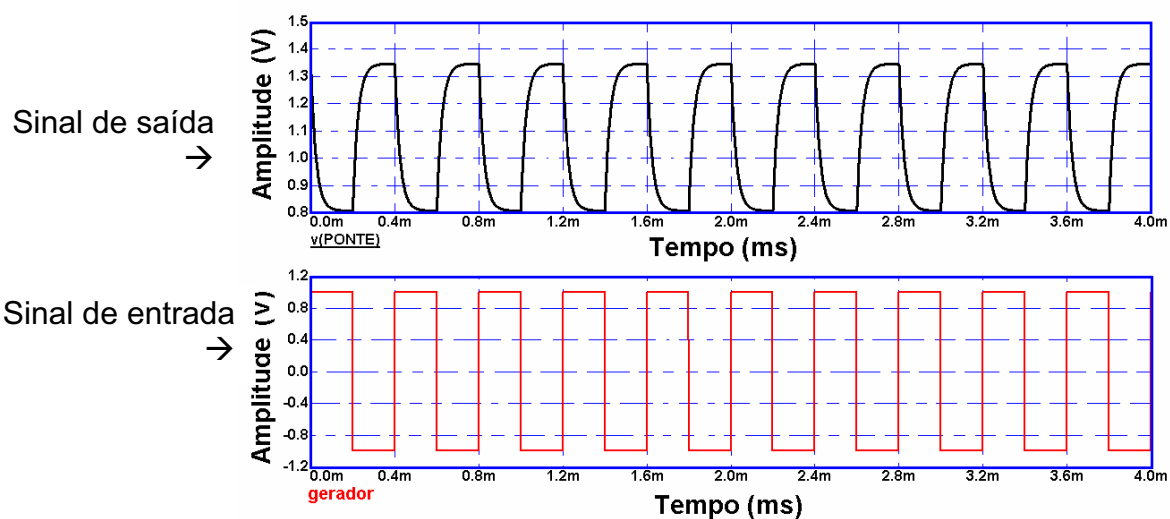


FIGURA 5.36 – Simulação do sinal de saída do circuito do anemômetro para uma estimulação de onda quadrada de 2,5 kHz.

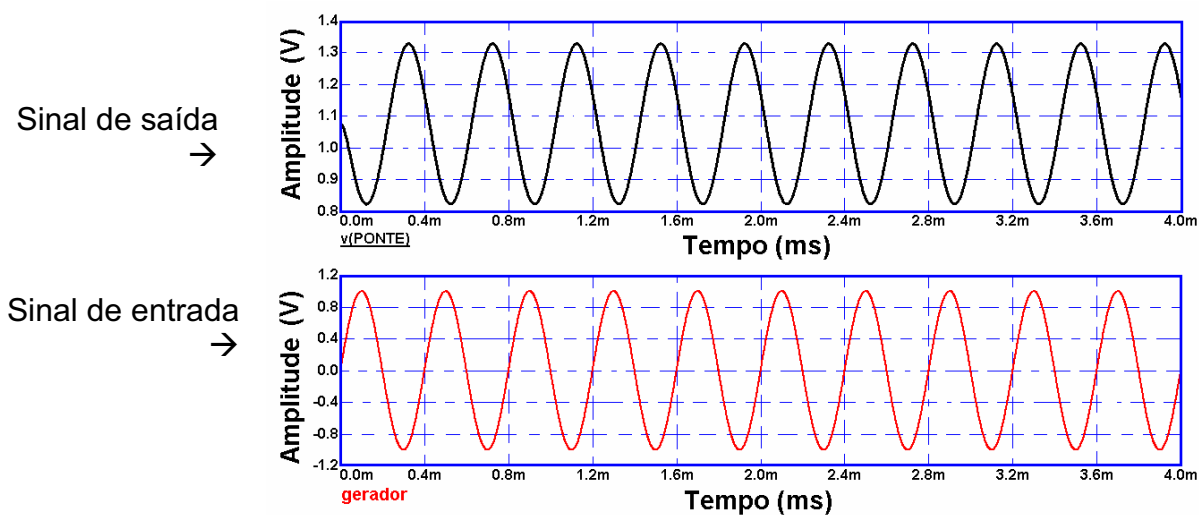


FIGURA 5.37 – Simulação do sinal de saída do circuito do anemômetro para uma estimulação senoidal de 2,5 kHz.

Comparando-se os resultados da Figura 5.34 e 5.36, para a freqüência de 1 kHz e 2,5 kHz respectivamente, uma pequena queda na amplitude do sinal de saída do anemômetro é percebida quando o circuito em malha fechada é colocado na freqüência de 2,5 kHz. Esta queda indica que o instrumento não pode fornecer resultados de boa amplitude quando submetido em freqüências acima deste limite, caracterizando a máxima resposta em freqüência do circuito.

Uma pequena queda da amplitude pode ser observada entre os gráficos da Figura 5.35 e 5.37 para a entrada senoidal. Esta atenuação indicada que a máxima freqüência de operação do circuito está próxima de 2,5 kHz, ocorrendo atenuações maiores para freqüências superiores ao limite simulado.

Os resultados experimentais e numéricos apresentam boa concordância com relação à diminuição da amplitude do sinal de saída do anemômetro quando sua sonda é submetida a frequências acima de 2,5 kHz. Esta característica é esperada para o funcionamento deste protótipo, atestando a calibração em frequência imposta ao circuito segundo protótipo nesta frequência de interesse.

5.5 – Caracterização das sondas de fio quente

O gráfico da Figura 5.38 mostra os dados da tensão e corrente para obtenção da resistência elétrica do cabo de interligação de 4 m – Figura 4.25(a) – e sua respectiva curva de tendência linear, passando pela origem. O coeficiente angular da reta obtida é o próprio valor da sua resistência elétrica, sendo apresentada no próprio gráfico.

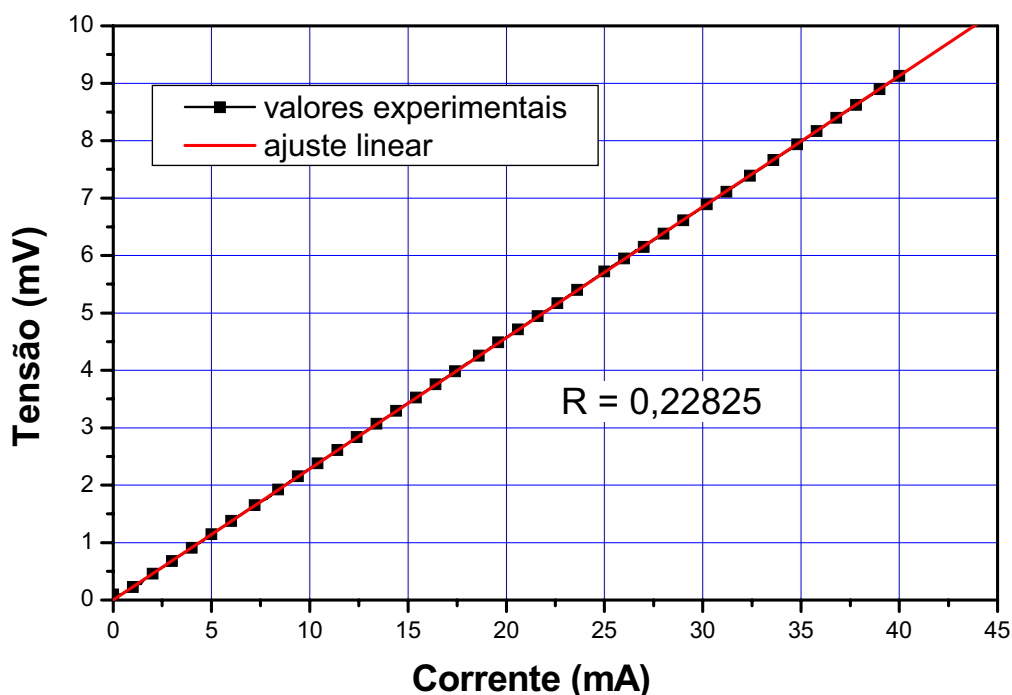


FIGURA 5.38 – Dados tensão × corrente do cabo de interligação de 4 m com o valor de sua resistência elétrica indicada.

Os resultados experimentais e a curva de ajuste linear da resistência elétrica do suporte para sondas – Figura 4.25(c) – são apresentados no gráfico da Figura 5.39.

A obtenção da resistência elétrica da sonda de 5 μm , mostrada na Figura 4.2(a) é apresentado no gráfico da Figura 5.40. De forma a evitar tanto o aquecimento excessivo, quanto

a queima da sonda, a corrente máxima para este teste foi limitada em 46 mA, obtendo-se assim 230 pontos espaçados de 0,2 mA cada. Por motivos estéticos, foram apresentados no gráfico da Figura 5.40 os resultados experimentais espaçados de cinco em cinco pontos.

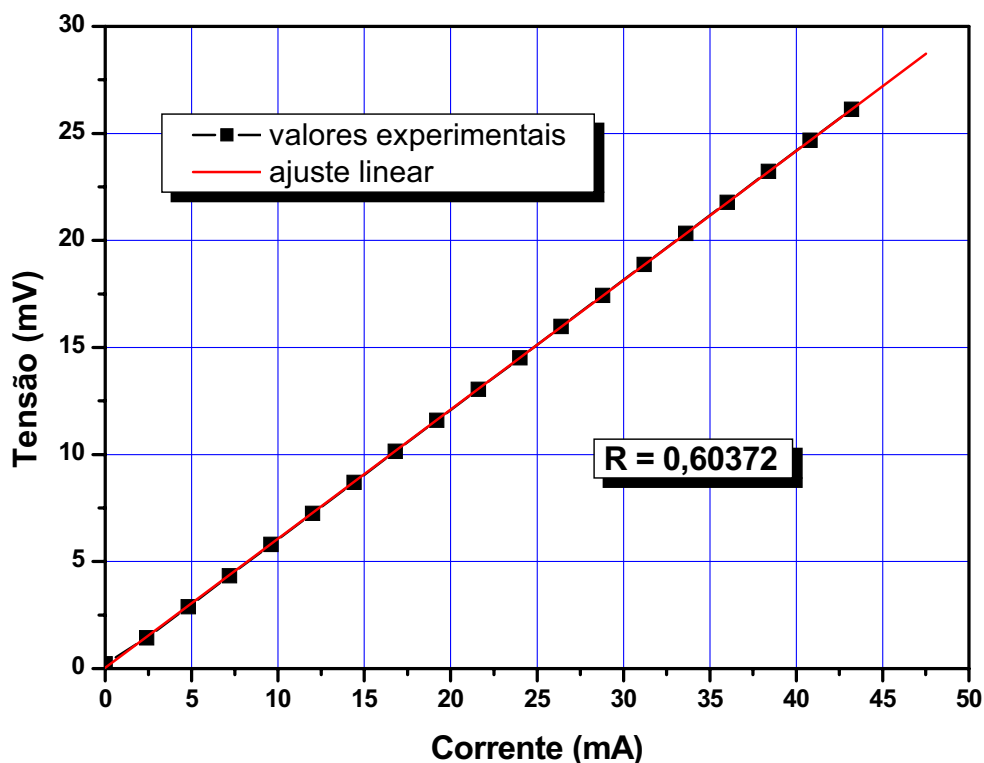


FIGURA 5.39 – Dados tensão \times corrente do suporte de sondas 55H22 com o valor de sua resistência elétrica indicada.

O mesmo procedimento aplicado na sonda anterior foi realizado para a sonda de tungstênio de 12 μm , mostrada na Figura 4.2(b), cujo valor de sua resistência, juntamente com os resultados experimentais, são mostrados no gráfico da Figura 5.41.

O resultado para as sondas da Figura 4.3 são mostrado no gráfico das Figuras 5.42, 5.43 e 5.44, obtidos através dos mesmos procedimentos experimentais aplicados nas sondas da Figura 4.2.

Durante todo o processo de aquisição dos dados da tensão e corrente das sondas, do cabo de interligação e do suporte de sondas, a temperatura ambiente esteve estável em aproximadamente 297,8 K (24,7 °C), com variação desprezível na segunda casa decimal. Desta forma, a influência da variação da temperatura ambiente no valor das resistências elétrica obtidas é praticamente nula, não sendo considerada neste trabalho.

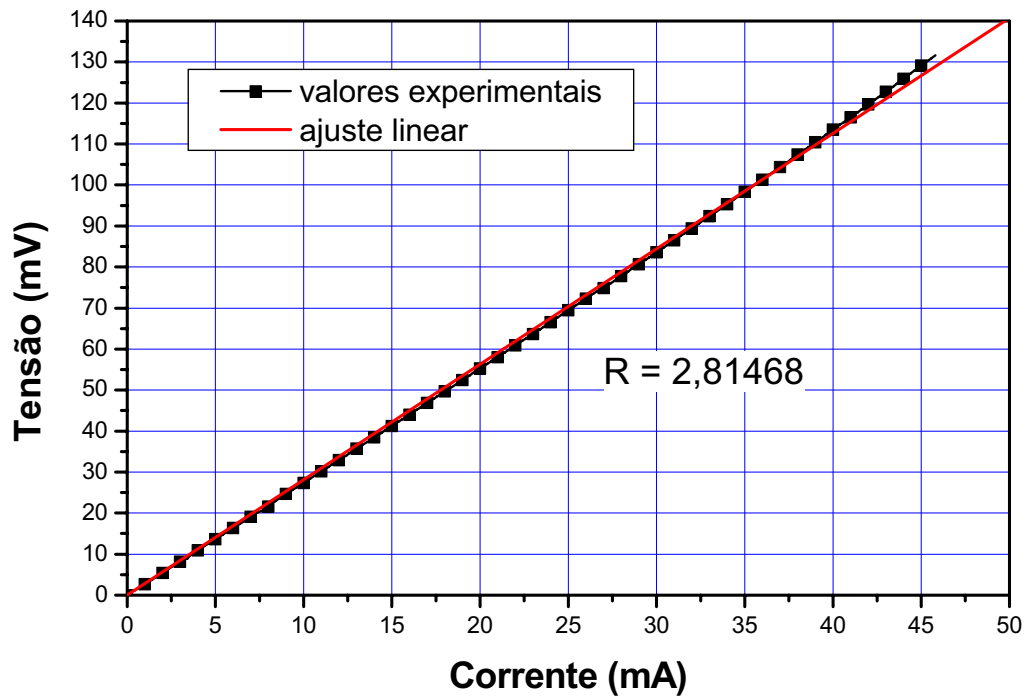


FIGURA 5.40 – Dados tensão × corrente da sonda de tungstênio – Figura 4.2(a) - e o valor de sua resistência elétrica.

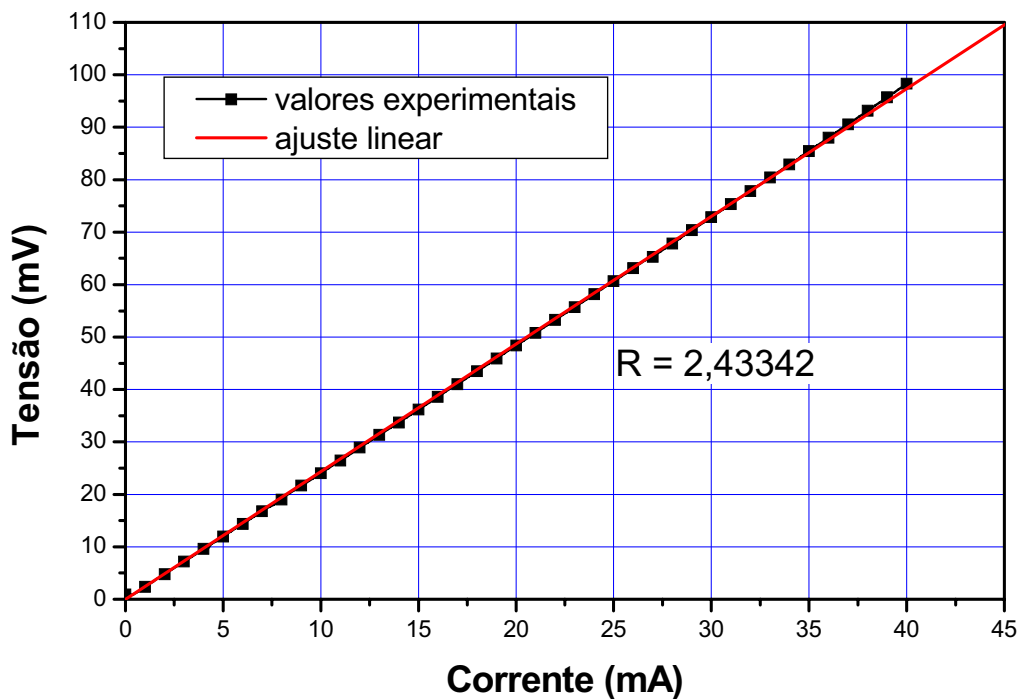


FIGURA 5.41 – Dados tensão × corrente da sonda de 12 μm – Figura 4.2(b) - e o valor de sua resistência elétrica.

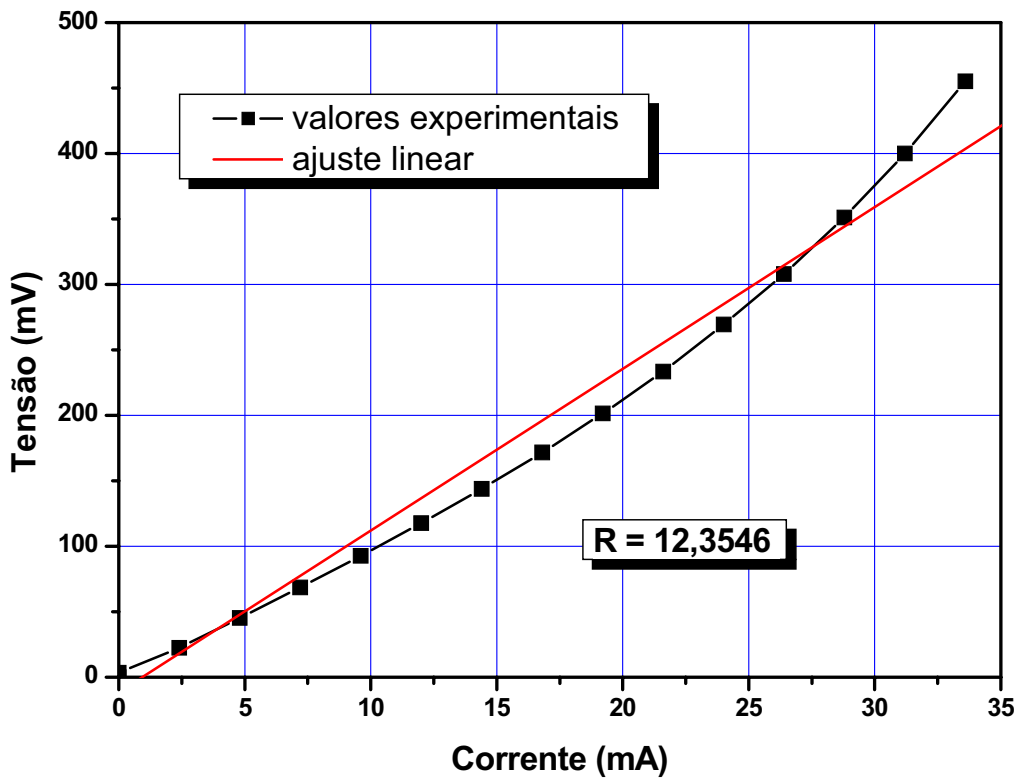


FIGURA 5.42 – Dados tensão × corrente da sonda sonda de 5 µm – Figura 4.3(a) - e o valor de sua resistência elétrica.

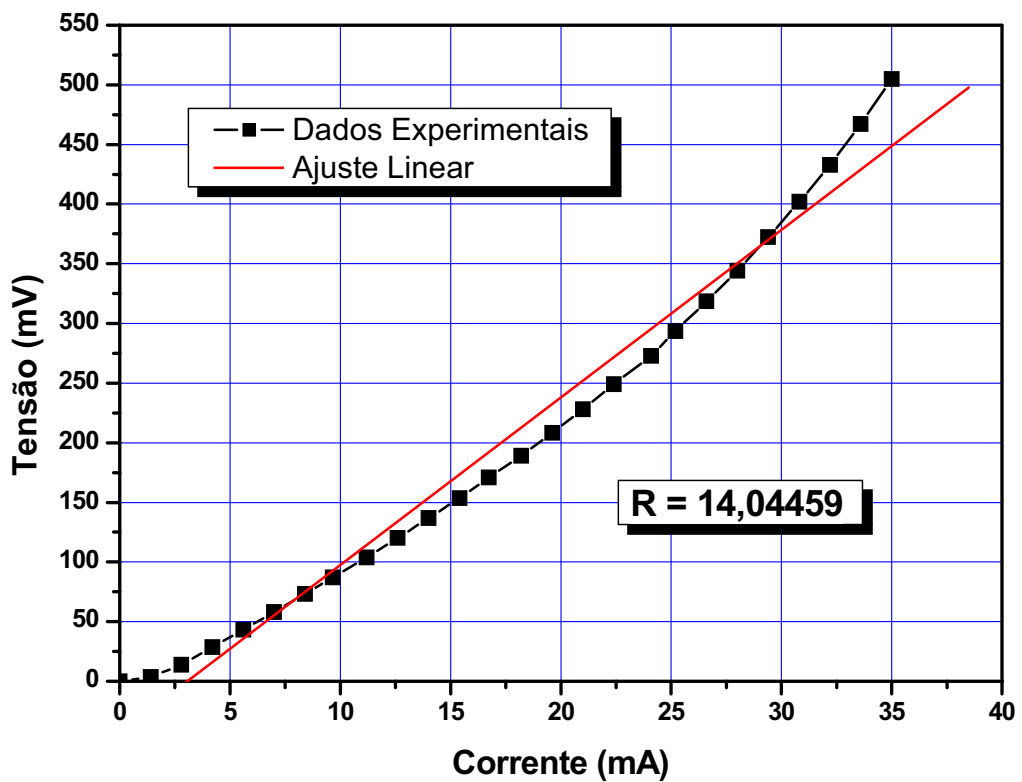


FIGURA 5.43 – Dados tensão × corrente da sonda de 5 µm – Figura 4.3(b) - e o valor de sua resistência elétrica.

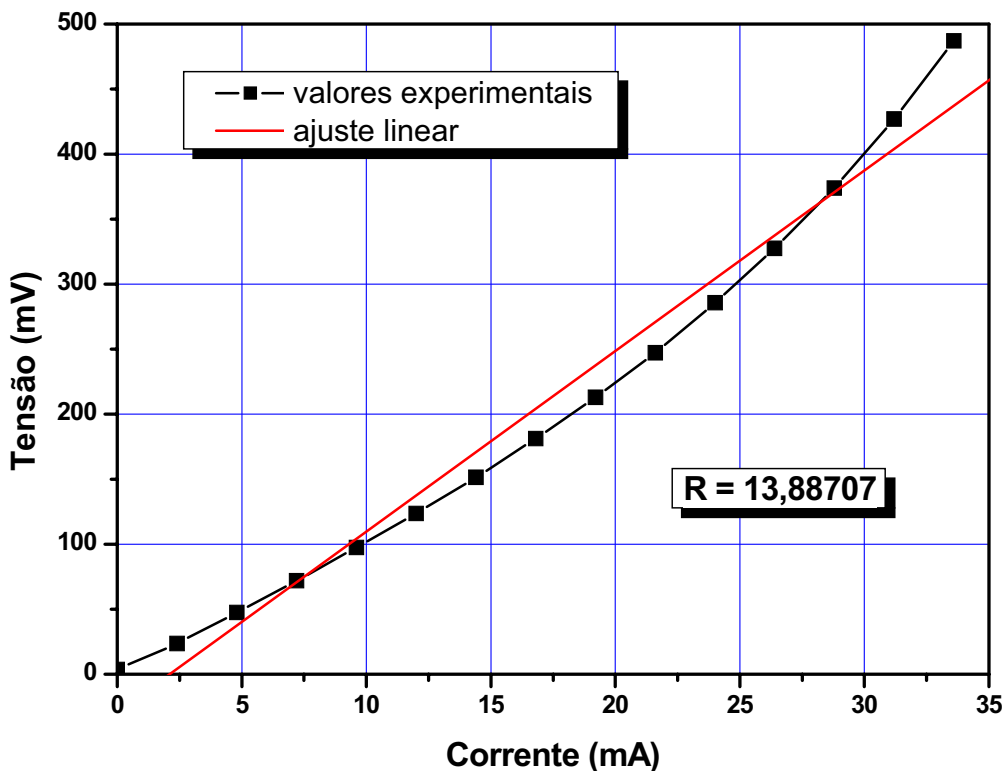


FIGURA 5.44 – Dados tensão × corrente da sonda para camada limite – Figura 4.3(c) - e o valor de sua resistência elétrica.

A Tabela 4 resume os resultados obtidos para a resistência das sondas de fio de tungstênio analisadas, do cabo de interligação e do suporte de sondas.

Tabela 4 – Valor das resistências elétricas dos componentes.

Cabo de interligação 4 m	0,22825 Ω
Suporte de sondas 55H22	0,60372 Ω
Sonda da Figura 4.2(a) (5 μm)	2,81468 Ω
Sonda da Figura 4.2(b) (12 μm)	2,43342 Ω
Sonda da Figura 4.3(a) (5 μm)	12,3546 Ω
Sonda da Figura 4.3(b) (5 μm)	14,04459 Ω
Sonda da Figura 4.3(c) (5 μm)	13,88607 Ω

O cálculo das incertezas associadas com a obtenção das resistências elétricas das sondas ensaiadas através deste processo é apresentado e descrito no Apêndice C.

A caracterização das sondas de fio quente utilizadas neste trabalho teve como objetivo fundamental obter o valor preciso de suas respectivas resistências elétricas para uma temperatura de referência. Estes resultados permitiram, tanto o ajuste preciso do sobre-aquecimento no circuito CTA, quanto bons resultados na simulação numérica do circuito e sonda.

O ajuste do sobre-aquecimento – *overheat* – depende do valor preciso da resistência do filamento na temperatura de operação da sonda. Neste trabalho, as sondas de fio quente, trabalhando em ar atmosférico, foram ajustadas numa temperatura muito próxima de 180 °C. Isto é feito, na prática, com o uso da Equação (2.27) e analiticamente, com o uso da Equação (2.30), juntamente com o valor dos coeficientes de resistividade do material para temperatura.

O melhor resultado para este teste foi verificado para a sonda com o filamento original da *Dantec*, mostrada na Figura 4.2(a), onde praticamente todos os pontos ensaiados estiveram dentro da faixa esperada, conforme é verificado no gráfico da Figura 5.40.

A sonda com fio de 12 μm , mostrada na Figura 4.2(b), também apresentou um resultado muito bom, evidenciado na excelente coincidência dos pontos experimentais com a reta de ajuste, conforme gráfico da Figura 5.41.

As sondas mostradas na Figura 4.3 foram recondicionadas com um material diferente do utilizado na sonda da Figura 4.2(b). Estas sondas utilizaram um fio de tungstênio de 5 μm , enquanto que a sonda da Figura 4.2(b) utiliza um fio de tungstênio de 12 μm . Através dos gráficos das Figuras 5.42, 5.43 e 5.44, pode-se verificar uma não linearidade nos resultados, dificultando assim a determinação precisa da resistência elétrica destas sondas.

As sondas da Figura 4.3 foram caracterizadas com o mesmo processo de medição empregado nas sondas da Figura 4.2, não havendo diferenças técnicas com relação à metodologia empregada. Todas as sondas estiveram dentro de uma cápsula de acrílico, impedindo assim qualquer perturbação do movimento do ar ambiente sobre a sonda. Além disso, todo o processo de medição é completamente automático, necessitando somente um comando do operador para ativar a rotina mostrada na Figura 4.22. As sondas da Figura 4.2(a) e 4.2(b) foram ensaiadas numa faixa de corrente de zero até um valor máximo de 45 mA. Já as sondas da Figura 4.3 foram ensaiadas numa faixa de corrente menor, com valor máximo de 35 mA.

Várias são as hipóteses para explicar o comportamento anômalo das sondas da Figura 4.3, podendo esta característica estar relacionada com o processo de solda utilizado, o tipo do material empregado ou deficiências na normalização do filamento após o processo de soldagem.

Vale ressaltar que a caracterização da resistência elétrica destas sondas, através do método utilizado neste trabalho, é um bom indicativo da qualidade do condicionamento.

O comportamento não-linear da sonda da Figura 4.3(c) influenciou negativamente os ensaios no túnel de vento, o qual tinha como objetivo medir a velocidade do escoamento na esteira de uma esfera lisa, conforme exposto na seção 5.3.

Capítulo 6

Conclusões e recomendações para trabalhos futuros

A anemometria de fio quente é uma consagrada técnica experimental estabelecida há cerca de um século. Sua contribuição para pesquisa científica e suas aplicações no campo comercial e industrial justificam os inúmeros trabalhos a respeito deste tipo de instrumentação, abrangendo dezenas de áreas da engenharia tais com controle, instrumentação eletrônica, aquisição de dados, sistemas aeroespaciais, mecânica dos fluidos, termodinâmica, química, meteorologia, etc.

Essa variedade de aplicações permitiu que o princípio físico que rege o funcionamento do anemômetro de fio quente fosse aplicado em diversos outros instrumentos. Por exemplo, ainda em 1927, KNUDSEN (1927) no seu interessante trabalho, propõem um sistema de anemometria de fio quente modificado de forma a medir pressão. Mesmo em datas mais recentes, outras propostas são apresentadas, como os medidores de concentração de gases, apresentado no trabalho de JONES (1977).

De maneira geral, o trabalho de KING (1914) constitui o alicerce principal para a anemometria de fio quente, sendo sua análise citada, direta ou indiretamente, em praticamente todas as referências consultadas no presente trabalho. A dedução da expressão que relaciona a troca de calor de cilindros aquecidos imersos num meio fluido, recebeu o nome de “Lei de King”, em razão da sua contribuição ao desenvolvimento do anemômetro de fio quente, conforme aponta COMTE - BELLOT (1976) dentre outros.

Torna-se necessário explicitar que, em nenhuma das referências consultadas, foi encontrado um circuito eletrônico completo que pudesse ser imediatamente construído e aplicado. Baseado exclusivamente no encadeamento dos componentes proposto por PERRY (1982), um circuito preliminar foi desenvolvido dentro do presente esforço de trabalho, sendo que algumas das falhas detectadas nas especificações dos componentes do primeiro

protótipo foram corrigidas numa segunda montagem, a qual apresenta somente componentes eletrônicos de melhor desempenho com relação ao primeiro circuito. Acredita-se que o esquema eletrônico apresentado, em detalhes, nas Figuras 3.8, 3.9 e 3.10, é mais do que suficiente para permitir a sua perfeita reprodução por parte de qualquer outro pesquisador da área da mecânica dos fluídos ou fins.

Entretanto, o desenvolvimento de um sistema de anemometria com finalidades industriais ou profissionais requer a elaboração de um projeto mais sofisticado e que apresente certos recursos automatizados para facilitar seu uso rotineiro. Neste contexto, o circuito eletrônico proposto apresenta ajustes manuais para a correção da tensão de *bias* e do sobre-aquecimento da sonda, os quais devem ser realizados através de medições secundárias, limitando o uso do anemômetro para as aplicações acadêmicas.

Um fator limitante na utilização de delicados instrumentos de medição é o ruído aleatório, constantemente presente nos sinais de saída. Na calibração em frequência com o uso do gerador de sinais, o primeiro protótipo do anemômetro apresentou uma carga considerável de ruído em seu sinal de saída, conforme pode ser verificado nos gráficos das Figuras 5.22 até 5.29, principalmente devido às características da fonte de alimentação chaveada e dos resistores empregados no circuito da ponte de Wheatstone. No segundo protótipo, o ruído pode ser excluído da forma de onda resultante graças a um recurso interno ao osciloscópio digital utilizado, conforme se pode observar nas Figuras 5.30 até 5.33, no entanto, o sinal é menos ruidoso em relação ao primeiro protótipo, devido ao emprego de componentes com características aprimoradas, além de uma blindagem contra radiação eletromagnética de bom desempenho.

De acordo com FRANCO (1998), diversas são as fontes de ruídos em circuitos eletrônicos e sua quantidade, ou nível, não depende da amplitude do sinal observado. Comparando-se a amplitude do sinal de saída entre as Figuras 5.25 e 5.31, por exemplo, podemos notar que a amplitude do sinal no primeiro protótipo é cerca de 35 vezes menor do que a amplitude do sinal do segundo protótipo. Esta comparação poderia encobrir o ruído presente no sinal do segundo protótipo, já que estes sinais apresentam amplitudes diferentes. A comparação deveria ocorrer para sinais de mesma amplitude, entretanto o nível de ruído no sinal do primeiro protótipo é inferior a 2 mV e os ruídos desta amplitude, se presentes no sinal de saída do segundo protótipo, não influenciaram os resultados obtidos.

O circuito eletrônico dos protótipos desenvolvidos é dependente das características físicas

das sondas de fio quente utilizadas, a exemplo de sua resistência elétrica, em virtude do limitado ajuste de *overheat* imposto ao projeto. Sondas com resistências elevadas implicam em valores mais elevados da resistência elétrica do potenciômetro de ajuste do *overheat*. Isto implica numa menor sensibilidade de ajuste, o que pode dificultar a obtenção precisa do valor de *overheat* desejado.

A temperatura do fluido de trabalho também é fator limitante, pois deve ser mantida constante durante todo o período de utilização dos protótipos desenvolvidos. A temperatura do fluido em contato com a sonda, no caso deste trabalho, o ar ambiente, representa um sério inconveniente para o esquema apresentado por PERRY (1982), já que não possui uma proposta de correção do ponto de operação do anemômetro quando grandes variações de temperatura ocorrem. Ambos os protótipos desenvolvidos e aplicados neste trabalho não devem ser utilizados quando o fluido em contato com a sonda apresentar variações bruscas de sua temperatura.

O cabo de interligação entre sonda e a ponte de Wheatstone, o diâmetro do filamento e o comprimento do suporte de sondas apresentam características elétricas que influenciam os ajustes da resposta em frequência do circuito, podendo diminuir a faixa de frequências dos protótipos desenvolvidos. O cabo de interligação, por exemplo, deve ser blindado e apresentar uma impedância puramente resistiva, já que o efeito da indutância neste acessório deteriora a máxima frequência de operação do anemômetro. Neste trabalho, foi utilizado um cabo de interligação da empresa *Dantec*, exclusivo para a interligação do equipamento de anemometria ao suporte de sondas, apresentando excelentes características indutivas.

A construção de sondas de fio quente de elevada eficiência constitui um verdadeiro desafio, devido principalmente as reduzidas dimensões do filamento e a dificuldade de obtenção de materiais de boa qualidade. De fato, no que diz respeito à manipulação de fios com diâmetros inferiores a 5 μm torna-se necessário equipamentos e uma instrumentação adequada. Para fins comparativos, um fio de cabelo típico possui, em média, 100 μm de diâmetro, ou seja, vinte vezes maior que o diâmetro de uma sonda de uso geral, conforme explica LOMAS (1986).

Grande parte das sondas de fio quente são produzidas através da soldagem por fusão do filamento em suportes metálicos, os quais possuem dimensões compatíveis com o filamento. Desta forma, a habilidade manual de qualquer pessoa, mesmo das mais aptas e qualificadas, é insuficiente para realizar a construção de uma sonda funcional, necessitando para isso micro-manipuladores e sistemas óticos de precisão para assegurar tanto qualidade, quanto repetibilidade ao processo. Assim, o condicionamento de sondas constitui um fator limitante

neste trabalho devido à inexistência de equipamentos adequados para sua restauração no campus da Unesp – IS. Este serviço foi realizado com o auxílio de laboratórios externos, não permitindo, assim, o acompanhamento integral do processo de recuperação das sondas utilizadas neste trabalho.

Conforme foi constatado durante os ensaios no túnel de vento discutidos no Capítulo 5.3, as sondas mostradas na Figura 4.3 apresentaram um comportamento ôhmico anômalo, podendo ser decorrente das características físicas do processo de soldagem do filamento nos suportes da sonda. No entanto, a qualidade do material utilizado como filamento também é colocada em dúvida, uma vez que esta característica é fundamental para construção de sondas de bom desempenho.

Conforme pode ser verificado tanto durante o processo de calibração, quanto na obtenção do valor preciso de sua resistência elétrica, a sonda com filamento original da *Dantec* apresentou comportamento superior com relação as demais, principalmente decorrente do material de suas sondas, sendo este fios de tungstênio de 5 μm de diâmetro, recoberto com uma camada de platina. Este material é de difícil obtenção, sendo comercializado somente pela *Dantec* com custo muito elevado.

A adequada operação de um HWA requer um ajuste preciso da temperatura de operação da sonda, que se faz necessário para propiciar uma durabilidade mínima de sua vida útil. Para trabalhos com ar atmosférico em velocidades moderadas, autores, a exemplo de BRUUN (1995), recomendam uma temperatura de operação da sonda de até 300 °C, contudo, isso depende das características do material do filamento e do modo de operação do anemômetro. Para sondas de tungstênio é recomendado uma temperatura máxima de operação de 240 °C.

Quando o fluido de trabalho é líquido, como por exemplo a água, sondas de filme quente são as mais indicadas, numa temperatura de operação não superior a 30 °C da temperatura do meio, em virtude da possível desprendimento de bolhas na superfície da sonda. Estas bolhas de gases no escoamento podem alterar significativamente o valor da velocidade medida. Por exemplo, o trabalho de SEED & WOOD (1970) apresenta o uso de um anemômetro de fio quente operando no modo CTA para a investigação da velocidade do sangue no interior de artérias. Para isso, a temperatura de operação da sonda deve ser ajustada de tal forma que não exceda um limite pré-estabelecido já que, feito isso, os elementos constituintes do sangue podem ser fatalmente deteriorados, implicando na morte do paciente. Para assegurar um ajuste preciso da temperatura da sonda (*overheat*), é necessário conhecer o valor exato da resistência elétrica da

sonda e de seus elementos de interligação tais como cabos, conectores e terminais. No presente trabalho, o levantamento preciso da resistência elétrica das sondas de fio quente foi realizado com o uso de equipamentos de pesquisa para caracterização de supercondutores. Estes equipamentos apresentam uma elevada sensibilidade na medição de valores muito baixos de resistência elétrica, inferiores a $0,001 \Omega$, especialmente em amostras de materiais com dimensões reduzidas. Neste contexto estão inseridas as sondas de fio quente, as quais também apresentam além de dimensões reduzidas, baixos valores de resistência quando em temperatura ambiente.

A bancada de instrumentos utilizada para medição das resistências das sondas recebeu poucas adaptações para permitir a realização das medidas através de um processo automatizado, onde uma faixa discreta de valores fixos de corrente são postos a circular na sonda e sua respectiva queda de tensão é automaticamente medida. Este processo permitiu a construção dos gráficos onde a resistência elétrica é medida com uma incerteza seguramente menor de 0.1%, além de, simultaneamente, monitorar sua temperatura, a qual manteve-se constante durante todo o intervalo de medição.

O processo de calibração das sondas utilizadas neste trabalho forneceram, além da relação de conversão da tensão de saída do anemômetro numa grandeza física que caracteriza o escoamento, uma maneira segura de atestar o funcionamento do circuito eletrônico do anemômetro, caracterizando o seu funcionamento dentro de uma faixa de velocidades de interesse.

A verificação da resposta em frequência de anemômetros de fio quente, seguindo os procedimentos descritos em FIEDLER (1978), também fornece informações importantes para a análise do projeto de anemômetros de fio quente, a exemplo da sensibilidade do instrumento, tanto de sua sonda, quando dos amplificadores utilizados no circuito eletrônico. Estas características são evidenciadas durante os procedimentos com o primeiro protótipo, apresentado no Capítulo 4.4.2.1.

O teste com o *laser*, acompanhado de sua respectiva análise espectral, apontou para o pleno funcionamento do circuito do primeiro protótipo até uma frequência máxima de 1,5 kHz, enquanto que o teste com gerador de sinais mostrou bom funcionamento em frequência até uma estimulação próxima de 5 kHz, para o primeiro protótipo e 2,5 kHz, para o circuito do segundo protótipo do anemômetro. Fabricantes de anemômetros profissionais, a exemplo da *Dantec Dynamics*, assegura que seus equipamentos para anemometria de fio quente podem alcançar a marca de 20 kHz de frequência de operação, no entanto, SEYED & VEERAVALLI (1996) relata que ajustar um HWA para frequências maiores que 10 kHz é extremamente difícil. Vale ressaltar que

ambos os testes – gerador de sinais e com *laser* – tratam de aproximações ao real efeito da troca de calor no filamento, conforme trata os trabalhos de WEIDMAN & BROWAND (1975) e LU (1979). Contudo, são suficientes para mostrar a habilidade destes circuitos em lidar com variações bruscas do escoamento.

Ambas as calibrações realizadas no circuito experimental do primeiro e do segundo protótipo, tanto na obtenção da sua função de transferência estática com diferentes sondas, quanto na verificação da resposta em frequência do sinal de saída destes circuitos, estiveram dentro do quadro funcional previsto para o desenvolvimento deste trabalho, atestando tanto o circuito eletrônico proposto, quanto as metodologias empregadas em sua qualificação funcional.

Considerações Finais

De forma a melhorar o circuito do anemômetro de fio quente e proporcionar um projeto de melhor impacto profissional, este trabalho pode ser aprimorado através do desenvolvimento de outros sub-circuitos, a serem inseridos junto com o esquema proposto por PERRY (1982), resultando assim num sistema mais robusto e com características comerciais atraentes.

Uma primeira modificação consiste no desenvolvimento de um circuito para compensação da variação da temperatura do fluido, podendo ser aplicado nos dados da tensão de saída do anemômetro. Esta compensação pode ser também realizada corrigindo a corrente de sobre-aquecimento da sonda, realizando assim uma compensação contínua da diferença de temperatura entre fluido e sonda.

O ruído no sinal de saída pode ser reduzido com o uso de filtros ativos de ordem elevada, no entanto, a construção de filtros ativos de elevado desempenho requer componentes eletrônicos especiais, adequados para trabalhar em elevadas frequências. A utilização de indutores e capacitores de baixa perda tais como indutores com elevado fator Q e capacitores de tântalo, são fatores que elevam os custos do protótipo, porém contribuem para a melhoria da qualidade do sinal resultante.

A resposta em frequência do circuito pode ser melhorada inserindo circuitos compensadores de atraso de fase. Estes circuitos podem controlar o *overshot* do circuito de malha fechada, minimizando também o tempo de estabelecimento do sinal de saída. Contudo, o

projeto destes compensadores é prejudicado quando diferentes sondas e diferentes condições de operação são desejadas ao instrumento.

A utilização de componentes SMD - *Surface Mounting Device*, podem melhorar o desempenho geral do circuito CTA. Para isso, placas de circuitos impresso exclusivas devem ser desenvolvidas. A utilização desta classe de componentes minimiza o ruído no sinal de saída, proporcionando também um circuito com dimensões físicas menores, além de deixar um aspecto bastante profissional ao circuito eletrônico.

Agregar um sistema de conversão de dados analógico para digital (A/D) permite maior integração do anemômetro com o computador. Para isso, se faz necessário incluir um micro-controlador ou um micro-processador de dados junto com o circuito CTA, permitindo assim um controle digital de ajustes tais como, tensão de *bias*, ganho e correção automática de *off-set*.

== Referências Bibliográficas

- Abernethy, R. B.; Benedict, R. P. & Dowdell, R. B., 1985, “ASME Measurement Uncertainty”, *Journal of Fluid Engineering*, Vol. 107, pp. 161-164.
- Antonia, R. A., 2003, “On Estimating Mean and Instantaneous Turbulent Energy Dissipation Rates with Hot-Wires”, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 27, pp. 151 – 157.
- Antonia, R. A.; Browne, L. W. B. & Chambers, A. J., 1981, “Determination of Time Constants of Cold Wires”, *Review of Scientific Instruments*, Vol. 52(9), pp. 1382-1385.
- Bradley, J. N.; Butlin, R. N. & Quinn, J. G., 1965, “An Electrical Method for Breaking Shock Tube Diaphragms”, *Journal of Scientific Instrumentation*, Vol.42, pp. 901-902.
- Brown, G. O., 2003, “Henry Darcy’s Perfection of the Pitot Tube”, *Henry P. G. Darcy and Other Pioneers in Hydraulics: Contributions in Celebration of the 200th Birthday of Henry Philibert Gaspard Darcy*, ASCE – American Society of Civil Engineers, Reston, VA. pp. 14-23.
- Bruun, H. H.; Farrar, B. & Watson, I., 1989, “A Swinging Arm Calibration Method for Low Velocity Hot-Wire Probe Calibration”, *Experiments in Fluids*, Vol. 7, pp. 400-404.
- Bruun, H. H., 1995, “Hot-Wire Anemometry - Principles and Signal Analysis”, Oxford Science Publications, 507p.
- Bruun, H. H., Khan, M. A., Al-Kayiem, H. H. & Fardad, A. A., 1988, “Velocity Calibration Relationships for Hot-Wire Anemometry”, *Journal of Physics & Scientific Instruments*, Vol.21, pp. 225-232.
- Buchhave, P., 1978, “Transducer Techniques”, *Proceedings of the Dynamic Flow Conference 1978 on Dynamic Measurements in Unsteady Flows*, Sijthoff & Noordhoff International Publishers, pp. 427-463.

- Citriniti, J. H. & George, W. K., 1997, "The Reduction of Spatial Aliasing by Long Hot-Wire Anemometer Probes", *Experiments in Fluids*, Vol. 23, pp. 217-224.
- Citriniti, J. H., Taulbee, K. D. & Woodward, S. H., 1994, "Design of Multiple Channel Hot Wire Anemometers", *Fluid Measurement and Instrumentation*, Vol.183, pp. 67-73.
- Christman, P. J. & Podzimek, J., 1981, "Hot-Wire Anemometer Behavior in Low Velocity Air Flow", *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, Vol. 14, pp. 46-51.
- Comte-Bellot, G., 1976, "Hot-Wire Anemometry", *Annual Review of Fluid Mechanics*, Vol.8, pp. 209-231.
- Comte-Bellot, G., 1977, "Hot-Wire and Hot-Film Anemometers", *Measurement of Unsteady Fluid Dynamic Phenomena*, Hemisphere Publishing Corporation, Cap. 6, pp. 123-162.
- Ebefors, T.; Kälvesten, E. & Stemme, G., 1998, "Three Dimensional Silicon Triple Hot-Wire Anemometer Based on Polyimide Joints", *IEEE International Workshop on Micro Electro Mechanical System (MEMS'98)*, Heidelberg, Alemanha, 6p.
- Eguti, C. S. A.; Woiski, E. R. & Vieira, E. D R., 2002, "A Laboratory Class for Introducing Hot-wire Anemometry in a Mechanical Engineering Course", *Proceedings (in CD ROM) of the ENCIT 2002 ~ VIII Brazilian Congress of Thermal Science and Engineering*, October, 15 – 18 – Caxambu, MG. 10p.
- Elsner, J. W.; Domagata, P. & Elsner, W., 1993, "Effect of Finite Spatial Resolution of a Hot-Wire Anemometry on Measurements of Turbulence Energy Dissipation", *Measurement. Science and Technology*, Vol. 4, pp. 517-523.
- Fiedler, H., 1978, "On Data Acquisition in Heated Turbulent Flows", *Proceedings of the Dynamic Flow Conference 1978 on Dynamic Measurements in Unsteady Flows*, Sijthoff & Noordhoff International Publishers, pp. 81-100.
- Fox, R. W. & McDonald, A. T., 2001, "Introdução à Mecânica dos Fluidos", LTC Editora, 5º ed. 504p.

- Franco, S., 1998, "Design with Operational Amplifiers and Analog Integrated Circuits", McGraw-Hill Inc., 2^oed., 668p.
- Freymuth, P., 1997, "Interpretations in the Control Theory of Thermal Anemometers", Measurement. Science and Technology, Vol. 8, pp.174-177.
- Goldstein, R. J., 1983, "Fluid Mechanics Measurements", Hemisphere Publishing Corp., 630p.
- Gonçalves, H. C., 2001, "Determinação Experimental da Frequência de Emissão de Vórtices ao Redor de Corpos Rombudos", Dissertação de Mestrado, Unesp - Ilha Solteira - SP, 177p.
- Granger, R. A., 1988, "Experiments in Fluid Mechanics", Holt, Rinehart and Winston, Inc., 486p.
- Guellouz, M. S. & Tavoularis, S., 1995, "A Simple Pendulum Technique for the Calibration of Hot-Wire Anemometers over Low-Velocity Ranges", Experiments in Fluids, Vol. 18, pp.199-203.
- Gupta, B. L., 1927, "Application of Thermionic Valves to Hot-Wire Anemometry", Journal of Scientific Instruments, Vol. 4, pp. 202-205.
- Guy, T. B., 1971, "Gas Velocity Measurements in a Shock Tube with a Hot-Wire Anemometer", Journal of Physics & Scientific Instruments, Vol. 4, pp. 961-965.
- Hauptmann, E. G., 1968, "A Simple Hot-Wire Anemometer Probe", Journal of Physics E: Scientific Instruments, Vol. 1(2), pp. 874-875.
- Hinze, J. O., 1987, "Turbulence", McGraw-Hill Inc., 2^oed., 790p.
- Hirai A. H., 2003, "Estudo Experimental da Emissão de Vórtices em Torno de Corpos Não-Aerodinâmicos Inseridos em Dutos Circulares para Moderados Números de Reynolds: Aplicação em Medidores de Vazão", Dissertação de Mestrado, Unesp - Ilha Solteira - SP, 227p.
- Jiang, F.; Tai, Y. C.; Ho, C. M.; Karan, R. & Garstenauer, M., 1992, "Theoretical and Experimental Studies of Micromachined Hot-Wire Anemometer", Caltech, EUA, 4p.

- Jones, T. V., 1977, "Heat Transfer, Skin Friction, Total Temperature, and Concentration Measurements", Measurement of Unsteady Fluid Dynamic Phenomena, Hemisphere Publishing Corporation, Cap. 4, pp. 63-102.
- Jørgensen, F. E., 1996, "The Multichannel Constant Temperature Anemometer – Recent Developments and use in 2- and 3-D Dimensional Flows", Three-Dimensional Velocity and Vorticity Measuring and Image Analysis Techniques, Vol. 4, Kluwer Academic Publishers pp. 43 - 58.
- Jørgensen, F. E., 2002, "How to Measure Turbulence with Hot-Wire Anemometers – A Practical Guide", Dantec Dynamics A/S, Publication N°: 9040U6151, 65p
- Khoo, B. C.; Chew, Y. T. & Teo, C. J., 2003, "A Model for the Frequency Response of a Near-Wall Hot-Wire: Velocity Perturbation and Sine-Wave Perturbation Tests", Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 27, pp. 167-175.
- King, L. V., 1914, "On the Convection of Heat From Small Cylinders in a Stream of Fluid: Determination of the Convection Constants of Small Platinum Wires with Applications to Hot-Wire Anemometry", Philosophical Transactions of the Royal Society A, Vol. 214, pp. 273-432.
- Kline, S.J., 1985, "The Purposes of Uncertainty Analysis", Journal of Fluid Engineering, Vol. 107, pp. 153 - 160.
- Kline, S. J. & McClintock, F. A., 1953, "Describing Uncertainties in Single-Sample Experiments", Stanford University, Mechanical Engineering Depart., p. 3 - 8.
- Knudsen, M., 1927, "The Hot-Wire Manometer", Andr., Fred., Host & Son, 18 p.
- Lancaster, D., 1975, "Active-Filter Cookbook", Howard W. Sams & Co., 240 p.
- Lanspeary, P. V., 1997, "Establishing Very Low Speed Disturbance-Free Flow for Anemometry in Turbulent Boundary Layers", Tese de Doutorado, The University of Adelaide – Austrália, 330 p.
- Lee, T. & Budwig, R., 1991, "Two Improved Methods for Low-Speed Hot-Wire Calibration", Measurement Science & Technology, Vol.2, pp. 643-646.

- Lee, S. P. & Kauh, S. K., 1997, "A New Approach to Enhance the Sensivity of a Hot - Wire Anemometer and Static Response Analysis of a Variable – Temperature Anemometer", *Experiments in Fluids*, Vol. 22, pp. 212-219.
- Lekakis, I., 1996, "Calibration and Signal Interpretation for Single and Multiple Hot-Wire/Hot-Filme Probes", *Measurement. Science and Technology*, Vol. 7, pp. 1313 - 1333.
- Lemonis, G. & Dracos, T., 1996, "Determinations of 3-D Velocity and Vorticity Vectors in Turbulent Flows by Multi Hot-Wire Anemometry", *Three-Dimensional Velocity and Vorticity Measuring and Image Analysis Techniques*, Vol. 4, Kluwer Academic Publishers pp. 1 - 42.
- Lindquist, C., 2000, "Estudo Experimental do escoamento ao Redor de Cilindros de Base Quadrada e Retangular", *Dissertação de Mestrado, Unesp - Ilha Solteira - SP*, 189p.
- Liepmann, H. W. & Roshko, A., 1960, "Elements of Gasdynamics", John Wiley & Sons, Inc., Vol. 1, 456p.
- Lomas, C. G., 1986, "Fundamentals of the Hot-wire Anemometry", Cambridge University Press. 211p.
- Lu, S. S., 1979, "Dynamic Characteristics of a Simple Constant Temperature Hot-Wire Anemometer", *Review of Scientific Instruments*, Vol.50(6), pp. 772-775.
- Metha, R. D. & Bradshaw, P., 1979, "Design Rules for Small Low Speed Wind Tunnels", *The Aeronautical Journal of the Royal Aeronautical Society*, Vol. 11, pp. 442-449.
- Moffat, R.J., 1988, "Describing the Uncertainties in Experimental Results", *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 1, pp. 3-17.
- Morris, S. C. & Foss, J. F., 2003, "Transient Thermal Response of a Hot-Wire Anemometer", *Measurement. Science and Technology*, Vol. 14, pp. 251-159.
- Neves, F. J. R.; Villa, C. V. S. & Vianna, J. N. de S., 2000, "Análise de um Modelo para Calibração Dinâmica de Transdutores de Pressão", *Universidade de Brasília*, 10p.
- Nicholas, J. V. & White, D. R., 2001, "Traceable Temperatures", John Wiley & Sons Ltd., 444 p.

- Pai, S. I., 1954, "Fluid Dynamics of Jets" D. Van Nostrand Company, Inc. 533p.
- Pallás-Areny, R. & Webster, J. G., 1991, "Sensors and Signal Conditioning", John Wiley & Sons Ltd., 398 p.
- Prandtl, L. & Tietjens, O. G., 1934, "Applied Hydro and Aeromechanics", Dover Publications Inc., 311p.
- Perry, A. E., 1982, "Hot-Wire Anemometry", Oxford University Press, 185 p.
- Perry, A. E. & Morrison, G. L., 1971, "Static and Dynamic Calibration of Constant Temperature Hot-Wire Systems", *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 47(4), pp. 765-777.
- Pupyshev, I. D.; Chepushtanov, A. A. & Beketov, Y. V., 2004, "Calibration Unit for Hot-Wire Anemometers", *Measurement Techniques*, Vol. 47(2), pp. 36-38.
- Saddoughi, S. G. & Veeravalli, S. V., 1996, "Hot-Wire Anemometer Behaviour at Very High Frequencies", *Measurement and Scientific Technology*, Vol. 7, pp. 1297-1300.
- Samways, A. L.; Al-Deen, M. F. N. & Bruun, H. H., 1994, "The Calibration of and Measurements with Cylindrical Hot-Film Probes in Water Flows", *Measurement and Scientific Technology*, Vol. 5, pp. 1551-1559.
- Seed, W. A. & Wood, N. B., 1970, "Use of a Hot-Film Velocity Probe for Cardiovascular Studies", *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, Vol. 3, pp. 377-384.
- Sheppard, P. A., 1941, "Anemometry: A Critical and Historical Survey", *Physical Society*, Vol. 53(4), pp. 361-390.
- Sherlock, R. A. & Wyatt, A. F. G., 1983, "The Dynamics of the Constant Temperature Detector System", *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, Vol. 16, pp. 673-682.
- Silva, C. R. I.; Mansur, S. S. & Vieira, E. D R., 2005, "Flow Around Spheres: A Didactic Experiment", *Proceedings (in CD ROM) of the COBME 2005 XVIII International Congress of Mechanical Engineering*, November, 6 – 1, Ouro Preto, MG. 6p.
- Stella, F.; Guj, G. & Barbagallo, D., 1997, "A General Approach for Multiple-Sensor Hot-Wire Probes", *Measurement and Scientific Technology*, Vol. 8, pp. 422-428.

- Watmuff, J. H., 1995, “An Investigation of the Constant Temperature Hot-Wire Anemometer”, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol.11, pp. 117-134.
- Weeks, A. R.; Beck, J. K. & Joshi, M., 1988 “A simple Experimental Technique for Measuring Frequency Response of Hot Film/Wire Sensors in Heated Airflows”, *ISA Transactions*, Vol. 27 (1), pp. 61-67.
- Weidman, P. D. & Browand, F. K., 1975, “Analysis of a Simple Circuit for Constant Temperature Anemometry”, *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, Vol.8, pp. 553-560.
- West, R. C., 1983, “Handbook of Chemistry and Physics - Chemical Rubber Company (CRC)”, CRC Press Inc., 63^o ed., 948 p.
- Wu, S. & Bose, N., 1993, “Calibration of a Wedge-Shaped Vee Hot-Film Probe in a Towing Tank”, *Measurement and Scientific Technology*, Vol. 4, pp. 101-108.
- Wyatt, L. A., 1953, “A Technique for Cleaning Hot-Wires Used in Anemometry”, *Journal of Scientific Instrumets*, Vol. 30, pp. 13-14.
- Wyngaard, J. C. & Lumley, J. L., 1967, “A Constant Temperature Hot-Wire Anemometer”, *Journal of Scientifc Instrumentation*, Vol. 44, pp. 363-365.
- Zhe, J., 2002, “Hot-Wire Anemometry and a Novel MEMS Device for Shear Stress Measurement”, Tese de Doutorado, Columbia University – New York – EUA. 157 p.

Literatura Consultada

- Anderson, K. F., 1994, “Practical Applications of Current Loop Signal Conditioning”, *Measurements Systems Engineer NASA – Dryden Flight Research Center – Scientific and Technical Information Program*, 19p
- Carter, B.; Rowland, P.; Karki, J. & Miller, P., 2001, “Amplifiers and Bits: An introduction to Slecting Amplifiers for Data Converters”, Texas Instruments Inc. Application Report SLOA035B, 26p.

- Brokaw, P. & Barrow, J., 1989, "Grounding for Low and High Frequency Circuits", Analog Devices Application Note, AN-345, 4 p.
- Daire, A., 2005, "An Improved Method for Differential Conductance Measurements", Keithley Instruments Inc. White Paper N° 2610, 12p
- Daire, A., 2004, "Achieving Accurate and Reliable Resistance Measurements in Low Power and Low Voltage Applications", Keithley Instruments Inc. White Paper N° 2544, 12p
- Gray, N., 2002, "Introduction to Power Supplies", National Semiconductor Corp. Application Note 1261, 2p.
- Gray, N., 2002, "Power Supply effects on Noise Performance", National Semiconductor Corp. Application Note 556, 7p.
- Karki, J., 1999, "Signal Conditioning Wheatstone Resistive Bridge Sensors", Texas Instruments Inc. Application Report SLOA034, 5p
- Keithley, 2004, "Problem: Error in Low Voltage, low Current Measurements", Keithley Instruments Inc. White Paper N° 2559, 1p
- McCutcheon, S.C., Martin, J.L & Barnwell, T.O. Jr., 1993, "Water Quality - Handbook of Hydrology", Maidment, D.R. (Editor), McGraw-Hill, 1424p.

Manuais consultados

- "Probe Catalog", 1992, Dantec Elektronik, Publication N°: 9607E, 22p.
- "HP 34401A Multimeter - User's Guide", 1996, Hewlett-Packard Company, Part Number 34401-90004, 236p.
- "Keithley 2182A Nanovoltmeter", 2004, Keithley Instruments Inc., 6p
- "Keithley 228A Programmable Voltage/Current Source", 2000, Keithley Instruments Inc., 2p

“Tektronix User Manual – TDS 200-Series Digital Real-Time Oscilloscope”, 2001, Tektronix Inc. – 071-0398-03, 132p.

“MC1000A Optical Chopper Operating Manual”, 2005, Thorlabs Inc., Doc 12536-D03 Rev. B 1-24-05, 21p.

“EJA 110 and EJA 120 Differential Pressure Transmitter Instruction Manual”, 1996, Yokogawa Electric Corp., IM 1C22B1-01 E 4th Edition, DP harp line, 96p.

Apêndice A

Incerteza da calibração e uso do manômetro diferencial

O manômetro diferencial utilizado, conforme já apresentado no Capítulo 4.2.1, é da empresa *Yokogawa Electric Corp.*, modelo EJ-120 com pressão diferencial máxima de 100 mm H₂O e precisão de 0,1 % de fundo de escala. Este equipamento é mostrado na Figura A.1.



FIGURA A.1 – Manômetro diferencial eletrônico EJ-120 da *Yokogawa Electric Corp.*.

O manômetro diferencial EJ-120 da Yokogawa fornece um sinal de saída proporcional a variação da corrente elétrica de 4 à 20 mA, ou seja, para diferença de pressão nula, o instrumento fornece um sinal em corrente com 4 mA. Para diferença de pressão máxima, o sinal de saída é uma corrente elétrica de 20 mA nos seus terminais de medição. De forma a realizar a leitura com um voltímetro, o sinal de 4-20 mA pode ser convertido com o uso de um resistor ligado em paralelo com os terminais de saída. Neste trabalho, esta conversão foi realizada com o uso de um circuito eletrônico com amplificador operacional, chamado de conversor corrente – tensão, capaz

de minimizar os erros de variação de tensão devido ao efeito Joule. Este circuito foi embutido dentro do compartimento dos terminais do manômetro diferencial. O manômetro diferencial EJ-120 da Yokogawa possui um mostrador digital frontal que fornece o valor da diferença de pressão em porcentagem de uma coluna de água, ou seja, a indicação de 100 % corresponde a diferença de pressão de 100 mm de H₂O em suas entradas.

Este equipamento é comercializado junto com uma carta de calibração, certificada pela empresa. Contudo, sua calibração de fábrica foi comparada com o uso de um manômetro de tubo inclinado, conforme mostra a Figura A.2. Este manômetro de tubo foi construído nas dependências do Departamento de Eng. Mecânica da Unesp – IS e utiliza água destilada como fluido manométrico. A utilização de água destilada permite uma comparação direta com os resultados de pressão do manômetro digital, já que sua unidade padrão é o mm de H₂O.



FIGURA A.2 – Manômetro de coluna inclinada da Unesp – IS.

O manômetro de coluna inclinada foi ajustado para operação na posição perpendicular, comportando-se assim como um tubo em forma de “U”. Nestas condições, a diferença de pressão em suas entradas é obtida pelo deslocamento do fluido no interior do tubo, conforme Equação (A.1).

$$\rho_a g (H - h) = \Delta P \quad (\text{A.1})$$

onde ρ_a é a densidade do fluido manométrico utilizado, g é a aceleração da gravidade local, H é a medida da altura inicial do fluido quando não submetido a pressão, sendo h a leitura da altura deslocada pelo fluido no interior do tubo. A variável ΔP é o valor da diferença de pressão medida pelo manômetro. A Equação (A.1) pode ser simplificada descontando o valor de H dos valores lidos, utilizando somente a diferença de altura efetivamente deslocada pelo fluido manométrico, assim ficamos com,

$$\Delta P = \rho_a g \Delta h \quad (\text{A.2})$$

onde Δh é a altura da coluna de fluido manométrico medida apropriadamente.

As incertezas associadas ao uso da Equação (A.2) foram levantadas com a aplicação do método descrito em KLINE & MCCLINTOCK (1953).

O efeito da incerteza de uma única variável sobre o resultado calculado para uma variável é obtido conforme Equação (A.3).

$$\delta S_{X_i} = \frac{\partial S}{\partial X_i} \delta X_i \quad (\text{A.3})$$

A derivada parcial de S em relação à X_i é conhecida como o coeficiente de sensibilidade do resultado S em relação à variável X_i . Para diversas variáveis independentes, os termos individuais são combinados da seguinte forma:

$$\delta S = \left[\sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial S}{\partial X_i} \delta X_i \right)^2 \right]^{1/2} \quad (\text{A.4})$$

sendo esta a equação básica da análise da propagação de incertezas, sendo válida quando:

- Cada medição é independente das demais;
- Distribuição com dispersão Gaussiana;
- Mesma probabilidade de incerteza para cada variável da equação.

Em muitas aplicações, deseja-se que a incerteza de um resultado seja expressa como uma fração deste. O método da propagação de incertezas descrito em MOFFAT (1988) apresenta uma

maneira prática de obter este valor para N variáveis, fazendo:

$$\frac{\delta S}{S} = \left[\left(a \frac{\delta X_1}{X_1} \right)^2 + \left(b \frac{\delta X_2}{X_2} \right)^2 + \dots + \left(m \frac{\delta X_N}{X_N} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (\text{A.5})$$

aplicável quando as incertezas relativas podem ser escritas na forma de um produto, conforme Equação (A.6).

$$S = X_1^a X_2^b X_3^c \dots X_N^m \quad (\text{A.6})$$

Substituindo a Equação (A.2) no formato da Equação (A.5), temos a seguinte relação de incerteza para a diferença de pressão do manômetro de coluna de água,

$$\frac{\delta \Delta P}{\Delta P} = \left[\left(\frac{\delta \rho_a}{\rho_a} \right)^2 + \left(\frac{\delta g}{g} \right)^2 + \left(\frac{\delta \Delta h}{\Delta h} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (\text{A.7})$$

onde $\delta \Delta P$ é a incerteza da diferença de pressão obtida em Pascal [N/m²].

A capilaridade é uma propriedade importante a ser considerada em manômetros de tubo. A tensão superficial do líquido e o diâmetro do tubo modificam o formato do fluido na interface com o ar atmosférico. Quando um líquido está em contato com um sólido, as moléculas da superfície livre ficam sujeitas a força de coesão, dirigida para o interior da massa líquida, e de adesão, relacionada com a atração das moléculas do fluido com as paredes do seu recipiente. A resultante dessas duas forças define a forma do menisco, conforme ilustra a Figura A.3(a) e (b).

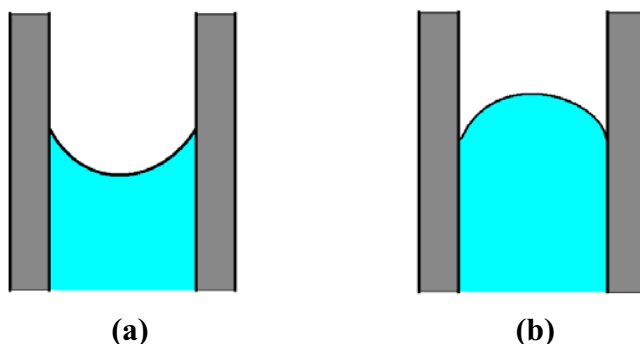


FIGURA A.3 – Formas do menisco (a),côncava e (b),convexa.

Quando a força de adesão for maior que a coesão, as moléculas do líquido se dispõem em uma curva na forma côncava, a exemplo da água, mostrada na Figura A.4(a). No caso contrário, o formato da curva do menisco é convexa, a exemplo do mercúrio, mostrado na Figura A.4(b).

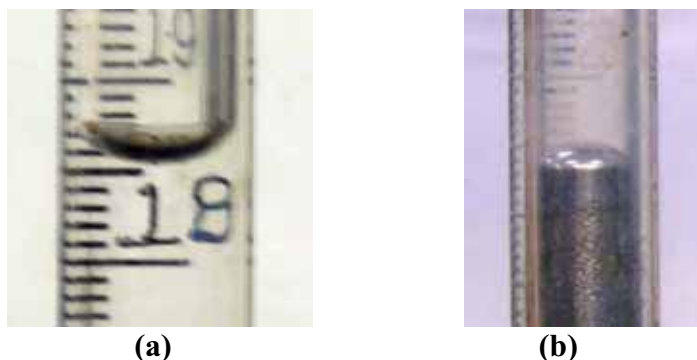


FIGURA A.4 – Formato do menisco (a), na água e (b), no mercúrio.

Neste trabalho, a leitura do deslocamento da coluna de água no manômetro de tubo em “U” foi realizada sempre na tangente do menisco em relação às divisões da escala milimétrica. Este procedimento minimiza o erro sistemático de leitura da coluna de água.

A densidade da água é obtida em função de sua temperatura, sendo extraída da Tabela D.1, apresentada no Apêndice D, sendo sua incerteza da ordem de 10^{-6} .

A aceleração da gravidade local foi extraída do livro das Efemérides Astronômicas, de 1999, publicado pelo Observatório Nacional (ON) da cidade do Rio de Janeiro. De acordo com o Prof. Luiz Muniz Barreto, pesquisado do Observatório Nacional e coordenado do programa de estabelecimento da Rede Gravimétrica Fundamental Brasileira, o instrumento destinado a medir a aceleração da gravidade local é chamado de gravímetro. O Observatório Nacional possui um gravímetro diferencial de mola da *LaCoste & Romberg* modelo G. Este instrumento mede intervalos de gravidade com precisão de 10^{-7} m/s^2 e exatidão melhor do que $4 \times 10^{-7} \text{ m/s}^2$. Para a região da cidade de Ilha Solteira, o valor da aceleração local da gravidade é de $g = 9,7838162 \text{ m/s}^2$.

Devido a baixa magnitude das incertezas associadas à densidade da água destilada e ao valor da aceleração da gravidade local, a calibração do manômetro diferencial através da Equação (A.7) fica reduzida somente a incerteza da leitura da altura da coluna de água pelo manômetro de tubo em “U”. Assim, ficamos com;

$$\delta \Delta P = \rho_a g \delta \Delta h \quad (\text{A.8})$$

O manômetro da Figura A.2 possui uma escala milimétrica junto ao tubo com água destilada. Desta forma, a incerteza na medição da altura da coluna de água é limitada pela graduação da escala milimétrica, sendo a incerteza de fundo de escala de $\pm 0,5 \text{ mm}$ ($5 \times 10^{-3} \text{ m}$).

A Tabela A.1 mostra os valores da densidade da água para temperatura de $26,0 \text{ }^\circ\text{C}$ e da aceleração da gravidade na cidade de Ilha Solteira, utilizados para determinação da incerteza da medida da pressão pelo manômetro de tubo em “U”.

TABELA A.1 – Dados ambientais durante os experimentos.

	Densidade da água @ $26,0 \text{ }^\circ\text{C}$ (kg/m^3)	Aceleração da gravidade local (m/s^2)
Valor	996,783	9,7838162

Substituindo os dados da Tabela A.1 na Equação (A.8), temos uma incerteza constante para medida da pressão pelo manômetro de tubo em “U”, conforme mostra Tabela A.2.

TABELA A.2 – Incertezas associadas na medida da pressão.

Incerteza da leitura do deslocamento da água (mm)	Incerteza da leitura da pressão do manômetro (Pa)	Incerteza do valor da pressão do manômetro digital (Pa)
$\pm 0,05$	$\pm 0,49$	$\pm 0,01$

A Figura A.5 mostra um gráfico com os valores da tensão de saída do manômetro diferencial da Yokogawa (Figura A.1) em comparação com os valores medidos com o manômetro de tubo (Figura A.2).

Através do gráfico da Figura A.5 nota-se que a tensão de saída do manômetro digital é diretamente proporcional com a medida da pressão pelo manômetro de tubo. Desta forma, pode-se assegurar que a leitura da tensão de saída do manômetro digital é consistente com o valor da pressão medida e com precisão indicada na Tabela A.2. Portanto, a precisão da leitura da pressão com o uso do manômetro digital é da ordem de $0,01 \text{ Pa}$, sendo este valor considerado nos dados de calibração estática do anemômetro de fio quente.

Os dados do gráfico da Figura A.5 foram obtidos submetendo, tanto o manômetro diferencial digital, quanto o manômetro de tubo, numa mesma tomada de pressão na saída de uma central de condicionamento de ar comprimido.

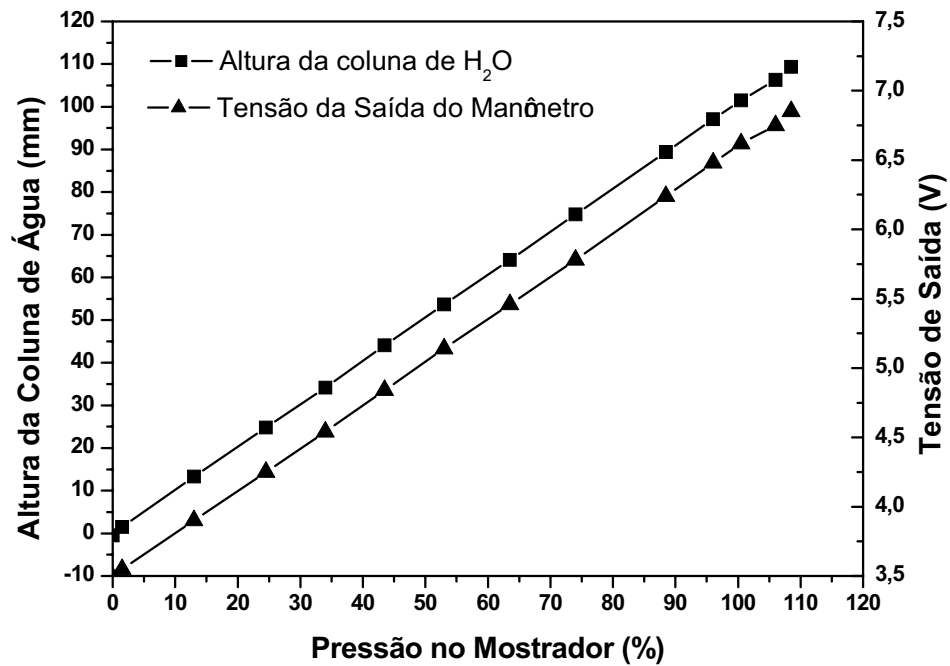


FIGURA A.5 – Comparação entre a leitura do manômetro digital e manômetro de tubo .

Na determinação da velocidade do jato livre, através da Equação (2.38), para a calibração de sondas de fio quente é necessário medir a diferença de pressão estática e de estagnação de um determinado ponto do escoamento. Neste trabalho, o manômetro diferencial digital é acoplado no calibrador de sondas mostrado na Figura 2.22, ou diretamente, nas tomadas de pressão de um tubo de Pitot, conforme esquema da Figura 2.28.

Aplicando a Equação (2.38) em (A.4), temos:

$$\delta U_0 = \left[\left(\frac{\delta \Delta P}{\rho_s U_0} \right)^2 + \left(- \frac{\Delta P \delta \rho_s}{\rho_s^2 U_0} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (\text{A.10})$$

De posse das incertezas da medida da diferença de pressão, mostrado na Tabela A.2, e da densidade do fluido (ar atmosférico), mostrado na Tabela B.3, temos as seguintes faixas de incerteza da velocidade, apresentados na Tabela A.3, juntamente com o erro relativo. Estes valores estão dentro da faixa de leitura de pressão do manômetro digital, sendo obtidos com o uso da Equação (A.10).

A faixa de valores para velocidade do escoamento da Tabela A.3 está dentro da faixa de valores capazes de serem medidas com o uso do manômetro diferencial digital da Yokogawa. Sua leitura máxima é uma diferença de pressão de 100 mm H₂O ou equivalente a 980,64 Pa.

Valores menores que 5 Pa não são sentidos pelos instrumentos e próximos de 900 Pa causam grande instabilidade na leitura, conforme manual do fabricante.

TABELA A.3 – Incertezas na medida da velocidade do escoamento.

Velocidade do escoamento (m/s)	Incerteza (± m/s)	Erro (%)
3	0,03	1,0
10	0,5	4,6
15	1,5	10,0
25	7,0	27,8
30	12,0	40,0
35	19,0	54,2
40	28,5	71,2

Observando os dados da Tabela A3 podemos perceber que a incerteza na determinação da velocidade do escoamento é muito elevada para diferenças de pressão muito próximas do limite do manômetro. A faixa de velocidade até 15 m/s fornece uma incerteza relativamente aceitável, sendo proibitivo o uso do instrumento para velocidades acima de 25 m/s ou diferenças de pressão próximas de 38% do valor máximo.

Apêndice B

Incerteza na determinação da densidade do ar atmosférico

A densidade do ar atmosférico está intimamente relacionada com sua temperatura. De acordo com FOX & McDONALD (2001), o ar atmosférico pode ser considerado com um gás ideal estando sob temperaturas próximas de 20 °C. Desta forma, sua densidade pode ser calculada com o uso da equação de estado para gás ideal, também chamada de equação de Clapeyron, mostrada abaixo;

$$P V = n R T_a \quad (\text{B.1})$$

onde P é a pressão do gás, V o volume ocupado pelo gás, R é a constante universal dos gases ideais, T_a a temperatura absoluta do gás e n , a razão da massa, conforme Equação (B.2),

$$n = \frac{m}{M} \quad (\text{B.2})$$

na qual m é a massa do gás e M , sua massa molar.

A densidade é definida pela razão entre massa e volume, assim:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (\text{B.3})$$

Substituindo as Equações (B.3) e (B.2) em (B.1), ficamos com,

$$\rho = \frac{P M}{R T_a} \quad (\text{B.4})$$

De acordo com WEST (1983), o ar atmosférico padrão é uma mistura de diversos gases,

sendo suas proporções relacionadas com as frações molares de seus diversos constituintes, conforme é apresentado na Tabela B.1.

TABELA B.1 – Frações e massas molares das diversas substâncias que compõe o ar atmosférico padrão.

Substância	N ₂	O ₂	Ar	CO ₂	Ne	He	Kr	Xe	CH ₄	H ₂
Fração molar	0,78084	0,20948	$9,34 \times 10^{-3}$	$3,14 \times 10^{-4}$	$1,818 \times 10^{-5}$	$5,24 \times 10^{-6}$	$1,14 \times 10^{-6}$	$8,7 \times 10^{-8}$	$2,0 \times 10^{-6}$	$5,0 \times 10^{-7}$
Massa molar (g/mol)	28,0	32,0	39,9	44,0	20,2	4,0	83,8	131,0	16,04	2,02

Fonte: WEST (1983)

Somando-se os valores das frações molares e suas respectivas massas molares dos componentes da Tabela B.1, obtemos uma massa molar para o ar atmosférico de $M_{ar} = 28,8373826$ g/mol. Porém, de acordo WEST (1983), a massa molar do ar atmosférico padrão é definida como $M_{ar} = 28,96443$ g/mol ou $M_{ar} = 0,02896443$ kg/mol, sendo este o valor utilizado no computo da densidade do ar neste trabalho.

A temperatura do ar ambiente foi medida com o auxílio de um termômetro de coluna de mercúrio, marca *TWG* modelo *Labortherm-N*, com escala de 15,0 até 30,0 °C e incerteza de fundo de escala de $\pm 0,25$ °C, devidamente aferido.

A pressão atmosférica foi obtida através da leitura da escala de um barômetro tipo aneróide de fabricação alemã, marca *Fischer VEB Feingeratebau*, modelo 102, capaz de medir pressão barométrica de 90 até 107 kPa e incerteza de fundo de escala de $\pm 0,05$ kPa, devidamente aferido e testado. A Figura B.1 mostra uma imagem deste instrumento.



FIGURA B.1 – Barômetro aneróide *Fischer VEB Feingeratebau*, modelo 102.

Analisando as incertezas associadas ao uso da Equação (B.4), podemos considerar como fontes de incertezas os valores da pressão atmosférica local e a temperatura do ar ambiente. Desta forma, aplicando o método de propagação de incertezas de KLINE & MCCLINTOCK (1953) segundo a metodologia sugerida por MOFFAT (1988), temos a seguinte equação de incerteza.

$$\frac{\delta\rho}{\rho} = \left[\left(\frac{\delta P}{P} \right)^2 + \left(-\frac{\delta T}{T} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (\text{B.5})$$

Os valores da Tabela B.2 representam os dados ambientais medidos durante a realização dos experimentos com o túnel aerodinâmico. Estes valores foram obtidos com o uso do barômetro e do termômetro citados. O laboratório de realização do experimento é climatizado, sendo capaz de manter a temperatura do ar ambiente dentro de uma faixa de temperatura controlável e estável.

TABELA B.2 – Dados ambientais durante os experimentos.

	Temperatura ambiente (K)	Pressão atmosférica local (kPa)
Valor	299,15 (26,0 °C)	97,1
Incerteza	± 0,25	± 0,05

Substituindo os valores da Tabela B.2 na Equação (B.5), temos a seguinte incerteza para a densidade do ar atmosférico para o experimento.

TABELA B.3 – Densidade do ar e sua incerteza para o experimento.

	Densidade do ar atmosférico local (kg / m³)
Valor	1,1307
Incerteza	± 0,001

Apêndice C

Incertezas na medição da resistência elétrica

A Lei de Ohm estabelece uma relação simples entre tensão, corrente e resistência, conforme é mostrado na Equação (C.1). Experimentalmente, a obtenção de um valor depende da medida de dois outros valores, associados com suas respectivas incertezas.

$$R_0 = \frac{V_0}{I} \quad (C.1)$$

O valor da incerteza da medida da resistência elétrica é obtida através do método de propagação de incertezas de KLINE & MCCLINTOCK (1953) segundo a metodologia sugerida por MOFFAT (1988), assim.

$$\frac{\delta R_0}{R_0} = \left[\left(\frac{\delta V_0}{V_0} \right)^2 + \left(-\frac{\delta I}{I} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (C.2)$$

onde δV_0 é a incerteza da medida da tensão sobre o filamento e δI , a incerteza da medida da corrente elétrica pelos instrumentos da Figura 4.24. A precisão destes instrumentos variam para cada faixa de medição ou seja, quando a escala do instrumento muda, a precisão da medida também muda, sendo que cada escala de medição possui sua respectiva precisão, conforme apresenta o manual de especificações técnicas destes instrumentos.

Considerando a maior escala de medição utilizada, tanto para corrente elétrica, quanto para a tensão, temos os seguintes valores de precisão para a medida da tensão (nanovoltímetro digital modelo 2182a) e da corrente (fonte de alimentação digital programável modelo 228a) sobre a sonda de fio quente, conforme mostra a Tabela C.1.

TABELA C.1 – Incertezas da medida da tensão e corrente pelos instrumentos da *Keithley*.

	Tensão (resolução de 100 nV)	Corrente (resolução de 100 μ A)
escala	1 V	100 mA
incerteza	$\pm 35 \mu$ V	$\pm 0,2$ mA

A Tabela C.2 mostra os valores máximos de corrente e tensão das sondas e acessórios, medidos durante a determinação de suas respectivas resistências elétricas.

TABELA C.2 – Valores máximos medidos de tensão e corrente.

Dispositivo analisado	Tensão (mV)	Corrente (mA)
Cabo de interligação 4 m	9,13025	40,0
Suporte de sondas 55H22	25,95996	43,0
Sonda da Figura 4.2(a) (5 μ m)	129,38762	45,0
Sonda da Figura 4.2(b) (12 μ m)	98,42582	40,0
Sonda da Figura 4.3(a) (5 μ m)	349,58981	28,0
Sonda da Figura 4.3(b) (5 μ m)	375,02983	29,0
Sonda da Figura 4.3(c) (5 μ m)	375,59427	28,5

Substituindo os dados da Tabela C.2 juntamente com as incertezas dos respectivos instrumentos da Tabela C.1, obtemos o valor da incerteza máxima da resistência elétrica de cada dispositivo analisado. Estes resultados são apresentados na Tabela C.3, junto com os valores das resistências extraídos da Tabela 4.

Através dos valores mostrados na Tabela C.3 podemos perceber que a incerteza na determinação da resistência elétrica das sondas é muito baixa, da ordem de $10^{-6} \Omega$. Tal valor mostra que os valores obtidos apresentam grande precisão e confiabilidade.

TABELA C.3 – Resistência elétrica dos dispositivos e suas incertezas.

Dispositivo	Resistência (Ω)	Incerteza ($\pm \mu\Omega$)
Cabo de interligação 4 m	0,22825	1,5
Suporte de sondas 55H22	0,60372	3,0
Sonda da Figura 4.2(a) (5 μm)	2,81468	12,8
Sonda da Figura 4.2(b) (12 μm)	2,43342	12,3
Sonda da Figura 4.3(a) (5 μm)	12,3546	83,2
Sonda da Figura 4.3(b) (5 μm)	14,04459	83,3
Sonda da Figura 4.3(c) (5 μm)	13,88607	88,8

Apêndice D

Tabela de densidade da água

A Tabela D1 foi reproduzida da literatura consultada MCCUTCHEON *et al.* (1993) para obtenção da densidade da água destilada numa faixa de temperatura entre 0 °C até 39,9 °C.

Para obter a correta densidade da água, basta escolher a dezena da temperatura desejada nas linhas da primeira coluna e selecionar os décimos de temperatura nas colunas seguintes. As células sombreadas ilustram o exemplo da densidade da água na temperatura de 17.7 °C como sendo de 0,998650 g/cm³.

Para converter a densidade da água de g/cm³ para kg/m³, basta multiplicar por 1000.

TABELA D.1 – Densidade da água destilada em $[g/cm^3]$ de 0 °C (estado líquido) até a temperatura de 30,9 °C com incrementos de 0,1 °C.

	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
0	0.999841	0.999847	0.999854	0.999860	0.999866	0.999872	0.999878	0.999884	0.999889	0.999895
1	0.999900	0.999905	0.999909	0.999914	0.999918	0.999923	0.999927	0.999930	0.999934	0.999938
2	0.999941	0.999944	0.999947	0.999950	0.999953	0.999955	0.999958	0.999960	0.999962	0.999964
3	0.999965	0.999967	0.999968	0.999969	0.999970	0.999971	0.999972	0.999972	0.999973	0.999973
4	0.999973	0.999973	0.999973	0.999972	0.999972	0.999972	0.999970	0.999969	0.999968	0.999966
5	0.999965	0.999963	0.999961	0.999959	0.999957	0.999955	0.999952	0.999950	0.999947	0.999944
6	0.999941	0.999938	0.999935	0.999931	0.999927	0.999924	0.999920	0.999916	0.999911	0.999907
7	0.999902	0.999898	0.999893	0.999888	0.999883	0.999877	0.999872	0.999866	0.999861	0.999855
8	0.999849	0.999843	0.999837	0.999830	0.999824	0.999817	0.999810	0.999803	0.999796	0.999789
9	0.999781	0.999774	0.999766	0.999758	0.999751	0.999742	0.999734	0.999726	0.999717	0.999709
10	0.999700	0.999691	0.999682	0.999673	0.999664	0.999654	0.999645	0.999635	0.999625	0.999615
11	0.999605	0.999595	0.999585	0.999574	0.999564	0.999553	0.999542	0.999531	0.999520	0.999509
12	0.999498	0.999486	0.999475	0.999463	0.999451	0.999439	0.999427	0.999415	0.999402	0.999390
13	0.999377	0.999364	0.999352	0.999339	0.999326	0.999312	0.999299	0.999285	0.999272	0.999258
14	0.999244	0.999230	0.999216	0.999202	0.999188	0.999173	0.999159	0.999144	0.999129	0.999114
15	0.999099	0.999084	0.999069	0.999054	0.999038	0.999023	0.999007	0.998991	0.998975	0.998959
16	0.998943	0.998926	0.998910	0.998893	0.998877	0.998860	0.998843	0.998826	0.998809	0.998792
17	0.998774	0.998757	0.998739	0.998722	0.998704	0.998686	0.998668	0.998650	0.998632	0.998613
18	0.998595	0.998576	0.998558	0.998539	0.998520	0.998501	0.998482	0.998463	0.998444	0.998424
19	0.998405	0.998385	0.998365	0.998345	0.998325	0.998305	0.998285	0.998265	0.998244	0.998224
20	0.998203	0.998183	0.998162	0.998141	0.998120	0.998099	0.998078	0.998056	0.998035	0.998013
21	0.997992	0.997970	0.997948	0.997926	0.997904	0.997882	0.997860	0.997837	0.997815	0.997792
22	0.997770	0.997747	0.997724	0.997701	0.997678	0.997655	0.997632	0.997608	0.997585	0.997561
23	0.997538	0.997514	0.997490	0.997466	0.997442	0.997418	0.997394	0.997369	0.997345	0.997320
24	0.997296	0.997271	0.997246	0.997221	0.997196	0.997171	0.997146	0.997120	0.997095	0.997069
25	0.997044	0.997018	0.996992	0.996967	0.996941	0.996914	0.996888	0.996862	0.996836	0.996809
26	0.996783	0.996756	0.996729	0.996703	0.996676	0.996649	0.996621	0.996594	0.996567	0.996540
27	0.996512	0.996485	0.996457	0.996429	0.996401	0.996373	0.996345	0.996317	0.996289	0.996261
28	0.996232	0.996204	0.996175	0.996147	0.996118	0.996089	0.996060	0.996031	0.996002	0.995973
29	0.995944	0.995914	0.995885	0.995855	0.995826	0.995796	0.995766	0.995736	0.995706	0.995676
30	0.995646	0.995616	0.995586	0.995555	0.995525	0.995494	0.995464	0.995433	0.995402	0.995371

Fonte: MCCUTCHEON *et al.* (1993)