

**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO**  
**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL**  
**PROGRAMA DE PÓS -GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**CONSTRUÇÃO E VALIDAÇÃO DE UMA BANCADA PARA CALIBRAÇÃO  
DE SENSORES PARA DETERMINAÇÃO DA UMIDADE RELATIVA DO AR**

**por**

**João Batista Dias**

**Dissertação para obtenção do Título de Mestre em Engenharia**

**Porto Alegre, novembro de 2001**

# CONSTRUÇÃO E VALIDAÇÃO DE UMA BANCADA PARA CALIBRAÇÃO DE SENSORES PARA DETERMINAÇÃO DA UMIDADE RELATIVA DO AR

por

João Batista Dias

Dissertação submetida ao Corpo Docente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, PROMEC, da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Título de

Mestre em Engenharia

Área de Concentração: Energia

Orientador: Prof. Dr. Paulo Smith Schneider

Comissão de Avaliação:

Prof. Dra Rosa Leamar Dias Blanco

Prof. Dr Sergio Viçosa Möller

Prof. Dr Paulo Otto Beyer

Prof. Dr Alberto Tamagna

Coordenador do PROMEC

Porto Alegre, 13 de novembro de 2001

### **Dedicatória**

*Aos meus pais, pelos ensinamentos de valores que me conduziram ao caminho do bem, pelo exemplo de suas vidas, proporcionando-me amor e dedicação.*

*À companheira Luiza, pela compreensão e paciência nos momentos mais difíceis.*

*Dedico-lhes essa conquista como gratidão.*

### **Agradecimentos**

*Aos professores da Instituição que compartilharam seus conhecimentos nas disciplinas.*

*Aos servidores da secretaria do PROMEC, pelos seus préstimos.*

*Aos colegas do Laboratório, Renato, Batista, Cirilo, Rodrigo e Bernardo, pela colaboração.*

*À professora Rosa Blanco, pelas suas orientações no início do curso.*

*Um agradecimento especial ao amigo e professor orientador Paulo Schneider, por sua contribuição no desenvolvimento deste trabalho.*

O presente trabalho destina-se a apresentar a experiência de montagem e de validação de uma Bancada de Calibração de sensores para determinação da umidade relativa do ar com base nas teorias e normas existentes de psicrometria.

A Bancada foi construída com base em normas internacionais, onde salienta-se a ASHRAE 41.1-1974, sendo uma evolução de trabalhos anteriormente desenvolvidos.

A validação da bancada passa por uma verificação do funcionamento do sistema montado, buscando garantir que o mesmo é eficaz no que se propõe. Para isso, curvas de estabilidade em temperatura e umidade relativa do ar em função do tempo foram levantadas e analisadas dentro de uma certa faixa de operação, entre 30,50 e 44,50 °C e para temperatura de bulbo úmido, entre 25,00 e 31,10 °C. Para a estabilidade em umidade relativa do ar testada, a faixa varia de 57,20 a 74,46 %.

Também foi verificado experimentalmente o comportamento da temperatura de bulbo úmido em função da velocidade do ar no escoamento, entre 1,25 e 5,00m/s. Para a comprovação desta verificação experimental, os dados coletados nos sensores e termômetros foram corrigidos através das equações de calibração e depois os mesmos foram comparados e estudados mediante uma análise de variância (ANOVA). Os resultados dos testes revelaram que a velocidade na faixa experimentada (1,25 a 5,00) m/s não gera uma diferença significativa na leitura dos sensores.

Um outro teste experimental foi elaborado para verificar o comportamento da temperatura de bulbo úmido em função da umidade relativa do ar para diversos elementos sensores de temperatura. (termômetros de Hg, sensores PT100, AD592 e termopar tipo K). Para esta verificação, os elementos sensores foram submetidos a uma velocidade de 5,00 m/s. Para cada nível de temperatura, três níveis de umidade relativa do ar foram analisadas.

Os resultados mostram que a Bancada de calibração é um ambiente controlado dentro de uma faixa de temperatura e umidade relativa do ar, sendo um recurso a mais que pode ser usado no vasto campo da psicrometria.

## “CONSTRUCTION AND VALIDATION OF THE SYSTEM FOR CALIBRATION OF SENSOR FOR DETERMINATION OF RELATIVE HUMIDITY OF THE AIR”

The present work is intended to present the assembly experience and the validation of a System of Calibration of sensor to determination of the relative humidity of the air based on the theories and existent norms of psychrometric.

The System was built based on international norms, where it is pointed out ASHRAE 41.1-1974, being an evolution of works previously developed.

The validation of the System goes by a verification of the system operation set up-pity, looking for guarantee that the same is effective in what intends to. For that, curves of stability in temperature and relative humidity of the air in function of the time were lifted up and analyzed inside of a certain operation range, between 30,50 and 44,50 °C and for wet bulb temperature, between 25,00 and 31,10 °C. For the stability in relative humidity of the air tested, the range varies from 57,20 to 74,46%.

It was also verified experimentally the behavior of the wet bulb temperature in function of the speed of the air in the drainage, between 1,25 and 5,00m/s. For the proof of this experimental verification, the data collected in the sensors and thermometers were corrected through the calibration equations and later the same ones were compared and studied by an analysis of variance (ANOVA). The results of the tests revealed that the speed in the experienced range (1,25 to 5,00) m/s doesn't generate a significant difference in the reading of the sensors.

Another experimental test was elaborated to verify the behavior of the wet bulb temperature in function of the relative humidity of the air to several sensor elements of temperature. (Thermometers of Hg, sensor PT100, AD592 and thermocouple type K). For this verification, the sensor elements were submitted to a speed of 5,00 m/s. For each temperature level, three levels of relative humidity of the air were analyzed.

The results show that the Calibration System is an atmosphere controlled inside of a temperature range and relative humidity of the air, being an extra resource that can be used in the vast field of the psychrometric.

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	1
1.1	Motivação .....	1
1.2	Objetivos do trabalho.....	2
1.3	Seqüência do trabalho.....	2
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	4
2.1	Introdução.....	4
2.2	Psicrometria.....	5
2.3	Métodos de medição de umidade.....	8
2.3.1	Princípios de operação de vários higrômetros.....	8
2.3.2	Outros métodos.....	12
2.3.3	Vantagens e Limitações.....	15
2.3.4	Seleção de um tipo de higrômetro .....	19
2.3.5	Calibração de higrômetros .....	20
2.4	Método de comparação .....	20
2.4.1	Propósito e Extensão .....	20
2.4.1.1	Instrumentos .....	21
2.4.1.2	Técnicas gerais de medidas .....	21
2.4.1.3	Medidas de temperaturas em correntes de ar ....	21
2.4.2	Método padrão que usa o psicrômetro aspirado .....	25
2.4.2.1	Princípios gerais.....	25
2.4.2.2	Aparato e Materiais .....	26
2.4.2.3	Procedimento .....	27
2.4.2.4	Resumo das observações .....	28
2.4.3	Equacionamento para cálculo da umidade relativa do ar.....	29
2.4.4	Uma formulação termodinâmica da constante de psicrômetro .....	30
2.4.4.1	Introdução .....	30
2.4.4.2	A formulação teórica: O processo de saturação adiabática- psicrômetro de saturação adiabática .....	32
2.4.4.3	A formulação exata da constante de psicrômetro.....	33
<b>3</b>	<b>MONTAGEM DA BANCADA DE CALIBRAÇÃO</b> .....	35
3.1	Introdução.....	35

3.2	Normas e métodos escolhidos para a montagem da Bancada.....	35
3.3	Descrição de montagem da Bancada .....	36
3.3.1	Circuito de ventilação fechado: subsistema [1].....	37
3.3.2	Câmara de condicionamento do ar: subsistema [2].....	38
3.3.3	Seção de Teste :subsistema [3].....	39
3.4	Instrumentação da Bancada de Calibração.....	41
3.4.1	Elementos de teste.....	41
3.4.2	Equipamentos.....	44
3.5	Aspectos relevantes de montagem da Bancada.....	47
3.6	Conclusão sobre a montagem da Bancada .....	48
<b>4</b>	<b>VERIFICAÇÃO DA BANCADA DE CALIBRAÇÃO.....</b>	<b>50</b>
4.1	Introdução.....	50
4.2	Estabilidade .....	50
4.2.1	Objetivo.....	50
4.2.2	Estabilidade em temperatura.....	50
4.2.3	Estabilidade em umidade relativa do ar.....	52
4.3	Variação da velocidade do ar no escoamento.....	57
4.3.1	Objetivo.....	57
4.3.2	Metodologia experimental.....	57
4.3.3	Metodologia de análise de variância (ANOVA) .....	58
4.4	Variação da umidade relativa do ar obtida com diferentes sensores.....	60
4.4.1	Introdução.....	60
4.4.2	Objetivo.....	60
4.4.3	Metodologia experimental.....	60
4.4.4	Metodologia de análise de variância (ANOVA).....	63
4.5	Conclusão sobre a verificação da Bancada.....	64
<b>5</b>	<b>ANÁLISE DE RESULTADOS DE CALIBRAÇÃO .....</b>	<b>66</b>
5.1	Introdução .....	66
5.2	Calibração na água (banho termostático) .....	67

5.3	Calibração no ar (Seção de Teste) .....	70
5.3.1	Comparação da calibração no ar e na água pela ANOVA.....	73
5.4	Conclusão sobre as calibrações.....	74
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS.....</b>	<b>75</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>77</b>
	<b>ANEXOS .....</b>	<b>80</b>
	Anexo I.....	81
	Anexo II.....	84
	Anexo III.....	86
	Anexo IV.....	89
	Anexo V.....	90
	Anexo VI.....	93
	Anexo VII.....	96
	Anexo VIII.....	102
	Anexo IX.....	112

## LISTA DE SÍMBOLOS

$a_0, a_1, \dots, a_n$  coeficientes da função de ajuste de um polinômio

$A$	coeficiente de psicrômetro [ $K^{-1}$ ou $^{\circ}C^{-1}$ ]
$A_{\theta}$	coeficiente termodinâmico de psicrômetro em função da temperatura $t^*$ [ $K^{-1}$ ou $^{\circ}C^{-1}$ ]
AD592	sensor de temperatura
$b_0$	coeficiente linear da reta
$b_1$	coeficiente angular da reta
$b_k$	desvio entre os valores de temperatura $tr_k$ e $tk$ , obtidos dos sensores calibr. [ $\pm$ $^{\circ}C$ ]
$b(tk)$	termo de correção da temperatura $tk$ obtida do sensor [ $^{\circ}C$ ]
$Cov$	covariância
CPP	controlador de processos programável
$d_{max}$	valor máximo do desvio da amostra e $\sigma$ seu desvio padrão
$d_i$	desvio de cada evento
$dx$	derivada da variável discreta $x$
$dP$	derivada da probabilidade $P$
$D$	diâmetro da tubulação [m]
$F$	distribuição fator $F$ calculado
$F_c$	fator $F$ tabelado (crítico)
$F(x_i)$	freqüência relativa do evento $x_i$
$G(x)$	função gaussiana de densidade de probabilidade
$h$	entalpia específica [kJ/kgAS]
$h^*$	entalpia específica em do fluxo de ar que deixa o aparato à temperatura $t^*$ [kJ/kgAS]
$h_L^*$	entalpia específica de líquido (sólido) água da corrente de ar que está a temperatura $t^*$ [kJ/kgAS]
$H_0$	hipótese de que não há diferenças significativas entre os grupos
$H_1$	hipótese de que há diferenças significativas entre os grupos
$H(x_i)$	função densidade de probabilidade ou função de probabilidade com dependência em $x_i$
$H_e(x_i)$	aproximação experimental para a função probabilidade em cada ponto $x_i$ .
$K$	número de níveis
x	
$L$	limite de erro
$L_c$	erro limite de calibração
$Ma$	massa molecular relativa de ar seco [28,9645 kg/mol]

Mv	massa molecular relativa de vapor d'água [18,1534 kg/mol]
MQG	média quadrática dos grupos
MQR	média quadrática dos resíduos
$M_i$	número de resultados possíveis no intervalo
n	número de observações e tamanho da amostra
N	número total de observações
$N(x_i)$	freqüência de ocorrência do evento $x_i$
p	pressão total atmosférica [Pa]
$p$	número de parâmetros estimados
pw	pressão parcial de vapor d'água na atmosfera [Pa];
pws	pressão parcial de vapor d'água na saturação [Pa]
pws(bs)	pressão parcial de vapor d'água na saturação à temperatura tbs [Pa]
pws(bu)	pressão parcial de vapor d'água na saturação à temperatura tbu [Pa]
ppmv	parte por milhão em volume
ppb	parte por bilhão
PT100	sensor de temperatura
$P(a,b)$	probabilidade de se obter um resultado x no intervalo $a < x < b$
$P(x_i)$	distribuição de probabilidade para a variável discreta x,
$Q_1$ e $Q_2$	limites do intervalo de um intervalo de confiança
r	coeficiente de correlação que avalia o grau de dependência das variáveis aleatórias
R	resistência elétrica a uma temperatura t [ $\Omega$ ]
Ro	resistência elétrica à temperatura de 0 °C [ $\Omega$ ]
Re	número de Reynolds $[\rho \frac{Vm D}{\mu}]$
$R^2$	regressão em torno da média
s	desvio padrão para pequenas amostras
$s^2$	variância residual em torno da regressão
S	soma quadrática dos desvios
Se	sensibilidade do sensor [ $\Omega/^\circ\text{C}$ ]
xi	
SQT	soma quadrática total
SQG	soma quadrática entre grupos
SQR	soma quadrática dos resíduos dentro dos grupos
$SQ_T$	soma quadrática em torno da média

$SQ_R$	soma quadrática devido à regressão
$SQ_r$	soma quadrática residual
S1 e S2	sensor-1 e sensor-2
$t$	temperatura do ar [°C]
$t^*$	temperatura termodinâmica de saturação adiabática [°C]
$t_x$	tempo de observação [s]
$t_i$	tempo inicial de observação [s]
$t_{bs}$	temperatura de bulbo seco [°C]
$t_{bu}$	temperatura de bulbo úmido [°C]
$t_{amb}$	temperatura do ar ambiente [°C]
$t_k$	temperatura lida no sensor [°C]
$t_{cor}$	temperatura corrigida em [°C]
$t_{rk}$	temperatura lida no termómetro de referência [°C]
$t$	valor da distribuição de Student para uma dada confiabilidade e um número de graus de liberdade $v$
$T$	temperatura absoluta [K]
T1	termómetro-1
T2	termómetro-2
Tref	termómetro de referencia
UR	umidade relativa do ar [%]
URc	umidade relativa do ar calculada na Seção de Teste [%]
URamb	umidade relativa do ar ambiente [%]
$v_m$	velocidade média do escoamento de ar [m/s]
$w$	razão ou conteúdo de umidade a temperatura $t$ [kgVA /kgAS]
$w^*$	razão ou conteúdo de umidade a temperatura $t^*$ [kgVA/kgAS]
$w_{\bar{x}}$	incerteza de medição do valor médio
$w_r$	incerteza de medição $\pm$ [°C]
$w_{rc}$	incerteza de medição propagada na Seção de Teste $\pm$ [%]
xii	
$w_{r_{bs}}$	incerteza de medição da temperatura de bulbo seco $\pm$ [°C]
$w_{r_{bu}}$	incerteza de medição da temperatura de bulbo úmido $\pm$ [°C]
$W$	razão ou conteúdo de umidade [kgVA / kgAS]
$W_s$	razão ou conteúdo de umidade na saturação [kgVA / kgAS]

$W_s(bs)$	razão ou conteúdo de umidade na saturação calculado com tbs [kgVA / kgAS]
$W_s(bu)$	razão ou conteúdo de umidade na saturação calculado com tbu [kgVA / kgAS]
$x$	variável discreta
$\bar{x}$	valor médio da variável discreta
$x_m$	valor médio
$x_v$	fração molar de vapor d'água a temperatura $t$
$x_v^*$	fração molar de saturação de vapor d'água a temperatura $t^*$
$x_v$	valor verdadeiro
$x_{ij}$	valor individual da variável
$x_{m..}$	média global
$x_{m.j}$	média do grupo
$\bar{X}$	valor médio da variável independente observada
$X_i$	variável independente observada
$\chi^2$	(qui-quadrado)-reduzido que representa o ajuste de um conjunto de dados experimentais $x$ e $y$
$y_i$	valor observado: variável aleatória
$\hat{y}_i$	valor previsto
$\bar{y}$	média global
$Z$	número que multiplicado por $\sigma$ representa a probabilidade
<b>Caracteres gregos</b>	
$\alpha$	coeficiente de temperatura linear da resistência [ $C^{-1}$ ]
$\alpha_j$	efeito do grupo $j$
$\beta_0$	parâmetro da equação
$\beta_1$	parâmetro da equação
$\delta$	nível de significância
$\varepsilon_i$ e $\varepsilon_{ij}$	parte aleatória (erro)
xiii	
$\eta$	erro
$\mu$	média geral; valor médio verdadeiro; grau de saturação
$\mu$	viscosidade dinâmica do ar [ $1,781 \times 10^{-5}$ kg/ms] a temperatura aprox. de 15 °C
$v$	número de graus de liberdade
$v_T$	número de graus de liberdade total

$v_r$	número de graus de liberdade da soma quadrática residual
$v_R$	número de graus de liberdade da soma quadrática devida à regressão
$\rho$	massa específica do ar [1,225 kg/m <sup>3</sup> ] a temperatura aproximadamente de 15 °C
$\sigma$	desvio padrão
$\sigma_i^2$	variância que varia com $X_i$
$\sigma^2$	variância populacional
$\sigma_y$	desvio padrão da variável y
$\sigma_{y,x}$	desvio padrão das variáveis y e x
$\sum$	somatório
$\Delta t$	variação de temperatura [°C]
$\Delta x$	largura de um intervalo

***Subscritos***

a	ar seco
bs	bulbo seco
bu	bulbo úmido
c	calibração e calculada
cor	corrigida
L	latente
m	médio
r	residual
R	regressão
s	saturação
T	total
v	Vapor

***Sobrescritos***

*	A temperatura de saturação adiabática
-	Média

**ÍNDICE DE FIGURAS**

<b>Fig.</b>	<b>TÍTULO</b>	<b>Pág.</b>
2.1	Carta psicrométrica para temperatura normalnormal.....	7
2.2	Psicrômetro de termopares .....	24

2.3	Constante termodinâmica de psicrômetro $A_0$ em função da temperatura de bulbo úmido termodinâmica $t^*$ (à pressão constante) .....	34
3.1	Esquema da Bancada de Calibração.....	36
3.2	Foto da Bancada de Calibração: Vista Geral.....	37
3.3	Desenho do variador de fluxo de ar.....	38
3.4	Foto da Seção de Teste.....	39
3.5	Disposição dos termômetros e dos sensores na Seção de Teste da tubulação.....	40
3.6	Vista superior da Seção de Teste da tubulação.....	40
3.7	Foto do motor-ventilador.....	44
3.8	Foto dos equipamentos da medição e controle.....	45
3.9	Foto do manômetro com tubo de Pitot.....	47
4.1	Curvas de estabilidade em temperaturas $t_{bs}$ e $t_{bu}$ na Seção de Teste e temperatura do ar ambiente ( $t_{amb}$ ), em função do tempo $t_x$ .....	51
4.2	Curvas de estabilidade em umidade relativa ( $UR_c$ ) na Seção de Teste e umidade relativa do ar ambiente ( $U_{amb}$ ), em função do tempo $t_x$ .....	56
4.3	Montagem para a verificação da temperatura $t_{bu}$ x velocidade do ar.....	57
4.4	Estrutura do teste da temperatura $t_{bu}$ x umidade relativa do ar ( $UR$ ).....	61
4.5	Comparação dos sensores com mecha medindo $t_{bu}$ .....	62
5.1	Etapas da calibração dos sensores na água e no ar.....	67
5.2	Desvio entre a temperatura de referência $t_{rk}$ e as temperaturas lidas $t_k$ , dada por $b_k$ , e as curvas de correção dos valores lidos $t_k$ , dada por $b(t_k)$ , obtidas pelo ajuste dos desvios $b_k$ .....	68
5.3	Potência dissipada em função da resistência elétrica do sensor PT100.....	69
5.4	(a),(b) e (c) Desvio entre a temperatura de referência $t_{rk}$ e as temperaturas lidas $t_k$ , dada por $b_k$ , e as curvas de correção dos valores lidos $t_k$ , dada por $b(t_k)$ , obtidas pelo ajuste dos desvios $b_k$ .....	71
5.5	Potência dissipada em função da temperatura no sensor AD592.....	73

## ÍNDICE DE TABELAS

<b>Tabela</b>	<b>TÍTULO</b>	<b>Pág.</b>
2.1	Composição do ar seco em percentual .....	5

2.2	Resumo de algumas características dos principais princípios de medição de umidade.....	14
4.1	Resultados da umidade relativa do ar calculada (URc), incerteza de medição propagada (wrc) e a constante do psicrômetro (A), calculadas na Seção de Teste em função do tempo tx.....	55
4.2	Dados referentes ao teste: temperatura tbu em função da velocidade do ar na Seção de Teste da tubulação.....	59
4.3	Resultados do teste F: (tbu x velocidade).....	59
4.4	Temperaturas tbu corrigidas para os sensores testados e a umidade relativa do ar correspondente, empregados no teste ANOVA.....	62
4.5	Valores de UR calculados com os valores de tbu correspondentes a cada sensor do teste.....	63
4.6	Resultados do teste tbu x UR.....	64
5.1	Curvas de ajuste para cada sensor com as faixas de incertezas de medição.....	69
5.2	Curvas de ajuste para cada sensor com as faixas de incertezas de medição.....	72
5.3	Resultados comparativos através da ANOVA dos sensores que foram calibrados na água e no ar.....	74

# **1 INTRODUÇÃO**

## **1.1 Motivação**

Este trabalho teve como motivação os trabalhos de climatização de estufas para plasticultura que vem sendo desenvolvido pelo Grupo de Estudos Térmicos e Energéticos (GESTE) do Departamento de Engenharia Mecânica da UFRGS [Schneider e Vielmo, 1999], no município de Antônio Prado – RS, com apoio da FAPERGS e do SEBRAE. No projeto iniciado em 1996, foram usados psicrômetros capacitivos, de elevada incerteza, caros e com histerese na resposta em umidade relativa para valores maiores do que 90 % de UR. Para substituí-los foram construídos psicrômetros com sensores digitais para os bulbos seco e úmido, mas que nunca passaram por uma calibração adequada.

Alem desses motivos, sensores digitais dissipam calor e portanto também necessitam de uma calibração. A solução encontrada foi à construção de uma Bancada de Calibração, a qual surgiu de um trabalho de diplomação do curso de Engenharia Mecânica da UFRGS defendido por Balestrin, 1999. A segunda versão desta, ganhou o prêmio jovem cientista na UFRGS, construída por Gasparini, 1999. Esta versão foi estudada e verificou-se que a velocidade nos ramais da tubulação não eram iguais e além disso, estava fora da faixa indicada pela ASHRAE, 41.6-1994. Outros detalhes foram observados, diâmetro da tubulação, posição dos sensores, posição do trocador de calor, isolamento térmico da tubulação, etc. Com isso, surge então a terceira versão de Bancada, a qual está sendo o motivo maior dessa dissertação.

## **1.2 Objetivos do trabalho**

- Construir um equipamento que permita gerar um ambiente controlado em temperatura e umidade relativa do ar para uma determinada faixa;
- Calibrar sensores de temperaturas de bulbos seco e úmido em comparação com termômetros de mercúrio em vidro.

### 1.3 Seqüência do trabalho

A revisão bibliográfica que se apresenta na seqüência desse trabalho dá uma idéia geral sobre a definição de psicrometria. Apresentam-se alguns dos métodos usados para a determinação da umidade relativa do ar, sendo que o método por comparação do psicrômetro aspirado será o foco principal desse trabalho. A outra parte da revisão bibliográfica necessária para complementar esse trabalho, encontra-se nos anexos VIII e IX, abordando: ajuste de curvas, incerteza de medição e o método de análise de variância (ANOVA) que será empregado para a comprovação estatística dos testes.

O capítulo 3 que segue destina-se a apresentar algumas características dos sensores de temperatura e de umidade relativa empregados nesse trabalho, bem como uma visão geral de montagem da Bancada de Calibração baseada em normas de calibração, sendo que neste trabalho, usa-se o método de calibração por comparação que foi revisado no capítulo anterior.

Além disso, o capítulo em questão apresenta nas etapas, uma descrição do funcionamento físico do conjunto e de cada subsistema que compõe o projeto, uma descrição relativa aos instrumentos da medição e controle agregados à Bancada, aspectos relevantes de montagem, uma verificação do funcionamento com hipóteses testadas experimentalmente e analisadas através do método estatístico da análise de variância (ANOVA). Os procedimentos de montagem e a lista de materiais para a montagem da Bancada de Calibração encontram-se no anexo I.

O capítulo 4 é dedicado a uma seqüência de testes de verificação do comportamento da Bancada de Calibração. Essa verificação é importante e necessária para que se possa conhecer as limitações do equipamento e a estabilidade em respeito à temperatura e a umidade relativa. Também busca verificar o comportamento de alguns sensores, quando estes são submetidos a um ambiente com temperatura, umidade relativa e velocidade do ar variáveis.

O capítulo 5 apresenta a calibração dos termômetros de mercúrio em vidro, sensores PT100, AD592 e termopares tipo K, utilizados nesse trabalho. Para fazer esta calibração, ou

seja, encontrar as equações que fazem a correção do valor medido pelos elementos sensores de temperatura em relação a um termômetro de referência, foi elaborada uma planilha em Microsoft Excel [Danieli, 1999], que emprega o método dos mínimos quadrados (veja anexo VI).

Este trabalho tem como proposta não só a montagem e verificação do funcionamento da Bancada de Calibração, mas também comparar a calibração de sensores de temperatura em um banho termostático de água com a calibração dos mesmos no ar em uma tubulação. A calibração na tubulação, mais especificamente na Seção de Teste, é feita com a temperatura de bulbo seco (tbs) do ar. Cada sensor calibrado possui a sua equação com o seu respectivo termo de correção e sua incerteza de medição.

## 2.1 Introdução

A revisão bibliográfica que se apresenta nesse capítulo ilustra alguns dos métodos usados para a determinação da umidade relativa do ar, incluindo algumas propriedades psicrométricas do ar, sendo que o método por comparação do psicrômetro aspirado será o foco principal desse trabalho. Uma parte complementar da revisão bibliográfica necessária para esse trabalho, encontra-se nos anexos VIII e IX, que possui como assuntos revisados: ajuste de curvas, incerteza de medição e o método de análise de variância (ANOVA) que será empregado para a comprovação estatística dos testes.

Os métodos apresentados a seguir têm como objetivo auxiliar aqueles que desejam selecionar e utilizar medidores de umidade. Ele é baseado na referência “A Guide to the Measurement of Humidity” editado pelo The Institute for Measurement and Control (1996). Ele apresenta algumas das principais técnicas utilizadas na determinação da umidade do ar e em outros gases inertes, destacando os seus princípios de operação, as suas vantagens e desvantagens, e principalmente as particularidades de cada caso [Santos e Kawakita, 1992].

A umidade é uma quantidade que apresenta relativa dificuldade de ser medida na prática e a exatidão atingível normalmente não é tão boa quanto as possíveis de serem obtidas em outras áreas da metrologia. Por exemplo, a massa de um objeto pode ser determinada pela medição em um laboratório comum dentro de uma parte em 100 000. Analogamente, a pressão atmosférica pode ser freqüentemente medida dentro de 5 partes em 10000. A umidade, entretanto, pode ser normalmente medida apenas dentro de 3 partes em 100, ou seja, com uma incerteza no resultado de  $\pm 3 \%$ .

Para se realizar uma medição confiável, em um determinado nível de exatidão, é necessário utilizar uma técnica segura e apropriada. Para isto, defini-se precisamente o objetivo da medição, seleciona-se um método adequado de medição validado por uma calibração confiável, realiza-se a medição corretamente sem introduzir erros [Santos e Kawakita, 1992].

## 2.2 Psicrometria

A origem da palavra psicrometria que vem do “grego”, *psicro* = água fria e *metria*= medida, logo psicrometria significa “medida da água fria” e esta estuda as propriedades termodinâmicas do ar úmido e o uso destas propriedades na análise das condições e processos que envolvem o ar úmido [ASHRAE, 1997].

Inicialmente é necessário definir ar e seus constituintes, segundo a ASHRAE, 1997.

*Ar seco* é uma mistura de diversos componentes gasosos, com composição relativamente constante. Pequenas variações nas quantidades dos componentes podem ocorrer com o tempo, localização geográfica e altitude. A composição percentual do ar seco em volume é a seguinte:

**Tabela 2.1** Composição do ar seco em percentual [ASHRAE, 1997]

SUBSTÂNCIA	%
Nitrogênio	78,084
Oxigênio	20,9476
Argônio	0,934
Dióxido de Carbono	0,0314
Neônio	0,001818
Hélio	0,000524
Metano	0,00015
Dióxido de Enxofre	0 a 0,0001
Hidrogênio	0,00005
Kriptônio, Xenônio e Ozônio	0,0002

A massa molecular aparente do ar seco é de 28,9645 kg/mol e a do vapor de água é de 18,1535 kg/mol, ambas na escala do carbono 12. O ar seco normalmente tem vapor de água associado, o que dá origem ao que se denomina ar úmido.

*Ar Úmido* é uma mistura binária (dois componentes) onde destacam-se o ar seco e vapor d'água. A quantidade de vapor d'água no ar úmido varia de zero (ar seco) até um máximo que depende da temperatura e pressão. Este máximo é a saturação, um estado de equilíbrio neutro entre o ar úmido e as fases condensadas da água (líquida ou sólida).

*Ar Atmosférico* é uma mistura de ar úmido mais contaminantes como fumaça, pólen, poluentes gasosos e particulados.

*Atmosfera Padrão* é considerada ao nível do mar, temperatura de 15 °C e pressão 101,325 kPa. A temperatura e pressão decrescem com a altitude. A aceleração da gravidade é considerada constante com valor padrão de 9,80665 m/s<sup>2</sup>.

### *O que é umidade ?*

A umidade relativa é definida como sendo a relação entre a fração molar do vapor d'água  $x_w$  em uma dada mistura de ar pela fração molar  $x_{ws}$  do vapor d'água saturada a mesma temperatura e pressão total [ASHRAE, 1997].

A umidade relativa do ar pode ser determinada através de uma carta psicrométrica, desde que as temperaturas de bulbo seco e úmido sejam fornecidas. A figura que segue ilustra uma carta psicrométrica com temperatura normal, que representa graficamente as propriedades termodinâmicas do ar úmido. As faixas de temperatura de bulbo seco normalmente cobertas pelas cartas são:

- temperatura normal: 0 a 50 °C
- temperatura moderada: -10 a 65 °C
- temperatura baixa: -30 a 10 °C
- temperatura alta: 4 a 127 °C

## *Carta Psicrométrica*

**Figura 2.1** Carta psicrométrica para temperatura normal [ASHRAE 41.6-94]

## 2.3 Métodos de medição de umidade

Os diferentes parâmetros e unidades utilizadas na medição de umidade são todos inter-relacionados, alguns dos quais como funções da temperatura e pressão, e também do teor de umidade contido no gás. Isto significa que existe freqüentemente uma opção de escolha para o parâmetro a se medir. A umidade relativa, em particular, pode ser medida diretamente utilizando alguns tipos de instrumentos disponíveis comercialmente. Entretanto, a mesma pode ser derivada indiretamente, por exemplo, a partir de medições de temperatura e de ponto de orvalho [Santos e Kawakita, 1992].

### 2.3.1 Princípios de operação de vários higrômetros

A umidade influencia uma ampla gama de processos físicos, químicos e biológicos. Em decorrência deste fato, existem diversos tipos de efeitos relacionados com a umidade que podem ser explorados para a indicação das variações de umidade. As descrições de alguns dos métodos mais importantes para a medição da umidade em gases são fornecidos a seguir:

#### A) Higrômetros mecânicos

Exploram as propriedades de expansão e de contração de materiais orgânicos conforme as variações de umidade. O elemento sensor pode ser confeccionado a partir do cabelo humano, *catgut* (material utilizado em cordas de violino, raquetes de tênis, etc., obtido através da torção de intestinos de ovelhas e outros animais) e tecidos [Santos e Kawakita, 1992].

#### B) Psicrômetros de bulbos seco e úmido

Um psicrômetro de bulbos seco e úmido é constituído de um par de sensores de temperatura, sendo que o bulbo de um deles é coberto por um tecido molhado com água. Quando o bulbo úmido é colocado em uma corrente de ar, a água evapora do tecido, existindo uma temperatura de equilíbrio chamada temperatura de bulbo úmido. Este processo não é de saturação adi-

abática, que define a temperatura de bulbo úmido termodinâmico, mas é um de transferência de calor e massa simultâneos no bulbo úmido [Beyer, 1998].

Para que o princípio no qual se baseia a operação deste tipo de medidor de umidade seja plenamente utilizado, é recomendável que o mesmo possua incorporado um pequeno ventilador para promover a aspiração do ar, a uma determinada velocidade, sobre os sensores úmido e seco. Outras formas de medidores, a exemplo do psicrômetro não-aspirado de Mason, ou mesmo o psicrômetro manual giratório (conhecido também por *reco-reco*), são menos eficazes na utilização do princípio descrito e, desse modo, estão mais propensos a fornecer medições errôneas da umidade [Santos e Kawakita, 1992].

### *C) Medidores por impedância elétrica (Capacitivos ou Resistivos)*

O sensor utilizado neste tipo de medidor é fabricado a partir de um material higroscópico, cujas propriedades elétricas se alteram na medida em que o mesmo absorve ou desolve as moléculas de água. As mudanças na umidade são medidas em termos de alterações na capacitância ou resistência elétrica do sensor, ou mesmo na combinação das duas. A maioria dos sensores de impedância modernos utilizam a tecnologia de filmes finos. Os higrômetros elétricos são normalmente portáteis e compactos, sendo que a forma mais usual deste instrumento é composta de uma pequena sonda ligada por meio de um cabo, ou mesmo conectada diretamente ao corpo principal do medidor

Estas sondas são normalmente equipadas com uma espécie de filtro para protegê-las de contaminações, apesar de que esta proteção pode prejudicar o tempo de resposta do sensor. Os higrômetros de impedância são normalmente equipados também com um sensor de temperatura. As leituras são fornecidas diretamente em um visor, algumas vezes com a possibilidade de escolha do parâmetro desejado (p.e. umidade relativa ou ponto de orvalho), e podendo inclusive dispor de uma saída na forma de um sinal elétrico proporcional [Santos e Kawakita, 1992].

### *D) Sensores capacitivos*

Respondem mais efetivamente à umidade relativa, apresentando uma melhor linearidade em baixas umidades relativas. Em geral os sensores capacitivos não sofrem danos pela condensação (100% de umidade relativa), contudo, se isto ocorrer, a calibração pode apresentar um desvio [Santos e Kawakita, 1992].

### *E) Sensores resistivos*

Analogamente aos sensores capacitivos, respondem mais efetivamente à umidade relativa. Por outro lado, apresentam uma melhor linearidade em umidades elevadas. A maioria dos sensores resistivos não toleram a condensação sobre o elemento sensor. Entretanto, alguns modelos possuem dispositivos de proteção que evitam a condensação, por exemplo através de um aquecimento automático do sensor. Um tipo específico de sensor resistivo é por vezes referido como “eletrolítico” devido ao uso de um polieletrólito como elemento higroscópico do sensor. Entretanto, este sensor não deveria ser confundido com os sensores eletrolíticos que utilizam o eletrolítico como mecanismo sensor [Santos e Kawakita, 1992].

### *F) Sensores de ponto de orvalho por impedância*

É um caso especial dos higrômetros de impedância, utilizados mais para a medição em unidades absolutas do que em termos da umidade relativa. Seguindo um princípio geral similar, o sensor pode ser composto de óxido de alumínio ou de outros metais ou mesmo uma base de silicone para o elemento ativo. Este tipo de sensor responde à pressão parcial do vapor. Normalmente, o sinal é convertido em outras unidades absolutas, resultando em valores apresentados pelo instrumento em termos de ponto de orvalho ou ppm<sub>v</sub> (parte por milhão em volume). Estes medidores podem apresentar uma ampla faixa de medição, incluindo-se gases muito secos [Santos e Kawakita, 1992].

### *G) Higrômetros por condensação*

Em um higrômetro de ponto de orvalho óptico, a condensação do vapor d'água na forma de orvalho ou gelo é induzida a ocorrer sobre a superfície de um pequeno espelho dentro do instrumento. O início da condensação é detectado opticamente pela ocorrência de alterações no modo em que o espelho reflete ou espalha um feixe de luz incidido sobre o mesmo. A leitura pode ser registrada no instante da condensação, ou o espelho pode ser mantido àquela temperatura possibilitando que uma série de leituras seja obtida. Os projetos e concepções utilizados variam, alguns apresentando o sensor incorporado em uma espécie de sonda, e outros fazendo a amostragem do ar através de um tubo. Enquanto que as sondas podem ser razoavelmente compactas, o corpo principal do medidor é relativamente grande e não portátil. As leituras são apresentadas na forma de temperatura de ponto de orvalho, possuindo também uma saída eletrônica

do sinal. Outros sensores de ponto de orvalho não-ópticos detectam a condensação eletricamente, ou através de outros métodos tal como a mudança na frequência de ressonância de um cristal de quartzo [Santos e Kawakita, 1992].

#### *H) Higrômetros de cloreto de lítio saturado*

O elemento sensor, que é um sal higroscópico, absorve o vapor d'água do ar. Uma tensão elétrica é aplicada através do sal e uma corrente elétrica proporcional atravessa o mesmo de acordo com a quantidade de vapor d'água que foi absorvida. No mesmo instante, a corrente elétrica também aquece o sal. Ao final, é alcançado um balanço entre a absorção e o aquecimento. A temperatura em que este equilíbrio ocorre é, então, relacionada com a pressão de vapor d'água. O instrumento é normalmente disponível na forma de uma sonda, com as leituras apresentadas na forma de ponto de orvalho [Santos e Kawakita, 1992].

#### *I) Eletrolítico (pentóxido fosforoso)*

O sensor consiste de um filme de um poderoso secante, pentóxido fosforoso ( $P_2O_5$ ), que absorve fortemente o vapor d'água contido no gás ao seu redor. Uma tensão elétrica é aplicada através do  $P_2O_5$ , o que provoca a eletrólise, dissociando a água em seus constituintes - hidrogênio e oxigênio. A corrente que flui neste processo é relacionada, através da Lei de Faraday, à quantidade de água eletrolisada. Assim, o valor da corrente é utilizado como indicador da umidade do gás que está sendo medido. Estes sensores são adequados à medição de umidades bastante baixas, embora eles exijam que a vazão do gás seja estável e determinada. Este instrumento mede a concentração de água por unidade de volume, com as leituras apresentadas em uma das unidades absolutas, tais como partes por milhão por volume ou pressão de vapor. Eles são normalmente mais utilizados na configuração de amostragem do gás por meio de um tubo, do que na forma de uma sonda [Santos e Kawakita, 1992].

#### *J) Higrômetros espectroscópicos*

Em geral, uma técnica espectroscópica é aquela onde a composição de uma mistura de gás é determinado através da análise do modo como as substâncias absorvem ou emitem luz de comprimentos de onda e frequências particulares. Toda substância química possui uma banda de frequências característica, e ela pode estar nas faixas do ultravioleta ou do infravermelho do es-

pectro. A técnica espectroscópica pode ser uma alternativa útil se for necessária à medição das concentrações de outras substâncias, além da do vapor d'água.

A técnica espectroscópica utilizada tanto para as umidades altas quanto para as moderadas é baseada na absorção infravermelha. A água absorve a radiação infravermelha em vários comprimentos de onda na faixa de  $1\mu\text{m}$  a  $10\mu\text{m}$ . A intensidade da radiação transmitida é mediada em um destes comprimentos de onda e comparada com aquela obtida para um comprimento de onda de referência, utilizando uma fotocélula para detecção. A quantidade desta radiação absorvida pelo gás é proporcional à concentração espacial (ou pressão parcial) do vapor d'água.

As técnicas espectroscópicas podem ser também utilizadas para a medição de concentrações extremamente baixas de vapor d'água, da ordem de algumas partes por bilhão (ppb). Existem várias versões desta tecnologia sofisticada, incluindo-se a APIMS (*Atmospheric Pressure Ionisation Mass Spectrometry*), e a FT-IR (*Fourier-transform Infrared Spectroscopy*), e a TDLAS (*Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy*)

#### *K) Medidores de umidade por mudança de cor*

Existem indicadores de umidade que indicam as mudanças de umidade através de alterações na cor de uma tira de papel ou de outro material. O material sensor é impregnado com cloreto de cobalto, e a mudança de cor ocorre como resultado de uma reação química da umidade com esta substância química. Outras técnicas de medição baseadas na alteração de cor envolvem o bombeamento de gás através de uma pequena garrafa recheada com cristais que mudam de cor de acordo com a umidade do gás [Santos e Kawakita, 1992].

#### *2.3.2 Outros métodos*

Obviamente, a relação apresentada está longe de ser completa. Outros métodos e princípios que têm seus usos em aplicações particulares incluem [Santos e Kawakita, 1992]:

*A1) Acústico:* A alteração da velocidade de transmissão do som no ar (ou em outros materiais) pode ser um indicador da umidade.

*B1) Expansão adiabática:* O efeito do resfriamento do ar em uma expansão produz uma névoa se a temperatura de ponto de orvalho for alcançada.

*C1) Gravimétrico:* Baseia-se na pesagem da umidade absorvida por um material.

*D1) Lyman-alpha:* A absorção e a emissão de luz ultravioleta pelo ar é um indicativo da pressão parcial do vapor d'água.

*E1) Fibra óptica:* A perda ou reflexão da luz pelas camadas da fibra indica alterações na umidade.

*F1) Índice de refração óptica:* A velocidade da luz no ar depende de sua composição, incluindo o vapor d'água.

*G1) Piezoelétrico (oscilador de quartzo):* A frequência de ressonância de um cristal de quartzo indica a massa de água que o mesmo absorveu do ar.

*H1) Ponte pneumática.* A pressão do vapor d'água é determinada a partir da mudança na pressão global quando a pressão de vapor é removida.

*I1) Condutibilidade térmica:* A perda de calor a partir de um fio quente é afetada pelo vapor d'água e pelos demais gases constituintes.

*J1) Variação térmica:* Calor de adsorção ou desorção da água a partir de um secante.

*K1) Zircônia:* O vapor d'água é detectado pela medição do teor de oxigênio no gás, e comparando-o com uma quantidade de referência de oxigênio.

Alguns dos métodos apresentados anteriormente também se aplicam à medição de umidade em sólidos e líquidos.

A tabela que segue apresenta simplificada uma visão geral das características dos principais tipos de higrômetros. Na mesma, são fornecidas indicações gerais das propriedades dos diferentes métodos. As notas entre colchetes fornecem informações adicionais, ou características que nem sempre são disponíveis. Evidentemente, os fabricantes de instrumentos ou os fornecedores deveriam ser consultados no caso da necessidade de detalhes específicos, principalmente porque as tecnologias estão em contínuo desenvolvimento. São fornecidas igualmente as incertezas para os diferentes tipos de instrumentos. Em casos excepcionais, os instrumentos podem apresentar um desempenho por vezes melhor do que os indicados aqui. Em outros casos, contrariamente, eles podem se comportar de uma maneira inferior do que a pior estimativa apresentada na tabela, devido às circunstâncias particulares de cada aplicação [Santos e Kawakita, 1992].

**Tabela 2.2** Resumo de algumas características dos principais princípios de medição de umidade  
[Santos e Kawakita, 1992]

**Nota:** (1) Quando as faixas de temperatura são fornecidas, elas se referem às faixas de operação para a medição de umidade, e não às faixas de operação de algum tipo de sensor de temperatura eventualmente incorporado ao medidor.

- (2) A tolerância geral de contaminação é indicada através de asteriscos: [\*\*\*] para uma boa tolerância, [\*\*] para uma média e [\*] para uma tolerância pobre.
- (3) As incertezas indicativas assumem uma calibração rastreada e não incluem qualquer contribuição que poderia advir de uma utilização inadequada do medidor. As incertezas são fornecidas a um nível de confiança de aproximadamente 95% [Santos e Kawakita, 1992].

### 2.3.3 *Vantagens e limitações*

A seguir estão listadas algumas das vantagens (+) e desvantagens (-) de cada um dos principais métodos de medição de umidade apresentados [Santos e Kawakita, 1992]:

#### *A) Higrômetros mecânicos*

São adequados à medição das condições normalmente presentes dentro de laboratórios e ambientes fechados em geral.

- + Alguns modelos não necessitam de alimentação ou baterias.
- + Os termohigrógrafos permitem o registro permanente em carta.
- + Podem ser relativamente mais baratos.
- Apresentam uma resposta lenta a mudanças na umidade.
- Podem sofrer de histerese.
- Podem se descalibrar devido a vibrações e movimentações.

#### *B) Psicômetros de bulbos seco e úmido*

Indicados para ambientes com espaço relativamente grande e umidades médias e elevadas,

- + São normalmente simples, baratos, confiáveis e robustos.
- + Podem apresentar uma boa estabilidade.
- + Atendem uma ampla faixa de umidades.
- + Toleram altas temperaturas, e até mesmo a condensação.
- Exige alguma habilidade para o seu uso e manutenção.
- Resultados podem exigir cálculos, exceto nos automáticos.
- A medição requer uma amostra relativamente grande de ar.
- A amostra ser umidificada pela água evaporada.
- Impurezas no ar ou na água podem contaminar a mecha, exigindo limpezas e trocas regulares.
- As medições podem ser complicadas abaixo de cerca de 1 °C, pela dúvida entre a presença de água ou de gelo sobre a mecha quando a temperatura da mesma cai abaixo de 0 °C.

- Os psicrômetros do tipo manual giratório e os não-aspirados são mais propensos a medições errôneas da umidade.

*C) Medidores por impedância elétrica (Capacitivos ou Resistivos)*

Os sensores resistivos e capacitivos são utilizados para uma variedade de aplicações, normalmente em condições ambiente, incluindo-se a utilização para o controle de sistemas de ar condicionado e outros processos. Alguns tipos podem ser utilizados em condições mais extremas. Os medidores de ponto de orvalho são distintos de outros neste grupo, uma vez que eles cobrem níveis de umidade muito mais baixos, fornecendo leituras em valores absolutos, e são utilizados no controle e monitoração de gases relativamente secos e na calibração de sensores.

No geral, os sensores por impedância elétrica são:

- + Normalmente fáceis de utilizar.
- + Disponíveis com memória integral para armazenamento de dados.
- Podem apresentar desvios na calibração se utilizados a altas temperaturas (acima de 40 °C) e/ou em altas umidades (o desempenho pode variar).
- Podem sofrer desvios e histereses.
- Podem ser danificados por agentes químicos agressivos.

*D) Sensores capacitivos, em particular*

- + Normalmente toleram a condensação, embora a calibração possa desviar.

*E) Sensores resistivos, em particular*

- Podem ser inutilizados pela condensação, embora alguns modelos possuam o sensor protegido

*F) Sensores de ponto de orvalho por impedância, em particular*

- + Normalmente, toleram a condensação, embora a calibração possa desviar.
- + Podem apresentar uma ampla faixa de medição.
- Podem ter um ajuste lento em baixas umidades absolutas.

- Apresentam alguma tendência ao desvio.

#### *G) Higrômetros por condensação*

Os higrômetros ópticos de ponto de orvalho são freqüentemente utilizados como padrões de referência em calibrações, em uma ampla faixa umidades.

- + Podem proporcionar medições com baixa incerteza.
- + Geralmente apresentam bom desempenho a longo tempo.
- + Possuem uma ampla faixa de medição.
- São relativamente caros.
- Normalmente, requerem alguma habilidade para a operação.
- A contaminação do espelho pode ocasionar leituras incorretas.
- O espelho deve ser limpo com água destilada.
- As medidas de temperatura de ponto de orvalho com valor abaixo de 0 °C exigem uma interpretação cuidadosa, a fim de verificar se o condensado é gelo ou água.

#### *H) Higrômetros de cloreto de lítio saturado*

Utilizam um método conhecido já há longo tempo e historicamente utilizado para a medição de uma ampla faixa de condições ambientais.

- + Podem ser relativamente baratos.
- Não conseguem medir umidades abaixo de 10 %UR.
- Não toleram a condensação.
- Apresentam resposta lenta.
- Sofrem contaminação de materiais higroscópicos ou solventes.
- Exigem alguma habilidade, especialmente para a manutenção.

#### *I) Eletrolítico (pentóxido fosforoso)*

Analogamente, utilizam um método conhecido já a longo tempo e utilizado em ambientes secos.

- + São compatíveis com alguns gases corrosivos.

- + Podem apresentar boa sensibilidade.
- As células de medição possuem uma vida limitada, após a qual elas devem ser regeneradas e re-calibradas.
- O controle da vazão do gás amostral é crítico.
- São danificados pela exposição à umidade ambiente, e por vezes a umidades excessivamente baixas (abaixo de 1 ppm<sub>v</sub>).
- Apresentam uma resposta lenta nas umidades mais baixas.
- Hidrocarbonetos, butadeína, amônia e alguns outros contaminantes impedem uma operação adequada.
- Adiciona alguns traços de hidrogênio e oxigênio na amostra de gás, que podem se recombinar, ocasionando erros.

#### *J) Higrômetros espectroscópicos*

Ampla faixa de utilização, indo desde a medição de umidade de gases em fornos e processos de combustão até a medição de traços de componentes em processos envolvendo gases de alta pureza.

- + Adequado ao uso com quase qualquer tipo de gás, inclusive os corrosivos e reativos
- + Pode ser utilizado para a medição de concentrações de outras substâncias ao mesmo tempo
- + Consegue medir a umidade em gases a altas temperaturas.
- + Princípio de medição sem contato.
- + Resposta rápida.
- + Alta sensibilidade.
- Utiliza tecnologia sofisticada.
- É relativamente caro.
- É difícil de calibrar.
- Dióxido de carbono pode interferir na medição da umidade se presente em alta concentração.

O higrômetro espectroscópico por absorção infravermelha em particular é utilizado em processos industriais onde o ambiente pode ser sujo, com alto teor de umidade, e em altas temperaturas.

- + Pode ser projetado para utilização em ambientes hostis.

Outros métodos espectroscópicos como o APIMS, o FT-IR e o TDLAS podem ser também utilizados para a medição de concentrações extremamente baixas de vapor d'água, da ordem de algumas partes por bilhão (ppb).

- + Podem medir concentrações bastante baixas de vapor d'água.
- Exige um percurso longo da amostra para uma sensibilidade adequada em níveis baixos de umidade.

#### *K) Medidores de umidade por mudança de cor*

Utilizados principalmente de uma forma visual expositiva como indicadores de umidade montados em paredes.

- + Não necessitam de nenhuma bateria ou de alimentação elétrica.
- + Podem ser facilmente observados.
- + São baratos e simples.
- Proporcionam apenas uma indicação grosseira da umidade.
- São difíceis de calibrar.

#### *2.3.4 Seleção de um tipo de higrômetro*

A fim de assegurar a “adequação à finalidade” é necessário, antes de tudo, estabelecer com clareza qual é a finalidade da medição. A realização de uma medição da umidade é realmente necessária? Se sim, qual será o seu uso, negócios ou processo? Para serem úteis, como os resultados deveriam ser expressos? A medição visa atender uma necessidade prática, ou objetiva cumprir uma especificação documentada, e se for este o caso, a especificação é significativa e realística? Uma vez que a necessidade e o objetivo de se realizar a medição estão claros, é importante decidir quais fatores são relevantes para se atingir tal objetivo [Santos e Kawakita, 1992].

Para isto, o usuário deveria considerar as seguintes questões. Qual a unidade ou a escala de medição a utilizar? O parâmetro de interesse pode ser umidade relativa, ponto de orvalho, ou alguma outra medida de concentração de vapor d'água [Santos e Kawakita, 1992].

É geralmente melhor selecionar um método de medição que intrinsecamente detecta o parâmetro de interesse. Muitos higrômetros fornecem os resultados em termos de dois ou mais parâmetros de umidade. Isto frequentemente é útil, mas deveria ser entendido que normalmente

somente um parâmetro está sendo medido, e os outros valores são resultantes de conversões numéricas. Devido a isto, o que se espera é que um instrumento possa fornecer uma indicação confiável de apenas um dos parâmetros apresentados. Além disso, na seleção de um medidor, outros fatores também devem ser considerados a exemplo da faixa de operação, do desempenho, tipo de indicação e sinal de saída, facilidade de utilização, materiais construtivos, etc.. [Santos e Kawakita, 1992]

### 2.3.5 *Calibração de higrômetros*

Os critérios de desempenho de um instrumento devem ser descritos em termos de uma especificação técnica adequada. Isto determinará os limites dentro dos quais pode se esperar um comportamento condizente do instrumento. Por exemplo, se um medidor possui uma especificação indicando uma incerteza de  $\pm 3\%$  da leitura, então o usuário pode, de certa forma, esperar que, se o instrumento for utilizado corretamente, o valor de umidade que ele indicar estará correto dentro de  $\pm 3\%$  da leitura. Entretanto, não podemos confiar neste desempenho a não ser que o mesmo seja verificado através de uma calibração do instrumento. Uma especificação não é a mesma coisa que uma calibração, e também nunca a substitui [Santos e Kawakita, 1992].

A calibração é um processo de comparação de um instrumento de medição contra um padrão para o mesmo tipo de medição, cuja finalidade é identificar eventuais desvios ou erros sistemáticos nas leituras. O resultado de uma calibração é normalmente resumido em um certificado de calibração, listando quaisquer correções que necessitam ser aplicadas aos valores indicados pelo instrumento, juntamente com a estimativa da incerteza da calibração e outras informações relevantes [Santos e Kawakita, 1992].

A rastreabilidade a padrões reconhecidos é a melhor maneira de assegurar a exatidão das medições, e esta proporciona a consistência das medições entre usuários em diferentes épocas e locais. Uma medição rastreável é aquela que pode ser relacionada a padrões de medição apropriados, geralmente nacionais ou internacionais, através de uma cadeia contínua de comparações [Santos e Kawakita, 1992].

## 2.4 **Método de comparação**

### 2.4.1 *Propósito e Extensão*

Conforme a norma ASHRAE, 41.1-1974, o procedimento de medidas de temperatura para uso específico recomenda:

- a) O estabelecimento de um ambiente de temperatura desejada para testes de aquecimento ou resfriamento.
- b) A determinação de taxas de fluxo de calor para ou de fluidos em movimento por fora ou dentro de tal equipamento.
  - As recomendações neste padrão são apropriadas a medidas de temperatura dentro da faixa de 4,44 até mais de 371,11 °C. As precauções adicionais ou refinamentos para medidas abaixo ou acima dessa faixa de temperatura, está fora da extensão deste padrão [ASHRAE, 41.1-1974].

#### *2.4.1.1 Instrumentos*

Os seguintes instrumentos são comuns para este propósito: [ASHRAE, 41.1-1974]

- a) Termômetros de mercúrio em vidro
- b) Termopares
- c) Termômetros de resistência elétrica, inclusive termistores

#### *2.4.1.2 Técnicas gerais de medidas*

A medida do fluxo de calor normalmente envolve a medida do escoamento de um fluido e a determinação de sua entalpia sendo informada. A entalpia depende da pressão e da temperatura entre outros parâmetros. Para o ar, a pressão barométrica e as temperaturas de bulbos seco e úmido são necessárias [ASHRAE, 41.1-1974].

#### *2.4.1.3 Medidas de temperaturas em correntes de ar*

##### *A) Determinação de temperaturas*

Uma determinação satisfatória da temperatura de uma corrente de ar exige que se observe determinada situação [ASHRAE, 41.1-1974]:

- a1) Não uniformidade de temperatura pela corrente de ar
- a2) Não uniformidade de velocidade do ar
- a3) Radiação térmica no elemento sensor
- a4) Condução de calor no elemento sensor
- a5) Não uniformidade da umidade do ar

### *B) Medida com relação à determinação do fluxo de calor*

Quando são requeridas medidas de temperatura num escoamento, as precauções necessárias para garantir uma boa medição são [ASHRAE, 41.1-1974]:

- b1) Testar os ganhos ou perdas de calor no duto do aparato de teste em condições de regime permanente e transiente.
- b2) Testar os ganhos ou perdas de calor devido ao vazamento de ar no aparato de teste.
- b3) Criar ou suprimir re-circulação ou outros padrões de corrente de ar anormais causados pela existência do aparato de teste.
- b4) Evitar as oscilações de temperatura com o tempo.
- b5) Verificar se o tempo de resposta do instrumento é adequado.

### *C) Erros de radiação*

Medidas de temperatura no fluxo de ar está sujeito a erro devido à radiação térmica quando os elementos sensores estão expostos a uma visão de superfícies em temperatura diferente da corrente de ar. Em tais casos os elementos sensores podem ser protegidos da exposição direta de qualquer maneira satisfatória. Uma proteção feita com um pedaço de tubo de chapa de alumínio polida é efetiva e conveniente. Duas proteções do tipo tubo concêntricas são mais efetivas que uma. O comprimento da proteção deveria ser pelo menos dois diâmetros-tubo além do elemento sensor. Para medidas de temperatura dentro da faixa deste padrão [ASHRAE, 41.1-1974], efeitos de radiação podem ser desprezíveis ou marginais. Por exemplo, os efeitos podem ser importantes quando os elementos sensores são expostos a superfícies grandes de um condensador de refrigerante quente. É boa prática conferir as temperaturas com ambos, protegendo e não protegendo os elementos sensores para estabelecer no caso de dúvida, se existe a necessidade. Usando o menor elemento sensor possível pode diminuir erros de radiação. Além de erros de radiação, erros devido à condução térmica para e do elemento sensor pode existir [ASHRAE, 41.1-1974].

### *D) Temperaturas de bulbos seco e úmido*

Quando a umidade do ar é estabelecida por meio de medidas de temperaturas de bulbos seco e úmido, é importante que os instrumentos sejam igualados. Isto é, eles deveriam indicar a mesma temperatura quando estão secos (sem mecha) no mesmo ambiente ou uma correção deveria ser aplicada. Isto assegura uma determinação mais precisa da temperatura de bulbo úmido. Os dois elementos sensores deveriam estar juntos no mesmo fluxo para medir a mesma amostra

de ar, mas o elemento de bulbo seco deveria estar sempre ao lado do elemento de bulbo úmido de forma que, a medida de bulbo seco não seja influenciada pela evaporação da umidade do bulbo úmido. A acumulação inadvertida de umidade de qualquer fonte no termômetro de bulbo seco causará um erro. Isto é provável acontecer durante os testes à alta umidade, ambos abaixo e acima de temperaturas baixas, especialmente quando as condições de névoa existirem [ASHRAE, 41.1-1974].

#### *E) Velocidade do ar na medida de bulbo úmido*

A medida da temperatura de bulbo úmido deve ser feita nas condições que provêm velocidade do ar em cima do bulbo úmido e, a partir de um tempo suficiente para que o equilíbrio de evaporação seja atingido. A velocidade do ar deve estar dentro da faixa para a qual o instrumento está calibrado. Para termômetros de mercúrio em vidro e outros dispositivos sensores de diâmetros semelhantes, é recomendado uma velocidade do ar de 3,6 a 10,2 m/s, sendo preferível que se aproxime de 5,0 m/s para assegurar resultados precisos. Instrumentos de diâmetro menor, como termistor ou psicrômetros de termopares, requerem proporcionalmente baixas velocidades do ar e requerem calibração satisfatória. Medidas de bulbo úmido requerem técnicas adicionais e precauções como indicado abaixo [ASHRAE, 41.1-1974]:

#### *F) Mecha no termômetro de bulbo úmido*

Um material satisfatório para a mecha é o algodão, que por sua vez, possui uma textura de malha bastante macia e boa. Antes do uso, a mecha deveria ser completamente limpa, lavando-a ou fervendo-a em água destilada. Um recobrimento bem justo da mecha no elemento sensor é necessário. Para prevenir a condução excessiva de calor do vidro de um termômetro, a mecha deveria cobrir aproximadamente 25,4mm do vidro como também o bulbo. Com o uso continuado, impurezas são depositadas nas mechas e essas interferem no bom funcionamento do equipamento. Então, é altamente importante que as mechas freqüentemente sejam limpas ou substituídas. A água que molha a mecha deve ser somente a destilada. Quando a mecha é abastecida continuamente por um reservatório de água, é importante que uma parte da mecha fique exposta ao fluxo de ar, possuindo uma distância de aproximadamente 25,4 mm do bulbo do termômetro à superfície da água do recipiente umedecedor. Esta distância é suficiente para que a água que deixa o umedecedor, atinja a temperatura de bulbo úmido antes de alcançar o bulbo, e esta não é grande o bastante para permitir que a mecha seque antes de molhar o bulbo adequadamente, dependendo evidentemente da temperatura e da umidade. Se esta técnica for usada, devem ser fei-

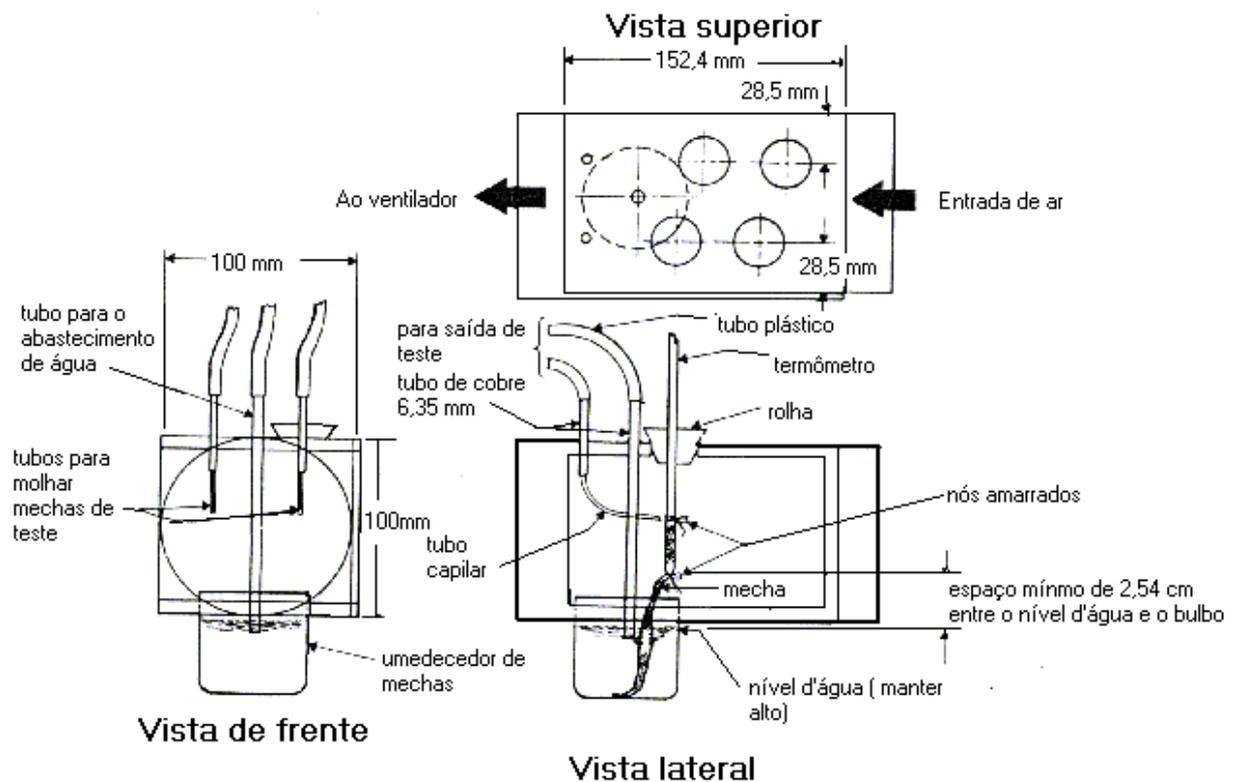
tas providências de forma que o umedecedor possa ser removido ou possa ser esvaziado e assim fazer um teste na medida com uma mecha mais curta e molhada [ASHRAE, 41.1-1974].

A figura que segue apresenta uma técnica de construção de psicrômetro usada para eliminar a remoção do sensor de temperatura do dispositivo a cada tempo para molhar, sendo que esta permite molhada à mão e /ou molhada contínua pelo uso de um reservatório de água [ASHRAE, 41.1-1974].

### *G) Psicrômetros de termopares*

A temperatura da água no reservatório é mais importante para termômetros de vidro com uma mecha maior que para termopares que emprega uma mecha de diâmetro menor. No caso do termômetro de vidro, mais água morna (comparada com a temperatura da água da mecha) é atraída ao bulbo do termômetro por unidade de tempo do que no caso do termopar com uma mecha de diâmetro menor [ASHRAE, 41.1-74].

Há evidência para mostrar que uma velocidade de ar de 1,78 m/s é suficiente para psicrômetro de termopares corretamente projetado. A figura que segue ilustra um psicrômetro de termopar que teve um bom desempenho [ASHRAE, 41.1-74].



**Figura 2.2** Psicrômetro de termopares [ASHRAE, 41.1-74]

*H) Bulbo úmido termodinâmico*

Na prática o termômetro de bulbo úmido não lê a verdadeira temperatura de bulbo úmido termodinâmico e em certas condições pode divergir consideravelmente disto. As taxas relativas de difusão de umidade da superfície úmida quando comparado à difusão de calor do ar no

entorno da superfície úmida, tende a fazer a temperatura de bulbo úmido psicrométrico ser menor do que a temperatura de bulbo úmido termodinâmico. O calor recebido por condução e por radiação de objetos próximos a temperatura de bulbo seco, tende a fazer o termômetro de bulbo úmido ler um valor maior. Felizmente, estes dois efeitos tendem a equilibrar um ao outro, com o resultado que a temperatura de bulbo úmido psicrométrico possa corresponder à temperatura de bulbo úmido termodinâmica a certas velocidades do ar, e geralmente divergirá menos dos valores teóricos do que se qualquer um destes efeitos estivesse presente sem o outro [ASHRAE, 41.1-74].

#### *I) Diâmetros dos elementos sensores*

Para outros diâmetros de bulbo de termômetro (ligeiramente abaixo de 6,3 mm), o balanço de velocidade variará em proporção direta ao diâmetro. Serão reduzidas velocidades do ar para instrumentos com termopares e termistores, que tipicamente têm tamanhos comparativamente pequenos dos elementos sensores de temperaturas. Em tais casos a velocidade correta deveria ser estabelecida calibrando o equipamento, de maneira que os dados obtidos por uso simultâneo de termômetros de mercúrio em vidro para bulbo úmido, fossem iguais [ASHRAE, 41.1-74].

#### *J) Proteções de radiação*

Termômetros de bulbo úmidos localizados em tubos de ar não deveriam ser protegidos se a parede estiver à temperatura de bulbo seco ou próxima. Se necessário, a parede fora do tubo deveria ser isolada para evitar uma grande diferença entre as temperaturas de bulbo seco, interiores e exteriores [ASHRAE, 41.1-74].

### **2.4.2 Método padrão que usa o psicrômetro aspirado**

#### *2.4.2.1 Princípios gerais*

Esse método da ASHRAE (1994) prevê a determinação da umidade relativa do ar dentro da faixa de temperatura de 5 a 80 °C com uma incerteza na umidade não excedendo a  $\pm 3\%$  quando a temperatura de bulbo úmido é medida até  $\pm 0,2$  °C, e não excedendo a  $\pm 2\%$  da umidade relativa quando a temperatura de bulbo úmido é medida a  $\pm 0,10$  °C. O método se restringe a temperaturas de bulbo úmido abaixo de 1 °C, temperaturas de bulbo seco não maiores do que 80 °C, umidade relativa não menor do que 10%, e pressão não diferindo da pressão atmosférica pa-

drão por mais que 30%. Este método não deveria ser usado onde há contaminação significativa de gases, vapores ou pó [ASHRAE, 1994].

A temperatura de bulbo úmido, a temperatura de bulbo seco, e um valor aproximado para a pressão (dentro de  $\pm 1\%$ ) forma a base para calcular a umidade relativa [ASHRAE, 1994].

#### 2.4.2.2 Aparato e materiais

##### A) Termômetros

a1. Quando é exigida uma incerteza na umidade relativa calculada não maior do que  $\pm 3\%$ , os termômetros serão tais que as leituras deles indicam a temperatura de bulbo úmido com uma incerteza não maior do que  $\pm 0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Quando é exigida uma incerteza na umidade relativa não maior do que  $\pm 2\%$ , os termômetros serão tais que as leituras deles indicam a temperatura de bulbo úmido com uma incerteza não maior do que  $\pm 0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ . A incerteza na leitura das temperaturas de bulbo seco não deverá ser maior do que  $\pm 0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$  [ASHRAE, 1994].

a2. Podem ser conectados termômetros elétricos de forma que as leituras dêem as temperaturas de bulbos seco e úmido diretamente [ASHRAE, 1994].

a3. Com ventilação transversal, os diâmetros dos sensores (excluindo a mecha) não devem ser menores do que 1mm e não maiores do que 7mm [ASHRAE, 1994].

a4. Com ventilação axial, os diâmetros dos sensores (excluindo a mecha) não devem ser menores do que 2 mm e não maiores do que 7mm e o comprimento deles, não deve ser menor do que 10mm e não maior do que 30mm [ASHRAE, 1994].

a5. São preferidos termômetros de mercúrio em vidro por motivo de variedade, disponibilidade e baixo custo. O uso deles não deve ser associado com desvantagens indevidamente onerosas. Tais termômetros devem ser graduados com divisões de  $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  ou menores e serem capazes de ler  $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ . (Especificação satisfatória para termômetros de mercúrio em vidro quando não é exigida uma incerteza na umidade relativa calculada menor do que  $\pm 3\%$ ) [ASHRAE, 1994].

##### B) Corrente de ar

b1. O fluxo de ar em cima de ambos os bulbos seco e úmido deverá ser um fluxo forçado de  $(4 \pm 1)$  m/s para ventilação transversal e  $(2 \pm 0.5)$  m/s para ventilação axial [ASHRAE, 1994].

b2. A amostra de ar não deve passar nenhuma obstrução antes de passar pelos bulbos seco e úmido [ASHRAE, 1994].

b3. Com fluxo axial, a direção de fluxo será livre no terminal de cada sensor para o terminal de apoio [ASHRAE, 1994].

C) Qualquer proteção de radiação será de metal, 0,4 até 0,8mm de espessura. Superfícies que exigem ter um polimento final, será usado o brilho natural retido no metal.

#### *2.4.2.3 Procedimento*

##### *A) Localização*

Escolha um local prático onde a amostra de ar é representativa e onde não é afetado através de fatores como maquinaria e pessoal [ASHRAE, 1994].

##### *B) Preparação*

Assegure que água penetrou o todo da mecha do bulbo úmido. Se a mecha for inicialmente seca, permita vários minutos para a saturação. Evite tocar a mecha com demora e assegure que o termômetro de bulbo seco está efetivamente seco [ASHRAE, 1994].

##### *C) Ventilação e observação*

(c1) Estabeleça a corrente de ar e mantenha até que uma temperatura de bulbo úmido constante seja atingida. (Com termômetros de mercúrio em vidro, aproximadamente dois minutos de ventilação é requerido) [ASHRAE, 1994].

(c2) Onde estão sendo feitas medidas que enquanto as condições de maior controle estão sendo mudadas, as leituras podem não ser significantes [ASHRAE, 1994].

#### *2.4.2.4 Resumo das observações*

A) *Por meio de psicrômetro de tabela ou carta.*

Escolha numa tabela de psicrômetro ou numa carta psicrométrica os valores de temperaturas de bulbos seco e úmido, no qual é consistente com as equações e com o valor apropriado do coeficiente de psicrômetro  $A$ . Com os valores das temperaturas de bulbos seco e úmido, obtenha a umidade relativa ou a umidade em tudo que desejar medir. (Valores de umidades relativas para temperaturas de bulbos seco e úmido são determinados com pressão atmosférica padrão e com três valores relevantes de  $A$ , isto é,  $6.5 \times 10^{-4}$ ,  $6.7 \times 10^{-4}$ , e  $6.9 \times 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ ) [ASHRAE, 1994].

B) *Através de cálculo*

A equação de psicrômetro que segue é equivalente para as condições prevalecentes, e pode ser usada como

$$pw = pws - Ap(t - t^*) \quad (2.1)$$

onde,

$pw$  = pressão parcial de vapor de água na mistura em [Pa];

$pws$  = pressão parcial de saturação à temperatura de bulbo úmido  $t^*$  em [Pa];

$t$  = temperatura do ar (bulbo seco) em [°C];

$t^*$  = temperatura termodinâmica (bulbo úmido) em [°C];

$p$  = pressão total atmosférica em [Pa];

$A$  = coeficiente de psicrômetro em [ $\text{K}^{-1}$  ou  $^{\circ}\text{C}^{-1}$ ].

O valor de  $A$  será escolhido na faixa de  $6.5 \times 10^{-4}$  a  $6.9 \times 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ . Se o valor de  $A$  foi determinado para o projeto particular de psicrômetro e ficar dentro desta faixa, então poderá ser usado. Se um valor que foi determinado estiver fora desta faixa, então o valor extremo mais perto da faixa será usado. Se nenhum valor de  $A$  foi determinado, então o valor  $6.7 \times 10^{-4} \text{ K}^{-1}$  será usado.

### 2.4.3 Equacionamento para cálculo da umidade relativa do ar

O equacionamento a seguir proposto pela ASHRAE Handbook of Fundamentals, (1997), determina a umidade relativa do ar a partir das temperaturas de bulbo seco ( $t_{bs}$ ) e bulbo úmido ( $t_{bu}$ ), a pressão  $p$  do ar ambiente.

**Seqüência para o cálculo da umidade relativa do ar**

Calcula-se  $pws(bs)$  e  $pws(bu)$  através da equação que segue com  $tbs$  e  $tbu$  respectivamente em Kelvin

$$\ln(pws) = \frac{C_8}{T} + C_9 + C_{10}T + C_{11}T^2 + C_{12}T^3 + C_{13} \ln T \quad (2.2)$$

onde,

$pws$  é a pressão de saturação do vapor d'água em [Pa];

$T$  é a temperatura absoluta em [K];

e  $C_8, C_9, C_{10}, C_{11}, C_{12}$  e  $C_{13}$  são constantes.

$$\begin{aligned} C_8 &= -5,8002206 * 10^{-3}; & C_9 &= 1,3914993; & C_{10} &= -4,8640239 * 10^{-2} \\ C_{11} &= 4,1764768 * 10^{-5}; & C_{12} &= -1,4452093 * 10^{-8}; & C_{13} &= 6,5459673 \end{aligned}$$

Calcula-se  $Ws(bs)$  e  $Ws(bu)$  respectivamente pelas equações seguintes, onde  $Ws$  é a razão ou conteúdo de umidade na saturação em [kgVA / kgAS];

$$Ws(bs) = 0,62198 \frac{pws(bs)}{p - pws(bs)} \quad (2.3)$$

$$Ws(bu) = 0,62198 \frac{pws(bu)}{p - pws(bu)} \quad (2.4)$$

Calcula-se  $W$  com a equação que segue

$$W = \frac{(2501 - 2,381tbu)Ws(bu) - (tbs - tbu)}{2501 + 1,805tbs - 4,186tbu} \quad (2.5)$$

onde,

$W$  é a razão ou conteúdo de umidade em [kgVA / kgAS];

VA- vapor d'água;

AS- ar seco;

$tbu$  é a temperatura de bulbo úmido em [°C];

$t_{bs}$  é a temperatura de bulbo seco em [°C].

Calcula-se  $\mu$  com a equação que segue, onde  $\mu$  é o grau de saturação

$$\mu = \frac{W}{W_s(t_{bs})} \quad (2.6)$$

Calcula-se  $UR$  com a equação que segue

$$UR = \frac{\mu}{1 - (1 - \mu)(p_{ws}(t_{bs})/p)} \times 100 \% \quad (2.7)$$

onde,

$UR$  é a umidade relativa do ar na seção de teste em [%]

$p$  é a pressão atmosférica absoluta em [Pa].

Calcula-se  $p_w$  com a equação que segue, onde  $p_w$  é a pressão parcial de vapor d'água em [Pa]

$$p_w = UR \cdot p_{ws}(t_{bs}) \quad (2.8)$$

## 2.4.4 Uma formulação termodinâmica da constante de psicrômetro

### 2.4.4.1 Introdução

O estudo de Simões Moreira, 1999, apresenta uma formulação exata da constante de psicrômetro baseado em argumentos termodinâmicos, em lugar da aproximação empírica habitual. Tal constante de psicrômetro termodinâmico joga uma área de concordância para valores esperados independentemente do tipo de construção e condições operacionais de um psicrômetro. A suposição que está se tratando de uma mistura de gás perfeito, carrega a solução exata a uma expressão mais simples para a constante de psicrômetro termodinâmico com uma divergência relativa dentro de 2 % para uma temperatura de bulbo úmido termodinâmica menor que 60 °C e pressão normal, que bastam para aplicações de campo

A temperatura de equilíbrio é nomeada a temperatura de bulbo úmido sugestivamente, considerando que o outro termômetro forneça a temperatura de bulbo seco ou simplesmente a temperatura do ar. As duas leituras de temperatura normalmente são combinadas por intermédio da equação

$$x_v = x_v^* - A (t - t^*) \quad (2.9)$$

onde  $A$  é a constante de psicrômetro em  $^{\circ}\text{C}^{-1}$ ,  $t$  é a temperatura do ar em  $^{\circ}\text{C}$ ,  $t^*$  é a temperatura de bulbo úmido em  $^{\circ}\text{C}$ ,  $x_v$  é a fração molar de vapor d'água a temperatura  $t$  e  $x_v^*$  é a fração molar de saturação de vapor d'água a temperatura  $t^*$ . A constante de psicrômetro e as temperaturas são os parâmetros fundamentais iniciais que necessitamos saber para se obter as propriedades termodinâmicas do ar úmido. A constante de psicrômetro normalmente é obtida em experiências cuidadosas de laboratório, tal como as que saíram de Greenspan e Wexler, (1968), Wylie (1979), Wylie e Lalas (1981a,b, 1992), Fan (1987) e Visscher (1995) [apud Simões, 1999]. Belli em 1830 [apud Simões, 1999] notou que a velocidade do ar influencia na temperatura de bulbo úmido e propôs que uma velocidade de ar suficientemente alta devesse ser provida. Um valor de  $A$  ao redor de  $6,70 \times 10^{-4} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$  geralmente é aceito, e foram construídas tabelas de psicrômetro com base nesse valor (Schurer, 1981) [apud Simões, 1999], mas outros valores também estão em uso atual, dependendo do princípio de construção do psicrômetro e condições operacionais. Fabricantes também têm as próprias constantes de psicrômetro.

A Organização Mundial de Meteorologia (WMO) psicrômetro de referência (Wylie e Lalas, 1981a, 1992) [apud Simões, 1999] está baseado em Wylie e Lalas para baixos valores de constantes. Também foi verificado que a constante de psicrômetro realmente não é uma magnitude constante e foram propostas equações com dependência em temperatura de bulbo úmido (Ferrel, 1885, Wylie e Lalas, 1981a, 1992, Sonntag et. al, 1989) [apud Simões, 1999]. Recentes experiências de Visscher (1995) [apud Simões, 1999] com vários tipos de psicrômetros e geometrias de bulbo a várias velocidades do ar, revelaram resultados importantes. Constantemente, ele achou valores distintamente maiores para a constante de psicrômetro do que as primeiras esperadas de Wylie e formulação de Lalas'. Além disso, Visscher achou uma dependência muito forte de  $A$  na construção e princípio operacional do psicrômetro. Assim, a constante de psicrômetro não é universal mas é bastante próximo associado com um tipo particular de instrumento. Além disso, Visscher obteve um valor 3 % maior por um WMO psicrômetro de referência e um valor 5 % menor pelo Assmann (tipo de psicrômetro aspirado) que também é aceito como um psicrômetro de referência pelo WMO.

Modelo de psicrômetro normalmente está baseado nas leis empíricas de simultânea transferência de massa e energia e sua analogia, dado que é assumido que o processo de transferência de massa acontece a uma baixa taxa. Threlkeld (1962) [apud Simões, 1999] esboçou um estudo paramétrico da influência do tamanho de bulbo-sensor, coeficiente de transferência de calor, efeitos de radiação e velocidade do ar na constante do psicrômetro. Depois, Wylie e Lalas

(1981a, b) [apud Simões, 1999] administrou uma formulação teórica e experimental mais detalhada em uma versão semelhante.

Estas investigações são uma tentativa para estabelecer um fundo teórico para a teoria da constante de psicrômetro baseada em argumentos termodinâmicos que em oposição à aproximação empírica tradicional. Uma formulação exata da constante de psicrômetro para um psicrômetro cuja temperatura de bulbo úmido iguala-se à temperatura de bulbo úmido termodinâmico, será apresentada na seqüência dessa revisão. Os diagramas de psicrometria da ASHRAE e tabelas [ASHRAE, 1997] estão baseados na temperatura de bulbo úmido termodinâmico. Apesar do fato que  $A$  deveria ser independente do tipo de psicrômetro, Szumowski (1982) [apud Simões, 1999] sugeriu que tabelas de psicrometria deveriam estar baseadas em um psicrômetro de saturação adiabática. Só é possível alcançar uma construção independente da constante de psicrômetro se a própria constante for uma propriedade termodinâmica do ar úmido.

Formulações analíticas prévias foram levadas por Threlkeld (1962) e por Greenspan e Wexler (1968) [apud Simões, 1999]. Porém, a formulação analítica recentemente elaborada é mais geral e é exata para a real mistura de ar seco e vapor d'água [Simões, 1999].

#### 2.4.4.2 *A Formulação Teórica: O processo de saturação adiabática - psicrômetro de saturação adiabática*

O processo inteiro é adiabático no senso que não há nenhuma troca de calor com o ambiente. A saturação do ar alcança uma temperatura denominada, temperatura de bulbo úmido termodinâmica  $t^*$ . A equação que segue representa as leis de conservação de massa e energia

$$h + (w^* - w)h_L^* = h^* \quad (2.10)$$

onde  $h$  é entalpia específica em kJ/kgAS,  $w$  é a razão de umidade em kgVA /kgAS da corrente de ar que entra no aparato e está a temperatura  $t$ ;  $w^*$  é a razão de umidade em kgVA/kgAS;  $h_L^*$  é a entalpia específica de água líquida (sólido); e  $h^*$  é a entalpia específica em kJ/kgAS do fluxo de ar que deixa o aparato a temperatura  $t^*$ . Isto é importante para notar que, para manter as condições de regime permanente, o psicrômetro de saturação adiabática deve possuir água líquida (sólido) a temperatura  $t^*$  para substituir a água perdida por evaporação. A utilidade da saturação adiabática em psicrômetro em análise é que há só uma temperatura  $t^*$ , e isso soluciona a equação (2.10) para um determinado estado termodinâmico do ar a pressão constante (Harrison, 1965) [apud Simões, 1999]. Então,  $t^*$  é uma propriedade termodinâmica do ar úmido e por con-

seguinte se está seguro que tem um valor único para um determinado estado de ar úmido.  $t^*$  é conhecida como a temperatura de bulbo úmido termodinâmico.

#### 2.4.4.3 A Formulação exata da constante de psicrômetro

Para estabelecer a constante termodinâmica de psicrômetro, escreve-se a equação (2.9) da seguinte forma:

$$x_v = x_v^* - A_\theta (t - t^*) \quad (2.11)$$

onde,  $x_v$  é a fração molar de vapor d'água, e  $A_\theta$  é a constante termodinâmica de psicrômetro. Nota que o termo termodinâmica e a subscrição  $\theta$  foram adicionadas para distinguir  $A_\theta$  da constante de psicrômetro ordinária.

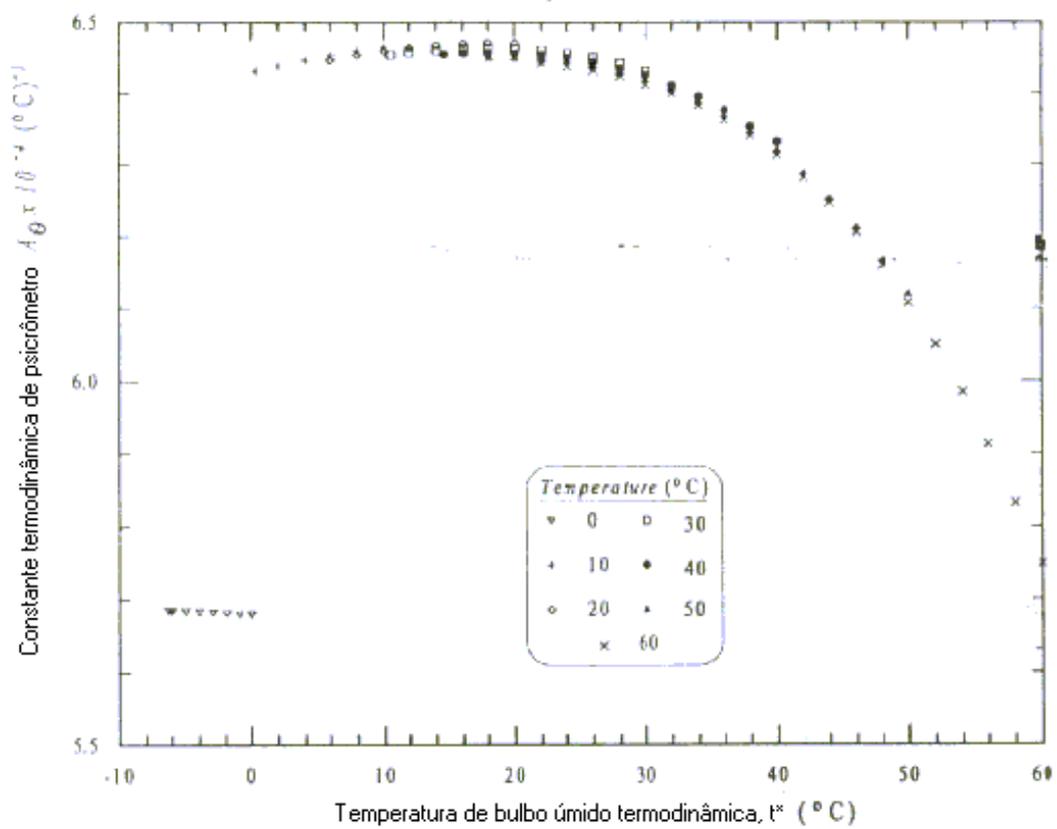
A diferença entre  $w^*$  e  $w$  na equação (2.10) é determinada por

$$w^* - w = 0,62198 \frac{x_v^* - x_v}{(1 - x_v)(1 - x_v^*)} \quad (2.12)$$

Finalmente, combinando a equação (2.10) do psicrômetro de saturação adiabática com a equação (2.12) pela diferença de relação de umidade, a equação (2.10) final de psicrômetro é dada por

$$A_\theta = \frac{(1 - x_v^*)(1 - x_v)h^* - h}{0,62198(t - t^*)h_L^*} \quad (2.13)$$

A figura que segue ilustra a constante termodinâmica de psicrômetro  $A_\theta$ , em função da temperatura de bulbo úmido termodinâmica  $t^*$  para vários valores constantes de temperatura (a pressão normal).



**Figura 2.3** Constante termodinâmica de psicrômetro  $A_{\theta}$  em função da temperatura de bulbo úmido termodinâmica  $t^*$  (à pressão constante) [Simões, 1999].

### **3 MONTAGEM DA BANCADA DE CALIBRAÇÃO**

#### **3.1 Introdução**

Este capítulo destina-se a apresentar uma visão geral de montagem da Bancada de Calibração baseada em normas de calibração, sendo que neste trabalho, usa-se o método de calibração por comparação que foi revisado no capítulo anterior.

Além disso, apresenta-se uma descrição do funcionamento físico do conjunto e de cada subsistema que compõe o projeto, uma descrição relativa aos instrumentos da medição e controle agregados a Bancada, aspectos relevantes de montagem, uma verificação do funcionamento com hipóteses testadas experimentalmente e analisadas através do método estatístico da análise de variância (ANOVA). Os procedimentos de montagem e a lista de materiais para a montagem da Bancada de Calibração encontram-se no anexo I.

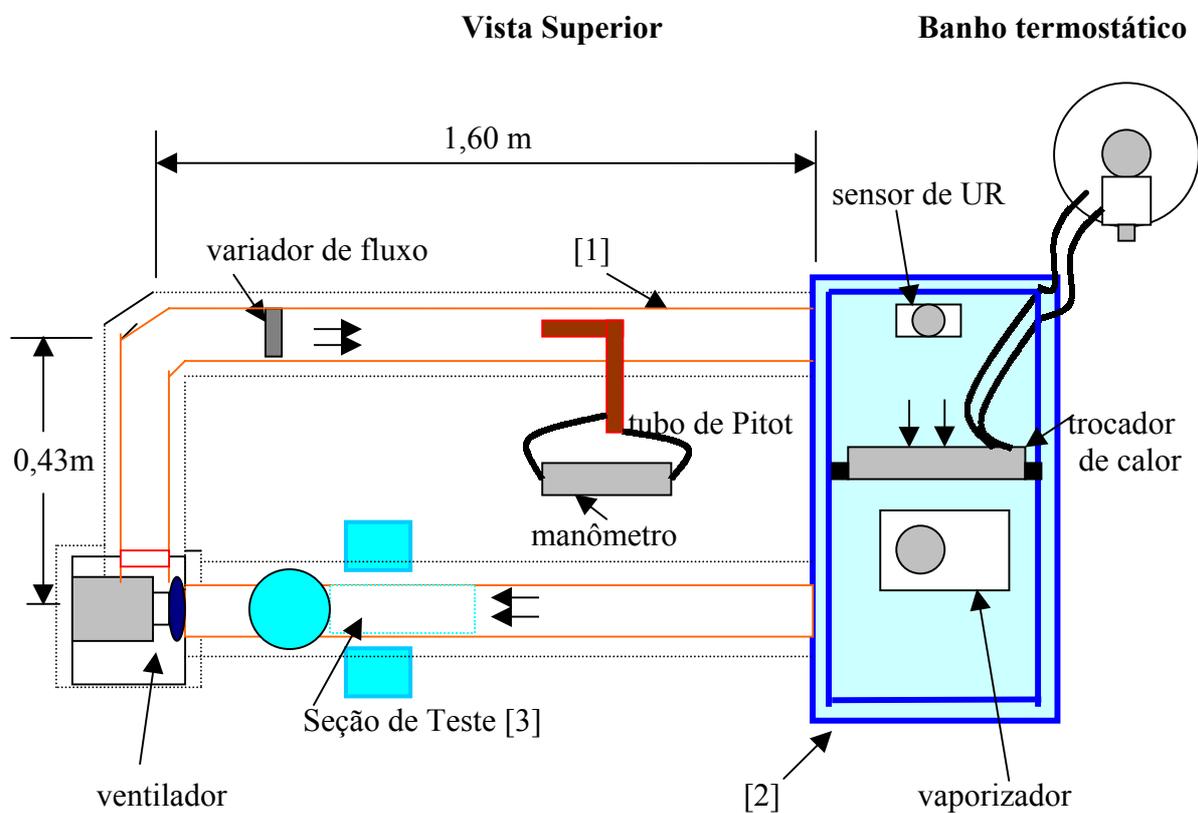
#### **3.2 Normas e métodos escolhidos para a montagem da Bancada**

A Bancada de Calibração foi montada sob algumas normas e métodos, tais como:

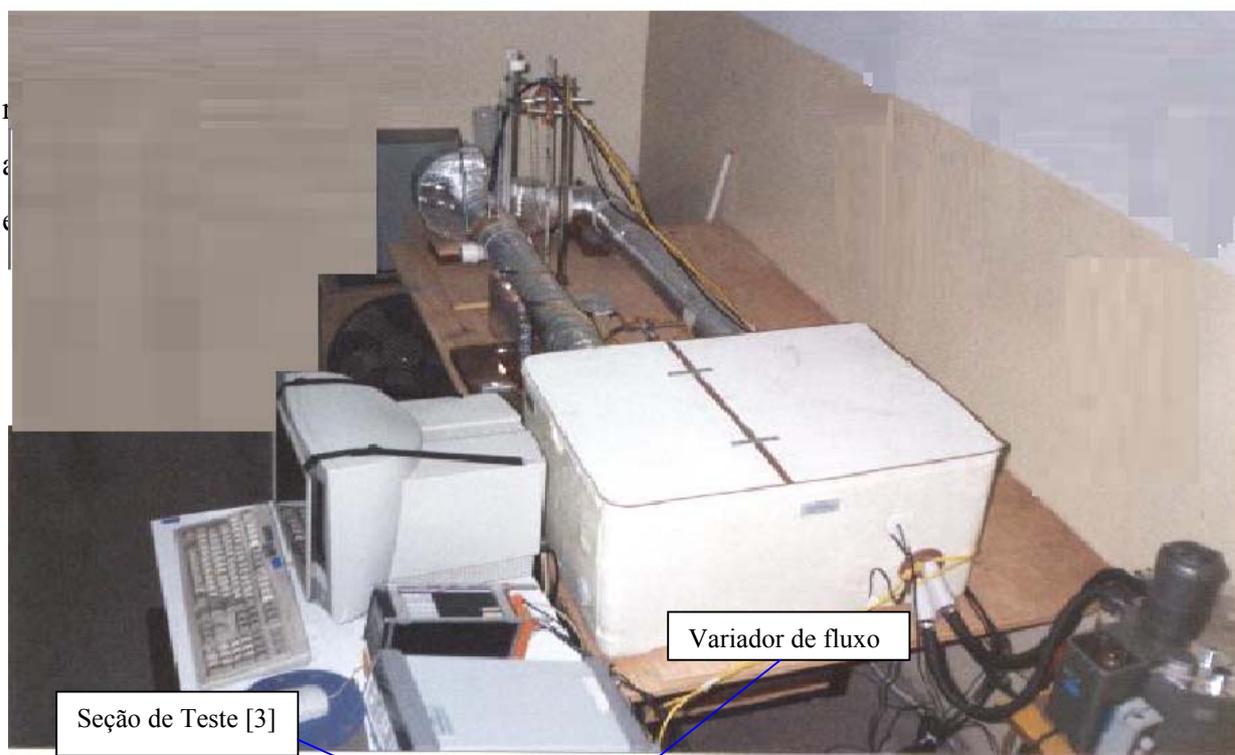
- a) ASHRAE 41.1-1974- para a montagem da Seção de Teste, tipos de sensores
- b) ASHRAE 41.6-1994 - método padrão que usa o psicrômetro aspirado, cálculo da constante experimental (A) do psicrômetro, faixa de velocidade do ar nos sensores
- c) ASHRAE (1997, cap. 6) - cálculo da umidade relativa do ar

#### **3.3 Descrição de montagem da Bancada**

A Bancada de Calibração ilustrada esquematicamente na figura 3.1 é composta basicamente por três subsistemas.



**Figura 3.1** Esquema da Bancada de Calibração



**Figura 3.2** Foto da Bancada de Calibração: vista geral

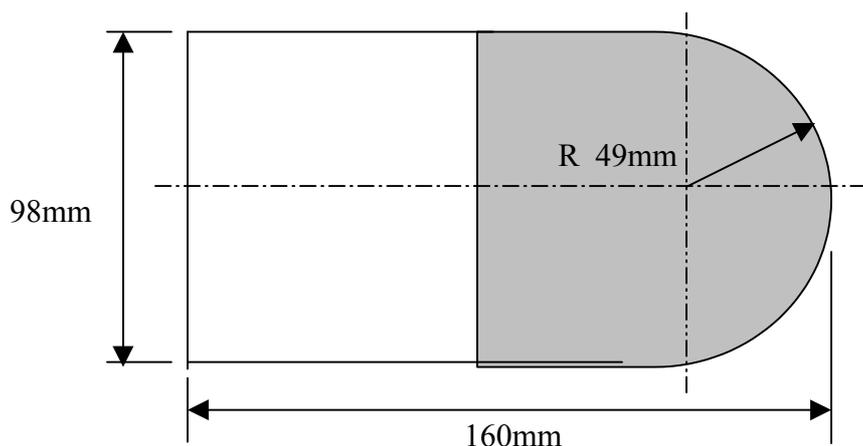
### 3.3.1 Circuito de ventilação fechado: subsistema [1]

O subsistema [1] é formado por uma tubulação, um ventilador e um variador de fluxo. A tubulação é de plástico convencional, em PVC empregado em instalações prediais, isolada termicamente por uma manta de poliestireno aluminizado, usada em coberturas de telhados residenciais. O ventilador centrífugo é o mesmo de pequenos aparelhos de condicionamento de ar do tipo “janela” e o variador de fluxo de ar foi construído a partir de uma simples placa que restringe o escoamento. O subsistema é instrumentado por um tubo de Pitot, como mostra a figura 3.1.

O variador de fluxo de ar na tubulação é uma placa metálica cujas dimensões estão representadas na figura 3.3, sendo que esta, é usada para fazer testes onde necessitam mudanças na velocidade do ar na tubulação.

O princípio de funcionamento está baseado na redução da área livre de circulação do ar na tubulação, gerando assim uma perda de carga, e em consequência disso, uma variação na vazão de ar.

O variador de fluxo de ar é construído com chapa de aço galvanizado, de 0,7mm de espessura, e suas dimensões são apresentadas na figura seguinte.



**Figura 3.3** Desenho do variador de fluxo de ar

### 3.3.2 Câmara de condicionamento do ar: subsistema [2]

Sua função é fornecer ar a temperatura e umidade controladas para que se possa efetuar a calibração dos sensores.

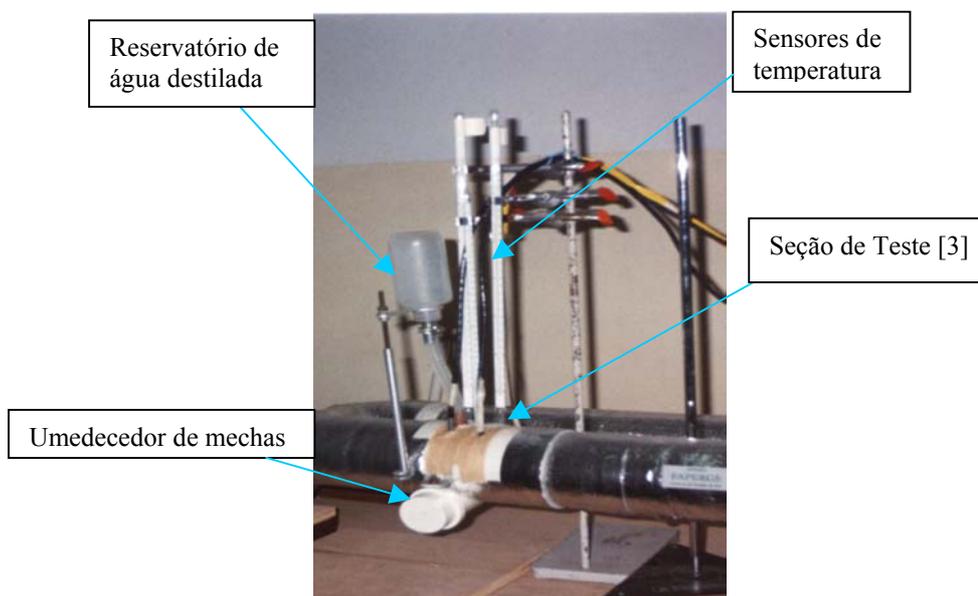
A câmara é formada por um circuito de troca de calor sensível e por um vaporizador. Nessa etapa do trabalho, foi possível apenas controlar a temperatura do ar com aquecimento a partir das condições ambientais. O dispositivo de troca de calor sensível é formado por um banho termostático automatizado [Gasparini,1999], que fornece água aquecida ou resfriada para um trocador de calor posicionado no interior da câmara. O trocador é um evaporador de condicionador de ar do tipo “janela”, de 7500 BTU/h. O vaporizador também é colocado no interior da câmara, e foi empregado um equipamento usado para umedecer ambientes.

A injeção de vapor na câmara é controlada por um CPP (Controlador Processos Programável) que será descrito na seqüência do trabalho. O volume de água contida no vaporizador deve ser de aproximadamente 1(um) de litro, apesar do recipiente ter capacidade para 5 (cinco) litros.

A estrutura da câmara é composta por uma caixa de poliestireno expandido para manter um bom isolamento térmico, com dimensões de 5cm de espessura, 36cm de altura, 57cm de largura e 75cm de comprimento, com revestimento interno de chapa de eucatex de 0,5cm de espessura mais chapa de aço galvanizada de 1mm de espessura que tem a finalidade de proteger a câmara quando esta for exposta a taxas de umidade elevada.

### 3.3.3 Seção de Teste: subsistema [3]

A Seção de Teste, figura 3.4 que segue, é uma parte da tubulação onde os elementos sensores são dispostos para os testes de calibração.

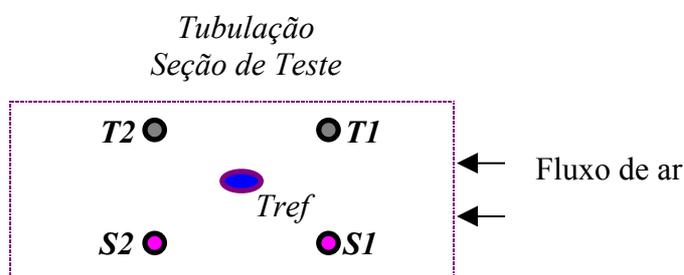


**Figura 3.4** Foto da Seção de Teste

A foto permite ver que o sistema é composto pela Seção de Teste propriamente dita, onde instalam-se os elementos sensores de temperatura de referência e de teste, por um umedecedor de mechas, um reservatório de água destilada e demais acessórios.

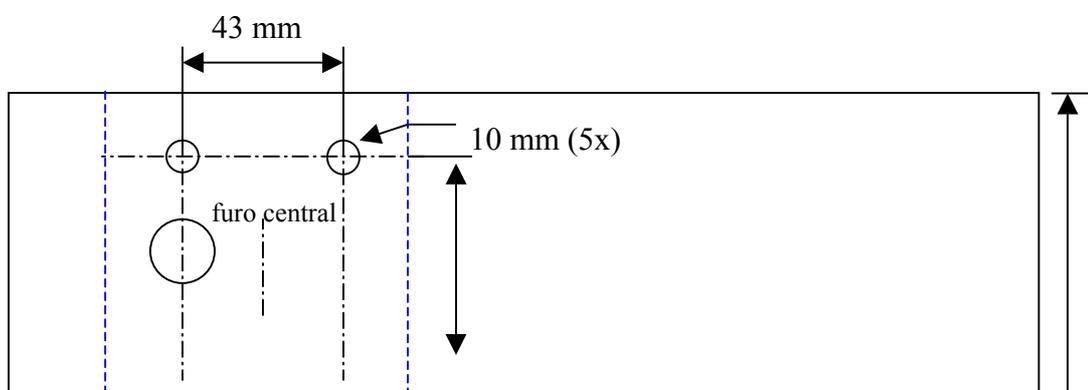
A figura 3.5 ilustra como os termômetros e os sensores podem ser dispostos na Seção de Teste da tubulação para que esses sejam calibrados ou simplesmente para fins de verificação do funcionamento da Bancada. Os termômetros Tref, T1 e T2 são de mercúrio em vidro. S1 e S2 são os sensores PT100 ou AD592 ou termopares, neste trabalho.

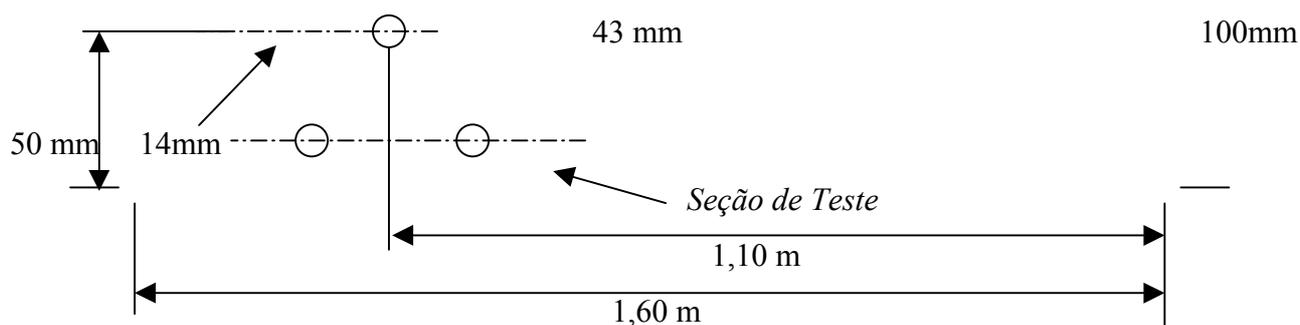
A disposição dos sensores de referência e teste, segue as recomendações da norma ASHRAE 41.1-1974. Na figura 3.5, a distância entre os sensores é de 43mm, com furos de 10mm de diâmetro equidistantes aos demais furos e o furo central é reservado para o termômetro usado como referência.



**Figura 3.5** Disposição dos termômetros e dos sensores na Seção de Teste da tubulação

Os quatro furos de 10mm são destinados aos termômetros ou sensores. O furo de 14 mm é destinado ao cano de cobre responsável pelo abastecimento de água do reservatório ao umedecedor de mechas. Todos os furos representados na figura 3.6 pertencem à Seção de Teste que por sua vez é uma pequena parte da tubulação, cujo material é o PVC.





**Figura 3.6** Vista superior da Seção de Teste da tubulação

Os sensores de temperatura devem penetrar a tubulação de tal modo que atinjam o centro da circunferência da mesma.

Os sensores de temperatura de bulbo úmido devem possuir uma mecha de tecido de algodão ou outro material higroscópico na parte sensível. No caso do termômetro de mercúrio em vidro, a mecha deve cobrir seu bulbo, e este deve estar a uma distância de no mínimo 25,4mm do nível da água do umedecedor de mechas, considerando que o diâmetro da tubulação do escoamento de ar é de 100mm [ASHRAE 41.1-1974].

O tecido para a construção da mecha deve ser limpo e isento de incrustações. A mecha pode ser estendida até 5cm para o lado da haste do termômetro, com a finalidade de reduzir as perdas de calor por condução. A mecha além de revestir o bulbo do termômetro ou o próprio sensor, deve ser longa o suficiente para imergir no recipiente com água destilada, a fim de manter sempre úmido o elemento sensor. O tubo que liga o reservatório de água destilada ao umedecedor das mechas é o responsável pelo transporte da água do reservatório ao umedecedor, passando transversalmente pelo fluxo de ar da Seção de Teste. Este tubo deve ser de um material com alta condutividade térmica, no caso o cobre, e tem como função ajudar a aproximar a temperatura da água do umedecedor das mechas da temperatura tbs.

Considerando as velocidades mínima e máxima do ar na tubulação de 1,25 m/s e 5,00m/s respectivamente, o número de Reynolds do escoamento situa-se entre 8600 e 34400, tomando-se  $\rho=1,225 \text{ kg/m}^3$ , a viscosidade dinâmica do ar  $\mu=1,781 \times 10^{-5} \text{ kg/ms}$  à temperatura de 15 °C.

Esses resultados, superiores ao número de Reynolds crítico ( $Re=2300$ ), indicando que o escoamento é turbulento. Dessa forma, a posição dos sensores deve respeitar uma distância mínima de 10 diâmetros em relação a qualquer acessório, como curvas ou restrições [Hansen, 1974]. A tubulação empregada possui diâmetro de 0,10m, o que leva a um afastamento mínimo de 1m. A Seção de Teste deve ser isolada termicamente para que todos os sensores localizados nela para o teste, possuam uma condição praticamente uniforme.

### 3.4 Instrumentação da Bancada de Calibração

A instrumentação para a Bancada de Calibração divide-se em duas partes: instrumentação dos elementos de teste e instrumentação dos equipamentos.

A instrumentação dos elementos de teste apenas monitora o seu estado e a dos equipamentos é responsável pela automação da circulação de ar na tubulação, do banho termostático e do vaporizador.

#### 3.4.1 Elementos de teste

Um sensor é um dispositivo que responde a uma mudança na variável controlada. A resposta é uma mudança em alguma propriedade física ou elétrica do principal elemento sensível, sendo útil para tradução ou amplificação de um sinal elétrico ou mecânico. Todos os sensores respondem a mudanças em uma variável de controle para criar um sinal.

Os sensores apresentados a seguir são aqueles que foram empregados nesse trabalho, junto com as suas especificações técnicas obtidas pelas referências citadas ou através do fabricante.

##### *Termômetro de mercúrio em vidro*

A seguir são apresentadas algumas características do termômetro de mercúrio em vidro usado como referência, retiradas do certificado de calibração de abril de 1997 da empresa (IMP. E EXP. DE MEDIDORES POLIMATE LTDA).

- operação na faixa de temperatura de -10 a 52 °C
- resolução de 0.1°C
- incerteza de medição de  $\pm 0.02^\circ\text{C}$

##### *Termopar*

A seguir são apresentadas algumas características do termopar tipo K [DIN, 1992]

- tipo K Chromel – Alumel
- código de cores: (+) amarelo e (-) vermelho
- operação na faixa de temperatura de -270 a 1372 °C

- tolerância de 1,1°C acima de 0 °C

### ***Sensor PT100***

São sensores de platina, que fazem parte dos chamados detetores de resistência elétrica (ou RTD em inglês). Para uma faixa limite de  $\Delta t$ , são elementos que apresentam variação direta da resistência elétrica com a temperatura.

A seguir são apresentadas as características elétricas do sensor PT100 [DIN, 1992]

- operação na faixa de temperatura de -200 a 850 °C
- resistência  $R_0=100\Omega$  à 0 °C
- tolerância de 0,3 °C à 0 °C
- tolerância de 0,55 °C à 50 °C
- sensibilidade de 0,4  $\Omega/^\circ\text{C}$
- coeficiente de temperatura linear da resistência  $\alpha = 0,00385 \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$

### ***Sensor AD592***

O AD592 é um circuito integrado monolítico com dois terminais. Trata-se de um transdutor de temperatura que produz uma saída de corrente proporcional à temperatura a que ele se encontra, propriedade esta característica de transistores à base de silício. O sensor utiliza os dois terminais, um como alimentação e o outro como saída de corrente.

A seguir são apresentadas algumas características elétricas do sensor AD592 [Analog Devices, 1992]

- encapsulamento plástico TO-92
- operação na faixa de temperatura de -25 a 105 °C
- linearidade de 0,15 °C máx na faixa de 0 a 70 °C
- precisão de 0,5 °C máx à 25 °C
- sinal característico de saída à 25 °C de 298,2  $\mu\text{A}$  e 1  $\mu\text{A/K}$
- fonte de alimentação de 4 a 30Vcc

### ***Sensor de umidade relativa***

Dotado de um elemento capacitivo em forma de uma membrana de filme não condutiva. A membrana é uma capa, com ambas as faces de eletrodos de metal e na moldura interior

uma cápsula plástica perfurada. A capacitância segue um comportamento não linear em função da umidade relativa. O sinal é linearizado e a temperatura é compensada em um circuito amplificador, resultando num sinal de saída de 0 a 100 % de umidade relativa

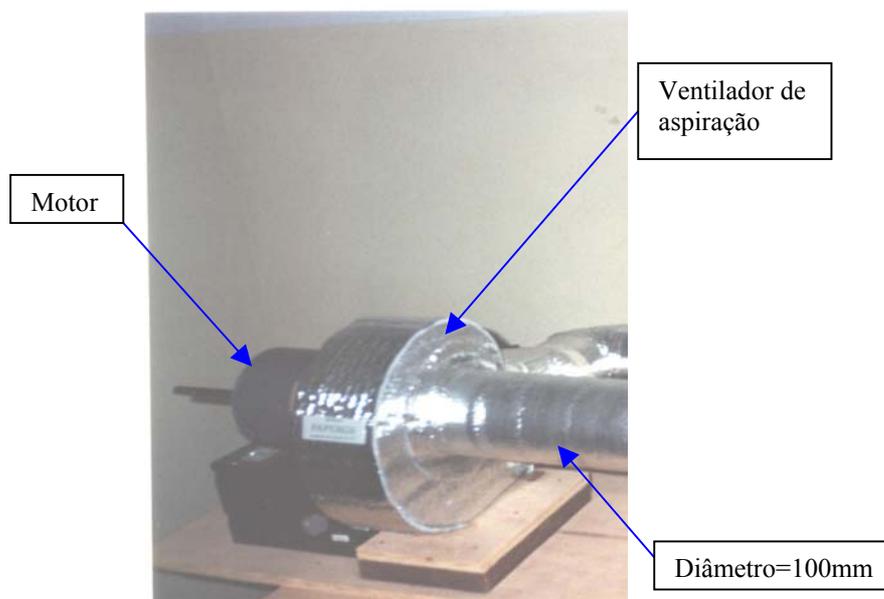
A seguir são apresentadas as características do sensor de umidade relativa [NOVUS Fabricante]

- saída de corrente: 4 a 20mA
- tensão de alimentação: 12 a 30Vcc
- precisão:  $\pm 2$  % de 0 a 100 % UR @ 25 °C
- temperatura de trabalho: - 40 a 85 °C
- histerese:  $\pm 0,8$  % max.
- linearidade:  $\pm 0,5$  % UR típico
- repetibilidade:  $\pm 0,5$  % UR

### 3.4.2 Equipamentos

#### *Ventilador de ar*

A figura 3.7 apresenta o conjunto motor-ventilador. Este motor possui quatro rotações, sendo que, a escolhida para trabalhar na Bancada foi a mais baixa da faixa, 450 r.p.m (7,5Hz) para que a vibração causada pelo motor fosse reduzida. A potência deste motor é de 150W, alimentado com tensão alternada de 220V e que tem acoplado ao seu eixo de rotação um rotor centrífugo.



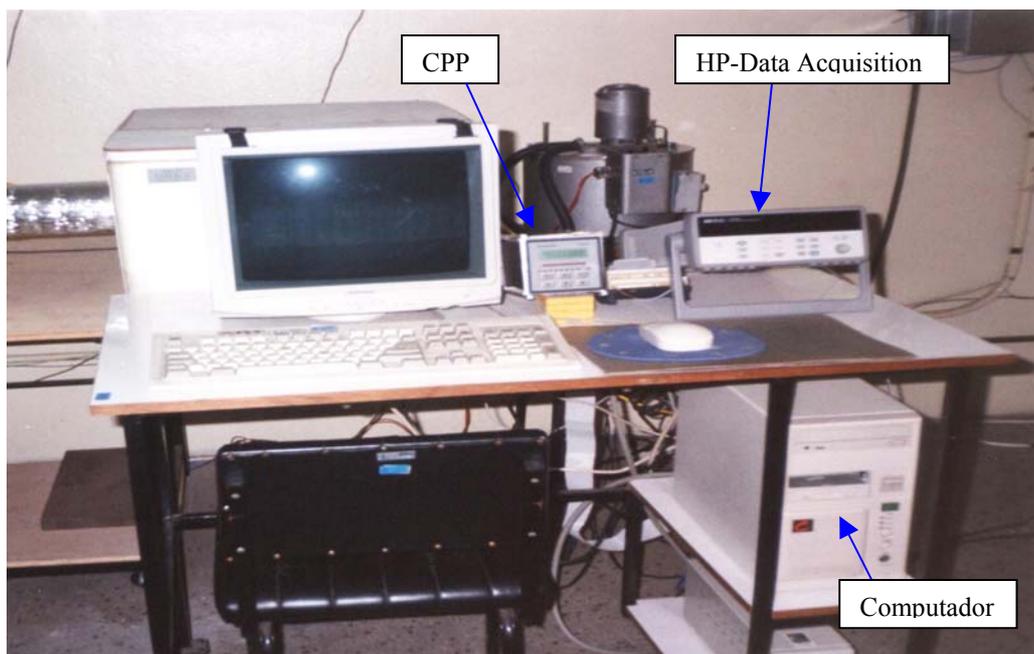
**Figura 3.7** Foto do motor-ventilador

### ***Banho Termostático***

A temperatura do banho termostático é controlada pelo CPP (Controlador de Processos Programável) e somente possui controle em temperaturas acima da temperatura ambiente. Para fazer testes com temperaturas abaixo da ambiente é necessário colocar gelo “picado” no banho, o que torna os testes muito trabalhosos e de baixo controle.

Para fazer o chaveamento da resistência que produz o aquecimento da água do banho, foi usado um relé de estado sólido ligado ao CPP. A resistência para o aquecimento do banho dissipa uma potência de 1500W quando é alimentada com uma tensão de 127 Vac. O relé usado para chavear a carga é de 25 A.

Para fazer aquisição das medidas e controle de variáveis de processo na Bancada de Calibração, além do computador PC compatível, dois equipamentos têm fundamental importância neste trabalho. O controlador de processos programável, CPP- Novus 8000 e o HP-Data Acquisition 34970 A. A figura 3.8 ilustra esses equipamentos.



**Figura 3.8** Foto dos equipamentos da medição e controle

### ***Controlador CPP- N8000***

O CPP-N8000 é um controlador de processos programável, com ação de controle PID (proporcional, integral e derivativa) para até oito malhas independentes. Suas malhas podem ser configuradas para aceitar até vinte e dois tipos diferentes de sinais de entrada (termopares, PT100, sinais de corrente e tensão) e os tipos de saída (atuação) mais utilizados, tudo programável pelo teclado ou através de interface de comunicação serial.

#### ***Ação Proporcional:***

Coloca na saída de controle um valor proporcional ao erro para a variável manipulada, ou seja, quanto maior a diferença entre a variável programada e a variável de processo, maior será o valor atribuído pelo controlador à variável manipulada.

#### ***Ação Integral:***

Tipo de ação utilizado para eliminar possíveis *erros* deixados pelo controle com ação proporcional. Neste tipo de ação, o valor da variável manipulada é proporcional à integral do *erro*, ou seja, quanto mais tempo persistir o *erro*, maior será o valor da variável manipulada, no sentido de eliminar o *erro*.

### *Ação Derivativa:*

Fornece rápidas variações na variável manipulada, como resultado de mudanças rápidas no valor da variável programada. Se o valor da variável de processo cai rapidamente, a componente derivativa aumenta rapidamente o valor da variável manipulada, de modo a corrigir a perturbação.

### ***HP- 34970A - Aquisição de Dados***

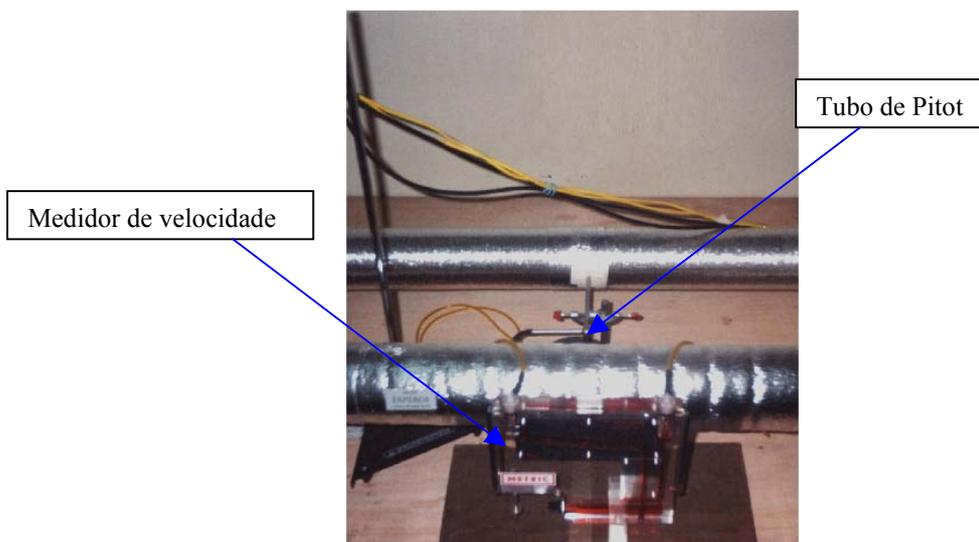
O HP 34970A é um equipamento para aquisição de dados que permite leituras no próprio display e/ou via computador, com vinte canais multiplexados que usa, como elemento chaveador de sinais, o relé.

#### *Características de Aquisição/Chaveamento*

- Precisão de multímetro de  $6^{1/2}$ -dígito, estabilidade, e rejeição de barulho
- Até 60 canais por instrumento (120 canais- terminais único)
- Taxas de até 600 leituras por segundo em um único canal e taxas de aquisição até 250 canais por segundo
- Interface GPIB (IEEE-488) e interface RS-232

### ***Manômetro com tubo de Pitot***

O tubo de Pitot indica a velocidade em um ponto do escoamento, pois mede a pressão de estagnação  $[\rho(\frac{V_m^2}{2})]$ , onde  $\rho$  é a massa específica do ar e  $v_m$  é a velocidade média do escoamento de ar. A figura 3.9 ilustra o manômetro com tubo de Pitot.



**Figura 3.9** Foto do manômetro com tubo de Pitot

### 3.5 Aspectos relevantes de montagem da Bancada

Alguns aspectos práticos, relativos à montagem e a operação da Bancada, são apresentados a seguir. Eles são fruto da experiência adquirida na operação dessa Bancada especificamente.

Para sua boa operação, observa-se que:

- A tampa da câmara de condicionamento de ar pode apresentar infiltrações, sendo assim, esta deve ser bem vedada.
- A tubulação deve ser isolada termicamente para que as trocas de calor sejam reduzidas e com isso, obter uma boa estabilidade no sistema.
- O motor do ventilador está acoplado diretamente por um eixo e deve operar em baixa rotação, para que o efeito vibratório causado por este, seja reduzido.
- O eixo do motor deve ser protegido por um anteparo aluminizado a fim de reduzir o efeito da radiação térmica emitida pelo eixo.
- Os elementos sensores de temperatura destinados a medir temperatura de bulbo úmido devem ser localizados após os elementos sensores destinados a medir temperatura de bulbo seco, ou seja, o ar deve passar primeiro pelos sensores tbs e depois pelos sensores tbu.
- A temperatura da água que abastece as mechas deve estar próxima a tbs do ar na tubulação.
- Os elementos sensores devem ser localizados no lado da tubulação onde o ar é aspirado.
- O tubo de Pitot, utilizado para medir a velocidade do ar fica melhor localizado na tubulação no lado oposto à Seção de Teste.
- A fenda de entrada do variador de fluxo do ar deve ser vedada por uma fita para evitar infiltrações no circuito.
- O banho termostático deve estar o mais próximo possível do trocador de calor, do subsistema [2], para reduzir as perdas térmicas para o ambiente externo.
- Para fazer testes com temperaturas abaixo da ambiente é necessário colocar gelo no banho e aguardar um certo tempo (30 min. aproximadamente) para que o sistema atinja um equilíbrio térmico.

- Para fazer testes acima da temperatura ambiente é necessário aquecer a água do banho com o recurso do controlador de processos programável, tendo o mesmo cuidado descrito no passo anterior, aguardar um certo tempo para que o sistema atinja um equilíbrio térmico antes de iniciar os testes.
- Para que se possam fazer testes com injeção de vapor, o vaporizador deve estar com uma pequena quantidade de água, aproximadamente um litro, evitando surtos de vapor a cada injeção.
- O sensor de umidade relativa do subsistema [2] fica melhor localizado na saída da tubulação onde o ar é espirado pelo ventilador, ou seja, na câmara de condicionamento de ar.

### **3.6 Conclusão sobre a montagem da Bancada**

A construção da mecha no sensor e no termômetro de mercúrio em vidro para medir tbu, depende do tipo e tamanho de cada sensor e de cada bulbo, sendo necessário adaptar conforme o caso.

O uso de água destilada e os cuidados na manutenção e limpeza da mecha de material higroscópico devem ser considerados.

A tampa da câmara de condicionamento de ar pode apresentar algumas ondulações prejudicando o seu fechamento. O uso de presilhas distribuídas na tampa pode evitar infiltrações.

O aquecimento demasiado do motor do ventilador interfere na temperatura do ar no interior da tubulação, sendo necessário um outro ventilador próximo do mesmo, para resfriá-lo durante os testes.

Para trabalhar com temperaturas abaixo da ambiente, é necessário aperfeiçoar o tipo de banho, ou seja, usar um banho com sistema de refrigeração. O sistema não prevê operações com umidade relativa controlada abaixo da ambiente, salvo em operações com umidade relativa acoplada a temperaturas acima da ambiente.

## **4 VERIFICAÇÃO DA BANCADA DE CALIBRAÇÃO**

### **4.1 Introdução**

O presente capítulo é dedicado a uma seqüência de testes de verificação do comportamento da Bancada de Calibração.

Essa verificação é importante e necessária para que se possa conhecer as limitações do equipamento e a estabilidade em respeito à temperatura e a umidade relativa. Também busca verificar o comportamento de alguns sensores, quando estes são submetidos a um ambiente com temperatura, umidade relativa e velocidade do ar variáveis.

### **4.2 Estabilidade**

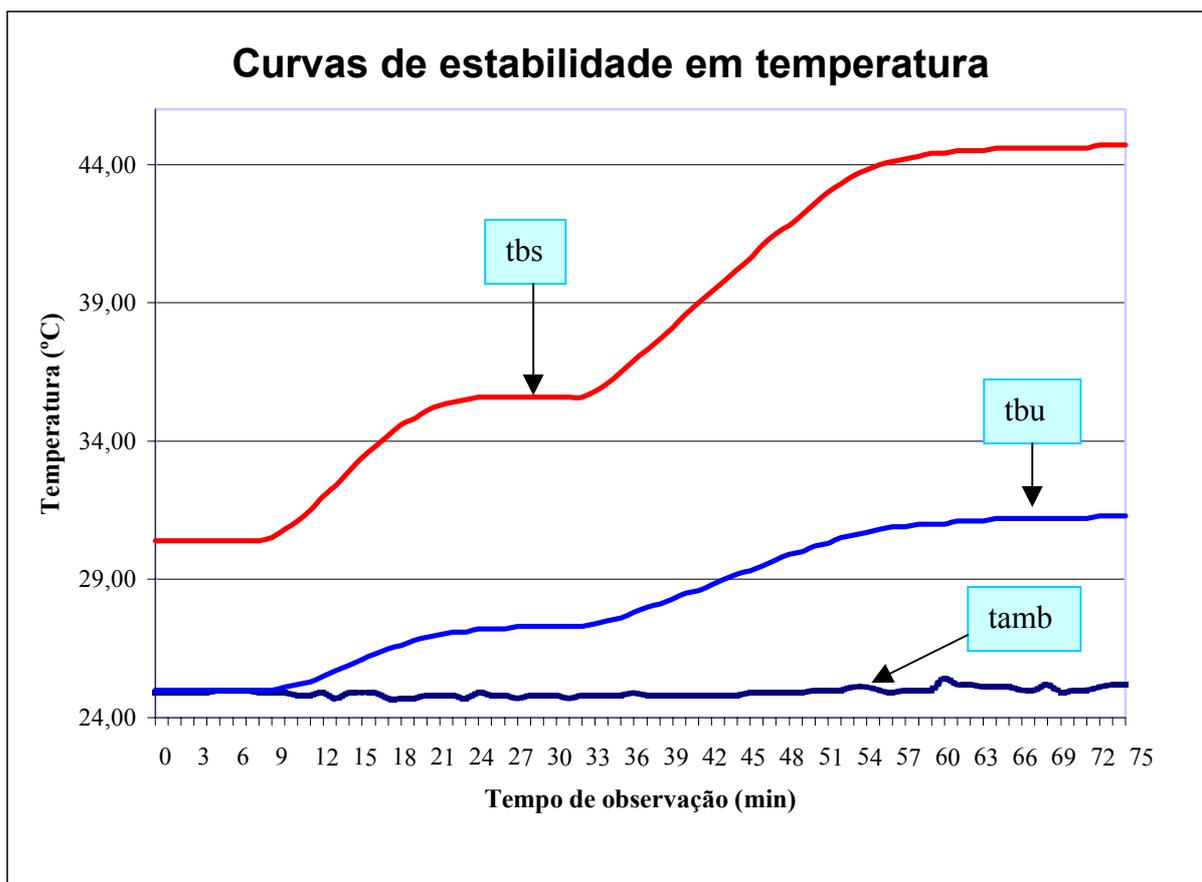
#### **4.2.1 Objetivo**

Verificar se há estabilidade das temperaturas tbs e tbu e da umidade relativa (UR) do ar na Seção de Teste da Bancada de Calibração, em função do tempo.

#### **4.2.2 Estabilidade em temperatura**

Para fazer o teste de estabilidade em temperatura em função do tempo, é necessário configurar o CPP para elevar a temperatura da água do banho em patamares desejados. Para iniciar o teste, a temperatura tbs do ar no interior da tubulação foi fixada um pouco acima da temperatura do ar ambiente.

Para medir as temperaturas de bulbo seco (tbs) e bulbo úmido (tbu), dois sensores do tipo PT100 (1 e 2 para tbs e tbu respectivamente) são instalados na Seção de Teste, e para medir a temperatura ambiente (tamb), é empregado um termopar próximo à seção de teste. O sensor usado para medir tbu deve estar com uma mecha de tecido de algodão conforme especificado no capítulo 3 [subsistema 3]. A aquisição de dados é automática através do HP- Data Acquisition 34970 A conectado a um computador. Os resultados estão na figura 4.1, e os dados estão no anexo IV.



**Figura 4.1** Curvas de estabilidade em temperaturas tbs e tbu na Seção de Teste e temperatura do ar ambiente (tamb), em função do tempo  $t_x$

A estabilidade foi perseguida tendo como variável de controle a tbs. Observa-se três patamares de estabilização em temperatura tbs, 30,50 °C, 35,60 °C e 44,40 °C. Os dados indicam que a Bancada é capaz de garantir condições estáveis para os testes. A temperatura tbu também foi estável, sendo nesses casos acoplada a tbs.

No instante inicial  $t_i=0$ , a temperatura inicial do teste é de 30,50 °C. Durante o intervalo de tempo observado de 0 a 9 min, há estabilidade. No instante 9 min, a água do banho foi submetida a um aquecimento levando a um novo patamar de temperatura de 35,60 °C num intervalo de tempo de 16min. Nesse patamar de 35,60 °C, o sistema fica em regime permanente por 9 min e nesse instante começa um novo aquecimento, levando a temperatura para outro patamar de 44,40 °C num intervalo de tempo de 26min. Nesse patamar de 44,40 °C o regime é praticamente estável, pois existe uma pequena variação da temperatura de 0,30 °C nos 15min de observação.

Seguindo os mesmos intervalos de tempo da curva de estabilidade em tbs, a temperatura tbu teve um comportamento semelhante com três patamares de estabilização a cerca de, 25,00 °C, 27,20 °C e 31,10 °C.

No instante  $t_i=0$ , a temperatura inicial do teste é de 25,00 °C, durante o intervalo de tempo observado de 0 a 9 min, há estabilidade. No instante 9 min, a água do banho foi submetida a um aquecimento levando a um novo patamar de temperatura de 27,20 °C num intervalo de tempo de 16min. Nesse patamar de 27,20 °C, o sistema fica em regime praticamente estável por 9 min, pois existe uma pequena variação da temperatura de 0,20 °C. A partir desse instante começa um novo aquecimento, levando a temperatura para outro patamar de 31,10 °C num intervalo de tempo de 30min. Nesse patamar de 31,10 °C o regime é praticamente estável, pois existe uma pequena variação da temperatura em 0,20 °C nos 13min de observação.

A temperatura ambiente tamb praticamente não variou ao longo do teste, mantendo-se próxima aos 25 °C com uma variação de 0,40 °C durante 75min de observação.

#### **4.2.3 Estabilidade em umidade relativa do ar**

Para fazer o teste de estabilidade em umidade relativa em função do tempo, é necessário configurar o CPP para elevar a temperatura da água do banho a um patamar desejado. Em segundo, o mesmo CPP passa a controlar a injeção de vapor, permitido obter-se valores de umidade relativa diferente para a mesma tbs. A umidade relativa na Seção de Teste é calculada a partir dos valores das temperaturas de bulbo seco e bulbo úmido, corrigido pelas equações de calibração com as suas respectivas incertezas de medição dos sensores usados e, a pressão atmosférica ambiente ao nível do mar.

A umidade relativa do ar ambiente externo pode ser medida com o mesmo sensor localizado na câmara de condicionamento de ar antes de se iniciar o teste, desde que a câmara esteja sem a tampa superior por alguns minutos. Para medir as temperaturas de bulbo seco e bulbo úmido, dois sensores PT100 são instalados na Seção de Teste. A aquisição de dados é automática através do HP- Data Acquisition 34970 A conectado ao computador. O sensor usado para medir a temperatura de bulbo úmido deve estar com uma mecha de tecido de algodão conforme especificado no capítulo 3 [subsistema 3]

O cálculo da umidade relativa foi efetuado do equacionamento apresentado pela ASHRAE (1997), e a incerteza de medição, foi calculada pelo método de Kleine e McClintock [Holman, 1996]. O cálculo completo foi implementado numa rotina computacional em linguagem Matlab que consta no anexo II.

### ***Cálculo da Umidade Relativa do ar***

Para o cálculo da umidade relativa na Seção de Teste, usa-se a seqüência proposta pela ASHRAE, 1997 apresentada no capítulo 2.

➡ Calcula-se  $UR$  com o auxílio da equação (2.7) reescrevendo-a para o caso

$$URc = \frac{\mu}{1 - (1 - \mu)(pws(bs)/p)} \times 100 \% \quad (4.1)$$

onde  $URc$  é a umidade relativa do ar na Seção de Teste em [%];

➡ Calcula-se  $pw$  com o auxílio da equação (2.8) reescrevendo-a para o caso

$$pw = URc \cdot pws(bs) \quad (4.2)$$

onde  $pw$  é a pressão parcial de vapor d'água em [Pa].

A norma ASHRAE (ASHRAE 41.6,1994) propõe a equação seguinte para o cálculo da umidade relativa do ar, também conhecida como equação do psicrômetro de bulbo seco e bulbo úmido.

$$pw = pws(bu) - A(tbs - tbu)p \quad (4.3)$$

Para determinar o coeficiente  $A$  do psicrômetro, o mesmo deve ser isolado na equação (4.3), uma vez que,  $pws(bu)$  e  $pw$ , foram determinados através das equações (2.2) e (4.3) respectivamente.

$$A = \frac{pws(bu) - pw}{p(tbs - tbu)} \quad (4.4)$$

onde  $A$  é o coeficiente do psicrômetro em [ $K^{-1}$  ou  $^{\circ}C^{-1}$ ]

➡ Dividindo a equação (4.3) por  $pws(bs)$ , temos

$$URc = \frac{pws(bu)}{pws(bs)} - \frac{Ap}{pws(bs)}(tbs - tbu) \quad (4.5)$$

Designando o termo  $\frac{Ap}{pws(bs)} = Ax$  e o termo  $\frac{pws(bu)}{pws(bs)} = pwsx$ , a nova equação fica sendo:

$$URc = pwsx - Ax(tbs - tbu) \quad (4.6)$$

A equação de Kleine e McClintock [Holman, 1996], revisado em anexo IX, quando aplicado ao cálculo da incerteza de medição da umidade relativa do ar, resulta em

$$wrc = \left( (-Ax * wr_{bs})^2 + (Ax * wr_{bu})^2 \right)^{1/2} \times 100\% \quad (4.7)$$

onde,

$wrc$  é a incerteza de medição propagada na Seção de Teste em  $\pm$  [%]

$wr_{bs}$  é a incerteza de medição da temperatura de bulbo seco em  $\pm$  [°C]

$wr_{bu}$  é a incerteza de medição da temperatura de bulbo úmido em  $\pm$  [°C]

As incertezas de medição  $wr_{bs}$  e  $wr_{bu}$  dos sensores PT100 foram obtidas através da calibração dos sensores. Para cada valor de  $tbs$  e  $tbu$  existe uma incerteza de medição acoplada, e estas foram usadas para calcular a incerteza propagada a cada valor de umidade relativa na Seção de Teste, URc.

A tabela 4.1 apresenta os valores da umidade relativa do ar calculada (URc), a incerteza de medição propagada (wrc) e o coeficiente de psicrômetro  $A$ , calculados na Seção de Teste em função do tempo tx.

**Tabela 4.1** Resultados da umidade relativa do ar calculada (URc), incerteza de medição propagada (wrc) e a constante de psicrômetro (A), calculadas na Seção de Teste em função do tempo tx

tx(min)	URc (%)	wrc $\pm$ (%)	A (°C <sup>-1</sup> )	tx (min)	URc (%)	wrc $\pm$ (%)	A (°C <sup>-1</sup> )
0	57,19	0,32	$6,399 \times 10^{-4}$	17	64,72	0,29	$6,391 \times 10^{-4}$

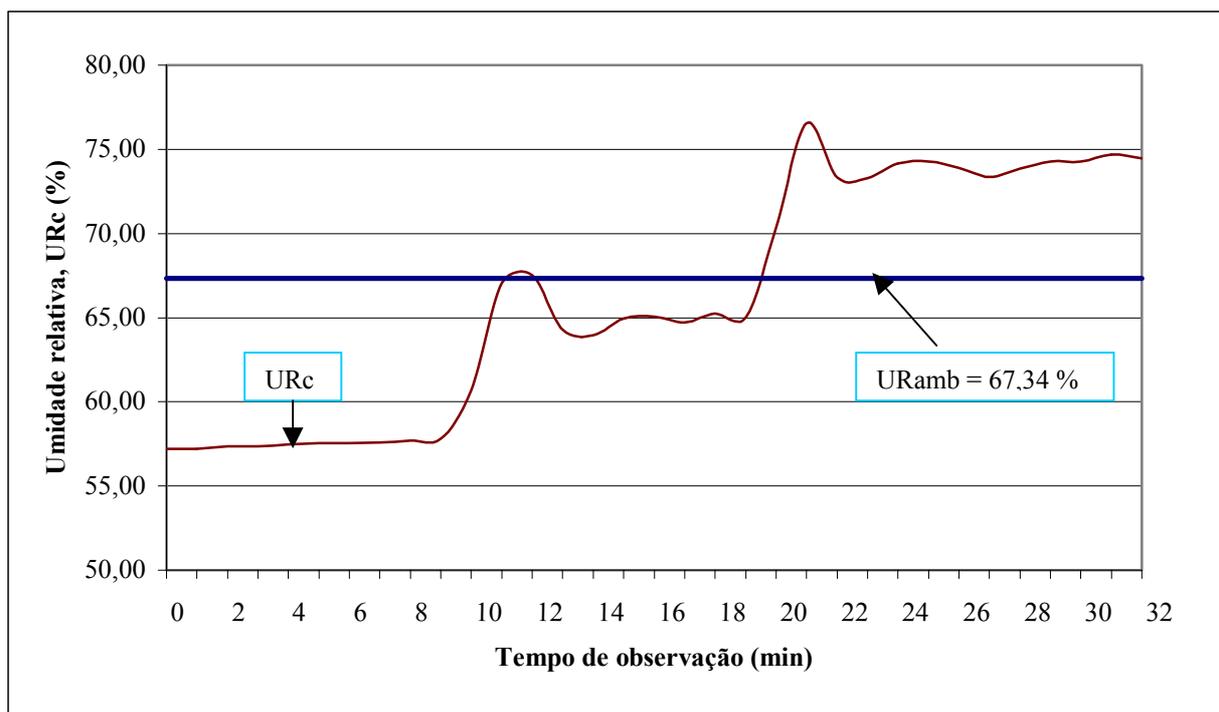
1	57,22	0,32	$6,399 \times 10^{-4}$	18	65,24	0,30	$6,390 \times 10^{-4}$
2	57,35	0,32	$6,399 \times 10^{-4}$	19	65,01	0,30	$6,390 \times 10^{-4}$
3	57,35	0,32	$6,399 \times 10^{-4}$	20	70,36	0,27	$6,384 \times 10^{-4}$
4	57,45	0,32	$6,399 \times 10^{-4}$	21	76,56	0,27	$6,377 \times 10^{-4}$
5	57,56	0,32	$6,399 \times 10^{-4}$	22	73,31	0,27	$6,381 \times 10^{-4}$
6	57,55	0,32	$6,399 \times 10^{-4}$	23	73,27	0,27	$6,381 \times 10^{-4}$
7	57,59	0,32	$6,399 \times 10^{-4}$	24	74,15	0,27	$6,380 \times 10^{-4}$
8	57,71	0,32	$6,399 \times 10^{-4}$	25	74,29	0,27	$6,379 \times 10^{-4}$
9	57,80	0,31	$6,399 \times 10^{-4}$	26	73,89	0,27	$6,379 \times 10^{-4}$
10	60,65	0,29	$6,396 \times 10^{-4}$	27	73,37	0,27	$6,378 \times 10^{-4}$
11	67,06	0,29	$6,390 \times 10^{-4}$	28	73,84	0,27	$6,379 \times 10^{-4}$
12	67,53	0,30	$6,389 \times 10^{-4}$	29	74,29	0,27	$6,378 \times 10^{-4}$
13	64,30	0,30	$6,392 \times 10^{-4}$	30	74,29	0,21	$6,378 \times 10^{-4}$
14	63,94	0,30	$6,392 \times 10^{-4}$	31	74,69	0,26	$6,377 \times 10^{-4}$
15	64,93	0,29	$6,391 \times 10^{-4}$	32	74,46	0,26	$6,377 \times 10^{-4}$
16	65,06	0,30	$6,391 \times 10^{-4}$				

Nota:

- (1) Umidade relativa  $URc$ , determinada com as equações da ASHRAE,1997
- (2) Coeficiente do psicrômetro  $A$ , determinado pela equação 4.4
- (3) Propagação da incerteza  $wrc$ , determinada pela equação 4.7
- (4) Incerteza de medição  $wr$  do sensor da tbs na faixa do teste:  $\pm (0,12 \text{ a } 0,13) \text{ } ^\circ\text{C}$
- (5) Incerteza de medição  $wr$  do sensor da tbu na faixa do teste:  $\pm (0,10 \text{ a } 0,11) \text{ } ^\circ\text{C}$
- (5) O Valor do coeficiente de psicrômetro calculado ficou próximo dos valores relevantes sugeridos pela ASHRAE ,1994, que são:  $(6.5 \times 10^{-4}, 6.7 \times 10^{-4}, \text{ e } 6.9 \times 10^{-4}) \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ .

Observando-se a tabela 4.1, verifica-se que a incerteza de medição da umidade relativa do ar  $wrc$ , ficou abaixo da prevista pela ASHRAE (1994). Essa prevê para determinar a umidade relativa dentro da faixa de temperatura de 5 a 80 °C, uma incerteza na umidade não maior do que  $\pm 3\%$  quando a temperatura tbu fosse medida com uma incerteza de até  $\pm 0,2 \text{ } ^\circ\text{C}$ , e não maior do que  $\pm 2\%$  da umidade relativa quando a temperatura tbu fosse medida com uma incerteza de até  $\pm 0,10 \text{ } ^\circ\text{C}$ . Para esses valores de incerteza, a ASHRAE recomenda que a umidade relativa do ar não pode ser menor do que 10%, e a pressão do ar não deve diferir da pressão atmosférica padrão por mais que 30%.

A figura 4.2 apresenta as curvas de estabilidade em umidade relativa calculada ( $URc$ ) na Seção de Teste e a umidade relativa ambiente ( $URamb$ ), em função do tempo  $t_x$ .



**Figura 4.2** Curvas de estabilidade em umidade relativa (URc) na Seção de Teste e umidade relativa do ar ambiente (URamb), em função do tempo tx

A estabilidade foi perseguida tendo como variável de controle a  $t_{bu}$ . Observa-se três patamares de estabilização a cerca de, 57,20 %, 65,06 % e 74,46 %. Os dados indicam que a Bancada é capaz de garantir condições estáveis para os testes.

A umidade relativa inicial para o teste foi de 57,20 %, e esse valor se manteve constante durante 9 min. No intervalo de tempo de 9 a 12min, houve injeção de vapor na câmara levando a umidade relativa a um pico de 67,34 %, mas após um minuto, caiu para 64,29 % e permaneceu no entorno de 65,06 % durante 6 min. No intervalo de tempo de 19 a 21 min, houve uma nova injeção de vapor na câmara, ocasionando um novo pico de umidade de 76,56 %, mas após um minuto, caiu para 74,46 % e permaneceu no entorno desse durante 10 min. A umidade relativa do ar ambiente manteve-se constante no valor de 67,34 % durante o tempo de teste de 33min.

Com base nos experimentos efetuados, garante-se a estabilidade em temperatura e umidade relativa do ar nas seguintes faixas :

- umidade relativa do ar de 57,20 até 74,46 % com  $w_{rc}$  na faixa de  $\pm (0,26 \text{ a } 0,32) \%$
- temperatura  $t_{bs}$  de 30,50 até 44,40 °C com  $w_r$  na faixa de  $\pm (0,11 \text{ a } 0,19) \text{ }^\circ\text{C}$

A incerteza de medição propagada da umidade relativa  $w_{rc}$  ficou na faixa de  $\pm (0,26 \text{ a } 0,32) \%$  e verifica-se que essa ficou abaixo da prevista de  $\pm (2 \text{ a } 3) \%$  [ASHRAE, 1994].

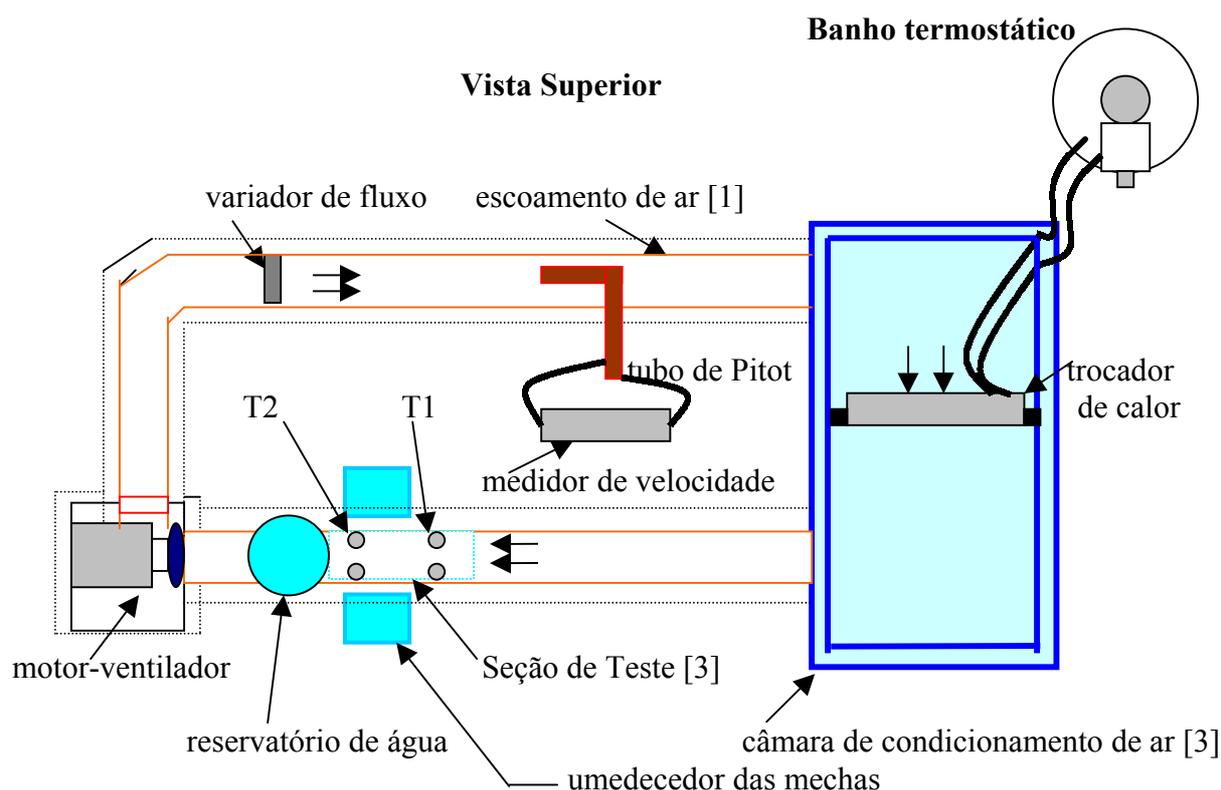
### 4.3 Variação da velocidade do ar no escoamento

#### 4.3.1 Objetivo

Todas as normas de medição de umidade relativa prescrevem valores para o escoamento de ar que passa pelos elementos sensores. Nessa seção, busca-se verificar se os valores da temperatura de bulbo úmido (tbu), medidos na Seção Teste, diferem se essa velocidade do ar for variada.

#### 4.3.2 Metodologia experimental

Para esta verificação os elementos sensores foram dispostos na Seção de Teste como indica a figura que segue. A faixa de velocidade no escoamento para o teste é de 1,25 a 5,00 m/s. A faixa de velocidade recomendada é de 3,0 a 5,0 m/s [ASHRAE, 1994].



**Figura 4.3** Montagem para a verificação da temperatura tbu x velocidade do ar

Para a realização do experimento foram fixados gradativamente quatro valores de temperatura de bulbo seco do ar. Os dados foram tomados em quatro patamares (chamados de teste) de temperaturas de bulbo seco diferentes, onde a velocidade do ar sofreu variações na faixa de 1,25 a 5,00 m/s. Em cada patamar foi adquirida em seqüências de quatro aquisições da tbu, sem-

pre para a mesma tbs. Para medir as temperaturas tbs e tbu, dois termômetros de mercúrio foram usados, T1 e T2 respectivamente.

Após o teste experimental, os dados foram analisados e a metodologia usada é denominada análise de variância (ANOVA) que será apresentada na seqüência. A lista de materiais e os procedimentos de como realizar este teste, está no anexo III.

### 4.3.3 Metodologia de análise de variância (ANOVA)

#### O experimento envolve:

- Uma variável de resposta: temperatura de bulbo úmido (tbu)
- Um fator controlável a (4) quatro níveis: velocidade média na tubulação, vm (1,25, 2,50, 3,75 e 5,00) m/s

#### Hipóteses:

Ho: não há diferenças significativas entre os valores de temperaturas (tbu);

H1: há diferenças significativas entre os valores de temperaturas (tbu);

**Teste F:** O teste compara o valor do fator F calculado com o valor de Fc tabelado (valor crítico). Se o valor calculado for maior que o valor tabelado (crítico), descarta-se a hipótese Ho e considera-se a hipótese H1, ou seja, existem diferenças significativas entre os grupos de temperaturas tbu.

A equação calcula o valor de F: 
$$F = \frac{MQG}{MQR} \quad (4.8)$$

onde,

F é o fator calculado;

MQG é a média quadrática global;

MQR é a média quadrática dos resíduos.

#### Disposição dos dados:

A tabela 4.2 apresenta os dados coletados referentes ao teste da temperatura de bulbo úmido (tbu) em função da velocidade do ar na Seção de Teste da tubulação.

**Tabela 4.2** Dados referentes ao teste: temperatura tbu em função da velocidade do ar na Seção de Teste da tubulação

Teste 1	Temperatura de bulbo úmido, tbu (°C)				tbs (°C)	vm (m/s)
seqüência 1	29,3	29,3	29,3	29,3	37,3	1,25
seqüência 2	29,2	29,2	29,2	29,2	37,4	2,50
seqüência 3	29,1	29,1	29,1	29,1	37,4	3,75
seqüência 4	29,0	29,0	29,0	29,0	37,4	5,00
Teste 2						
seqüência 1	33,4	33,4	33,3	33,3	48,1	1,25
seqüência 2	33,5	33,5	33,5	33,5	48,8	2,50
seqüência 3	33,6	33,6	33,6	33,6	49,1	3,75
seqüência 4	33,4	33,4	33,4	33,4	49,1	5,00

Nota: Temperatura ambiente no dia do teste: 29 a 33 °C

Os valores medidos levaram ao cálculo de F e Fc, detalhado no anexo III. Os resultados obtidos são apresentados na tabela 4.3.

**Tabela 4.3** Resultados do teste F: (tbu x velocidade)

Testes	F (calculado)	Fc (crítico)
1	0	3,4902996
2	0,064516129	3,4902996

Como F (calculado) < Fc (crítico) para todos os valores de velocidade do ar investigados, considera-se a hipótese Ho como verdadeira, ou seja, não há diferenças significativas entre as temperaturas tbu nos testes dentro da faixa de velocidade testada.

#### 4.4 Variação da umidade relativa do ar obtida com diferentes sensores

#### 4.4.1 Introdução

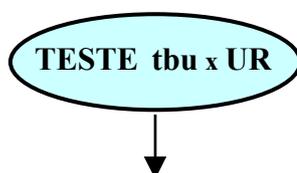
Existem vários tipos de sensores de temperatura, entre eles, destacamos alguns para fazerem parte deste trabalho, como o PT100, o termopar K, o AD592 e o próprio termômetro de mercúrio. Mas será que esses sensores de temperatura, quando usados para medir temperatura de bulbo úmido (tbu), possuem o mesmo comportamento quando expostos a mesma condição ambiental, ou seja, para determinados valores de temperatura e umidade relativa, as respostas são iguais ou existe diferença significativa entre as mesmas ?

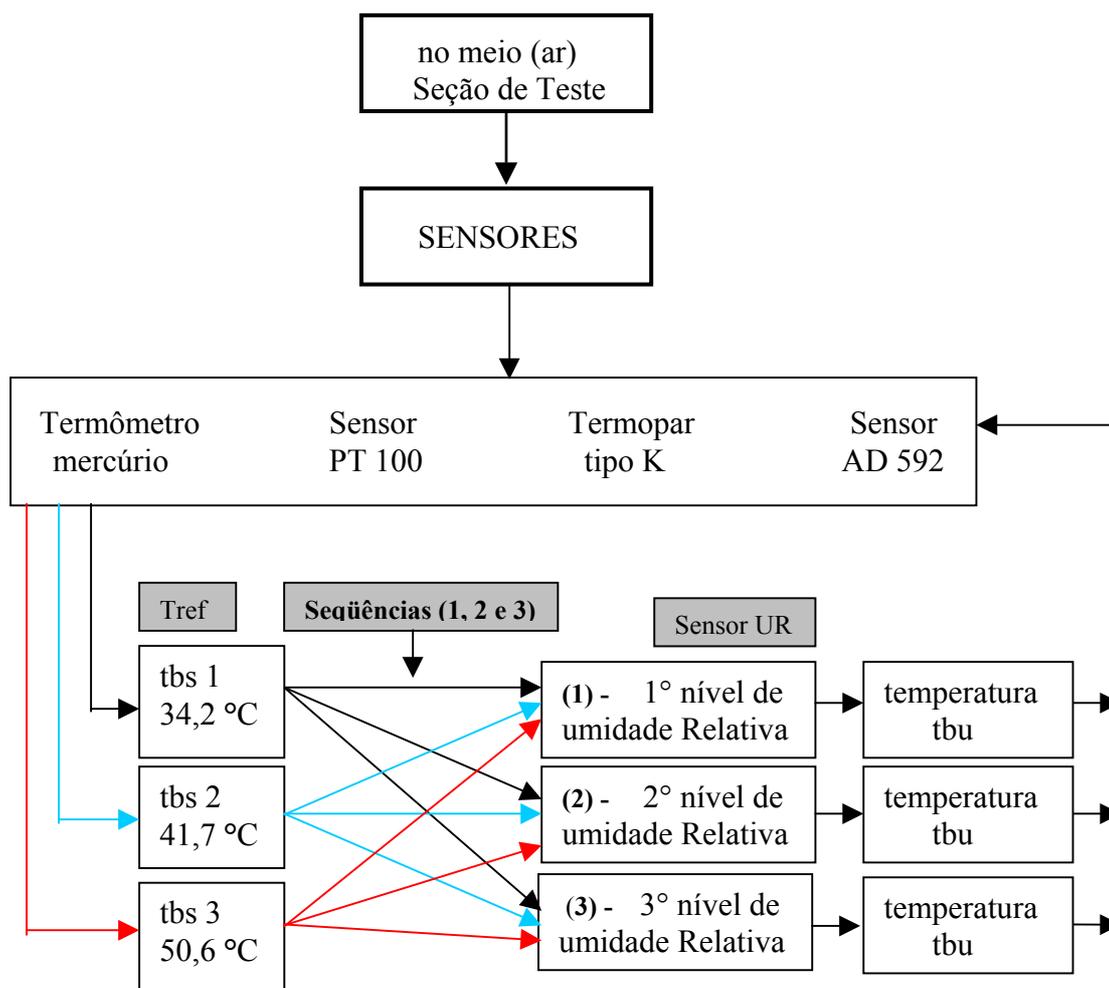
#### 4.4.2 Objetivo

Verificar se o valor da umidade relativa obtida com o auxílio da temperatura de bulbo úmido, medida pelos sensores Hg, PT100, AD592 e termopar tipo K diferem entre si, quando esses são submetidos na Seção de Teste a três níveis diferentes de umidade relativa e temperatura de bulbo seco.

#### 4.4.3 Metodologia experimental

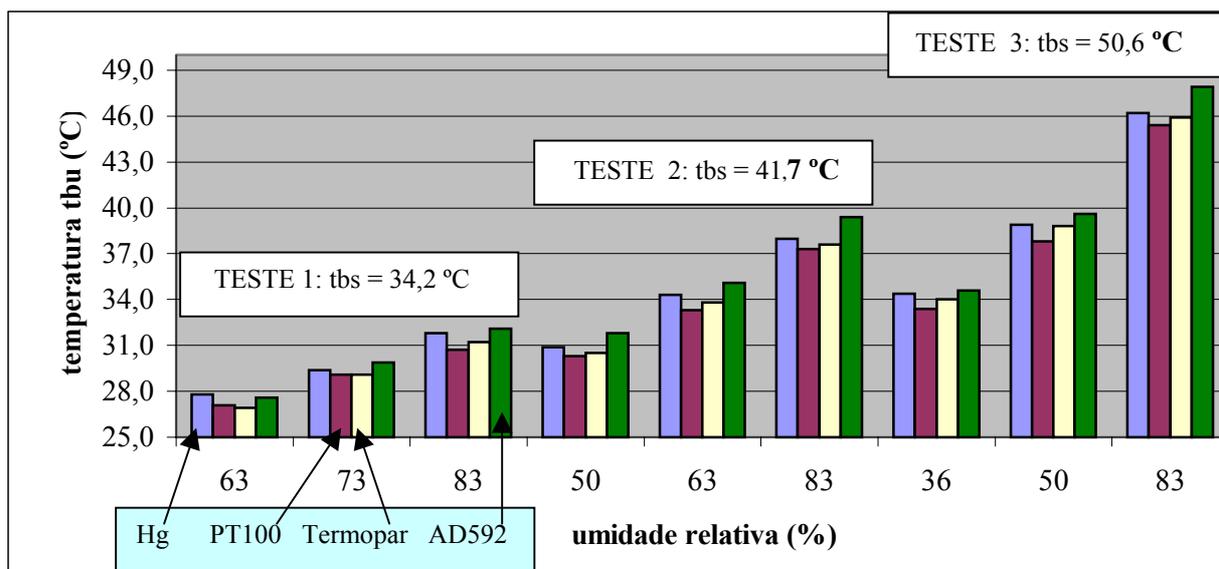
A figura 4.4 indica as etapas do teste (tbu x UR). O teste prevê para cada nível de temperatura tbs, medido pelo termômetro de referência conforme ilustra a figura que segue, três níveis de umidade relativa medido pelo sensor de umidade usado como referência. A velocidade média do ar no escoamento para esse teste é de 5,00 m/s, e a temperatura do ar ambiente externo no momento do teste é de 26 °C. Os valores de umidade relativa do ar para o teste são ajustados e controlados com auxílio do controlador CPP. Os valores medidos das temperaturas tbu que fazem parte desse teste, devem ser corrigidos por curvas de ajuste de calibração específica de cada sensor. Os dados serão submetidos a uma análise de variância (ANOVA) para verificar se existe diferença significativa entre os valores de umidade relativa obtida com os valores de tbu, medida pelos sensores. Veja anexo VII.





**Figura 4.4** Estrutura do teste da temperatura tbu x umidade relativa do ar (UR)

A figura 4.5 faz uma comparação entre as leituras de temperaturas de bulbo úmido obtidas pelos sensores dos testes. Esta comparação visa detectar se os valores de tbu lidos pelos sensores passivos do tipo PT100 e AD 592, diferem dos valores lidos pelos sensores ativos do tipo termômetro de mercúrio e termopar.



**Figura 4.5** Comparação dos sensores com mecha medindo tbu

Percebe-se na figura 4.5 que o sensor AD592 lê valores de temperaturas maiores do que os demais sensores. Também se verifica que o sensor PT100 lê valores próximos aos do termopar e dos termômetros de mercúrio.

A tabela 4.4 apresenta os resultados referentes ao teste da temperatura de bulbo úmido em função da umidade relativa do ar. Os valores das temperaturas tbu apresentados na tabela foram corrigidos com as equações de calibração específica de cada sensor deste teste.

**Tabela 4.4** Temperaturas tbu corrigidas para os sensores testados e a umidade relativa do ar correspondente, empregados no teste ANOVA

<b>Testes (1, 2 e 3)</b>	<b>Termômetro Hg</b> tbu (°C)	<b>PT100</b> tbu (°C)	<b>Termopar</b> tbu (°C)	<b>AD 592</b> tbu (°C)	<b>Sensor</b> <b>UR (%)</b>
seqüência 1 (1)	27,8	27,1	26,9	27,6	63
seqüência 2 (1)	29,4	29,1	29,1	29,9	73
seqüência 3 (1)	31,8	30,7	31,2	32,1	83
seqüência 1 (2)	30,9	30,3	30,5	31,8	50
seqüência 2 (2)	34,3	33,3	33,8	35,1	63
seqüência 3 (2)	38,0	37,3	37,6	39,4	83
seqüência 1 (3)	34,4	33,4	34,0	34,6	36
seqüência 2 (3)	38,9	37,8	38,8	39,6	50
seqüência 3 (3)	46,2	45,4	45,9	47,9	83

□□□□ A tabela 4.5 apresenta os resultados da umidade relativa do ar, obtidos com os valores de temperaturas de bulbo úmido corrigidas de cada sensor e, com os valores das temperaturas de bulbo seco, medidas pelo termômetro de referência.

**Tabela 4.5** Valores de UR calculados com os valores de tbu correspondentes a cada sensor do teste

<i>Testes (1, 2 e 3)</i>	<b>Termômetro Hg</b> UR(%)	<b>PT100</b> UR(%)	<b>Termopar</b> UR(%)	<b>AD 592</b> UR(%)	<b>Sensor</b> UR (%)
seqüência 1 (1)	61,75	58,12	57,09	60,70	63
seqüência 2 (1)	70,44	68,77	68,77	73,26	73
seqüência 3 (1)	84,52	77,90	80,88	86,38	83
seqüência 1 (2)	46,72	44,37	45,14	50,35	50
seqüência 2 (2)	61,13	57,13	58,89	64,81	63
seqüência 3 (2)	79,16	75,55	77,09	86,70	83
seqüência 1 (3)	34,63	31,79	33,48	35,21	36
seqüência 2 (3)	48,88	45,16	48,54	51,33	50
seqüência 3 (3)	78,04	74,43	76,67	86,09	83

Analisando os resultados das tabelas 4.4 e 4.5, percebe-se que os valores de UR variam significativamente para uma pequena variação de tbu. Pegando por exemplo, dois valores de tbu da tabela 4.4, (27,8 e 27,1 °C) com tbs de 34,2 °C e dois valores calculados de UR da tabela 4.5, (61,75 e 58,12 %). Para uma diferença de tbu de 0,7 °C, resulta numa diferença em UR de 3,63 %. Verifica-se também que os valores de UR, calculados pelos valores de tbu obtidos pelo sensor AD592, são maiores que os valores de UR referentes aos demais sensores do teste. Observando os valores de UR referentes ao termopar, percebe-se que são os menores em relação aos demais.

#### 4.4.4 Metodologia de análise de variância (ANOVA)

##### O experimento envolve:

- Uma variável de resposta: umidade relativa do ar, (UR)

**Objetivo:**

Verificar se o valor da umidade relativa obtida com o auxílio da temperatura de bulbo úmido, medida pelos sensores Hg, PT100, AD592 e termopar tipo K diferem entre si.

**Hipóteses:**

Ho: não há diferenças significativas entre os valores de UR;

H1: há diferenças significativas entre os valores de UR;

**Teste F:** A equação calcula o valor de F: 
$$F = \frac{MQG}{MQR} \quad (4.8)$$

**Tabela 4.6** Resultados do teste tbu x UR

F(calculado)	F(crítico)
433,415	2,35508
29,82021	3,008786

A tabela 4.6 apresenta os resultados do teste tbu x UR e nessa observa-se os valores de  $F(\text{calculado}) < F_c(\text{crítico})$ . Através da ANOVA considera-se a hipótese H1, ou seja, a diferença que existe entre os valores de UR é significativa.

#### 4.5 Conclusão sobre a verificação da Bancada

A Bancada mostrou ser capaz de manter patamares de temperaturas de bulbo seco e de umidade relativa do ar estáveis, como indicam as figuras 4.1 e 4.2.

Com base nos experimentos efetuados, garante-se estabilidade em temperatura e umidade relativa do ar na faixa testada com uma incerteza de medição em umidade relativa do ar abaixo da prevista ASHRAE, 1994.

O coeficiente do psicrômetro (A) calculado teve uma boa aproximação dos valores relevantes sugeridos pela ASHRAE, 1994.

O teste de verificação de  $t_{bu}$  em função da velocidade do ar mostrou que existe uma pequena diferença entre os valores das temperaturas  $t_{bu}$ . Através da análise de variância, verifica-se que a hipótese a ser considerada é  $H_0$ , ou seja, a diferença que existe entre os valores de temperatura  $t_{bu}$  não é significativa, logo a faixa de velocidade experimentada (1,25 a 5,00) m/s não modifica o valor da temperatura  $t_{bu}$  de forma significativa. A velocidade sugerida para a operação da Bancada é de 4 m/s.

Na verificação do comportamento de diversos sensores em função da umidade relativa do ar, os sensores em teste apresentaram um comportamento bem semelhante sob as mesmas condições ambientais a que foram submetidos, exceto o sensor AD592 que apresenta um desvio maior em relação aos demais. Através da ANOVA considera-se a hipótese  $H_1$ , ou seja, a diferença que existe entre os valores determinados de UR é significativa. Logo se pode dizer que os sensores em teste respondem de forma diferente no que se refere ao cálculo desta propriedade na faixa de UR experimentada.

## **5 ANÁLISE DE RESULTADOS DE CALIBRAÇÃO**

### **5.1 Introdução**

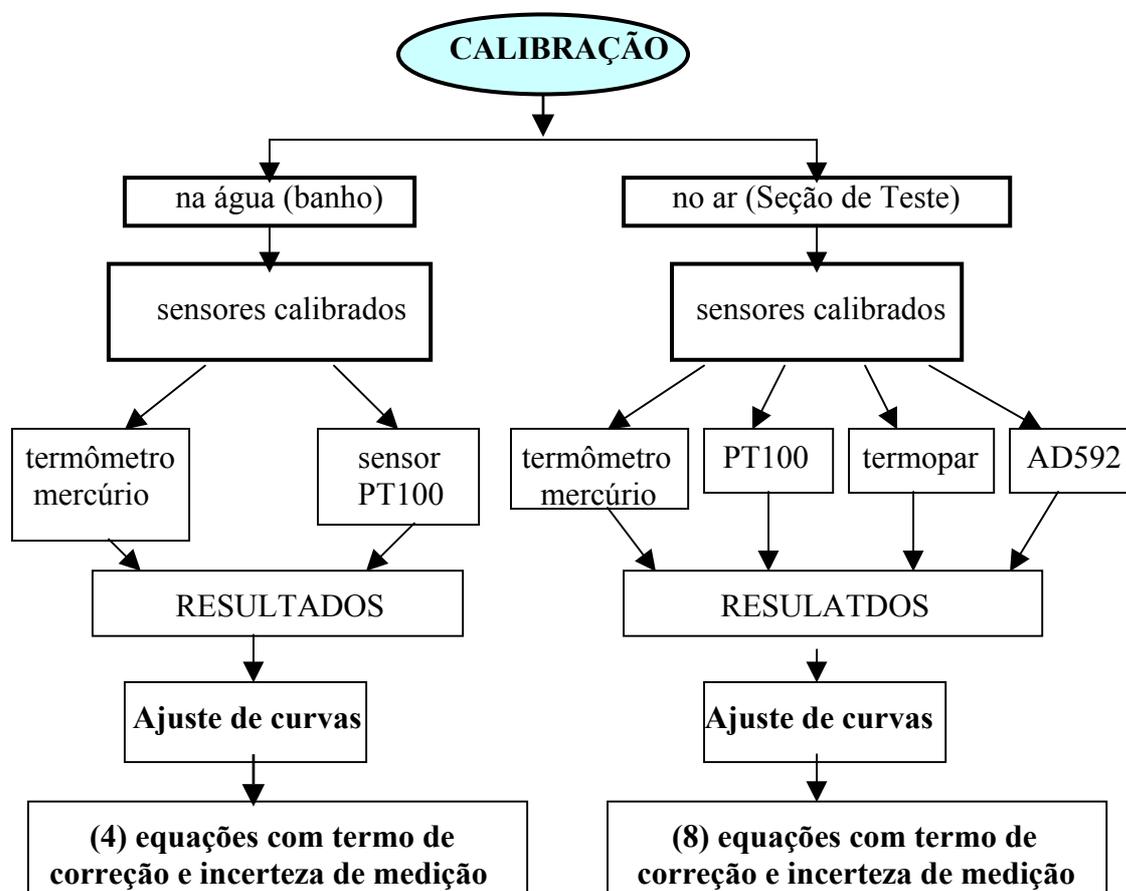
Este trabalho tem como proposta não só a montagem e verificação do funcionamento da Bancada de Calibração, mas também comparar a calibração de sensores de temperatura em um banho termostático de água com a calibração dos mesmos no ar em uma tubulação. A calibração na Seção de Teste é feita com a temperatura de bulbo seco (tbs) do ar. Cada sensor calibrado possui a sua equação com o seu respectivo termo de correção e sua incerteza de medição.

Na grande maioria das aplicações de engenharia, os sensores calibrados ficam expostos a diversos ambientes, podendo ser sólidos, líquidos ou gasosos.

A calibração mais comum destes sensores é feita em banhos termostáticos de água, óleo e álcool [LABELO PUCRS, 2000], mas a calibração no ar não é uma prática comum.

Este capítulo apresenta a calibração dos termômetros de mercúrio em vidro, sensores PT100, AD592 e termopares tipo K, utilizados nesse trabalho. Para fazer esta calibração, ou seja, encontrar as equações que fazem a correção do valor medido pelos elementos sensores de temperatura em relação a um termômetro de referência, foi elaborada uma planilha em Microsoft Excel, que emprega o método dos mínimos quadrados ilustrada no anexo VI.

A figura 5.1 indica as etapas experimentais da calibração dos sensores de temperatura indicados e do tipo de calibração, na água (banho termostático) e no ar (Seção de Teste).



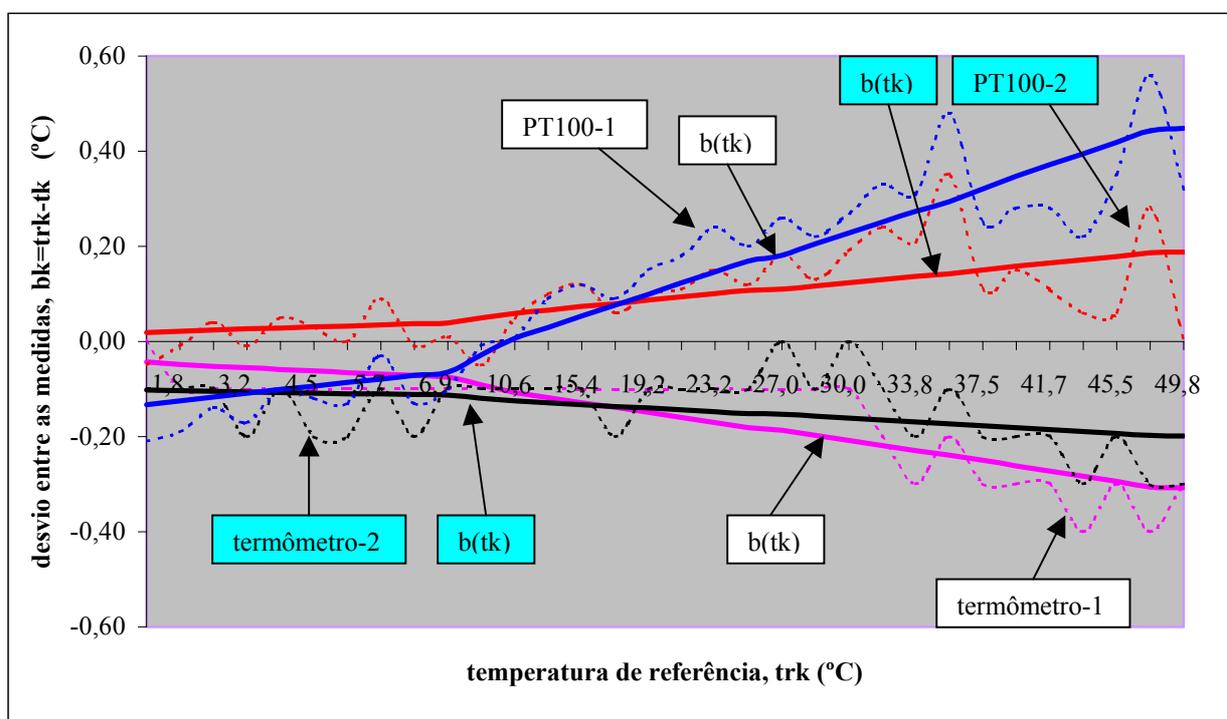
**Figura 5.1** Etapas da calibração dos sensores na água e no ar

## 5.2 Calibração na água (banho termostático)

Na calibração em banho termostático, dois termômetros de mercúrio em vidro e dois sensores PT100 foram calibrados. Para que todos estivessem imersos num ambiente a mesma temperatura, a parte sensível de cada um deles deve ficar muito próxima uma das outras, de modo que se possa considerar que todos estejam à mesma condição no instante da aquisição dos dados. Os dados dos termômetros de mercúrio foram lidos na própria escala, simultaneamente com a aquisição de dados dos sensores PT100, sendo essa última obtida através do HP-3970 A via computador.

É importante relembrar que toda a calibração foi feita em relação a um terceiro termômetro de mercúrio em vidro usado como referência. Os materiais e os procedimentos necessários para esta calibração, os dados experimentais e os resultados do teste da ANOVA, encontra-se no anexo VI.

A figura 5.2 apresenta o comportamento dos sensores testados em banho termostático de água. Mostra o desvio entre a temperatura de referência  $t_{rk}$  e a temperatura lida  $t_k$ , dada por  $b_k$ , e a curva de correção dos valores lidos  $t_k$ , dada por  $b(t_k)$ , obtida pelo ajuste dos desvios  $b_k$ .



**Figura 5.2** Desvio entre a temperatura de referência  $t_{rk}$  e as temperaturas lidas  $t_k$ , dada por  $b_k$ , e as curvas de correção dos valores lidos  $t_k$ , dada por  $b(t_k)$ , obtidas pelo ajuste dos desvios  $b_k$

Dessa forma, tem-se que

$$t_{\text{cor}} = t_k + b(t_k) \quad (5.1)$$

onde,

$t_{\text{cor}}$  é a temperatura corrigida em [°C];

$b(t_k)$  é o termo de correção da temperatura  $t_k$  em [°C];

$t_k$  é a temperatura lida no sensor a ser corrigida em [°C].

As curvas de ajuste com as suas respectivas faixas de incerteza de medição, calculadas para cada um dos sensores na água (banho termostático), são as seguintes:

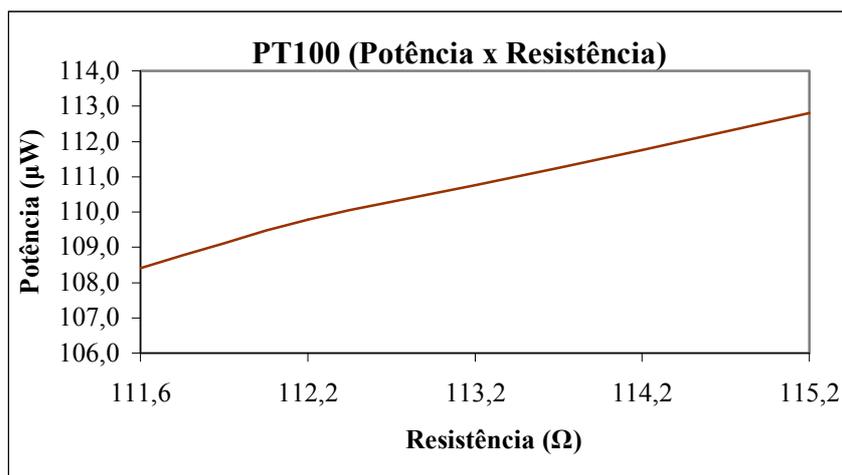
**Tabela 5.1** Curvas de ajuste para cada sensor com as faixas de incertezas de medição

<b>Sensores</b>	<b>Curvas de ajuste</b>	<b><math>w_r \pm (^{\circ}\text{C})</math> na faixa de teste</b>
termômetro-1	$t_{\text{cor}} = tk - 0,0391932 - 0,0054343 (tk - 1)$	(0,01 a 0,02)
termômetro-2	$t_{\text{cor}} = tk - 0,0996753 - 0,0019943 (tk - 1)$	(0,01 a 0,02)
PT100-1	$t_{\text{cor}} = tk + 0,0163547 + 0,0034971 (tk - 1)$	(0,01 a 0,02)
PT100-2	$t_{\text{cor}} = tk - 0,1449002 + 0,0121892 (tk - 1)$	(0,01 a 0,03)

Analisando a figura 5.2, percebe-se que:

- os termômetros de mercúrio têm desvios negativos
- o ajuste linear  $b(tk)$  para os sensores é suficiente nas faixas testadas
- o coeficiente angular da reta  $b(tk)$  de ajuste do PT100-1 é maior do que a do PT100-2
- o coeficiente angular da reta  $b(tk)$  de ajuste do termômetro-2 é menor em módulo do que a do termômetro-1

Comparando os sensores testados pode-se dizer que os sensores PT100 apresentam comportamento inferior ao dos termômetros de mercúrio, por apresentarem um desvio maior em temperaturas maiores. Também, por serem sensores passivos, os PT100 necessitam de uma alimentação externa para gerarem o sinal de leitura, e dissipam potências praticamente lineares dentro de uma determinada faixa, em função da resistência elétrica que aumenta com a temperatura. Esse comportamento é mostrado na figura 5.3, obtida experimentalmente.



**Figura 5.3** Potência dissipada em função da resistência elétrica do sensor PT100

### 5.3 Calibração no ar (Seção de Teste)

A calibração no ar foi realizada na Seção de Teste da Bancada, medindo a temperatura tbs do escoamento de ar. Os sensores calibrados foram: dois termômetros de mercúrio em vidro, dois PT100, dois termopares tipo K e dois AD592. Admitindo que todos os sensores estivessem num ambiente de mesma temperatura, a parte sensível de cada um deles ficou localizada na Seção de Teste, pressupondo assim, que a condição ambiental no instante da aquisição de dados, seja a mesma para todos. Os dados dos termômetros de mercúrio foram lidos diretamente em suas escalas, simultaneamente com a aquisição de dados dos sensores PT100 e dos termopares tipo K, obtidas através do HP-3970 A via computador. A aquisição de dados dos sensores AD592 foi obtida através da placa de aquisição de dados CIO-DAS-TEMP da Computer Boards via computador com o software HP-VEE.

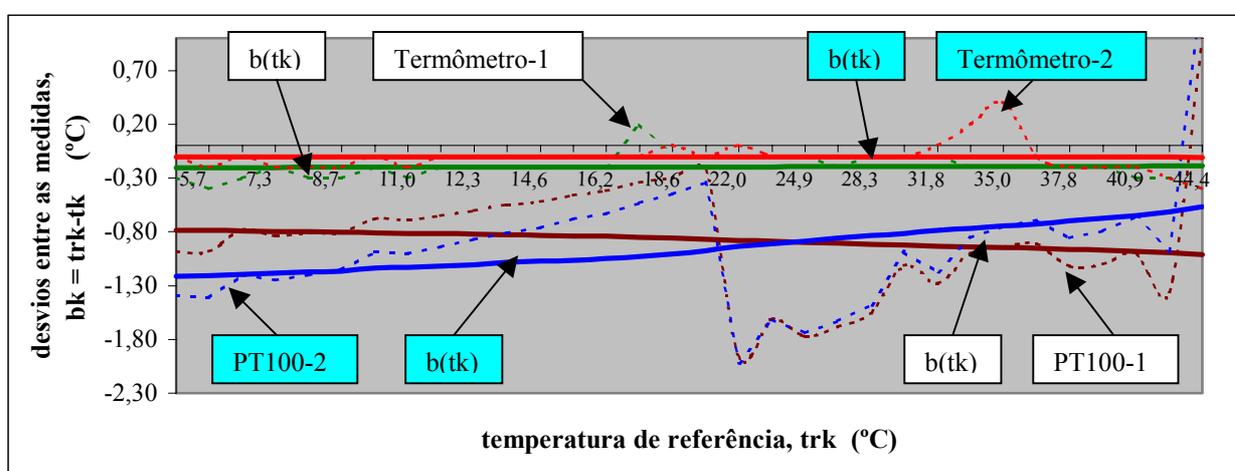
É importante relembrar que toda a calibração foi feita em relação a um terceiro termômetro de mercúrio em vidro usado como referência, e a velocidade do ar no escoamento para esta calibração foi de 3,75 m/s. Os materiais e os procedimentos necessários para esta calibração, os dados experimentais e os resultados do teste da ANOVA, encontra-se no anexo VII .

A figura 5.4 apresenta o comportamento dos sensores testados na Seção de Teste da tubulação. Mostra o desvio entre a temperatura de referência  $t_{rk}$  e a temperatura lida  $t_k$ , dada por  $b_k$ , e as curvas de correção dos valores lidos  $t_k$ , dada por  $b(t_k)$ , obtida pelo ajuste dos desvios  $b_k$ .

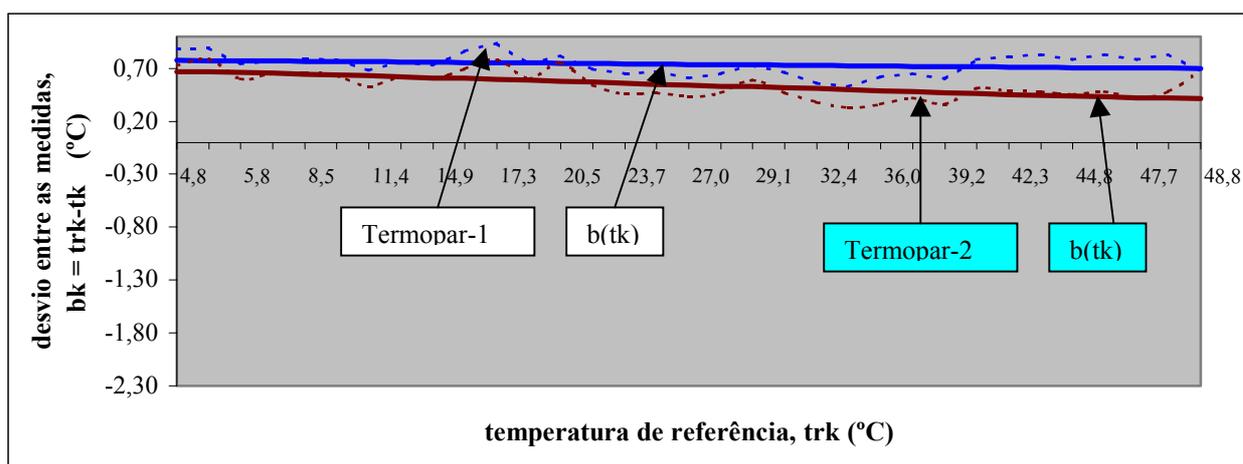
Foi observado um comportamento anormal nos sensores PT100 quando esses foram submetidos ao escoamento de ar na Seção de Teste, visto que se observa na figura 5.4, que há um deslocamento dos dados de ajuste fora do esperado. Mesmo sabendo-se que esta seqüência

de dados apresenta problemas, a mesma foi usada ao longo do trabalho, o que não invalida a metodologia empregada.

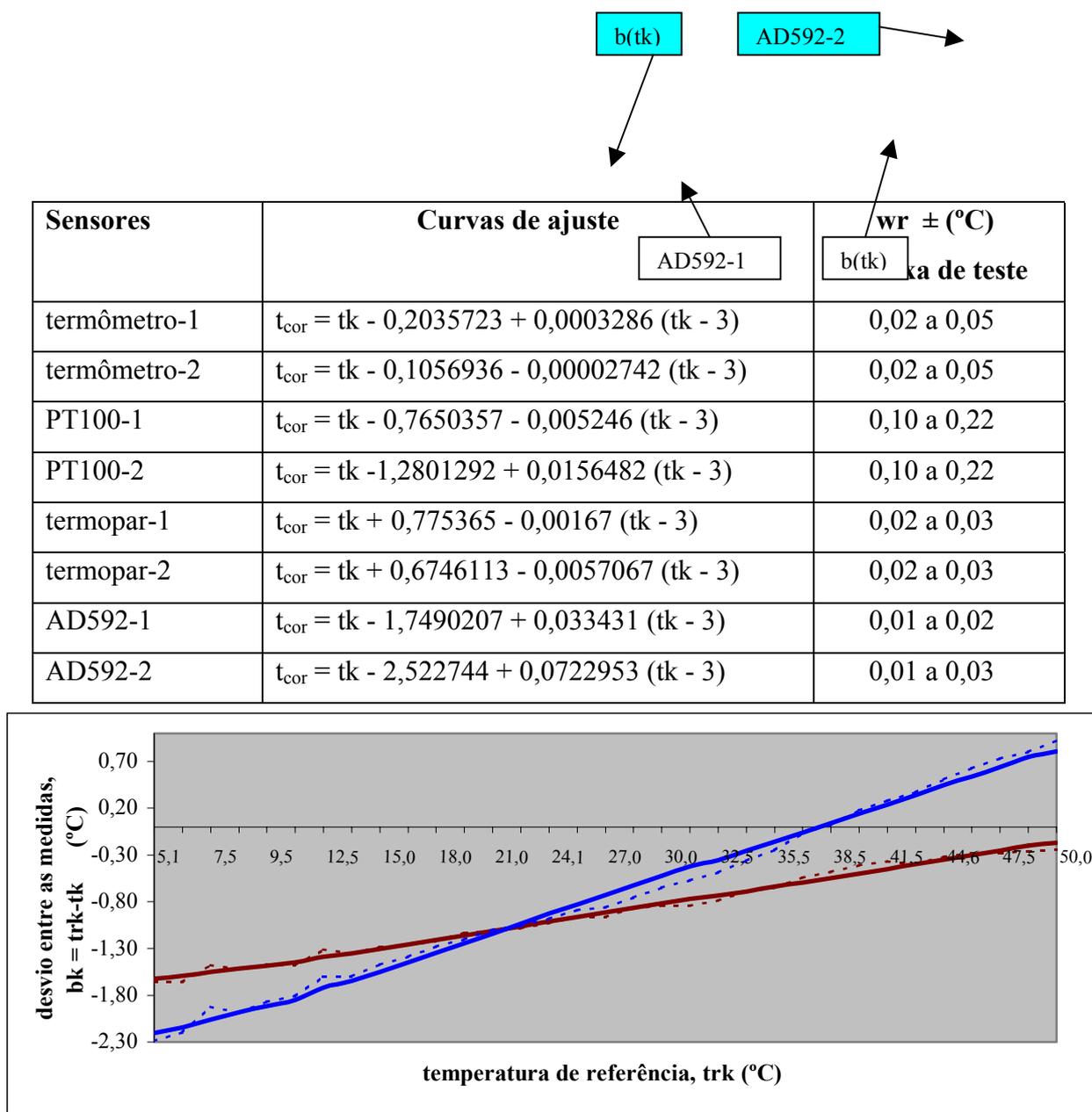
Para verificar se a causa do comportamento anormal foi o meio no qual os sensores foram calibrados, uma nova calibração foi realizada em outros sensores PT100, a qual está ilustrada na figura 7.1 no anexo VII, que confirma um bom comportamento da curva de ajuste. Desta forma verifica-se que os sensores PT100 anteriormente calibrados, estavam com defeito. Mas os novos dados não foram usados nesse trabalho.



(a)



(b)



(c)

**Figura 5.4** (a), (b) e (c) Desvio entre a temperatura de referência  $trk$  e as temperaturas lidas  $tk$ , dada por  $b_k$ , e as curvas de correção dos valores lidos  $tk$ , dada por  $b(tk)$ , obtidas pelo ajuste dos desvios  $b_k$ .

Dessa forma, tem-se que

$$t_{cor} = tk + b(tk) \quad (5.1)$$

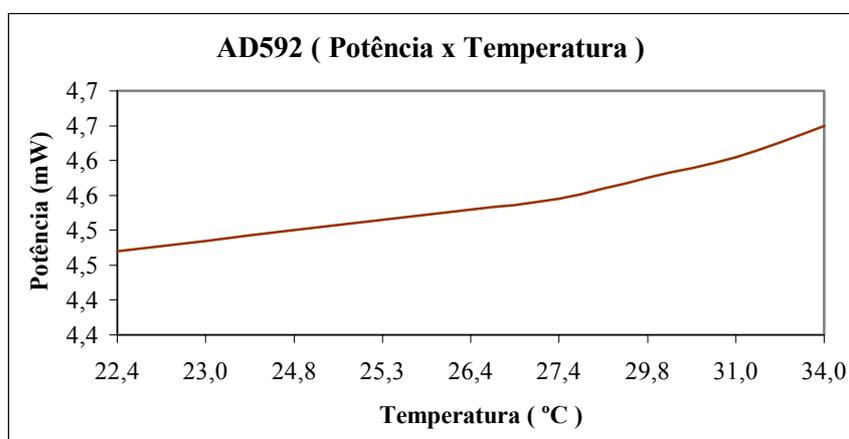
As curvas de ajuste com as suas respectivas faixas de incerteza de medição, calculadas para cada um dos sensores no ar (Seção de Teste), são as seguintes:

**Tabela 5.2** Curvas de ajuste para cada sensor com as faixas de incertezas de medição

Analisando a figura 5.4 (a), (b) e (c), percebe-se que:

- os termômetros de Hg, os sensores PT100 e AD592 têm desvios negativos e os termopares positivos;
- o ajuste linear  $b(tk)$  para os sensores é suficiente nas faixas testadas;
- o coeficiente angular da reta  $b(tk)$  de ajuste dos sensores PT100-2 e AD592-2 é maior do que as do PT100-1 e AD592-1;
- o coeficiente angular da reta  $b(tk)$  de ajuste do sensor AD592-2 é maior do que a do AD592-1;
- os coeficientes angulares da reta  $b(tk)$  de ajuste dos termopares são negativos, e o termopar-1 apresenta um coeficiente angular menor em módulo do que o do termopar-2;
- os sensores AD592 apresentam os menores desvios  $b_k$  na faixa testada;
- os sensores PT100 apresentam os maiores desvios  $b_k$  na faixa testada;

Comparando os sensores testados pode-se dizer que os termômetros de mercúrio e os termopares, apresentam uma resposta mais qualificada, pois ao longo da faixa testada, o desvio  $b_k$  manteve-se dentro de uma certa uniformidade, e com o coeficiente angular da reta de ajuste, menor em relação aos demais sensores. Já os sensores PT100, apresentam um desvio  $b_k$  bem variado ao longo da faixa testada, sendo maior para temperaturas maiores. Observando os sensores AD592, percebe-se um baixo desvio em relação à reta de ajuste ao longo da faixa testada, porém o coeficiente angular da reta é maior em relação aos demais sensores, caracterizando assim, um sensor inferior. Os AD592 são sensores passivos, logo necessitam de uma fonte de alimentação externa para gerarem o sinal e com isso, dissipam potências internas e essas aumentam em função da temperatura. A figura 5.5 foi obtida experimentalmente e ilustra o comportamento do sensor AD592.



**Figura 5.5** Potência dissipada em função da temperatura no sensor AD592

### 5.3.1 Comparação da calibração no ar e na água pela ANOVA

**O experimento envolve:**

- Uma variável de resposta: temperatura tbs corrigida através das equações de calibração

**Objetivo:**

- Identificar se as respostas dos elementos sensores calibrados em meios diferentes, na água e no ar, diferem entre si.

**Hipóteses:**

Ho: não há diferenças significativas entre os grupos nas leituras dos elementos sensores calibrados na água e no ar;

H1: há diferenças significativas entre os grupos nas leituras dos elementos sensores calibrados na água e no ar;

**Teste F:** A equação calcula o valor de F: 
$$F = \frac{MQG}{MQR} \quad (4.8)$$

**Disposição dos dados:**

Para que se possa fazer uma analogia entre as calibrações, na água e no ar e entre os sensores e termômetros calibrados, os valores de temperatura lidos nos termômetros de mercúrio, T1 e T2 e nos sensores PT100-1 e 2, na Seção de Teste, foram aplicados nas equações de calibração na água, e a resposta corrigida desses valores está na tabela 7c no anexo VII.

A análise de variância (ANOVA) foi aplicada nos resultados das temperaturas corrigida correspondentes aos elementos sensores que foram calibrados tanto na água como no ar. Sendo assim, os elementos sensores analisados foram os termômetros de mercúrio e os sensores PT100. Os valores medidos levaram ao cálculo de F e Fc, detalhado no anexo VII na tabela 7.1a. Os resultados obtidos são apresentados na tabela a seguir.

**Tabela 5.3** Resultados comparativos através da ANOVA dos sensores que foram calibrados na água e no ar

Meios de calibração	F (calculado)	Fc (crítico)
na água (banho) e no ar (Seção de Teste)	0,072836	2,429999

Como  $F$  (calculado)  $<$   $F_c$  (crítico) para todos os valores de temperatura obtidos, considera-se a hipótese  $H_0$  como verdadeira, ou seja, não há diferenças significativas entre as leituras dos sensores calibrados na água e no ar.

#### **5.4 Conclusão sobre as calibrações**

Os termômetros de mercúrio e os sensores PT 100, calibrados na água (banho termostático) e no ar (Seção de Teste), apresentam pequenas diferenças entre suas respostas ao serem submetidos a meios diferentes. Observando os resultados dos fatores  $F$ , calculado e crítico determinados pela ANOVA, verifica-se que  $F$ (calculado) é menor do que o  $F$ (crítico), e isso nos remete a hipótese  $H_0$ . Logo a diferença que existe entre os resultados das temperaturas tbs nos meios mencionados não é significativa. Com isso conclui-se que esses sensores podem ser calibrados em banho com água ou em um escoamento de ar, como na Seção de Teste da Bancada que mostrou ser um meio eficaz e capaz de atender as necessidades de calibração.

## **6 CONCLUSÃO E SUGETÕES PARA FUTUROS TRABALHOS**

O objetivo desse trabalho foi montar uma Bancada de Calibração de sensores de temperatura para determinação da umidade relativa do ar, e verificar a qualidade dos resultados obtidos.

As observações e a conclusão que dizem respeito à experiência que foi adquirida nesse trabalho, são válidas para a Bancada de Calibração que foi montada, que deverão ser úteis àquelas que continuarem a trabalhar nela, e incluem sugestões para melhorá-la.

A Bancada é um equipamento muito útil tanto para o estudo do comportamento de sensores como para pesquisa de instrumentação. Esta mostrou ser capaz de manter patamares de temperaturas tbs e de umidade relativa estáveis, como indicam as figuras 4.1 e 4.2.

Com base nos experimentos efetuados, garante-se estabilidade em temperatura e umidade relativa do ar na faixa testada com uma incerteza de medição em umidade relativa do ar abaixo da prevista ASHRAE, 1994.

O coeficiente do psicrômetro (A) calculado teve uma boa aproximação dos valores relevantes sugeridos pela ASHRAE, 1994.

O teste de verificação de tbu em função da velocidade do ar mostrou que existe uma pequena diferença entre os valores das temperaturas tbu. Através da ANOVA, verifica-se que a diferença que existe entre os valores de temperatura tbu não é significativa, logo a faixa de velocidade experimentada (1,25 a 5,00) m/s não modifica o valor da temperatura tbu de forma significativa.

A metodologia de análise de variância (ANOVA) mostrou ser de grande importância na análise de dados tanto na validação quanto na calibração de sensores.

Na verificação do comportamento de diversos sensores em função da umidade relativa do ar, os sensores em teste apresentaram um comportamento bem semelhante sob as mesmas condições ambientais a que foram submetidos, exceto o sensor AD592 que apresenta um desvio maior em relação aos demais. Através da ANOVA, considera-se que a diferença que existe entre os valores determinados de UR é significativa. Logo se pode dizer que os sensores em teste respondem de forma diferente no que se refere ao cálculo desta propriedade na faixa de UR experimentada.

Os termômetros de mercúrio e os sensores PT 100, calibrados na água (banho termostático) e no ar (Seção de Teste), apresentam pequenas diferenças entre suas respostas ao serem submetidos a meios diferentes. Observando os resultados dos fatores F, calculado e crítico determinados pela ANOVA, verifica-se que  $F(\text{calculado})$  é menor do que o  $F(\text{crítico})$ . Logo a diferença que existe entre os resultados das temperaturas tbs nos meios mencionados não é significativa. Com isso conclui-se que esses sensores podem ser calibrados em banho com água ou em um escoamento de ar, como na Seção de Teste da Bancada que mostrou ser um meio eficaz e capaz de atender as necessidades de calibração.

### **Sugestões para futuros trabalhos**

- Implementar na Bancada, um banho termostático com temperaturas controladas abaixo da temperatura ambiente do ar;
- Operar a Bancada com banho de sais;
- Fazer uma adaptação na Bancada para testar psicrômetros completos já existentes;
- Verificar a influência de vibrações mecânicas causadas pelo motor-ventilador na leitura dos sensores de temperatura.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASHRAE STANDARD 41.1-1974. “**Standard Measurement Guide: Section on Temperature Measurements**”, ASHRAE, Atlanta

ASHRAE STANDARD 41.5-1975. “**Standard Measurement Guide Engineering Analysis of Experimental Data**”, ASHRAE, Atlanta

ASHRAE STANDARD 41.6-1994. “**Method for Measurement of Moist Air Properties**”, ASHRAE, Atlanta

ASHRAE, 1997. “**Handbook of Fundamentals**”, ASHRAE, Atlanta

Balestrin, E., 1999. “**Construção de uma Bancada de Calibração**”, Trabalho de Diplomação, GESTE/UFRGS, Porto Alegre

Barros, N. B.; Scarmínio, I.S; Bruns, R.E, 1995. “**Planejamento de Otimização de Experimentos**”, Unicamp, São Paulo

BS1042: 1.1 –1981. “**Methods of Measurement of Fluid Flow in Closed Conduits**”, British Standards Institution

Claeyssen, J. R.; Bravo, E; Castro, A.; et al, 1995. “**Introdução ao Matlab Para Windows**”, UFRGS, Porto Alegre

Danieli, R.,1999. “**Planilha para ajuste de curvas**”, GESTE/UFRGS, Porto Alegre

Fox, R.W. e McDonald, R., 1988. “**Introdução à Mecânica dos Fluidos**”, Guanabara, Rio de Janeiro

Gasparini, R. A., 1999. “**Construção de uma Bancada de Calibração de Psicrômetros**”, Feira de Iniciação Científica, GESTE/UFRGS, Porto Alegre

Hansen, A.G., 1974. “**Mecânica dos Fluidos**”, Limusa, México

Hollman, J.P., 1996. “**Experimental Methods for Engineers**”, McGraw-Hill, New York

ISO 4677/1-1985. “**Atmospheres for Conditioning and Testing- Determination of Relative Humidity Part 1: Aspirated Psychrometer Method**”, International Standard

ISO, 1995. “**Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement**”, Switzerland

ISO/TAG/WG3, 1993. “**Guide to the Expression of Uncertainty in Measurements, International Organization for Standardization**”.

INSTITUTE OF MEASUREMENT AND CONTROL, 1996. “**A Guide to the Measurement of Humidity**”, NPL, London

Incropera, F.P., DeWitt, D.P., 1998. “**Fundamentos de Transferência de Calor e Massa**”, LTC, Rio de Janeiro

Melchior, C. A., 2001. “**Calibração de Termômetros em Banhos Termostáticos**”, LABELO PUCRS, Porto Alegre

Novus Produtos Eletrônicos, 1997. “**Manual de Instruções**”, Porto Alegre

PHYSICAL METROLOGY-MET-2220, 1988. “**Temperature Systems**”, MIMT, Copyright

Ribeiro, J.L.D, 1996. “**Projeto de Experimentos na Otimização de Produtos e Processos**”, UFRGS, Porto Alegre

Santos, C. e Kawakita, K., 1992. “**Métodos de Medição de Umidade em Gases**”, Instituto de Pesquisas Tecnológicas, São Paulo

Schneider, P.S. e Vielmo, H. A., 1999, “**Desenvolvimento de Mecanismos Para Climatização de Estufas Para Plasticultura**”, Projeto de Pesquisa FAPERGS Número 99/0219-0 Porto Alegre

Schneider, P.S., 2000, Ajuste de Dados, **Notas de Aula** da Disciplina de Medições Térmicas do Curso de Engenharia Mecânica/UFRGS, Porto Alegre

Schneider, P.S., 2000, Termometria, **Notas de Aula** da Disciplina de Medições Térmicas do Curso de Engenharia Mecânica/UFRGS, Porto Alegre

Simões Moreira, J.R., 1989. “**Considerações Teóricas e Práticas de Funcionamento do Psicrômetro**”, Revista Controle & Instrumentação, São Paulo

Simões Moreira, J.R., 1999. “**A Thermodynamic Formulation of the Psychrometer Constant**”, Escola Politécnica da USP, São Paulo

Triola, M.F., 1998. “**Introdução à Estatística**”, LTC-Livros Técnicos e Científicos, Rio de Janeiro

Vuolo, J.H, 1998. “**Fundamentos da Teoria de Erros**”, Edgard Blücher, São Paulo

Van Wylen, G.e Sonntag, R., 1995. “**Fundamentos da Termodinâmica Clássica**”, Edgard Blücher, São Paulo

## ANEXOS

<b>Anexo I:</b>	Materiais, equipamentos e procedimentos de montagem da Bancada de Calibração.....	81
<b>Anexo II:</b>	Programa em linguagem Matlab para cálculo da umidade relativa do ar com a sua respectiva incerteza de medição.....	84
<b>Anexo III:</b>	Materiais, equipamentos e procedimentos para verificação do teste (tbu x velocidade) com tabelas de resultados da ANOVA.....	86
<b>Anexo IV:</b>	Dados coletados experimentalmente para gerar as curvas de estabilidade em temperatura.....	89
<b>Anexo V:</b>	Materiais, equipamentos e procedimentos para o teste (tbu x UR) com tabela de resultados da ANOVA.....	90

<b>Anexo VI:</b>	Materiais, equipamentos e procedimentos utilizados na calibração dos termômetros de mercúrio e dos sensores PT100 em banho com água, tabela de dados experimentais para a calibração e tabelas de resultados da ANOVA.....	93
<b>Anexo VII:</b>	Materiais, equipamentos e procedimentos utilizados na calibração dos termômetros de mercúrio e dos sensores PT100 no ar (Seção de Teste), tabela de dados para calibração e tabela de resultados da ANOVA.....	96
<b>Anexo VIII:</b>	Metodologia de análise estatística .....	102
<b>Anexo IX:</b>	Fundamentos de incerteza de medição .....	112

## ***ANEXO I***

### **Materiais, equipamentos e procedimentos de montagem da Bancada de Calibração**

#### **Materiais e Equipamentos:**

<b><i>Quantidade</i></b>	<b><i>Descrição</i></b>
(1)	Caixa de poliestireno expandido com dimensões de: espessura = 5,0cm, altura = 36cm, largura = 57cm e comprimento = 75cm (veja fig. 3.2)
(1)	Isolante térmico de poliestireno (5mm) de espessura com uma camada externa aluminizada (lâmina de alumínio)
(1)	Tubo de PVC de 10cm de diâmetro x 300cm de comprimento (tubulação)
(1)	Joelho de PVC de 10cm de diâmetro (tubulação)
(1)	Transição com redução concêntrica de duto retangular para redondo de 10cm (tubulação)
(1)	Caixa de eucatex com tampa, revestida internamente com chapa de ferro galvanizado de 0,7mm de espessura, dimensões da caixa: espessura = 0,5cm , altura = 30cm, largura = 35cm e comprimento = 65cm (Câmara de condicionamento de ar)

- (1) Trocador de calor usado em condicionamento de ar
- (1) Motor com ventilador centrífugo acoplado para aspiração do ar: Potência de 150W, tensão de operação 220Vac
- (1) Reservatório plástico de 250ml para água destilada
- (1) Umedecedor das mechas com capacidade para 186ml de água destilada
- (1) Variador de fluxo do ar :0,7mm de espessura x 98mm de largura x 160mm de comprimento (Veja fig.3.3)
- (1) Sensor de umidade relativa: 0 a 100 %
- (2) Vaporizador de água: capacidade para 5 litros, tensão de operação 110 /220Vac
- (1) Banho termostático de água: capacidade para 23 litros com resistência para aquecimento da água: Potência de 1500W, tensão de operação 110Vac
- (1) Relé de estado sólido de 25A para controle do aquecimento do banho
- (1) Relé de estado sólido de 10A para controle do vaporizador
- (1) Computador PC – compatível
- (1) HP- Data Acquisition : HP - 34970 A
- (1) CPP:Controlador de Processos Programável - Novus 8000
- (2) Mangueiras de borracha para água, com diâmetro interno de 0,12cm e 80cm de comprimento para circulação da água pelo trocador de calor (veja fig. 3.2)
- (1) Tubo de Pitot com medidor de velocidade do ar: Faixa de operação: 0 a 45m/s
- (1) Cabo de dois metros, com dois fios 26 AWG (0.40mm): sensor de umidade relativa
- (1) Cabo de dois metros, com dois fios 26 AWG (0.40mm): saída de controle para o relé do aquecimento
- (1) Cabo de dois metros, com três fios 26 AWG (0.40mm): sensor PT100 monitorar a temperatura do banho
- (2) Cabo de quatro metros, com quatro fios 22 AWG (0.64mm): sensor PT100 para calibração
- (1)Cabo de dois metros, com dois fios 26 AWG (0.40mm): saída de controle para o relé do vaporizador
- (1) Cabo de comunicação RS 232 : PC com HP
- (1) Cabo de comunicação HP-IB: PC com HP

### **Procedimentos de montagem:**

- Fazer os furos na caixa de poliestireno expandido e na caixa de revestimento interno: dois furos de 100mm para a tubulação de ar; um furo de 40mm para as mangueiras de circulação de água; um furo de 10mm para entrada dos cabos do vaporizador (veja fig. 3.1);
- Fixar o trocador de calor aproximadamente no centro da caixa de revestimento interno (veja fig. 3.1);
- Posicionar o banho próximo à bancada (50cm) e fazer as conexões das mangueiras para circulação de água (Veja figs. 3.1 e 3.2);
- Fixar na mesa de madeira, o motor - ventilador de aspiração de ar (veja fig. 3.7);
- Adaptar a transição com redução concêntrica de duto retangular para redondo na saída de ar do motor para a tubulação;
- Construir na tubulação, a Seção de Teste (veja figs. 3.4 e 3.6);
- Colar o material isolante térmico em toda a extensão da tubulação;
- Montar a tubulação de plástico PVC (Veja fig. 3.2);
- Adaptar na Seção de Teste, o umedecedor para as mechas dos sensores (veja fig. 3.4);
- Adaptar o reservatório para água destilada: recipiente de plástico de 250ml (veja fig. 3.4);
- Instalar na tubulação o Tubo de Pitot com medidor de velocidade do ar na posição indicada (veja fig. 3.9);
- Colocar o vaporizador no interior da câmara de condicionamento de ar (veja fig. 3.1);
- Colocar o sensor de umidade relativa na lateral interna da câmara de condicionamento de ar (Veja fig. 3.1);
- Fechar as tampas: a metálica da caixa de revestimento interno e sobre esta, a de poliestireno expandido, eliminando ao máximo, as infiltrações das tampas e de toda a furação das conexões;
- Fazer todas as conexões elétricas nos equipamentos da medição e controle
- Configurar os equipamentos da medição e controle conforme a necessidade do experimento;

**Obs:** A Bancada foi construída sobre uma mesa com tampo de madeira com dimensões de (1,10 x 2,20) m

## ***ANEXO II***

***Programa em linguagem Matlab para cálculo da umidade relativa do ar com a sua respectiva incerteza de medição***

***% Constantes da equação para cálculo de pws***

***C8=-5.8002206e3;***

***C9=1.3914993;***

***C10=-4.8640239e-2;***

***C11=4.1764768e-5;***

***C12=-1.4452093e-8;***

***C13=6.5459673;***

***p=101325; %pressão atmosférica total ao nível do mar (Pa)***

```
wrbs= [0.122 0.122 0.122 0.122 0.122 0.122 0.122 0.122 0.122 0.122 0.123 0.123 0.123 0.123
0.123 0.124 0.124 0.124 0.124 0.125 0.125 0.125 0.125 0.125 0.126 0.126 0.126 0.126
0.126 0.126 0.122 0.122]; % incerteza de medição sensor-1 PT100 (°C)
```

```
wrbu= [0.101 0.101 0.101 0.101 0.101 0.101 0.101 0.101 0.101 0.101 0.101 0.102 0.104 0.104 0.104
0.104 0.104 0.104 0.104 0.105 0.105 0.107 0.110 0.109 0.109 0.110 0.110 0.110 0.110 0.110
0.110 0.110 0.110 0.110]; % incerteza de medição sensor-2 PT100(°C)
```

```
tkbs=[33.083 33.085 33.063 33.073 33.054 33.038 33.039 33.035 33.009 33.039 33.131 33.261
33.305 33.340 33.388 33.437 33.496 33.534 33.571 33.591 33.661 33.734 33.741 33.764 33.804
33.846 33.898 33.932 33.965 34.000 34.018 34.052 34.068]; % temperaturas de bulbo seco (°C)
```

```
tkbu=[26.081 26.088 26.094 26.103 26.105 26.112 26.110 26.114 26.115 26.156 26.754 27.997
28.120 27.585 27.565 27.782 27.857 27.831 27.954 27.932 28.924 30.027 29.495 29.509 29.693
29.754 29.734 29.845 29.786 29.893 29.909 30.008 29.983]; % temperaturas de bulbo úmido
(°C)
```

```
tcbs = -0.7650357- 0.005246*(tkbs - 3) + tkbs; % temperatura de bulbo seco corrigida (°C)
% PT100-1
```

```
tcbu = -1.2801292 + 0.0156482*(tkbu - 3) + tkbu; %temperatura de bulbo úmido corrigida
(°C) % PT100 2
```

```
n=33;
```

```
Tcbs=tcbs+273.15; % temperatura absoluta de bulbo seco corrigida (K)
```

```
Tcbu=tcbu+273.15; % temperatura absoluta de bulbo úmido corrigida (K)
```

```
for i=1:n
```

```
pwsbs(i)=exp(C8/Tcbs(i)+C9+C10*Tcbs(i)+C11*(Tcbs(i)^2)+C12*(Tcbs(i)^3)+C13*log(Tcbs(i)
)); % pressão abs. de saturação do vapor d`água (Pa)
```

```
pwsbu(i) = exp (C8/Tcbu(i)+C9+C10*Tcbu(i)+C11*(Tcbu(i)^2)+C12*(Tcbu(i)^3)+C13*
log(Tcbu(i))); %pressão abs. de saturação do vapor d`água (Pa)
```

$W_{sbs}(i)=0.62198*(p_{wsbs}(i)/(p-p_{wsbs}(i)));$  %conteúdo de umidade na satutação (kgVA / kgAS)  
 $W_{sbu}(i)=0.62198*(p_{wsbu}(i)/(p-p_{wsbu}(i)));$  %conteúdo de umidade na satutação (kgVA / kgAS)  
 $W(i)=(((2501-2.381*t_{cbu}(i))*W_{sbu}(i)-(t_{cbs}(i)-t_{cbu}(i)))/(2501+1.805*t_{cbs}(i)-4.186*t_{cbu}(i)));$   
 % conteúdo de umidade (kgVA / kgAS)

$u(i)=W(i)/W_{sbs}(i);$  % grau de saturação  
 $uR(i)=u(i)/(1-(1-u(i))*(p_{wsbs}(i)/p));$  % umidade relativa  
 $URc(i)=uR(i)*100;$  (%) % umidade relativa na Seção de Teste

$p_w(i)=uR(i)*p_{wsbs}(i);$  %pressão parcial de vapor d'água (Pa)  
 $A(i)=((p_{wsbu}(i)-p_w(i))/(p*(t_{cbs}(i)-t_{cbu}(i))));$  % coeficiente do psicrômetro( $K^{-1}$  ou  $C^{-1}$ )  
 $A_x(i)=A(i)*p/p_{wsbu}(i);$   
 $wrc(i)=[((-A_x(i)*w_{rbs}(i))^2+(A_x(i)*w_{rbu}(i))^2)^{0.5}]*100;$  % incerteza propagada em (%)

end

### ***ANEXO III***

#### **Materiais, equipamentos e procedimentos para verificação do teste (tbu x velocidade) com tabelas de resultados da ANOVA**

##### **Materiais e Equipamentos:**

###### ***Quantidade***

###### ***Descrição***

- (2) - Termômetro de mercúrio em vidro- Faixa de temp.:(-10 °C a 52 °C)
- (3) - Sensor PT100- Faixa de temp.:(-150 °C a 650 °C)
- (1) - HP- Data Acquisition : HP - 34970 A
- (1) - Software HP benc Link data logger
- (1) - CPP – Controlador de Processos Programável -Novus 8000
- (1) - Computador PC- compatível
- (1) – Manômetro com tubo de Pitot- Faixa:(0 a 45m/s)
- (1) – Banho termostático de água
- (2) - Quatro metros de cabo com quatro fios 22 AWG (0.64mm): sensores PT100

- (1) - Quatro metros de cabo com três fios 26 AWG (0.40mm):sensor PT100 do banho
- (2)- Gelo picado de 3kg
- (2) - Água destilada de 300ml
- (2)- Mechas de algodão

**Procedimentos para verificação do teste (tbu x velocidade):**

1. Montar o sistema geral (veja fig. 4.3)
2. Inserir na tubulação o tubo de Pitot (Manômetro com tubo de Pitot). (Veja figuras. 3.9 e 4.3)
3. Montar os termômetros na Seção de Teste. Excluir o termômetro de referência. O termômetro T2 para medir tbu, deve estar com uma mecha de algodão na parte sensível;
4. Colocar no reservatório, água destilada para manter as mechas sempre umedecidas;
5. Colocar gelo picado no banho de água para levar a temperatura até próxima de 0 °C;
6. Ligar a bomba para que a água possa circular pelo trocador de calor;
7. Aguardar aproximadamente 30 minutos para que o sistema, tubulação /sensores/ termômetros possam entrar em “regime permanente”;
8. Configurar o HP via computador para fazer as leituras das temperaturas (sensores PT100);
9. Fixar uma temperatura para iniciar o primeiro teste, a de “equilíbrio térmico”;
10. Para o teste 1: seqüência 4, deixar a tubulação livre, sem variador de fluxo do ar para que a velocidade média seja de 5,0 m/s;
11. Fazer quatro leituras visuais, uma a cada minuto, nos termômetros (T1=tbs e T2=tbu);
12. Continuar o teste 1: seqüência 3. Introduzir na tubulação, aproximadamente 1/3 do variador de fluxo de ar para que a velocidade média fique em torno de 3,75 m/s;
13. Repetir o passo número 11;
14. Continuar o teste 1: seqüência 2. Introduzir na tubulação, aproximadamente 2/3 do variador de fluxo de ar para que a velocidade média fique em torno de 2,5 m/s;
15. Repetir o passo número 11;
16. Continuar o teste 1: seqüência 1. Introduzir na tubulação, aproximadamente 5/6 do variador de fluxo de ar para que a velocidade média fique em torno de 1,25 m/s;
17. Repetir o passo número 11;
18. Salvar os dados em uma tabela;

19. Para executar os testes 1 e 2 respectivamente, fixar outros valores para a temperatura e repetir os passos do teste 1, do passo 9 ao 18 com as mesmas velocidades mencionadas anteriormente.

### Resultados da verificação do teste da temperatura de bulbo úmido em função da velocidade do ar pela análise de variância (ANOVA)

As tabelas que seguem apresentam os resultados referentes aos testes 1 e 2 (tbu x velocidade do ar)

**Tabela 3.1** Resultados do teste 1: temperatura tbu x velocidade do ar através da ANOVA

Teste 1						
Anova: fator único						
RESUMO						
<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>		
Coluna 1	4	116,6	29,15	0,016666667		
Coluna 2	4	116,6	29,15	0,016666667		
Coluna 3	4	116,6	29,15	0,016666667		
Coluna 4	4	116,6	29,15	0,016666667		
ANOVA						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	0	3	0	0	1	3,4902996
Dentro dos grupos	0,2	12	0,016667			
Total	0,2	15				

**Tabela 3.2** Resultados do teste 2: temperatura tbu x velocidade do ar através da ANOVA

Teste 2						
Anova: fator único						
RESUMO						
<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>		
Coluna 1	4	133,9	33,475	0,009166667		
Coluna 2	4	133,9	33,475	0,009166667		
Coluna 3	4	133,8	33,45	0,016666667		
Coluna 4	4	133,8	33,45	0,016666667		
ANOVA						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	0,0025	3	0,000833	0,064516129	0,97763333	3,4902996
Dentro dos grupos	0,155	12	0,012917			
Total	0,1575	15				

**ANEXO IV****Dados coletados experimentalmente para gerar as curvas de estabilidade em temperatura****Tabela 4** Dados para gerar as curvas de estabilidade em temperatura em função do tempo

<b>tx (min)</b>	<b>tbs (°C)</b>	<b>tamb(°C)</b>	<b>tbu(°C)</b>	<b>tx(min)</b>	<b>tbs (°C)</b>	<b>tamb(°C)</b>	<b>tbu (°C)</b>
0	30,40	24,90	25,00	38	37,30	24,80	28,00
1	30,40	24,90	25,00	39	37,70	24,80	28,10
2	30,40	24,90	25,00	40	38,10	24,80	28,30
3	30,40	24,90	25,00	41	38,60	24,80	28,50
4	30,40	24,90	25,00	42	39,00	24,80	28,60
5	30,40	25,00	25,00	43	39,40	24,80	28,80
6	30,40	25,00	25,00	44	39,80	24,80	29,00
7	30,40	25,00	25,00	45	40,20	24,80	29,20
8	30,40	24,90	25,00	46	40,60	24,90	29,30
9	30,50	24,90	25,00	47	41,10	24,90	29,50
10	30,80	24,90	25,10	48	41,50	24,90	29,70
11	31,10	24,80	25,20	49	41,80	24,90	29,90
12	31,50	24,80	25,30	50	42,20	24,90	30,00
13	32,00	24,90	25,50	51	42,60	25,00	30,20
14	32,40	24,70	25,70	52	43,00	25,00	30,30
15	32,90	24,90	25,90	53	43,30	25,00	30,50
16	33,40	24,90	26,10	54	43,60	25,10	30,60
17	33,80	24,90	26,30	55	43,80	25,10	30,70
18	34,20	24,70	26,50	56	44,00	25,00	30,80
19	34,60	24,70	26,60	57	44,10	24,90	30,90

20	34,80	24,70	26,80	58	44,20	25,00	30,90
21	35,10	24,80	26,90	59	44,30	25,00	31,00
22	35,30	24,80	27,00	60	44,40	25,00	31,00
23	35,40	24,80	27,10	61	44,40	25,40	31,00
24	35,50	24,70	27,10	62	44,50	25,20	31,10
25	35,60	24,90	27,20	63	44,50	25,20	31,10
26	35,60	24,80	27,20	64	44,50	25,10	31,10
27	35,60	24,80	27,20	65	44,60	25,10	31,20
28	35,60	24,70	27,30	66	44,60	25,10	31,20
29	35,60	24,80	27,30	67	44,60	25,00	31,20
30	35,60	24,80	27,30	68	44,60	25,00	31,20
31	35,60	24,80	27,30	69	44,60	25,20	31,20
32	35,60	24,70	27,30	70	44,60	24,90	31,20
33	35,60	24,80	27,30	71	44,60	25,00	31,20
34	35,80	24,80	27,40	72	44,60	25,00	31,20
35	36,10	24,80	27,50	73	44,70	25,10	31,30
36	36,50	24,80	27,60	74	44,70	25,20	31,30
37	36,90	24,90	27,80	75	44,70	25,20	31,30

**ANEXO V****Materiais, equipamentos e procedimentos para o teste (tbu x UR) com tabela de resultados da ANOVA****Materiais e Equipamentos:****Quantidade****Descrição**

- (1) - Termômetro de mercúrio em vidro (referência): Faixa de temp.(-10 °C a 52 °C)
- (2) - Termômetro de mercúrio em vidro -Faixa de temp.:(-10 °C a 52 °C)
- (3) - Sensor PT100- Faixa de temp.:(-150 °C a 650 °C)
- (2) - Sensor AD592 – Faixa de temp: (-25 °C a 105 °C)
- (2) – Termopar tipo K(Chromel/Alumel) – Faixa de temp.(-270 a 1372 °C)
- (1) - HP- Data Acquisition : HP - 34970 A
- (1) - Software HP benc Link data logger
- (1) - Placa de aquisição de dados CIO-DAS-TEMP da Computer Boards
- (1) - Software HP VEE 4.0 of Hewlett-Packard
- (1) - CPP – Controlador de Processos Programável -Novus 8000
- (1) - Sensor de umidade relativa (0 a 100%)
- (1) - Vaporizador de água para ambientes de 5L
- (1) - Relé de estado sólido para 10 A para controle do vaporizador
- (1) - Relé de estado sólido para 25 A para controle do aquecimento do banho

- (1) - Computador PC - compatível
- (1) - Manômetro com tubo de Pitot- Faixa:(0 a 45m/s)
- (1) - Banho termostático de água
- (2) - Quatro metros de cabo com quatro fios 22 AWG (0.64mm):sensores PT100
- (1) - Quatro metros de cabo com três fios 26 AWG (0.40mm):sensor PT100 do banho
- (1) - Quatro metros de cabo com quatro fios 26 AWG (0.40mm): sensor AD592
- (2) – Quatro metros de extensão para termopares com dois fios 22 AWG (0.64mm)
- (2) - Gelo picado de 3kg
- (1) - Água destilada de 300ml
- (2) - Mechas de algodão

### **Procedimentos para o teste (tbu x UR):**

Obs: Esse procedimento é genérico, ou seja, não fixa valores para temperatura e para umidade relativa, ficando a critério do experimentador, respeitando é claro os limites de operação da Bancada.

1. Montar os termômetros T1, T2 e Tref e os sensores PT100, S1 e S2 na Seção de Teste (Veja fig. 3.5). O termômetro T2 e o sensor S2 para medir tbu, devem estar com uma mecha de algodão na parte sensível;
2. Colocar no reservatório, água destilada para manter as mechas sempre umedecidas.
3. Ligar a bomba para a água do banho circular pelo trocador de calor;
4. Aguardar aproximadamente 30 minutos para que o sistema, tubulação /sensores /termômetros possam entrar em “equilíbrio térmico”;
5. Configurar o HP via computador para fazer as leituras das temperaturas (sensores PT100);
6. Fixar um valor de temperatura tbs (ar na tubulação) para iniciar o teste (1° nível). Temperatura de equilíbrio térmico ou próxima;
7. Fixar um valor de umidade relativa (1° nível). Umidade relativa ambiente ou próxima;
8. Para o teste, deixar a tubulação livre, sem o variador de fluxo de ar para que a velocidade média seja de 5,0 m/s;
9. Fazer as leituras nos termômetros (Tref = tbs e T2=tbu) “simultaneamente” com a aquisição automática via HP do sensor PT100, S2=tbu;
10. Continuar o teste

11. Para o mesmo nível de temperatura fixado no passo número 6, fixar um 2º ponto de umidade relativa e repetir os passos de números 9 e 10 respectivamente;
12. Continuar o teste
13. Para o mesmo nível de temperatura fixado no passo número 6, fixar um 3º ponto de umidade relativa e repetir os passos de números 9 e 10 respectivamente;
14. Repetir os passos do 6 ao 13 para os níveis de temperatura, 2º e 3º. Aguardar para que o “equilíbrio térmico” no sistema se estabeleça;
15. Salvar os dados em uma tabela;
16. Repetir todo o procedimento para o termopar tipo K e para o sensor AD 592 com os mesmos níveis de temperatura e umidade relativa estabelecidos anteriormente;
17. Fazer a correção das temperaturas (tbu) do termômetro-2 e dos sensores-2 do teste com auxílio das equações de calibração no ar;
18. Salvar os dados corrigidos em uma tabela para facilitar a sua análise.

### Resultados do teste da temperatura (tbu x UR) pela análise de variância (ANOVA)

**Tabela 5** Resultado do teste (tbu x UR) obtido pela ANOVA

Anova: fator duplo sem repetição							
<i>RESUMO</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>			
Linha 1	4	237,66	59,415	4,7287			
Linha 2	4	281,24	70,31	4,487533			
Linha 3	4	329,68	82,42	14,29787			
Linha 4	4	186,58	46,645	7,057767			
Linha 5	4	241,96	60,49	10,97387			
Linha 6	4	318,5	79,625	24,43457			
Linha 7	4	135,11	33,7775	2,272492			
Linha 8	4	193,91	48,4775	6,436158			
Linha 9	4	315,23	78,8075	25,78509			
Coluna 1	9	565,27	62,80778	284,976			
Coluna 2	9	533,22	59,24667	264,2926			
Coluna 3	9	546,55	60,72778	267,9049			
Coluna 4	9	594,83	66,09222	342,2169			
ANOVA							
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>	

Linhas	9211,364	8	1151,42	433,415	4,97E-24	2,35508
Colunas	237,6632	3	79,22105	29,82021	2,9E-08	3,008786
Erro	63,75896	24	2,656623			
Total	9512,786	35				

## **ANEXO VI**

### **Materiais, equipamentos e procedimentos utilizados na calibração dos termômetros de mercúrio e dos sensores PT100 em banho com água, tabela de dados experimentais para a calibração e tabelas de resultados da ANOVA**

#### **Materiais e equipamentos:**

##### **Qti**

##### **Descrição**

- (1) - Termômetro de mercúrio em vidro (referência): Faixa de temp.(-10 a 52 °C)
- (2) - Termômetro de mercúrio em vidro: Faixa de temp.:(-10 a 52 °C)
- (3) - Sensor PT100: Faixa de temp.:(-150 a 650 °C)
- (1) - HP- Data Acquisition : HP - 34970 A
- (1) - Software HP benc Link data logger
- (1) - CPP:Controlador de Processos Programável - Novus 8000
- (1) - Computador PC compatível
- (1) - Banho termostático de água
- (2) - Quatro metros de cabo com quatro fios 22 AWG (0.64mm): sensores PT100
- (1) - Seis metros de cabo com três fios 26 AWG (0.40mm): sensor PT100 do banho
- (2) - Gelo picado de 3kg

#### **Procedimentos para a calibração:**

1. Introduzir no banho de água os sensores PT100 S1 e S2 e os termômetros de mercúrio T1, T2 e Tref (Os elementos sensíveis de todos os sensores devem estar muito próximos uns dos outros)

2. Colocar gelo picado no banho de água para levar a temperatura até próxima de 0 °C;
3. Ligar a bomba para a água misturar e circular pelo recipiente de teste;
4. Aguardar aproximadamente 30 minutos para que o sistema banho / sensores /termômetros possam entrar em “equilíbrio térmico”;
5. Configurar o HP via computador para fazer as leituras das temperaturas (sensores PT100: S1 e S2);
6. Fazer a 1ª leitura visual nos termômetros T1 , T2 e Tref “simultaneamente” com a aquisição automática via HP dos sensores PT100;
7. Fazer novas leituras a cada novo “patamar de estabilidade”. Para temperaturas abaixo e acima da ambiente, usar o controlador de processos programável (CPP) para monitorar o aquecimento do banho;
8. Salvar os dados e armazená-los em uma tabela;
9. Fazer o ajuste de curvas dos sensores de temperatura em função do termômetro de referência Tref, usando a planilha de ajuste que segue elaborada no Excel.

**Tabela 6** Dados obtidos experimentalmente dos termômetros T1 e T2 e dos sensores PT100, S1 e S2 na água, em relação ao termômetro de referência Tref.

Tref (°C)	T1 (°C)	T2 (°C)	S1 (°C)	S2 (°C)
0,2	0,3	0,3	0,30	0,49
0,3	0,3	0,3	0,33	0,53
0,3	0,4	0,4	0,35	0,54
0,4	0,5	0,5	0,42	0,63
0,4	0,5	0,5	0,45	0,64
0,6	0,6	0,7	0,52	0,72
0,7	0,8	0,8	0,76	0,94
1,0	1,1	1,1	0,98	1,19
1,2	1,3	1,4	1,31	1,50
1,8	1,8	1,9	1,85	2,01
2,5	2,6	2,6	2,51	2,69
3,2	3,3	3,3	3,16	3,34
3,8	3,9	4,0	3,81	3,97
4,5	4,6	4,6	4,45	4,60
5,1	5,2	5,3	5,07	5,22
5,7	5,8	5,9	5,70	5,83
6,4	6,5	6,5	6,31	6,43
6,9	7,0	7,1	6,91	7,03
7,5	7,6	7,6	7,49	7,60
10,6	10,7	10,7	10,65	10,61
13,4	13,5	13,5	13,35	13,39
15,4	15,5	15,5	15,30	15,31
17,4	17,5	17,5	17,28	17,28
19,2	19,3	19,4	19,14	19,11
21,2	21,3	21,3	21,10	21,05
23,2	23,3	23,3	23,09	23,02
25,1	25,2	25,2	24,95	24,86
27,0	27,1	27,1	26,88	26,80
28,0	28,1	28,0	27,82	27,74
30,0	30,1	30,1	29,87	29,78
31,9	32,0	31,9	31,71	31,63
33,8	34,0	33,9	33,56	33,47
35,7	36,0	35,9	35,49	35,39
37,5	37,7	37,6	37,15	37,02
39,5	39,8	39,7	39,39	39,25
41,7	42,0	41,9	41,55	41,42
43,7	44,0	43,9	43,59	43,42
45,5	45,9	45,8	45,44	45,28
47,6	47,9	47,8	47,54	47,25
49,8	50,2	50,1	49,52	49,24
50,0	50,3	50,3	50,00	49,68

## ***ANEXO VII***

**Materiais, equipamentos e procedimentos utilizados na calibração dos termômetros de mercúrio e dos sensores PT100 no ar (Seção de Teste), tabela de dados para calibração e tabela de resultados da ANOVA**

### **Materiais e Equipamentos:**

#### **Quantidade**

#### **Descrição**

- (1) - Termômetro de mercúrio em vidro (referência): Faixa de temp.(-10 a 52 °C),
- (2) - Termômetro de mercúrio em vidro- Faixa de temp.:(-10 a 52 °C)
- (3) - Sensor PT100- Faixa de temp.:(-150 a 650 °C)

- (2)- Sensor AD592- Faixa de temp.: ( -25 a 105 °C)
- (2)- Termopar tipo K (cromel/alumel) - Faixa de temp.: (-270 a 1372 °C)
- (1) - HP- Data Acquisition : HP - 34970 A
- (1) - Software HP benc Link data logger
- (1) - CPP – Controlador de Processos Programável -Novus 8000
- (1) - Computador PC- compatível
- (1) - Medidor de velocidade com tubo de Pitot- Faixa de veloc.: (0 a 45m/s)
- (1) - Banho termostático de água
- (1) - Relé de estado sólido para 25 A para controle do aquecimento do banho
- (2) - Quatro metros de cabo com quatro fios 22 AWG (0.64mm): sensores PT100
- (2) - Quatro metros de extensão com dois fios 22 AWG (0.64mm): termopares tipo K
- (1) - Quatro metros de cabo com quatro fios 26 AWG (0.40mm): sensores AD592
- (1) - Quatro metros de cabo com três fios 26 AWG (0.40mm): sensor PT100 do banho
- (2) - Gelo picado de 3kg

#### **Procedimentos para a calibração:**

1. Montar o sistema (Veja figs. 3.2, 3,4 e 3.5);
2. Montar na Seção de Teste, os sensores e termômetros de mercúrio (Veja figs. 3.4 e 3.5);
3. Colocar gelo no banho de água para levar a temperatura até próxima de 0 °C;
4. Ligar a bomba para a água circular pelo trocador de calor;
5. Aguardar aproximadamente 30 minutos para que o sistema, tubulação/sensores /termômetros possam entrar em “equilíbrio térmico”;
6. Configurar o HP via computador para fazer as leituras das temperaturas (sensores PT100, S1 e S2);
7. Fazer a 1ª leitura visual nos termômetros (T1 , T2 e Tref) “simultaneamente” com a aquisição automática via HP dos sensores PT100, S1 e S2;
8. Fazer novas leituras a cada novo “patamar de estabilidade”. Para temperaturas abaixo e acima da ambiente, usar o controlador CPP para monitorar o aquecimento do banho;
9. Salvar os dados e armazená-los em uma tabela;
10. Fazer o ajuste de curvas dos termômetros T1 e T2 e dos sensores S1 e S2 em função do termômetro de referência na planilha de ajuste de curvas no Microsoft Excel;

11. Encontrar as equações de correção (calibração) para os termômetros T1 e T2 e para os sensores S1 e S2 em relação ao termômetro de referência com as suas respectivas incertezas de medição;
12. Para a calibração dos demais sensores, AD592 e termopar K, seguir o mesmo procedimento deste apêndice.

**Tabela 7a** Dados obtidos experimentalmente para a calibração dos termômetros T1 e T2 e dos sensores PT100, S1 e S2 no ar, em relação ao termômetro de referência Tref

T1 (°C)	T2 (°C)	S1 (°C)	S2 (°C)	Tref (°C)
6,0	5,8	6,69	7,10	5,7
6,6	6,4	7,18	7,61	6,2
7,6	7,4	8,08	8,50	7,3
8,1	8,1	8,74	9,15	7,9
9,0	8,9	9,51	9,90	8,7
9,6	9,5	10,11	10,45	9,3
11,2	11,1	11,68	11,99	11,0
11,9	11,8	12,29	12,60	11,6
12,5	12,4	12,95	13,24	12,3
13,4	13,3	13,80	14,07	13,2
14,8	14,7	15,15	15,41	14,6
15,7	15,6	16,02	16,26	15,5

16,4	16,3	16,66	16,88	16,2
17,4	17,3	17,62	17,83	17,2
18,4	18,7	18,94	19,13	18,6
20,3	20,2	20,50	20,65	20,2
22,1	22,1	22,23	22,34	22,0
23,1	23,0	24,97	25,02	23,0
25,0	25,0	26,51	26,52	24,9
26,6	26,6	28,27	28,24	26,5
28,5	28,4	29,98	29,93	28,3
30,2	30,2	31,65	31,58	30,1
31,9	31,9	32,91	32,79	31,8
33,5	33,4	34,68	34,57	33,4
35,2	34,8	36,00	35,86	35,0
36,6	36,0	37,34	37,15	36,4
38,0	37,9	38,71	38,49	37,8
39,4	39,4	40,32	40,06	39,2
41,1	41,1	42,00	41,69	40,9
43,0	42,9	43,70	43,36	42,7
44,7	44,7	45,76	45,38	44,4
50,5	50,5	49,10	48,63	50,1

Nota: (1) Temperatura ambiente no dia da coleta de dados: 33,5 °C

(2) Velocidade média do ar na tubulação: 3,75 m/s

**Tabela 7b** Dados obtidos experimentalmente para a calibração dos sensores AD592, S1 e S2 e dos termopares, 1 e 2, no ar, em relação ao termômetro de referência Tref

Termômetro Tref (°C)	SENSOR AD592		TERMOPAR TIPO K		
	S1(°C)	S2(°C)	Tref(°C)	Termopar 1(°C)	Termopar 2(°C)
5,1	6,76	7,39	4,8	3,92	4,07
6,0	7,66	8,20	5,2	4,31	4,41
7,5	8,98	9,47	5,8	5,06	5,20
8,5	10,02	10,49	7,2	6,43	6,55
9,5	10,97	11,37	8,5	7,71	7,84
10,5	11,98	12,31	9,9	9,12	9,27
12,5	13,81	14,10	11,4	10,72	10,87
13,5	14,85	15,10	13,2	12,44	12,58
15,0	16,28	16,47	14,9	14,17	14,3
16,5	17,76	17,89	15,9	15,04	15,21
18,0	19,22	19,28	17,3	16,36	16,52
19,5	20,63	20,70	18,6	17,86	18,00
21,0	22,11	22,10	20,5	19,68	19,75
22,5	23,58	23,56	22,0	21,31	21,46
24,1	25,13	25,08	23,7	23,05	23,24
25,5	26,46	26,39	25,4	24,73	24,93

27,0	27,96	27,86		27,0	26,39	26,57
28,5	29,37	29,26		28,6	27,95	28,13
30,0	30,84	30,65		29,1	28,37	28,51
31,5	32,34	32,07		30,6	29,94	30,13
32,5	33,29	32,99		32,4	31,84	32,02
34,0	34,69	34,36		34,3	33,77	33,97
35,5	36,15	35,75		36,0	35,38	35,64
37,0	37,54	37,07		37,6	36,95	37,18
38,5	38,98	38,48		39,2	38,60	38,84
40,0	40,41	39,82		40,8	40,02	40,29
41,5	41,87	41,22		42,3	41,49	41,81
43,0	43,39	42,63		43,6	42,77	43,12
44,6	44,92	44,09		44,8	44,02	44,35
46,0	46,28	45,37		46,2	45,37	45,72
47,5	47,78	46,77		47,7	46,92	47,28
49,0	49,26	48,20		48,0	47,17	47,52
50,0	50,25	49,08		48,8	48,12	48,50

Nota: (1) Temperatura ambiente no dia da coleta de: 26,5 °C

(2) Velocidade média do ar na tubulação: 3,75 m/s

**Tabela 7c** Valores de temperatura dos termômetros T1 e T2 e dos sensores PT100 S1 e S2, obtidos no ar (Seção de Teste) e corrigidos com as equações de calibração na água (banho), em comparação aos valores obtidos do termômetro Tref no ar

T1 (°C)	T2 (°C)	S1 (°C)	S2 (°C)	Tref (°C)
5,93	5,69	6,73	7,03	5,7
6,53	6,29	7,22	7,55	6,2
7,52	7,29	8,12	8,45	7,3
8,02	7,99	8,78	9,10	7,9
8,92	8,78	9,56	9,86	8,7
9,51	9,38	10,16	10,42	9,3
11,11	10,98	11,73	11,98	11,0
11,80	11,68	12,35	12,60	11,6
12,40	12,28	13,01	13,24	12,3
13,29	13,18	13,86	14,08	13,2
14,69	14,57	15,22	15,44	14,6
15,58	15,47	16,09	16,30	15,5
16,28	16,17	16,73	16,93	16,2
17,27	17,17	17,69	17,89	17,2
18,27	18,57	19,02	19,21	18,6
20,16	20,06	20,08	20,74	20,2
21,95	21,96	22,32	22,46	22,0
22,94	22,86	25,07	25,17	23,0
24,83	24,85	26,62	26,69	24,9

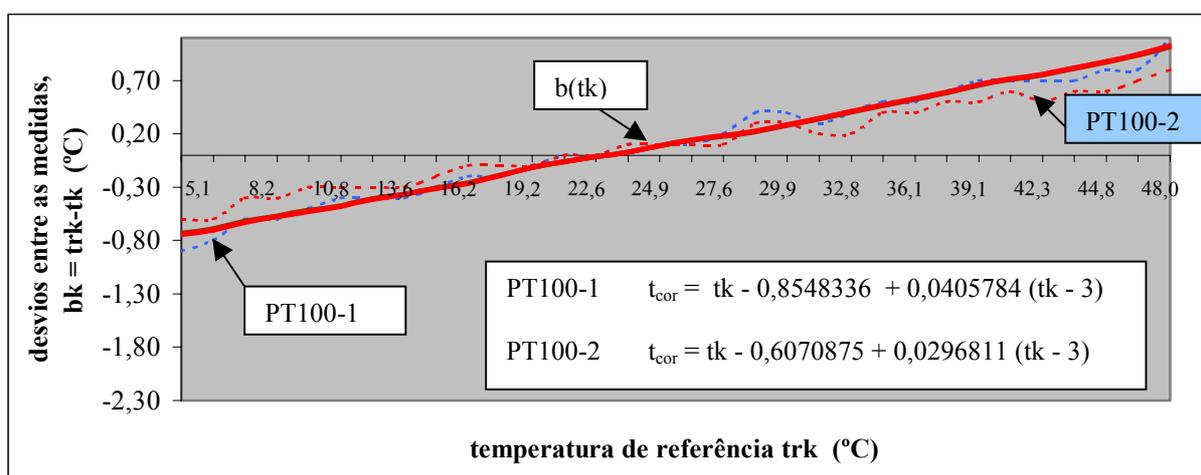
26,42	26,45	28,38	28,43	26,5
28,31	28,25	30,10	30,14	28,3
30,00	30,04	31,77	31,81	30,1
31,69	31,74	33,04	33,03	31,8
33,28	33,24	34,81	34,83	33,4
34,98	34,63	36,14	36,14	35,0
36,37	35,83	37,48	37,45	36,4
37,76	37,92	42,16	42,04	37,8
39,15	39,22	40,47	40,39	39,2
40,84	40,92	42,16	42,04	40,9
42,73	42,72	43,87	43,73	42,7
44,42	44,51	45,93	45,78	44,4
50,19	50,30	49,28	49,07	50,1

### Resultados das Calibrações pela ANOVA

**Tabela 7.1a** Resultados obtidos pela ANOVA para comparar as calibrações dos sensores PT100 e dos termômetros de mercúrio, na água e no ar

Anova: fator único						
RESUMO						
<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>		
Coluna 1	32	743,1476	23,22336	164,277		
Coluna 2	32	740,9775	23,15555	165,7114		
Coluna 3	32	775,9504	24,24845	172,4378		
Coluna 4	32	780,0045	24,37514	168,1282		
Coluna 5	32	742	23,1875	166,2044		
ANOVA						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	48,75715	4	12,18929	0,072836	0,990265	2,429999
Dentro dos grupos	25939,52	155	167,3518			
Total	25988,28	159				

A figura abaixo ilustra a nova calibração dos sensores PT100 S1 e S2 na Seção de Teste



**Figura 7.1** Desvio entre a temperatura de referência  $tr_k$  e as temperaturas lidas  $t_k$ , dada por  $b_k$ , e as curvas de correção dos valores lidos  $t_k$ , dada por  $b(tk)$ , obtidas pelo ajuste dos desvios  $b_k$ .

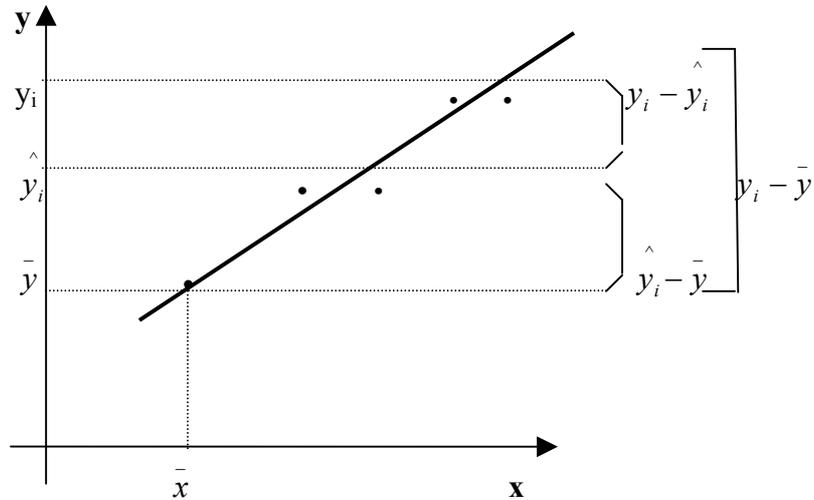
## ANEXO VIII

### 1 METODOLOGIA DE ANÁLISE DE ESTATÍSTICA

#### 1.1 Análise de variância (ANOVA)

O exame dos resíduos é fundamental na avaliação da qualidade do ajuste de qualquer modelo. Um modelo que deixe resíduos consideráveis é obviamente um modelo ruim. O modelo ideal não deixaria resíduo algum: todas as suas previsões (ou predições, como se

diz na estatística) coincidiriam com os resultados observados [Barros, Scarmínio e Bruns, 1995]



**Figura 1.1** Decomposição do desvio em relação à média global,  $(y_i - \bar{y})$ , na soma das parcelas  $(y_i - \hat{y}_i)$  e  $(\hat{y}_i - \bar{y})$ .

O procedimento usual de avaliação do desempenho de um modelo começa pela análise dos desvios das observações em relação à média global. Como se mostra na figura anterior, o desvio de um valor observado em relação à média de todas as observações,  $(y_i - \bar{y})$ , pode ser decomposto em duas parcelas:

$$(y_i - \bar{y}) = (\hat{y}_i - \bar{y}) + (y_i - \hat{y}_i) \quad (1.1)$$

A primeira parcela,  $(\hat{y}_i - \bar{y})$ , representa o afastamento da previsão do modelo para o ponto em questão,  $\hat{y}_i$  em relação à média global,  $\bar{y}$ . A segunda parcela é a diferença entre o valor observado e o valor previsto. Num modelo bem ajustado essa diferença deve ser pequena, o que significa dizer, em termos da equação 1.1, que o desvio  $(y_i - \bar{y})$  deve ser aproximadamente igual ao desvio  $(\hat{y}_i - \bar{y})$ . Isso é outra maneira de dizer que as previsões estão em boa concordância com as observações.

Esta comparação de desvios pode ser colocada em termos quantitativos. Para isso a primeira coisa a fazer é elevar a equação 1.1 ao quadrado e em seguida fazer o somatório sobre todos os pontos:

$$\sum (y_i - \bar{y})^2 = \sum [(\hat{y}_i - \bar{y}) + (y_i - \hat{y}_i)]^2$$

$$\sum (y_i - \bar{y})^2 = \sum (\hat{y}_i - \bar{y})^2 + 2\sum (\hat{y}_i - \bar{y})(y_i - \hat{y}_i) + \sum (y_i - \hat{y}_i)^2$$

Pode-se demonstrar que o somatório dos produtos  $(\hat{y}_i - \bar{y})(y_i - \hat{y}_i)$  é igual a zero, o que reduz a equação a

$$\sum (y_i - \bar{y})^2 = \sum (\hat{y}_i - \bar{y})^2 + \sum (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (1.2)$$

Estas somas de quadrados de desvios costumam ser chamadas de somas quadráticas, ou, abreviadamente, - S. Q. Com essa terminologia a equação 1.2 pode ser lida assim:

$$[\text{S.Q. em torno da média}] = [\text{S.Q. devido à regressão}] + [\text{S.Q. residual}]$$

ou então, numa notação mais compacta,

$$SQ_T = SQ_R + SQ_r$$

quer dizer: uma parte da variação total das observações  $y_i$  em torno da média é descrita pela equação de regressão, e o restante fica por conta dos resíduos. Quanto maior for a fração descrita pela regressão, melhor será ajuste do modelo. Isso pode ser quantificado por meio da razão

$$R^2 = \frac{SQ_R}{SQ_T} = \frac{\sum (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2} \quad (1.3)$$

onde  $R^2$  é regressão em torno da média.

O maior valor possível para  $R^2$  obviamente é um, e ele só ocorrerá, se não houver resíduo algum e portanto toda a variação em torno da média for explicada pela regressão. Quanto mais perto de um estiver o valor de  $R^2$ , melhor terá sido o ajuste do modelo aos dados observados. Os valores previstos pela reta de regressão são dados pela equação  $\hat{y}_i = b_0 + b_1 X_i$ . Sendo

$b_0 = \bar{y} - b_1 \bar{X}$ , a equação fica melhor representada por

$$\hat{y}_i = \bar{y} + b_1 (X_i - \bar{X}) \quad (1.4)$$

onde,

$\hat{y}_i$  é o valor previsto;

$b_0$  é o coeficiente linear da reta;

$b_1$  é o coeficiente angular da reta;

$X_i$  é a variável independente observada;

$\bar{X}$  é o valor médio da variável independente observada.

Cada soma quadrática tem associado a si um certo número de graus de liberdade, que indica quantos valores independentes envolvendo as  $n$  observações  $y_1, y_2 \dots y_n$  são necessários para determiná-la. Para a soma quadrática dos  $n$  desvios em relação à média o número de graus de liberdade é  $(n-1)$  e não  $n$ , porque a soma dos desvios,  $\sum (y_i - \bar{y})$ , é nula, e isso consome um grau de liberdade.

Para chegar ao número de graus de liberdade de  $SQ_R$  partimos da equação 1.4 e vemos que a soma quadrática devida à regressão é dada por

$$\sum (\hat{y}_i - \bar{y})^2 = b_1^2 \sum (X_i - \bar{X})^2 \quad (1.5)$$

O somatório  $\sum (X_i - \bar{X})^2$  é fixado a priori (os  $X_i$ 's não são variáveis aleatórias), e portanto o valor de  $\sum (\hat{y}_i - \bar{y})^2$  é completamente determinado por um único número, o valor de  $b_1$ . Isso não significa, é claro, que  $b_1$  seja também uma variável fixa. O seu valor depende das respostas obtidas experimentalmente, que são variáveis aleatórias.. A existência dos erros experimentais fará com que uma outra série de experimentos idênticos, realizados nas mesmas condições (mesma grandeza observada), produza rendimentos diferente e leve a um novo valor de  $b_1$ . Com esse único valor, no entanto, o somatório  $\sum (\hat{y}_i - \bar{y})^2$  estará determinado.

Estas considerações mostram que a soma quadrática devida à regressão tem apenas um grau de liberdade. Como o número total de graus de liberdade é  $(n-1)$ , a soma quadrática residual,  $\sum (y_i - \hat{y}_i)^2$ , deve ter  $(n - 2)$  graus de liberdade, para que o número seja o mesmo nos dois lados da equação 1.2:

$$\begin{aligned} v_T &= v_R + v_r, \\ (n-1) &= 1 + (n-2) \end{aligned}$$

Essa equação reflete o fato de que o nosso, modelo contém apenas dois parâmetros  $\beta_0, \beta_1$ . Em geral o número de graus de liberdade da soma quadrática residual é a diferença entre, o número de observações e o número de parâmetros estimados, isto é,  $v_r = (n - p)$ . O número de

graus de liberdade da soma quadrática devida à regressão é o número de parâmetros menos um,  $v_R = (p - 1)$ .

onde,

$v_r$  é o número de graus de liberdade da soma quadrática residual;

$v_R$  é o número de graus de liberdade da soma quadrática devida a regressão.

Para o caso particular de um modelo com apenas dois parâmetros, como em nosso exemplo, os resultados desta seção encontram-se reunidos na tabela que segue, que é a chamada tabela de análise da variância (ou simplesmente ANOVA, um acrônimo de *Analysis of Variance*).

Dividindo as somas quadráticas pelos seus respectivos números de graus de liberdade obtemos as chamadas médias quadráticas (MQ), que são mostradas na última coluna da tabela que segue.

**Tabela 1.1** Tabela de análise da variância para o ajuste de um modelo linear com dois parâmetros [Barros, Scarmínio e Bruns, 1995]

<i>Fonte de variação</i>	<i>Soma Quadrática</i>	<i>Nº de graus de lib.</i>	<i>Média Quadrática</i>
<i>Regressão</i>	$\sum (\hat{y}_i - \bar{y})^2$	<b>1</b>	<b>MQ<sub>R</sub> = SQ<sub>R</sub></b>
<i>Resíduos</i>	$\sum (y_i - \hat{y}_i)^2$	<b>n-2</b>	<b>MQ<sub>r</sub> = SQ<sub>r</sub> / (n- 2) = s<sup>2</sup></b>
<i>Total</i>	$\sum (y_i - \bar{y})^2$	<b>n -1</b>	

onde  $s^2$  é a variância residual em torno da regressão. Por enquanto isso é apenas uma decomposição algébrica da soma quadrática total. Logo veremos que, dentro de certas suposições, as médias quadráticas passam a ter uma interpretação estatística. Isso nos permitirá submetê-las a testes e utilizá-las no cálculo de intervalos de confiança.

A soma quadrática residual, SQ<sub>r</sub>, representa a parte da variação das respostas em torno da média que fica fora da regressão. Dividindo-a por  $v_r$  obtemos a média quadrática residual, que é uma estimativa, com  $n-2$  graus de liberdade, da variância dos pontos em torno da equação de regressão, isto é, em torno do modelo ajustado. Essa estimativa é uma medida aproximada do erro médio (quadrático) cometido ao se usar a equação de regressão para prever o valor de  $y$  correspondente a um dado valor de  $X$ .

## 1.2 Intervalos de confiança

Ao postular o modelo (Equação  $y_i = \beta_o + \beta_1 X_i + \varepsilon_i$ ), admitimos que cada observação  $y_i$  é constituída de uma parte sistemática,  $\beta_o + \beta_1 X_i$ , e de uma parte aleatória,  $\varepsilon_i$ . Suponhamos que o modelo seja correto, isto é, que a sua parte sistemática represente fielmente a relação existente entre as variáveis  $y$  e  $X$ . Nesse caso, ao determinarmos um grande número de respostas repetidas correspondentes ao mesmo valor  $X_i$ , deveremos observar uma distribuição dos valores  $y_i$  em torno do valor  $\beta_o + \beta_1 X_i$ . Esse valor, portanto, nada mais é que a *média* dos valores observados no ponto  $X_i$ . Mesmo que o modelo esteja correto, no entanto, a flutuação das respostas introduz incerteza na determinação dos parâmetros e nas previsões feitas a partir dele. Nesta seção mostraremos como, fazendo algumas suposições acerca do comportamento dos erros  $\varepsilon_i$ , podemos quantificar essa incerteza e determinar intervalos de confiança para os valores estimados. Se o modelo é correto, ou seja, se o verdadeiro valor médio de  $y_i$  é mesmo  $\beta_o + \beta_1 X_i$ , devemos esperar que observações realizadas repetidamente no mesmo ponto  $x_i$  se distribuam simetricamente em torno do valor  $\beta_o + \beta_1 X_i$ , com desvios positivos sendo tão frequentes quanto desvios negativos, de tal maneira que a média dos erros  $\varepsilon_i$  seja zero. Num dado valor  $X_i$  os erros em  $y_i$  se distribuirão com uma certa variância  $\sigma_i^2$ , que em princípio varia com  $X_i$ . No entanto, nas nossas deduções adiante vamos admitir que essa variância é constante e igual a um certo valor  $\sigma^2$  ao longo de toda a faixa estudada. A esta hipótese costuma-se dar o nome de *homoscedasticidade* das observações. Admitiremos ainda que os erros correspondentes a observações realizadas em valores diferentes da variável independente não são correlacionados, isto é, admitiremos que  $Cov(\varepsilon_i, \varepsilon_j) = 0$ , se  $i \neq j$ . Como a única parte de  $y_i$  que é aleatória é o erro  $\varepsilon_i$ , dessas hipóteses também decorre que  $V(y_i) = \sigma^2$  e  $Cov(y_i, y_j) = 0$ , se  $i \neq j$ . Finalmente, como última suposição sobre erros, admitiremos que eles seguem uma distribuição normal,  $N$ . Na maioria das situações reais, esta é uma boa aproximação, graças ao teorema do limite central (não será demonstrado nesse trabalho) e ao esforço que o pesquisador consciencioso faz para eliminar os erros sistemáticos de suas experiências. Essas hipóteses a respeito do comportamento dos erros aleatórios podem ser resumidas nas expressões

$$\varepsilon_i \approx N(0, \sigma^2) \text{ e } Cov(\varepsilon_i, \varepsilon_j) = 0, \quad (1.6a)$$

ou, equivalentemente,

$$y_i \approx N(\beta_o + \beta_1 X_i, \sigma^2) \text{ e } Cov(y_i, y_j) = 0 \quad (1.6b)$$

onde  $\sigma^2$  é a variância populacional. Com essas suposições estamos finalmente em condições de determinar intervalos de confiança para os resultados do modelo. Sendo que o coeficiente angular da reta de regressão pode ser escrito como

$$b_1 = \frac{[\sum (X_i - \bar{X})y_i]}{S_{xx}},$$

ou seja, como uma combinação linear das variáveis aleatórias  $y_i$ , com coeficientes  $\frac{(X_i - \bar{X})}{S_{xx}}$ :

$$b_1 = \left[ \frac{(X_1 - \bar{X})}{S_{xx}} \right] y_1 + \dots + \left[ \frac{(X_n - \bar{X})}{S_{xx}} \right] y_n$$

Como por hipótese os  $y_i$ 's, além de não serem correlacionados, têm variância constante, podemos aplicar a equação 1.4 e escrever

$$V(b_1) = \left[ \frac{(X_1 - \bar{X})}{S_{xx}} \right]^2 V(y_1) + \dots + \left[ \frac{(X_n - \bar{X})}{S_{xx}} \right]^2 V(y_n)$$

$$V(b_1) = \left[ \frac{\sum (X_i - \bar{X})^2}{S_{xx}^2} \right] \sigma^2,$$

$$V(b_1) = \frac{\sigma^2}{S_{xx}} \quad , \quad (1.7)$$

já que  $\sum (X_i - \bar{X})^2 = S_{xx}$ .

Admitindo agora que o valor de  $s^2$ , a variância residual em torno da regressão, seja uma boa estimativa de  $\sigma^2$ , podemos obter uma estimativa do desvio padrão de  $b_1$ , ou o *erro padrão* de  $b_1$ , tirando a raiz quadrada da equação 1.7 e substituindo  $\sigma$  por  $s$ :

$$\text{erro padrão de } b_1 = \frac{s}{(S_{xx})^{1/2}} \quad . \quad (1.8)$$

### 1.3 Significância estatística da regressão

Agora que admitimos que os erros seguem uma distribuição normal, podemos voltar à análise da variância e usar as médias quadráticas para testar se a equação de regressão é estatisticamente significativa. Quando  $\beta_I = 0$ , isto é, quando não há relação entre  $X$  e  $y$ , pode-se demonstrar que a razão entre as médias quadráticas  $MQ_R$  e  $MQ_r$  segue uma distribuição  $F$ :

$$\frac{MQ_R}{MQ_r} \approx F_{1, n-2}, \quad (1.9)$$

onde  $I$  e  $n-2$  são os números de graus de liberdade da média quadrática devida à regressão e da média quadrática residual, respectivamente. Como a equação 1.9 só vale para  $\beta_I = 0$ , podemos testar essa hipótese nula usando o valor efetivamente calculado para  $MQ_R / MQ_r$ . Para isso basta compará-lo com o valor tabelado de  $F_{1, n-2}$  no nível de confiança desejado (ver tabela que segue): Pontos de percentagem da distribuição  $F$ , 5 % com 95 % (de confiança). Se verificarmos que  $MQ_R / MQ_r$  é maior que o valor de  $F_{1, n-2}$ , a possibilidade de que  $\beta_I = 0$  deve ser descartada. Em outras palavras, nesse caso teríamos evidência estatística suficiente para nos fazer acreditar na existência de uma relação linear entre as variáveis  $y$  e  $X$ . Quanto maior o valor de  $MQ_R / MQ_r$ , melhor [Barros, Scarmínio e Bruns, 1995].

**Tabela 1.2** Fator  $F$ , com 95% de Confiança (Ribeiro, J.L.D, 1996, “Projeto de Experimentos na Otimização de Produtos e Processos”, PPGEP/UFRGS)

Para exemplificar de como se verifica o valor de  $F$  (ver tabela 1.2), precisamos do valor de  $F_{1,n-2}$ , que pode ser lido na interseção da coluna. Por exemplo, se  $v_1 = 1$  com a linha correspondendo a  $v_2 = 3$ , isto para  $n = 5$ . Lá se vê que no nível de 95% de confiança o valor procurado igual a 10,13. Isso quer dizer que será necessário que  $MQ_R / MQ_r > F_{1,n-2}$  para que possamos dizer que nossa regressão é estatisticamente significativa. Caso contrário, não teremos razão para duvidar que o valor de  $\beta_1$  seja mesmo zero e que portanto não haja relação entre as variáveis. Pode acontecer, porém, que uma regressão, embora significativa do ponto de vista do teste  $F$ , não seja útil para realizar previsões, por cobrir uma faixa de variação pequena dos fatores estudados. Sugeriu-se Box e Wetz, 1973 [apud Barros, Scarmínio e Bruns, 1995] que para que isso não ocorra, isto é. para que uma regressão seja não apenas estatisticamente significativa mas também útil para fins preditivos, o valor da razão  $MQ_R / MQ_r$  deve ser no mínimo de quatro a cinco vezes o valor de  $F_{1,n-2}$ . Essa condição também é amplamente satisfeita.

## 1.4 Aplicação do método da análise de variância (ANOVA)

### 1.4.1 Formulação matemática do problema

$$\Rightarrow \text{Modelo estatístico:} \quad x_{ij} = \mu + \alpha_j + \varepsilon_{ij} \quad (1.10)$$

onde,

$x_{ij}$  = valor individual da variável;

$\mu$  = média geral;

$\alpha_j$  = efeito do grupo  $j$ ;

$\varepsilon_{ij}$  = é um erro aleatório.

$\Rightarrow$  *Hipóteses:*

$H_0$ : não há diferenças significativas entre os grupos;

$H_1$ : há diferenças significativas entre os grupos;

$\Rightarrow$  *Decomposição dos resíduos:*

$$(x_{ij} - x_{m..}) = (x_{m.j} - x_{m..}) + (x_{ij} - x_{m.j}) \quad (1.11)$$

onde,

$x_{m..}$  = média global;

$x_{m.j}$  = média do grupo.

$\Rightarrow$  *Elevando ao quadrado e somando a decomposição dos resíduos:*

$$\begin{aligned} \sum (x_{ij} - x_{m..})^2 &= \sum (x_{m.j} - x_{m..})^2 + \sum (x_{ij} - x_{m.j})^2 \\ \text{SQT} &= \text{SQG} + \text{SQR} \end{aligned} \quad (1.12)$$

onde,

SQT = soma quadrática total;

SQG = soma quadrática entre grupos,

SQR = soma quadrática dos resíduos dentro dos grupos.

$\Rightarrow$  *Graus de liberdade:*

$$(N - 1) = (K - 1) + (N - K) \quad (1.13)$$

onde,

N= número total de observações;

K= número de níveis.

⇒ *Médias quadráticas:*

$$MQG = \frac{SQG}{(K-1)} \quad (1.14)$$

$$MQR = \frac{SQR}{(N-K)} \quad (1.15)$$

onde,

MQG = média quadrática dos grupos;

MQR = média quadrática dos resíduos.

⇒ Teste F: A equação 1.9 fica

$$F = \frac{MQG}{MQR} \quad (1.16)$$

onde F é um fator da distribuição

- O Teste F compara o valor de F calculado com o valor de F<sub>c</sub> tabelado (valor crítico). Se o valor calculado for maior que o valor tabelado (crítico), descarta-se a hipótese H<sub>0</sub> e considera-se a hipótese H<sub>1</sub>, ou seja, existem diferenças significativas entre os grupos [Ribeiro, 1996].

## **ANEXO IX**

## **2 FUNDAMENTOS DE INCERTEZA DE MEDIÇÃO**

### **2.1 Probabilidade**

#### *2.1.1 Probabilidade*

"Em engenharia nenhuma medida se faz sem erros"

Um processo aleatório é qualquer fenômeno que pode ter diferentes resultados finais, quando repetido sob condições determinadas [Vuolo, 1998]. Os resultados finais são chamados de eventos, ou ainda o agrupamento de resultados finais., tal como

$$x_1 \quad x_2 \quad x_3 \quad \dots \quad x_i \quad \dots \quad x_{m-1} \quad x_m ; \text{ para } m \text{ eventos possíveis} \quad (2.1)$$

$$(r \ r \ r \ \dots \ r \ r \ r) \ y \ \text{vezes} \ (t \ t \ t \ \dots \ t \ t \ t) \ n - y \ \text{vezes} ; \text{ para } n \ \text{repetições ou eventos.} \quad (2.2)$$

Para o primeiro caso, define-se a frequência de ocorrência do evento  $x_i$  como o número de vezes  $N(x_i)$  que ocorre  $x_i$  quando o processo é repetido  $N$  vezes, ou seja

$$\sum_{i=1}^m N(x_i) = N \quad \text{onde } 0 \leq N(x_i) \leq N \quad (2.3)$$

A frequência relativa do evento  $x_i$  é dada por

$$F(x_i) = \frac{N(x_i)}{N} \quad (2.4)$$

Se o processo for repetido para  $N \rightarrow \infty$ , espera-se que a fração acima se torne um número cada vez mais definido (lei dos grandes números), e se torne a probabilidade de ocorrência do evento  $x_i$ , definida como

$$P(x_i) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{N(x_i)}{N} = \lim_{N \rightarrow \infty} F(x_i) \quad \text{onde } 0 \leq P(x_i) \leq 1 \quad (2.5)$$

As equações 2.3 e 2.4 permitem concluir que

$$\sum_{i=1}^m F(x_i) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^m N(x_i) = 1 \quad \text{e ainda que } \sum_{i=1}^m P(x_i) = \sum_{i=1}^m F(x_i) = 1 \quad (2.6)$$

### 2.1.2 Distribuição de probabilidades

Considerando-se mais uma vez a seqüência da equação 2.1,

$$x_1 \quad x_2 \quad x_3 \quad \dots \quad x_i \dots \quad x_{m-1} \quad x_m ; \text{ para } m \text{ eventos possíveis} \quad (2.7)$$

os resultados apresentados em ordem crescente formam um conjunto onde  $x$  é chamado de variável discreta. Cada um dos possíveis valores da variável discreta  $x_i$  tem uma probabilidade  $P(x_i)$  de ocorrer, e o conjunto de  $m$  valores de  $P(x_i)$  é definido como distribuição de probabilidades para a variável discreta  $x$ . Para qualquer que seja essa distribuição, ela obedecerá à condição de normalização, dada por

$$\sum_{i=1}^m P(x_i) = 1 \quad (2.8)$$

### 2.1.3 Valor médio

Para um processo aleatório de uma variável discreta  $x$ , que se repete  $N$  vezes ( $x_1 \ x_2 \ x_3 \dots x_k \dots x_{N-1} \ x_N$ ), o valor médio de  $x$  é dado por:

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N x_k \quad (2.9)$$

Se cada resultado possível  $x_i$  ocorreu  $N(x_i)$  vezes, o valor médio  $\bar{x}$  é dado por:

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^m x_i N(x_i) = \sum_{i=1}^m x_i F(x_i) \quad (2.10)$$

pois  $N(x_i) / N$  é a frequência relativa  $F(x_i)$ . A medida que  $N \rightarrow \infty$ , o valor médio  $\bar{x}$  aproxima-se do valor médio verdadeiro ou média limite, dada por

$$\mu = \lim_{N \rightarrow \infty} \bar{x} \quad (2.11)$$

Como nessa situação a frequência relativa  $F(x_i)$  tende a  $P(x_i)$ , o valor médio verdadeiro é dado por

$$\mu = \sum_{i=1}^m x_i P(x_i) \quad (2.12)$$

Como o número  $N$  de repetições de um processo aleatório não pode ser infinito, o valor médio verdadeiro  $\mu$  é uma quantidade desconhecida. Também o valor das probabilidades  $P(x_i)$  não é conhecido exatamente na prática.

Para um caso finito de elementos, o valor médio, também chamado de "melhor valor" para uma grandeza, é dado por:

$$x_m = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad (2.13)$$

A média é:

fácil de ser calculada,

única,

sensível a todos os valores do conjunto

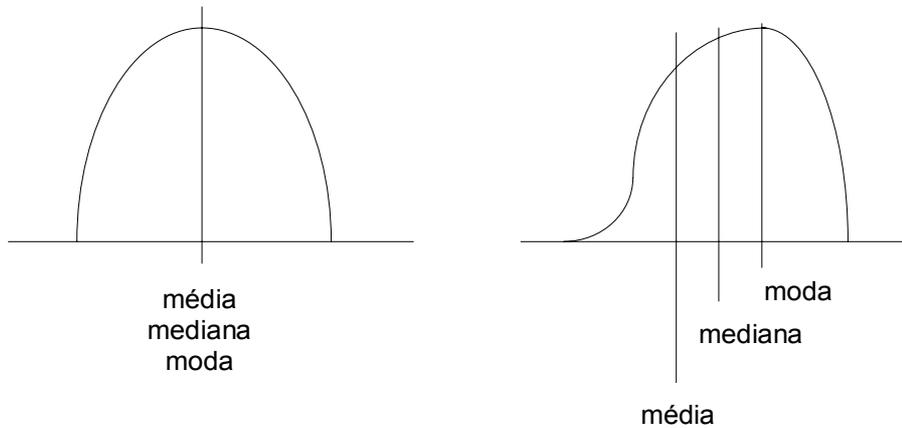
a soma de todos os valores dos desvios é nula  $\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X}) = 0$

Outras medidas:

A mediana divide em dois um grupo de dados

A moda é o valor de maior frequência.

A figura abaixo mostra sua comparação



**Figura 2.1** Média, mediana e moda

#### 2.1.4 Tipos de distribuições

Existem vários tipos de distribuições de probabilidades, que são empregados conforme o tipo de processo que se está estudando. Destacam-se as distribuições, Binomial e Poisson, indicadas para processos onde um grande número de casos idênticos é observado ( $n \gg 1$ ), com uma probabilidade  $p$  pequena ( $p \ll 1$ ).

Para a análise de dados experimentais emprega-se a função distribuição de probabilidades de Laplace-Gauss, ou simplesmente função gaussiana. A função gaussiana é amplamente utilizada para descrever erros experimentais, e por isso também é chamada de função normal de erro. Ela foi deduzida em momentos diferentes por Gauss, 1795 e por Laplace, 1812, e ajuda a entender porque as distribuições de erros tendem a ser gaussianas. As deduções, entretanto, não demonstram que os erros seguem as distribuições gaussianas, mas experimentalmente verifica-se que os eles o fazem com boa aproximação.

#### *Variável contínua e variável discreta*

Quando um processo aleatório é formado por um número muito grande de valores possíveis, como

$$x_1 \quad x_2 \quad x_3 \quad \dots \quad x_j \quad \dots \quad x_{M-1} \quad x_M; \text{ para } M \gg 1 \quad (2.14)$$

a descrição das probabilidades  $P(x_i)$ , ou das frequências  $N(x_i)$ , ou das frequências relativas  $F(x_i)$  se torna difícil ou mesmo inviável para cada  $x_i$ , pois sua determinação exigiria um número de processos repetidos  $N$ , tal que  $N \gg M$ .

O problema é contornado com a redefinição do evento, a partir de um intervalo com centro em  $x_i$  e largura  $\Delta x$ , representado por  $\{x_i; \Delta x\}$ . Por definição, ocorre o evento  $x_i$  se o resultado é uma quantidade  $x_j$  tal que

$$x_i - \frac{\Delta x}{2} \leq x_j \leq x_i + \frac{\Delta x}{2} \quad (2.15)$$

onde os valores de  $x_i$  e  $\Delta x$  devem ser tais que qualquer valor de  $x_j$  esteja incluído nesse intervalo. Destaca-se o caso em que o valor  $x$  resulta de um processo de medição, onde os valores possíveis de  $x_j$  são discretos. Mesmo quando uma grandeza física  $x$  observada seja contínua, o resultado da medição  $x_j$  de  $x$  constitui um conjunto discreto de valores.

### 2.1.5 Função densidade de probabilidade

Ainda supondo uma variável contínua, cada evento pode ser definido a partir de um intervalo  $\{x_i; \Delta x\}$ , com centro em  $x_i$  e largura  $\Delta x$ . No processo aleatório  $x$  da equação 2.13, cada evento  $x_i$  pode ocorrer com uma probabilidade  $P(x_i) \equiv \Delta P_i$ . Se  $\Delta x$  for pequeno, as probabilidades dos diferentes resultados  $x_i$  no intervalo devem ser aproximadamente iguais ( $\cong p$ ). Dessa forma, a probabilidade  $\Delta P_i$  deve ser aproximada a  $pM_i$ , onde  $M_i$  é o número de resultados possíveis no intervalo. Este número de repetições  $M_i$  é frequentemente proporcional a  $\Delta x$ , uma vez que o intervalo seja muito pequeno, e logo  $\Delta P_i$  é proporcional a  $\Delta x$ , fazendo aparecer

$$H(x_i) = \frac{\Delta P_i}{\Delta x}, \quad (2.16)$$

para  $\Delta x$  pequeno, sendo que  $H(x_i)$  é independente de  $\Delta x$ , e apenas dependente de  $x_i$ .

A função  $H(x_i)$  é conhecida como função densidade de probabilidade ou função de probabilidade. Se a função  $H(x_i)$  é conhecida, a probabilidade de ocorrer um resultado no intervalo  $\{x_i; \Delta x\}$ , com  $\Delta x$  pequeno, é dada por

$$P(x_i) \equiv \Delta P_i \cong H(x_i) \Delta x \quad (2.17)$$

Quando é possível considerar  $\Delta x \rightarrow \infty$ ,  $\Delta x$  e  $\Delta P_i$  são infinitesimais e podem ser indicados como  $dx$  e  $dP$ . Omitindo-se o índice  $i$ , a última equação é reescrita como

$$dP = H(x) dx \quad \text{ou} \quad H(x) = \frac{dP}{dx} \quad (2.18)$$

Para  $N$  repetições de um processo real, a aproximação experimental para a probabilidade  $P(x_i) \cong \Delta P_i$  é a frequência relativa  $F(x_i)$ , o que leva a

$$H_e(x_i) = \frac{F(x_i)}{\Delta x} \quad (2.19)$$

que é uma aproximação experimental para a função probabilidade em cada ponto  $x_i$ .

### 2.1.6 Valor médio e desvio padrão

A probabilidade  $P(a,b)$  de se obter um resultado  $x$  no intervalo  $a < x < b$  é obtida pela equação 2.16 para todos os valores  $x_i$  do intervalo, ou seja

$$P(a,b) = \sum_{x_i > a}^{x_i < b} P(x_i) = \sum_{x_i > a}^{x_i < b} H(x_i) \Delta x \quad (2.20)$$

No limite, com  $\Delta x \rightarrow \infty$ , a soma acima é a integral de  $H(x)$  entre  $a$  e  $b$ ,

$$P(a,b) = \int_a^b H(x) dx \quad (2.21)$$

Empregando-se a condição de normalização apresentada na equação 2.8, tem-se

$$P(-\infty, +\infty) = \int_{-\infty}^{+\infty} H(x) dx = 1 \quad (2.22)$$

O valor médio verdadeiro  $\mu$  (equação 2.12) pode ser reescrito como

$$\mu \cong \sum_{i=1}^m x_i \Delta P_i \cong \sum_{i=1}^m x_i H(x_i) \Delta x, \quad \text{que no limite com } \Delta x \rightarrow \infty \text{ é } \mu = \int_{-\infty}^{+\infty} x H(x) dx$$

0

Define-se aqui a variância  $\sigma^2$  como  $\sigma^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} (x - \mu)^2 H(x) dx$ , cujo desvio padrão é

$$\sigma = +\sqrt{\sigma^2} \quad (2.23)$$

### 2.1.7 Função gaussiana

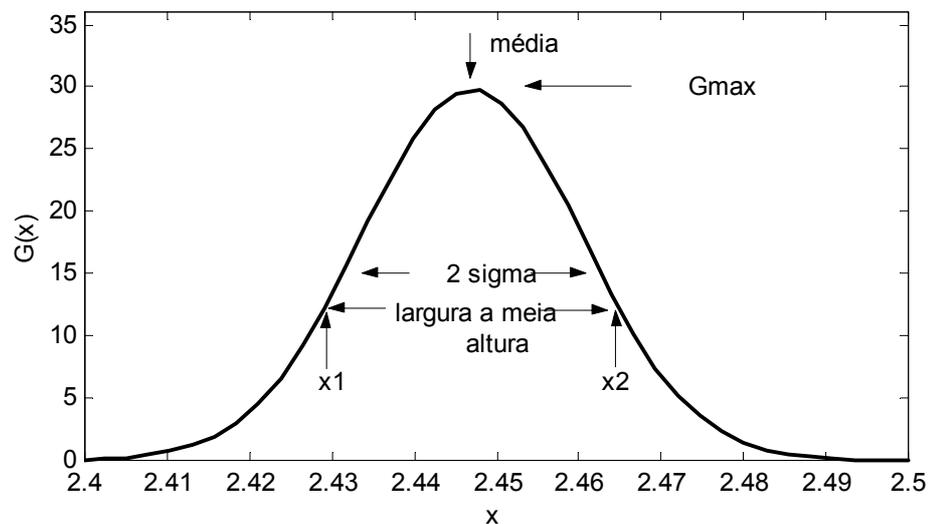
A função gaussiana de densidade de probabilidade é dada por

$$G(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad (2.24)$$

onde  $x$  é uma variável contínua e  $\mu$  e  $\sigma$  são parâmetros dados por  $\mu = \lim_{N \rightarrow \infty} \bar{x}$  com  $\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i$  e

$$\sigma = \left( \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2}{N} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.25)$$

O gráfico da função gaussiana, ou ainda função normal de erro, é dado na figura que segue:



**Figura 2.2** Distribuição normal gaussiana ou PDF com MATLAB (stats toolbox)**Tabela 2.1** Resumo de alguns aspectos referentes à figura 2.2

max = altura máxima	$\max = G(x=\mu) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}}$
largura de meia altura define os pontos $x_1$ e $x_2$	$= x_2 - x_1$ para $G(x) = G_{\max} / 2$ $x_1 = \mu - \sigma \sqrt{2 \ln 2}$ $x_2 = \mu + \sigma \sqrt{2 \ln 2}$ $= 2,3548 \sigma$
largura total teórica prática	$-\infty < x < +\infty$ $\mu - 3\sigma < x < \mu + 3\sigma$

*Funções do MATLAB*

a) A função distribuição normal de erro ou gaussiana é dada pela função NORMPDF do toolbox statistics (PDF=probability density function).

NORMPDF(x,mu,sigma) com x= vetor de dados, em ordem crescente, mu= média de x, dada por MEAN(x) e sigma= desvio padrão, dado por std(x)

b) A função DISTTOOL, onde todas as formas de distribuição podem ser graficadas, quer como pdf (função de densidade de probabilidade) ou cdf (distribuição de frequência acumulada)

*2.1.8 Valor verdadeiro  $x_v$  e Erro  $\eta$* 

Uma grandeza física experimental deve ser determinada a partir de medição e o resultado é sempre uma aproximação para o valor verdadeiro da grandeza. Os objetivos da teoria de erros consistem em determinar o melhor valor possível para a grandeza a partir de medições e determinar quanto esse pode ser diferente do valor verdadeiro  $x_v$  [Vuolo, 1998].

O valor verdadeiro  $x_v$  é obtido por um padrão ou por um ponto fixo, por exemplo um ponto físico de troca de fase em condições de equilíbrio. Se  $x$  é o resultado de uma medição, o erro em  $x$  é dado por  $\eta$ , tal que

$$\eta = x - x_v \quad (2.26)$$

Como em geral o valor verdadeiro  $x_v$  é desconhecido, resulta que  $\eta$  também é uma quantidade desconhecida, e portanto será determinado em termos de sua probabilidade.

Geralmente o erro  $\eta$  em um valor experimental  $x$  tem diversas causas, podendo ser escrito como uma soma de  $q$  erros elementares

$$\eta = \eta_1 + \eta_2 + \dots + \eta_q \quad (2.27)$$

onde cada fator tem diferentes distribuições de probabilidades (retangulares, triangulares, gaussianas, etc.). A sobreposição dessas distribuições tende a se tornar gaussiana.

## 2.2 *Incerteza de medição*

### 2.2.1 *Introdução*

A grandeza física que é obtida através de um procedimento experimental é sempre uma aproximação do valor verdadeiro da mesma grandeza. A teoria de erros tem como objetivo determinar o melhor valor possível para a grandeza, e quanto esse pode ser diferente do valor verdadeiro. O melhor valor possível também é chamado de melhor estimativa ou valor experimental do mensurando.

*A incerteza pode ser então definida como uma indicação de quanto o melhor valor pode diferir do valor verdadeiro, em termos de probabilidades. Ainda em outras palavras, a incerteza é um valor estimado para o erro, i.e., o valor do erro se ele pudesse ser medido ou se ele fosse medido.*

### 2.2.2 *Intervalo de confiança P*

Nível de confiança, coeficiente de confiança ou simplesmente confiança  $P$  é a probabilidade  $P$  de que uma afirmativa esteja correta. Para o valor desconhecido  $x$ , a afirmação  $4 < x < 5$ , com confiança 90% diz que há 90% de chance de  $x$  assumir valores entre 4 e 5.

Tomando-se o resultado de uma medição de pressão como indicado na tabela que segue.

**Tabela 2.2** Resultado de uma medição de pressão

freqüência	pressão (kPa)
2	101,2
4	101,5
5	101,7
2	101,8
7	102,0
3	102,1

onde o nº de termos: 23 dados ; a média: 101,7739 kPa ; e o desvio padrão: 0,2750 kPa

A média 101,7739 kPa, com a incerteza associada de  $1\sigma$ , indica que o valor lido de pressão  $p$  poderá estar na faixa

$$101,7739 \text{ kPa} - 0,2750 \text{ kPa} < p < 101,7739 \text{ kPa} + 0,2750 \text{ kPa}$$

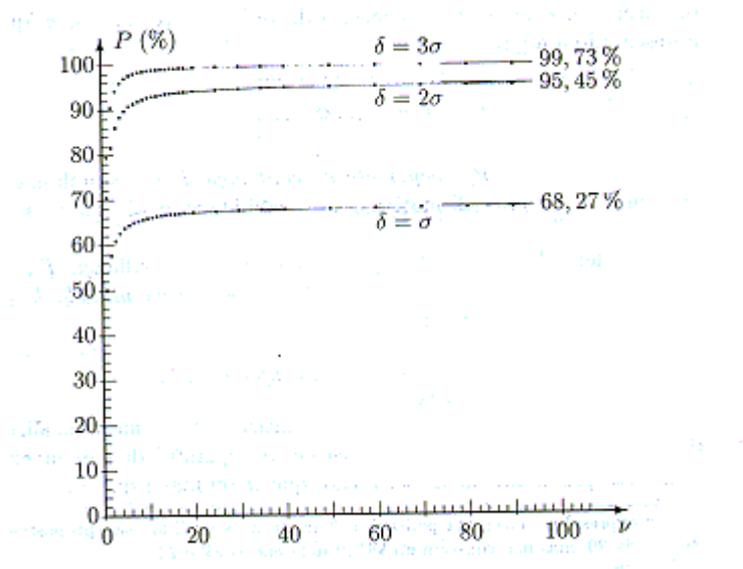
com 68,67 % de probabilidade.

Retomando a distribuição gaussiana, observa-se que o desvio padrão  $\sigma$  representa a probabilidade de que o resultado caia na faixa de  $\pm \sigma$  no entorno na média com 68,67 % de chances. Se desejar uma probabilidade de acerto maior, a faixa de incerteza deve ser aumentada, como mostra a tabela que segue

**Tabela 2.3** Valores de confiança conforme o desvio padrão

incerteza	confiança
$\sigma$	68,67 %
$2\sigma$	95,45 %
$3\sigma$	99,73 %
$1,645\sigma$	90,00 %
$2,576\sigma$	99,00 %
$\Delta=0,6745\sigma$	50,00%

Estes mesmos resultados podem ser vistos na figura que segue numa distribuição de freqüência acumulada, onde  $v$  é o número de graus de liberdade, ou simplesmente o número de medidas.



**Figura 2.3** Níveis de confiança  $P$  em função dos graus de liberdade  $\nu$  [Vuolo, 1998]

### 2.2.3 Indicação da incerteza

Segundo a ISO/TAG/WG3 (1993), as maneiras mais usuais para a indicação da incerteza de medição são:

- incerteza padrão  $\sigma$
- incerteza expandida com confiança  $P$  ( $k \sigma$ )
- erro provável  $\Delta$
- limite de erro  $L$

A incerteza padrão é o desvio padrão da distribuição de erros, onde o erro  $\sigma$  é com confiança  $P=68,27\%$ . Na incerteza expandida, multiplica-se  $\sigma$  por um valor de  $k$  conveniente, que leva a confiança mostrada na tabela 2.3, tal que

$$w = k\sigma \quad (2.28)$$

O erro possível é um caso particular para confiança de 50%, o que corresponde a  $0,6745 \sigma$ .

Os intervalos de confiança da tabela 2.3 são válidos para grandes amostras ou populações. Quando se tratam de dados experimentais, normalmente recolhidos em número limitado, a amostra terá um desvio padrão calculado em relação a uma média que não é independente dos dados, e por isso deve ser descontada do conjunto da amostra. A figura 2.3 apresenta esse comportamento em função de  $\sigma$  e o desvio padrão da amostra passa a ser dado por

$$s = \left( \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N-1} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.29)$$

O limite de erro  $L$  é definido de diversas maneiras. Considerando-se uma distribuição normal de erro, pode-se assumir que seja o máximo erro admissível, que teoricamente não é determinado, mas que na prática aceita-se a relação

$$L = 3\sigma \quad \text{ou} \quad L = 3s \quad (2.30)$$

mas que em outras situações pode ser fixado para outros múltiplos de  $\sigma$  ou  $s$ .

O conceito de limite de erro também pode ser estendido para a avaliar incertezas de instrumentos, onde se escolhe a menor divisão da escala e esta é associada ao erro padrão (menor divisão =  $\sigma$ ). Dependendo da qualidade do instrumento, o erro limite de calibração pode ser dado por

$$L_c = \sigma \quad \text{ou} \quad L_c = 2\sigma \quad (L_c = s \quad \text{ou} \quad L_c = 2s) \quad (2.31)$$

#### 2.2.4 Incerteza da média

Quando se expressa uma medida por  $v = m \pm w$ ;  $P$  percentual está se dizendo que a grandeza  $v$  pode ser encontrada no intervalo de amplitude  $m-w$  até  $m+w$ , com  $P$  percentual de confiabilidade, onde  $m$  é o valor médio e  $w$  a incerteza da medida.

Porém, quando um dado processo metrológico pode ser repetido com garantia de qualidade de sua execução, i.e., quando o processo obedece a um procedimento rigoroso, o operador é bem treinado, os instrumentos são os mesmos e as condições ambientais são controladas e repetidas, entre outras condições, pode-se afirmar mais sobre a média  $m$  do processo. Nesse caso, é possível que várias amostras de dados do mesmo processo apresentem um valor médio bastante próximo, e então se fala da incerteza de medição do valor médio, dado por

$$w_{\bar{x}} = \frac{Z\sigma}{\sqrt{n}} \quad (2.32)$$

onde  $Z$  é um número que multiplicado por  $\sigma$  representa a probabilidade apresentada na tabela 2.3.

## 2.3 Erro e Incerteza

### 2.3.1 Definição

Para uma dada quantidade medida, o ERRO representa a diferença entre o valor verdadeiro e o valor observado

Incerteza: um valor estimado para o erro, i.e., o valor do erro se ele pudesse ser medido ou se ele fosse medido.

### 2.3.2 Tipos de erros

1- *falha grave* – eliminado (operador, condições adversas, ruído, etc.)

2- *erro sistemático* – erro persistente e que tem caráter constante. Podem ser corrigidos por calibração. Também chamado de erro de acuracidade ou erro fixo. Após sua eliminação, busca-se o aumento da repetição da medição, onde se observa que os valores variam, ou seja, aparece a dispersão dos resultados.

grande dispersão: processo pobre, pouco controlado

pequena dispersão: processo com qualidade

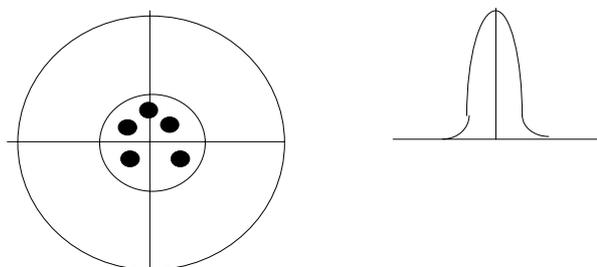
3- *erro aleatório* - erro que causa a leitura de valores aleatórios em ambos os lados do valor médio. Também chamado de erro de precisão ou randômico. [ASHRAE STANDARD, 41.5-75]

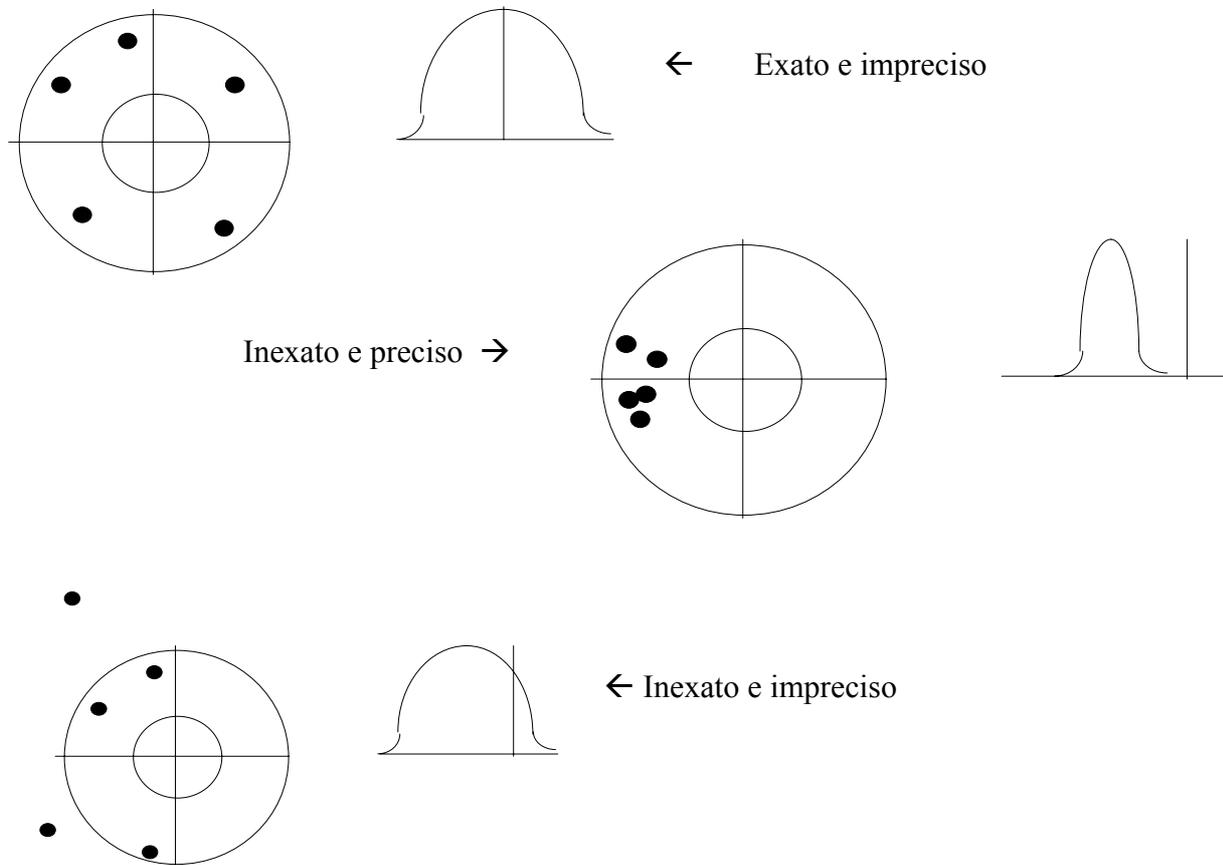
### 2.3.3 Exatidão x Precisão

*Exatidão ou acuracidade* é a proximidade entre o valor verdadeiro e a média. Quanto menor o erro, maior será a acuracidade do resultado.

*Precisão* é a proximidade de concordância entre valores obtidos pela repetição de um procedimento experimental sob condições determinadas. É ligada ao erro aleatório [Santos, 1995]. O caso dos tiros com dardos num alvo exemplifica o conceito de exatidão e precisão.

Exato e preciso →





**Figura 2.4** Avaliação do comportamento de um jogo de dardos

#### 2.3.4 Propagação de erros

1- Métodos rápidos, não recomendados, com o uso dos limites máximos e mínimos  
ex: Potência dissipada numa resistência elétrica

$$P=UI = 1000 \text{ W}$$

$$U= 100 \text{ V} \pm 3\text{V} (3\%)$$

$$I= 10 \text{ A} \pm 0,2 \text{ A} (2\%)$$

$$P_{\min}=(100-3)(10-0,2)=950,6\text{W} \quad (-4,94\%)$$

$$P_{\max}=(100 + 3)(10+0,2)=1050,6\text{W} \quad ( 5,06\%)$$

2- Procedimentos recomendados

a) A incerteza para cada variável  $v$  é descrita pela especificação de um "melhor valor" seguido de um intervalo de incerteza  $w$  no nível de confiança desejado

$$v = m \pm w; P \text{ percentual}$$

ex: temperatura =  $20 \pm 0.5$ : 95 % de certeza

b) Quando a exatidão do instrumento é dada em % do fundo de escala, o máximo valor de desvio de qualquer leitura é dado por esse valor, que então associado a todas as leituras.

ex: tensão = 5V na escala de 0-10 Volt, com 1% de fundo de escala

$$V = 5 \text{ V} \pm (10 \times 0,01) \text{ V} = 5 \text{ V} \pm (0,1) \text{ V} = 5 \text{ V} \pm 0,1 \text{ V}$$

c) Combinações de incerteza

As combinações são dadas segundo a composição de duas medidas que compõem a medida final.

$$(A \pm a) \pm (B \pm b) \quad w_r = (a^2 + b^2)^{1/2} \quad (2.33a)$$

$$(A \pm a) \times (B \pm b) \quad w_r = AB \left[ \left( \frac{a}{A} \right)^2 + \left( \frac{b}{B} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (2.34b)$$

$$(B \pm b) / (A \pm a) \quad w_r = \frac{B}{A} \left[ \left( \frac{a}{A} \right)^2 + \left( \frac{b}{B} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (2.35c)$$

do exemplo da potência dissipada

$$(100 \pm 3) \times (10 \pm 0,2) \quad w_r = 100 \cdot 10 \left[ \left( \frac{3}{100} \right)^2 + \left( \frac{0,2}{10} \right)^2 \right]^{1/2} = 36 \text{ W}$$

De uma forma mais geral, segundo Kline e McClintock [Holman, 1996]

Seja  $V = f(x_1 \dots x_n)$

$$w_r = \left( \left( \frac{\partial V}{\partial x_1} w_1 \right)^2 + \dots + \left( \frac{\partial V}{\partial x_n} w_n \right)^2 \right)^{1/2} \quad (2.34)$$

## 2.4 Validade dos dados coletados

Um conjunto de dados, ou simplesmente amostra, pode conter valores espúrios ou duvidosos, que podem constituir erros graves. Para excluí-los judiciosamente emprega-se o critério de Chauvenet, a uma amostra de  $n$  eventos, dado por  $\frac{d_{\max}}{\sigma}$  onde  $d_{\max}$  é o valor máximo do desvio da amostra e  $\sigma$  seu desvio padrão.

O procedimento deve ser feito montando-se uma tabela que faça aparecer o desvio  $d_i = x_i - \bar{x}$  de cada evento, e que permita calcular ainda a média e seu desvio padrão, como segue:

**Tabela 2.4** Montagem da tabela para determinação do critério de Chauvenet

evento	valor	desvio
1	$x_1$	$d_1 = x_1 - \bar{x}$
2	$x_2$	$d_2 = x_2 - \bar{x}$
....		
i	$x_i$	$d_i = x_i - \bar{x}$
....		
n	$x_n$	$d_n = x_n - \bar{x}$
$\infty$	$\bar{x}$	$\sigma$

Com a média calculada, obtém-se os desvios e o desvio padrão. Identifica-se, em seguida, o máximo valor do desvio,  $d_{\max}$ , e aplica-se a relação  $\frac{d_{\max}}{\sigma}$ . O evento em que

$$\frac{d_i}{\sigma} > \frac{d_{\max}}{\sigma} \quad (2.35)$$

é eliminado da amostra. Os valores de  $\frac{d_{\max}}{\sigma}$  são encontrados na tabela que segue:

**Tabela 2.5** Critério de rejeição de Chauvenet [Holman, 1990]

Número de leituras n	$\frac{d_{\max}}{\sigma}$	Número de leituras n	$\frac{d_{\max}}{\sigma}$
3	1,38	25	2,33

4	1,54	50	2,57
5	1,65	100	2,81
6	1,73	300	3,14
7	1,80	500	3,29
10	1,96	1000	3,48
15	2,13		

## 2.5 *Tamanho de amostras*

### 2.5.1 *Fundamentos*

A capacidade de uma amostra de seguir uma distribuição estatística acaba determinando sua classificação como grande ou pequena. As grandes amostras são aquelas onde se pode verificar a densidade de probabilidade de forma definida, seguindo melhor as funções de distribuição adotadas, o que não se verifica nas pequenas amostras.

#### *Grandes amostras*

Não há unanimidade na indicação do número de eventos que define uma grande amostra. A norma ASHRAE 41.5-75 (1975) indica 20 eventos ( $n > 20$ ), enquanto que Triola, 1998 já indica 30 eventos ( $n > 30$ ).

Nas grandes amostras, o valor médio  $\bar{x}$  é a melhor estimativa da média populacional  $\mu$ , ou valor verdadeiro. Associa-se ao valor da média um intervalo de confiança, ou incerteza, que obedece a uma dada probabilidade.

As equações para cálculo da média (equação 2.13), desvio padrão de uma grande amostra (equação 2.25) e de uma pequena amostra (equação 2.29), incerteza expandida (equação 2.28) e a incerteza da média (equação 2.32) são aplicáveis nesse caso.

A determinação do tamanho de amostra é dada pelo cálculo da incerteza da média (equação 2.32), onde  $n$  é

$$n = \left( \frac{Z \sigma}{w_{\bar{x}}} \right)^2 \quad (2.36)$$

Quando o desvio padrão da amostra não é conhecido, emprega-se uma regra ou indicação prática, onde se diz que o desvio padrão equivale aproximadamente a 4ª parte da amplitude de variação do fenômeno. Identificam-se os valores máximos e mínimos dos eventos e assume-se a 4ª parte de sua diferença.

### 2.5.2 Pequenas amostras - distribuição *t* de Student

Para amostras com número de eventos inferior a 30 ou mesmo 20, o valor do desvio padrão não é mais conhecido estatisticamente, e passa-se a empregar a equação 2.29, repetida aqui

$$\sigma' = s = \left( \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N-1} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.37)$$

onde o número de eventos do denominador  $n-1$  é conhecido por graus de liberdade  $v$ . A subtração de um evento numa pequena amostra pode ser compreendida pelo fato que a média é empregada para o cálculo de grandezas estatísticas, e portanto está comprometida.

Como o desvio padrão não é conhecido, não estamos mais tratando com uma distribuição gaussiana. A distribuição que melhor se adapta para esse caso é a distribuição *t* de Student, desenvolvida por William Gosset (1876-1937) que trabalhava para a cervejaria Guinness. Essa distribuição tem as seguintes propriedades:

- varia conforme o n° de eventos
- tem forma simétrica (sino)
- aproxima-se da distribuição de Gauss para  $n > 30$

A incerteza do valor médio de uma pequena amostra é dada por

$$w_{\bar{x}} = \frac{t s}{\sqrt{v}} \quad (2.38)$$

onde  $t$  é o valor da distribuição para uma dada confiabilidade e um número de graus de liberdade  $v$ ,  $s$  o desvio para um número de graus de liberdade  $v$ , e  $n$  é o número total de eventos da amostra.

## 2.6 AJUSTE DE DADOS

### 2.6.1 Introdução

O ajuste de dados experimentais é uma técnica que permite a interpolação de resultados ou dados, através de uma função ajustada. Esse método também é chamado de regressão, que pode ser linear, polinomial, etc., dependendo da escolha da função de ajuste escolhida. A obtenção da curva de regressão pode ser feita com a aplicação do método dos mínimos quadrados, apresentado a seguir:

### 2.6.2 Método dos mínimos quadrados

#### 2.6.2.1 Fundamentos

Supor uma amostra experimental, composta de  $n$  eventos  $x_1, x_2, \dots, x_n$ . A soma dos quadrados de seus desvios, em relação a um valor médio  $x_m$ , é dada por

$$S = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (2.39)$$

O método é baseado na minimização de  $s$  em relação à  $x_m$ , de tal forma que

$$\frac{\partial S}{\partial \bar{x}} = 0 = \sum_{i=1}^n -2(x_i - x_m) = -2 \left( \sum_{i=1}^n x_i - n x_m \right) \quad (2.40)$$

Quando a função de ajuste escolhida for uma reta  $y = ax + b$ , a soma quadrática dos desvios da equação (2.39) é dada por

$$S = \sum_{i=1}^n (y_i - (ax_i + b))^2 \quad (2.41)$$

e busca-se a minimização de  $S$  em relação a  $a$  e  $b$ , o que resulta em

$$a = \frac{n \sum x_i y_i - (\sum x_i) (\sum y_i)}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \quad (2.42)$$

$$b = \frac{(\sum y_i) (\sum x_i^2) - (\sum x_i y_i) (\sum x_i)}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \quad (2.43)$$

O desvio padrão do ajuste é dado por

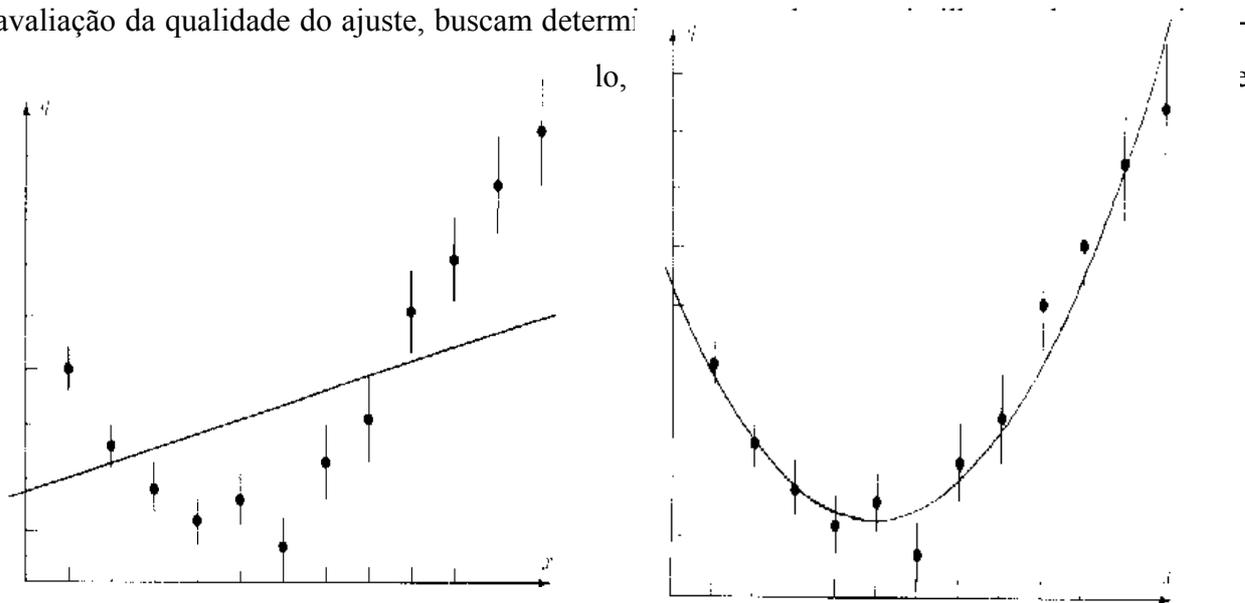
$$S = \left[ \frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{n - 2} \right]^{1/2} \quad (2.44)$$

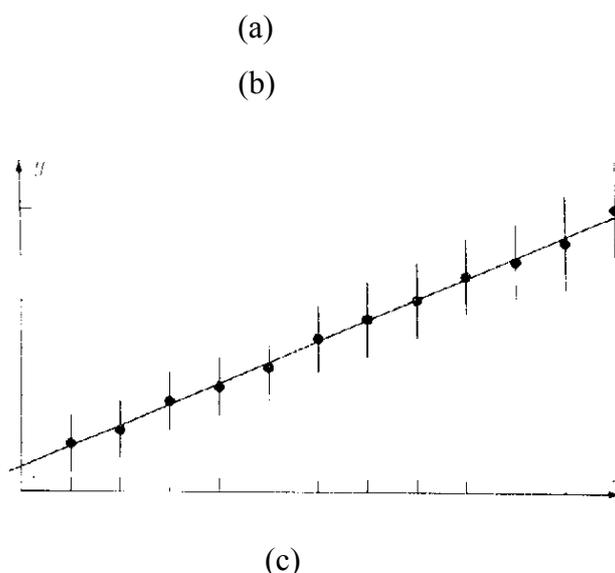
onde  $\hat{y}$  é o valor calculado de  $y$  pela função de ajuste.

Se a função de ajuste for um polinômio do tipo  $a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_nx^n$ , por exemplo, o procedimento se repete, e a minimização de  $S$  se faz em relação aos coeficientes  $a_0, a_1, a_2 \dots a_n$ .

### 2.6.2.2 Avaliação da qualidade do ajuste

Para que uma curva ou função de ajuste seja considerada boa, os pontos experimentais  $y_i$  não devem estar muito afastados dos pontos calculados  $\hat{y}_i$ , como também pode-se desconfiar daqueles que estão absolutamente em concordância com os pontos calculados. Os critérios de avaliação da qualidade do ajuste, buscam determi





**Figura 2.5** (a) Ajuste com baixa qualidade, (b) Ajuste com boa qualidade e (c) Ajuste com baixa verossimilhança. [Vuolo, 1998]

**Tabela 2.6** Dados das curvas de ajuste

curva	nº de pontos	ajuste	graus de liberdade
(a)	12	$a+bx$	$\nu = 10$
(b)	12	$a+bx + c x^2$	$\nu = 9$
(c)	12	$a+bx$	$\nu = 10$

A curva da fig. 2.5(b) representa melhor os dados experimentais que a curva da fig. 2.5(a). Na parábola, a flutuação dos pontos experimentais em relação à curva ajustada é coerente com as incertezas experimentais. Na curva da fig. 2.5(c), o acordo entre os dados e a curva ajustada é bom, mas a qualidade é ruim, pois a situação é inverossímil. É muito difícil encontrar, na prática, um ajuste tão bom para uma incerteza de medição tão grande, o que denota que estas últimas foram superestimadas.

### 2.6.3 Barras de incerteza

Retomando os critérios de incerteza de medição para dados experimentais que apresentam distribuição gaussiana, podemos dizer que o desvio padrão  $\sigma$  de um evento representa a probabilidade de aproximadamente 68,3% de que o valor verdadeiro esteja localizado no intervalo  $\pm\sigma$ , e assim sucessivamente para  $2\sigma$  (~95,5%),  $3\sigma$  (~99,7%), e outros.

Para se avaliar a qualidade de uma curva de ajuste calculada, é importante que se grafique a referida curva junto com os dados experimentais que a geraram. A fig. 2.5 apresenta essa situação, e o uso das barras verticais em cada dado experimental indica a incerteza da medição. Se a curva ajustada passa pelo intervalo compreendido pela barra de incerteza, e se essa incerteza é de  $\pm\sigma$  por exemplo, isso significa que o dado experimental tem cerca de 68,3% de estar contido na curva ajustada. Essa avaliação é elementar, mas pode ser um primeiro recurso para a análise da qualidade do ajuste.

#### 2.6.4 $\chi^2$ reduzido

Para uma função  $f(x)$  que representa o ajuste de um conjunto de dados experimentais, defini-se o parâmetro  $\chi^2$  (qui-quadrado) como

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^n \frac{[y_i - f(x_i)]^2}{\sigma_i^2} \quad (2.45)$$

e o parâmetro  $\chi^2$  - *reduzido* (qui-quadrado *reduzido*) como

$$\chi_{red}^2 = \frac{\chi^2}{v} \quad (2.46)$$

onde  $v$  é o número de graus de liberdade.

O denominador da equação 2.45 indica o quadrado do desvio entre o ponto experimental e a função ajustada, que é relativizado em função da variância, no denominador. Por tratar-se de uma quantidade estatística, é possível ainda atribuir a probabilidade de  $\chi^2$  - *reduzido* tem de ser encontrado entre valores  $Q_1$  e  $Q_2$ , que correspondem aos limites do intervalo de um intervalo de confiança.

*A aplicação do teste do  $\chi^2$  - reduzido se faz da seguinte maneira:*

Calcula-se o  $\chi^2$  e com o valor de  $v$  chega-se ao  $\chi^2$  - *reduzido* e procuram-se os valores de  $Q_1$  e  $Q_2$  nos gráficos das figuras 2.6(a) e (b), segundo o número de graus de liberdade  $v$ . A fig. 2.6(a) tem limites de probabilidade de 1% a 99% (98% de intervalo de confiança) e a fig. 2.6(b) tem limites de probabilidade de 5% a 95% (90% de intervalo de confiança). Confronta-se o  $\chi^2$  - *reduzido* do item 1 com os limites  $Q_1$  e  $Q_2$  do item 2. Se o valor calculado estiver contido em  $Q_1 < \chi_{red}^2 < Q_2$ , o ajuste é de boa qualidade.

**Figura 2.6** Valores de  $Q_1$  e  $Q_2$  com níveis de confiança (a) 98% e (b) e 90%, em função de  $\chi^2$  - *reduzido* e do número de graus de liberdade  $v$ . [Vuolo, 1998]

### 2.6.5 Coeficiente de Correlação $r$

Quando se estabelece uma curva de ajuste, como  $y=a+bx$  por exemplo, emprega-se o coeficiente de correlação  $r$  para avaliar o grau de dependência das variáveis aleatórias  $x$  e  $y$ , de forma que

$$r = \left[ 1 - \frac{\sigma_{y,x}^2}{\sigma_y^2} \right]^{1/2} \quad (2.47)$$

onde

$$\sigma_y = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - y_m)^2}{n-1} \right]^{1/2} \quad (2.48)$$

$$\sigma_{y,x} = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - y_{i,c})^2}{n-2} \right]^{1/2} \quad (2.49)$$

para uma reta. O denominador da equação 2.49 ( $n-2$ ) representa o número de graus de liberdade, que polinômios de ordem  $m$  é dado por  $(n-(m+1))$ .

Uma expressão empregando somatórios é dada pela equação que segue:

$$r = \frac{n \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{\sqrt{[n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2][n \sum y_i^2 - (\sum y_i)^2]}} \quad (2.50)$$

O teste de significância do coeficiente  $r$  é dado pelo valor  $H$ , que para uma reta com número de graus de liberdade  $(n-2)$  é dado por

$$H = \left| \frac{r}{\sqrt{1-r^2}} \right| \sqrt{n-2} \quad (2.51)$$

que segue uma distribuição  $t$  de Student. Pode-se afirmar que  $r$  é significativo ( $r \neq 0$ ) a um nível de significância  $\delta$ , se

$$H \geq t_{\delta/2, v=n-2} \quad (2.52)$$