UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA
CURSO DE LICENCIATURA EM FÍSICA

O ERRO NA MEDIÇÃO DA UMIDADE ATRAVÉS DE UM PSICRÔMETRO ASPIRADO

John Welvins Barros de Araújo

Bagé, RS
2018

John Welvins Barros de Araújo

O ERRO NA MEDIÇÃO DA UMIDADE ATRAVÉS DE UM PSICRÔMETRO ASPIRADO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no Curso Licenciatura em de Física da Universidade Federal do Pampa como requisito básico para a conclusão do Curso de Licenciatura em Física.

Orientador: Edson Massayuki Kakuno
Coorientador: Fabricio Ferrari (IMEF - FURG)

Bagé, RS
2018

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos
pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do
Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais) .

A558e Araújo, John Welvins Barros.
O ERRO NA MEDIÇÃO DA UMIDADE ATRAVÉS DE UM PSICRÔMETRO ASPIRADO / John Welvins Barros Araújo.
160 p.

Trabalho de Conclusão de Curso(Graduação)--
Universidade Federal do Pampa, FÍSICA, 2018.
"Orientação: Edson Massayuki Kakuno ".
"Coorientação: Fabricio Ferrari (IMEF-FURG) ".

1. Sensor de Umidade. 2. Umidade. 3. Acurácia, Precisão e Sensibilidade. 4. Sensor de Temperatura. 5. Psicrômetro. I. Título.

JOHN WELVINS BARROS DE ARAÚJO

O ERRO NA MEDIÇÃO DA UMIDADE ATRAVÉS DE UM PSICRÔMETRO ASPIRADO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Licenciatura em Física da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Licenciado em Física.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 14 de junho de 2018.

Banca examinadora:

Profa. Dra. Carla Judite Kipper
UNIPAMPA

Prof. Dr. Arlei Prestes Tonel
UNIPAMPA

Prof. Dr. Luis Roberto Brudna Holzle
UNIPAMPA

Dedico está monografia a todos meus familiares, professores e amigos, em especial a meus pais, Cícera Irani Barros Costa e Eusebio da Rocha pelo constante e magnífico apoio. Agradeço a meus irmãos Italo e Sara pela compreensão e apoio. A meus colegas de faculdade, Italo, Diesse, Ricardo, Matheus, Pablo e Gabriel que estivem sempre a meu lado. Por fim, quero agradecer a meu orientador Edson Kakuno pela paciência e dedicação.

AGRADECIMENTO

Os autores deste trabalho reconhecem e agradecem a contribuição do graduando Daniel Fonseca Corradini Ferrando, que contribuiu, entre outros, no desenvolvimento do hardware e software dos sensores de temperatura, do sistema de medidas de umidade e do sistema de calibração em temperaturas. Do graduando Charles Magnus do aluno do IF-Sul e bolsista IC-Jr. Thales Salazar, que de alguma forma contribuíram durante o desenvolvimento do trabalho.

Agradecem ao Programa Institucional de Bolsa de Iniciação à Docência – PIBID/UNIPAMPA, através do Edital CAPES no. 061/2013, e pela Portaria CAPES nº 096/2013 e CNPQ processo 405472 / 2015-3 pelo apoio financeiro parcial para: material do projeto e bolsa de estudos do autor. A Unipampa campus Bagé pela disponibilidade de acesso e de infraestrutura para o desenvolvimento deste trabalho.

Resumo

Este trabalho discute questões relacionadas aos erros, acurácia, precisão e resolução para serem trabalhados no ensino médio, EM, (e também no superior) e para tanto propõe a montagem de um psicrômetro, versão acessível ao EM utilizando o Arduino e sensor de temperatura LM35 e uma versão refinada utilizando sensores calibrados, com acurácia da ordem de dez vezes melhor que o primeiro. Este último utilizado neste trabalho para avaliar os erros nos modelos teóricos, encontrados na literatura, para o psicrômetro. É descrito a montagem de um sistema de calibração de sensores de temperatura com estabilidade melhor que 0,01 K ao longo de 30 segundos, que é o tempo necessário para realizar um conjunto de leituras para calibração. Também foi desenvolvido e montado um sistema duplo de medidas de temperaturas com acurácia (após o processo de calibração) melhor que 0,04 K a zero Celsius. Os resultados mostram que o erro na temperatura do bulbo úmido é um pouco mais crítica do que o erro na temperatura do bulbo seco. O trabalho também mostra que um simples procedimento de calibração entre os termômetros de bulbo seco e bulbo úmido, melhoram em um fator de 3 ou mais no erro da umidade relativa.

Palavras-chave: Acurácia; Precisão; Sensibilidade; Sensor de Temperatura; Psicrômetro; Sensor de Umidade.

Abstract

This paper discusses questions related to errors, accuracy, precision and resolution to be worked in high school, HS, and also in the undergraduate level, and proposes the assembly of a psychrometer, an accessible version to HS using Arduino board and LM 35 temperature sensors. Another refined version using calibrated sensors, with an accuracy of ten times better than the first one. The latter were used in this work to evaluate the errors in the theoretical models, found in the literature, for the psychrometer. It is described the assembly of a temperature sensor calibration system with stability better than 0.01 K over 30 seconds, which is the time required to perform a set of readings for calibration. A dual system of temperature measurements with accuracy (after the calibration process) better than 0.04 K at zero Celsius was also developed and assembled. The results show that the error in the wet bulb temperature is somewhat more critical than the dry bulb temperature error. The work also shows that a simple calibration procedure between dry bulb and wet bulb thermometers improves by a factor of 3 or more in relative humidity error.

Keywords: Accuracy; Precision; Sensitivity; Temperature sensor; Psychrometer; Humidity Sensor.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.01 - Pressão de Saturação 25

Figura 2.02 - Gráfico da razão de mistura, massa de vapor de água dividido pela massa de ar, em função da temperatura 28

Figura 2.03 - Gráfico da pressão parcial de vapor de água durante a saturação (dados BAIRD, 2001) 29

Figura 2.04 - Ajuste linear aos dados experimentais do calor latente da água (Tabela 2.01), temperatura expressa em Kelvin 35

Figura 2.05 - Desvio percentual do calor latente da água, obtidos a partir das equações 37

Figura 2.06 - Desvio percentual do calor latente, obtidos a partir das equações de calor latente (e) da água, até 50 °C 38

Figura 3.01 - Um típico higrômetro de cabelo 44

Figura 3.02 - Comportamento do fio de cabelo em relação à umidade relativa 45

Figura 3.03 - Psicrômetro 46

Figura 3.04 - Tabela de consultas da umidade relativa para psicrômetro 47

Figura 3.05 - Representação de um termopar 53

Figura 3.06 - Tipos de termopares e suas características 54

Figura 3.07 - Curvas de (a) tensão de (b) coeficiente de *Seebeck* pela temperatura 55

Figura 3.08 - Montagem clássica de termopar com junta fria 55

Figura 3.09 - Sensor de temperatura tipo *Bandgap* clássico 57

Figura 3.10 - Pinagem LM35 58

Figura 3.11 - Curvas características de termistores tipo NTC e PTC 59

Figura 3.12 - Erro de interpolação para curvas de calibração de NTC's 61

Figura 3.13 - Curva de tensão por corrente característica de termistores tipo NTC 63

Figura 3.14 - (a) Resistência por temperatura para um sistema linearizado e um não linearizado, (b) exemplo circuito de linearização para NTC 63

Figura 3.15 - Os três tipos típicos de estruturas de um RTD de platina (Pt) 67

Figura 3.16 - Curvas dos coeficientes de um Pt100 (RDT de platina) e um termopar tipo S em função da temperatura 68

Figura 3.17 - Alguns tipos de transdutores elétricos sensíveis a umidade por tecnologia 70

Figura 3.18 - Exemplo de configuração de um sensor de umidade capacitivo 71

Figura 3.19 - Sensor SHT-31 72

Figura 4.01 - Resposta desejada para o sistema de calibração térmica 74

Figura 4.02 - Descrição esquemática do hardware do sistema de calibração 76

Figura 4.03 – Arduino, modelo UINO 77

Figura 4.04 - Fluxograma geral do programa de controle do sistema de calibração 78

Figura 4.05 - Fluxograma do processo de rampa, estabilidade e medidas 80

Figura 4.06 - Resposta do sistema de calibração térmica 85

Figura 4.07 - Zoom em apenas um patamar de temperatura do sistema de calibração 86

Figura 4.08 - Foto do sistema de calibração 87

Figura 4.09 - Foto do sistema de calibração em destaque a câmara térmica 87

Figura 4.09 - Gaussiana de cem medidas do resistor RA 88

Figura 4.10 - Curvas de calibração do ADS1248 utilizando as resistências padrão de $100\ \Omega$, $150\ \Omega$ e $200\ \Omega$ 90

Figura 4.11 - Curvas de calibração do sistema de medição de temperatura ADS1248 com dois Pt100AA 91

Figura 4.12 - Esquemático da montagem de comparação dos sensores 94

Figura 4.13 - Montagem de comparação dos sensores de umidade e psicrômetro 95

Figura 5.01 - A precisão e acurácia em medidas 97

Figura 6.01 - Umidade relativa de Referência, 19/05/2018 – 21/05/2018 101

Figura 6.02 - Temperaturas absolutas, 19/05/2018 – 21/05/2018 102

Figura 6.03 - Pressão atmosférica , 19/05/2018– 21/05/2018 103

Figura 6.04 - Análise da dispersão da pressão atmosférica local (Bagé-RS), maio de 2018 106

Figura 6.05 - Erro máximo do psicrômetro para uma incerteza de $\pm 10\ hPa$ na pressão local 107

Figura 6.06 - Erro absoluto máximos do psicrômetro para uma incerteza de $\pm 0{,}5\ K$ na temperatura de bulbo seco 108

Figura 6.07 - Erro percentual máximo do psicrômetro para uma incerteza de $\pm 0{,}5\ K$ na temperatura de bulbo seco 109

Figura 6.08 - Erro absoluto máximo do psicrômetro para uma incerteza de $\pm 0{,}5\ K$ na temperatura de bulbo úmido 111

Figura 6.09 - Erro percentual máximo do psicrômetro para uma incerteza de $\pm 0{,}5\ K$ na temperatura de bulbo úmido 112

Figura 6.10 - Erro máximo na umidade relativa, com incerteza de ± $0{,}5\ K$ nas temperaturas e incerteza de $\pm\ 10\ hPa$ na pressão 113

Figura 6.11 - Razão entre as incertezas da umidade relativa contra 115

Figura 7.01 – Conexões de dois LM35 com o Arduino 117

Figura 7.02 - Gráfico de ruido aleatório de dois LM35 119

Figura 7.03 - Histograma de medidas de dois LM35, de 13278 pontos sem banho térmico 120

Figura 7.04 - Ajuste Gaussiano de medidas de dois LM35, de 13278 pontos sem banho térmico 121

Figura 7.05 - Representação do desvio padrão de uma curva gaussiana 122

Figura 7.06 - Esquema de montagem do psicrômetro com ventilação forçada 124

Figura 7.07 – Resposta do psicrômetro com LM35 com diferentes métodos 126

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.01 - Razões de mistura de saturação (ao nível do mar), em função da temperatura 27

Tabela 2.02 – Dados experimentais para o calor latente pela temperatura 34

Tabela 3.01 – Características de alguns sensores térmicos populares 52

Tabela 3.02 – Comparação entre diversos padrões de Pt100 65

Tabela 3.03 – Classificação de diversos padrões de Pt100 66

Tabele 3.04 - Parâmetros dos sensores SHT75 e SHT31 72

Tabela 4.01 - Resultado do teste de confiança do HP-3457A 89

Tabela 6.01 – Erros do psicrômetro em comparação ao sensores de referências 104

Tabela 7.01 - Procedimentos e assuntos potenciais da primeira atividade 116

Lista de Abreviaturas

Calor latente especifico	L
Calor pelo o numero de moles	q
Constante de resfriamento da câmara térmica em função da diferença de temperatura	β
Constante de aquecimento da câmara térmica em função da potência elétrica	α
Constante universal dos Gases	R
Desvio padrão	S_d
Energia	U
Energia especifica	u
Entalpia	H
Entalpia especifica	h
Entropia especifica	s
Erro aleatório	E_a
Erro padrão	E_p
Erro sistemático absoluto	E_s
Estado final fase vapor	g
Estado inicial fase liquida	l
Massa de total do ar	M_{ar}
Massa de vapor de água	M_{v}
Massa de vapor de água no ar saturado	M_{vs}

Massa molar da água	m_{a}
Numero de Moles	N
Numero de Moles de vapor de água	N_{v}
Parâmetro característico da câmara térmica	k
Potencial do patamar	V_p
Pressão	P
Pressão atmosférica local	P_{atm}
Pressão parcial do i-enésimo componente	P_{i}
Pressão parcial do vapor de água	P_{v}
Pressão parcial do vapor de água na saturação	P_{vs}
Pressão parcial do vapor de água na saturação a temperatura de bulbo úmido	$P_{\mathrm{vs(T_m)}}$
Temperatura ambiente	T
Temperatura de bulbo úmido	T_{m}
Temperatura do patamar	T_{patamar}
Temperatura de ponto de orvalho	T_{p}
Trabalho pelo o numero de moles	w
Umidade Absoluta	U_{a}
Umidade de Saturação	U_{s}
Umidade Relativa	U_{r}
Resistência do aquecedor a temperatura do bloco térmico	r_T
Valor de referência	X_{ref}

Variação da energia térmica do sistema de calibração	dQ
Volume	V
Volume molar	v
Volume molar da água liquida	v_{l}
Volume molar do vapor de água	v_{g}

SUMÁRIO

1 - Introdução **19**

2 – A umidade relativa, uma aproximação teoria **20**

2.01 Umidade Absoluta 20

2.02 Umidade de Saturação 21

2.03 Umidade Relativa 21

2.04 Aproximações a uma mistura Ideal e o modelo De Dalton 22

2.05 Pressão parcial e pressão parcial de saturação 25

2.06 A pressão parcial de saturação e a temperatura 26

2.07 A relação de Clausius-Clapeyron 30

2.08 O calor latente e sua dependência com a temperatura 34

2.09 Expressões para a pressão parcial de saturação 38

2.10 Expressões para a pressão parcial 40

3 – Sensores e a medição da umidade relativa **42**

3.1 O cabelo e a umidade relativa 44

3.2 O psicrômetro e seu funcionamento 46

3.3 Sensores de temperatura e suas incertezas 51

3.3.1 Termopares 53

3.3.2 Semicondutores (Circuitos integrados - CI) 56

3.3.3 Termistores 58

3.3.4 RTD 64

3.4 Sensores Capacitivos 69

4 –Desenvolvimento experimental **73**

4.1 O sistema de calibração térmica 73

4.1.1 A confiança do sistema de calibração térmica 88

4.2 A calibração do sistema de medição de temperatura 89

4.3 Montagem e coleta de dados com o SHT31, SHT75 e Psicrômetro 92

5 – Uma introdução ao Erro de Medição **96**
5.1 A estatística na medição 97

6 – Resultados e análise dos erros **100**
6.1 Comparação entre as equações para umidade relativa 100
6.2 Análise da propagação do erro na determinação da Umidade Relativa através do psicrômetro 105

7 – Uma proposta de prática para educação básica **116**
7.1 Calibração entre os sensores LM35-0 e LM35-1 117
7.2 O psicrômetro com o LM35 e Arduino 122
7.3 Análise do erro e sua propagação em medição de umidade com psicrômetro 125
8 – Conclusão **128**

Referências **130**

Apêndice A **136**

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento tecnológico tem proporcionado muitas facilidades ao a vida moderna e um importante eixo impulsionador das tecnologias são as técnicas de metrologia, portanto compreender de forma mais profunda e clara termos como acurácia, precisão, resolução, entre outros torna-se cada vez mais urgente no cotidiano e principalmente na formação técnica e nas engenharias. Este trabalho explora a água, que é um elemento fundamental para a vida na Terra, o aspecto de interesse deste trabalho é a água dissolvida na atmosfera que se traduz em umidade.

O conforto térmico é influenciado pela troca de umidade entre o meio e o organismo, essa troca depende da umidade absoluta do meio, que nem sempre é constante, da capacidade que o meio tem de manter essa quantidade de água (na forma de vapor) dissolvida no ar, conhecida como umidade absoluta de saturação, e da capacidade que o organismo tem para absorver o vapor. Logo, conclui-se que a troca de umidade entre o organismo e o meio ocorre de uma forma relativa à umidade absoluta daquele momento. Portanto fica conveniente criar a uma quantidade conhecida como umidade relativa (Ur).

A umidade relativa não está somente conectada ao conforto térmico de um organismo, mas as questões ambientais, climáticas e industriais, sendo assim um termo muito citado no nosso cotidiano, mas pouco dominado pelos alunos do ensino médio (talvez porque seja pouco trabalhado na formação dos futuros professores). Neste trabalho é proposta uma forma prática de trabalhar este tema no ensino médio, através da montagem de um psicrômetro (instrumento que determina a umidade relativa através da medida de duas temperaturas: uma conhecida como temperatura de bulbo seco e a outra de temperatura de bulbo úmido) o que propícia a discussão da acurácia, precisão, resolução e erros associados à determinação da umidade relativa. Também é apresentada uma revisão extensa sobre o tema e como se realiza a medida da umidade relativa. Como a determinação da umidade relativa através do psicrômetro depende da medida da temperatura, uma discussão detalhada sobre medida de temperatura por contato é apresentada e as questões de acurácia, precisão, resolução e erros também são explorados neste contexto.

2 A UMIDADE RELATIVA E UMA APROXIMAÇÃO TEÓRICA

A umidade indica o quanto de vapor de água está diluído no ar, é um parâmetro climático importante na produção industrial, agrícola e no conforto climático, e dessa forma despertar o interesse da comunidade cientifica.

O meio onde se procura estudar a umidade relativa é o ar atmosférico, que é composto basicamente de Nitrogênio ($\sim 78\,\%$) e Oxigênio ($\sim 21\%$), porém existem outros componentes como o Argônio e o vapor de água, este último é o objeto de estudo deste trabalho, e neste capítulo são discutidas algumas questões teóricas da determinação da umidade relativa, como a umidade absoluta e umidade absoluta durante a saturação.

Devido às condições de baixa pressão e temperatura na superfície da terra, pode-se aproximar o ar atmosférico a uma mistura ideal de gases ideias (não interagentes), utilizar o modelo de Dalton para uma mistura ideal e através relação de Clausius–Clapeyron obter uma relação para umidade relativa em termos de grandezas mensuráveis.

2.01 Umidade absoluta

A umidade absoluta (U_a) indica a quantidade de água diluída no ar atmosférico na forma de vapor, ela pode ser obtida pela razão entre as massas de vapor (M_v) e ar seco, ou em termos volumétricos pela razão da massa de vapor de água pelo volume de ar (V), no qual o vapor está diluído.

$$U_a = \frac{M_v}{V}\left[\frac{kg}{m^3}\right]. \qquad (2.01)$$

A umidade absoluta por si só não explica alguns fenômenos de interesse do nosso dia a dia como, por exemplo, a condensação, que é o principio básico do orvalho.

2.02 Umidade de saturação

A umidade de saturação é a máxima quantidade de vapor de água que um dado volume pode suportar, ou seja, a massa de vapor presente no dado volume quando o ar encontra-se saturado de vapor de água (M_{vs}).

$$U_{vs} = \frac{M_{vs}}{V}\left[\frac{kg}{m^3}\right]. \tag{2.02}$$

Intuitivamente, pode-se deduzir que quando a mistura (ar seco + vapor de água) está saturada, as moléculas de água estão mais propensas a condensar, mas de fato a umidade de saturação indica o equilíbrio termodinâmico, pois desde que se mantenha constante as condições de pressão e temperatura, a quantidade de água que evapora durante a saturação será igual à quantidade que condensa.

2.03 Umidade de relativa

A umidade relativa (U_r) é razão entre umidade absoluta (U_a) e umidade de saturação (U_s), sendo assim adimensional e é normalmente expressa em porcentagem, por isso possui um fator multiplicativo de 100%.

$$U_r = \frac{U_a}{U_s}\ 100\% \ . \tag{2.03}$$

Quando a umidade absoluta for igual à umidade de saturação, dizemos que o ar está saturado de vapor de água, ou seja, a umidade relativa será de 100% ($U_r = 100\%$).

Substituindo as equações 2.01 e 2.02 em 2.03 temos a umidade relativa como a razão entre a massa de vapor água presente no volume, pela máxima quantidade de massa de vapor de água que este volume pode suportar.

$$U_r = \frac{M_v}{M_{vs}}\ 100\% \,. \qquad (2.04)$$

Nem sempre é possível medir a massa de vapor de água presente no ar, normalmente esse dado só é obtido em experimentos realizados em ambiente controlado. Para mensurar a umidade relativa, de forma mais conveniente, precisa-se adotar um modelo que forneça uma equação de estado para massa em termos de outras grandezas físicas.

2.04 Aproximações a uma mistura Ideal e o modelo De Dalton

Levando em consideração que os fenômenos de interesse ocorrem em um meio convencional, isto é, em pressões em torno de $1\,x\,10^5\,Pa$ e temperaturas em torno de $300\,K$ $(26{,}85\,°C)$, pode-se aproximar o ar úmido (ar seco com vapor de água), a uma mistura ideal, isto é uma mistura de gases não interagentes, ou em outras palavras, se assume que o potencial químico entre elementos de diferentes gases é desprezível, as moléculas de vapor de água não interagem com o ar seco.

Para que essa aproximação seja válida precisamos fazer algumas observações (WYLEN, 1995), considere um meio que contenha água em fase líquida e em vapor diluído no ar, como por exemplo, um volume de água líquida sobre a qual se encontra um volume de ar úmido.

1. Que água em sua fase líquida não contém gases dissolvidos.
2. Que a mistura (ar úmido) pode ser considerada como uma mistura de gases ideais.
3. Que o equilíbrio termodinâmico entre a água líquida e o vapor de água presente no ar úmido, não seja influenciado pela presença dos demais componentes do ar.

Sabendo as características básicas e essenciais do meio de interesse, e assumindo as devidas aproximações apresentadas acima, pode-se estudar a

mistura ar úmido (ar seco mais vapor de água) através o modelo de Dalton para uma mistura ideal de gases.

Este modelo assume como premissa que cada um dos componentes da mistura existe separadamente e independentemente, ocupando todo o volume e estando em equilíbrio térmico com o restante da mistura.

Neste modelo o comportamento de um dado componente não é influenciado pela presença dos demais, e assim podemos estudar um dado elemento isolado do restante da mistura. Uma vez que cada elemento ocupa todo o volume disponível, a pressão total da mistura é composta pela soma das pressões parciais de cada elemento que constitui a mistura. Para o caso do ar atmosférico temos.

$$P_{atm} = \sum_{i=1}^{k} P_i \, . \qquad (2.05)$$

Onde P_{atm} é a pressão atmosférica, P_i é a pressão parcial devido ao i-ésimo elemento que compõem o ar e k é o número total de elementos que compõem o ar atmosférico.

Devido às condições normais de pressão e temperatura (CNPT), pode-se aproximar o vapor de água a um gás ideal, logo a lei dos gases ideias (2.06) é uma equação de estado valida para estudar a dinâmica do vapor de água e através dela, pode-se expressar a massa de água presente no ar úmido, em termos de outras grandezas.

$$P_v V = N_v R T \text{ [J]}. \qquad (2.06)$$

A massa é identificada na expressão 2.06 através de sua relação com o número molar, representada abaixo, onde N_v é o número de moles de vapor de água presente no ar e m_a é a massa molar da água e M_v é a massa de vapor de água:

$$\frac{M_v}{m_a} = N_v \ . \tag{2.07}$$

Inserindo a expressão 2.07 na equação de estado do gás ideal (2.06), tem-se:

$$P_v V = \frac{M_v}{m_a} RT \ [\mathrm{J}]. \tag{2.08}$$

Isolando a massa, obtém-se uma expressão em função da pressão, do volume e da temperatura.

$$M_v = \frac{P_v V m_a}{RT} \ [kg] \ . \tag{2.09}$$

O índice v indica que os parâmetros referem-se às propriedades e características do vapor de água presente no ar, à temperatura e o volume não carregam o índice, pois o vapor está em equilíbrio térmico com o meio e o volume ocupado pelo vapor de água será sempre o volume total do meio, ou seja, o volume independe da quantidade de vapor de água presente no ar.

Para a situação de saturação ($U_r = 100\%$.), a expressão 2.09 será a mesma, porém, no lugar do índice v será usado o índice vs, referenciando-se à condição de saturação, porém a massa molar da água m_a e constante universal dos gases R (constante de Regnault) permanecem constantes, não se alterando em função da quantidade de vapor presente no ar.

$$M_{vs} = \frac{P_{vs} V m_a}{RT} \ [kg] \ . \tag{2.10}$$

Retornando as expressões 2.09 e 2.10 para 2.04 tem-se:

$$U_r = \frac{RT}{P_{vs} V m_a} \frac{P_v V m_a}{RT} \ 100\% \ . \tag{2.11}$$

$$U_r = \frac{P_v}{P_{vs}} 100\% \,. \qquad (2.12)$$

A expressão 2.12 explicita a umidade relativa em termos das pressões parciais.

2.05 Pressão parcial e pressão parcial de saturação

A pressão parcial de vapor de água (P_v) é a pressão parcial devido à presença de vapor de água no ar úmido, e desde que se conheça a quantidade de massa de água na forma de vapor presente na mistura (ar úmido), a pressão P_v pode ser obtida através da equação 2.08.

A pressão parcial de saturação de vapor de água no ar úmido (P_{vs}) é a pressão parcial de vapor de água quando o ar úmido se encontra saturado de vapor de água.

Figura 2.01 – Pressão de Saturação

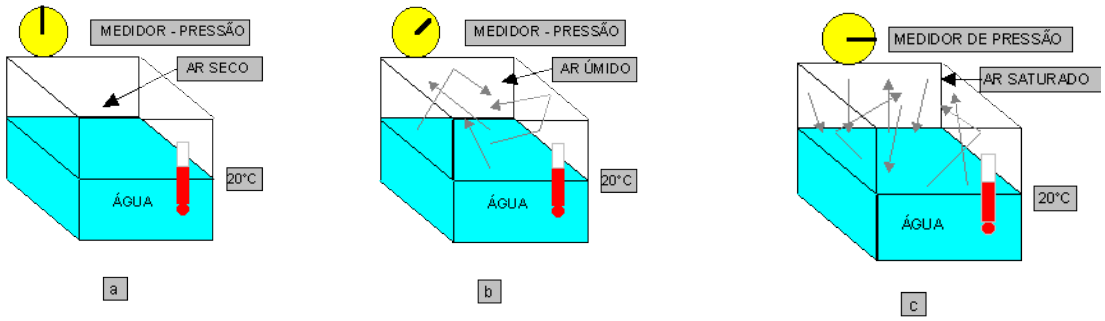


Figura 2.01: Ilustração esquemática de pressão de vapor e saturação. Em um recipiente fechado com a água e ar seco (a), à medida que as moléculas de água evaporaram a pressão do recipiente aumenta (b), e à medida que a pressão aumenta a probabilidade de que das moléculas de vapor condensar aumenta, o sistema deverá encontrar o equilíbrio termodinâmico, e a partir deste instante a pressão do recipiente será a pressão de saturação (c) que para uma temperatura constante a pressão também é constante.

Fonte: GRIMM, A. M.

Na Figura 2.01, temos representado um recipiente com água e ar seco (imagem a) em equilíbrio térmico.

Ainda que a temperatura de equilíbrio não seja a temperatura de ebulição da água, ela começa a evaporar tornando o ar úmido (imagem b). A temperatura é uma grandeza macroscópica, que em uma visão microscópica corresponde à energia cinética média das partículas, que no caso são as moléculas de água. Está visão permite assumir que existam moléculas de água com energia cinética suficiente para desvincular-se do corpo de água.

À energia cinética das moléculas de vapor de água adicionadas ao ar, aumenta a pressão parcial de vapor de água (P_v), e isso é traduzido em um aumento da pressão total do recipiente (imagem b). O aumento da pressão no recipiente incrementa o número médio de colisões das partículas, aumentando a probabilidade das moléculas vapor de água condensarem.

Esse sistema tende a encontrar um equilíbrio (de transferência de massa) termodinâmico, no qual a quantidade de moléculas que evaporam será igual à quantidade de moléculas que condensam (imagem c), a pressão parcial de vapor de água no recipiente durante esse equilíbrio é a pressão parcial de saturação devido ao vapor (P_{vs}) que é uma constante do equilíbrio termodinâmico do sistema, ou seja, se permanecer o equilíbrio a pressão de saturação será constante.

2.06 Pressão parcial de saturação e a temperatura

Uma vez que o vapor de água está em equilíbrio térmico com o meio, que a energia cinética media das moléculas de vapor de água é proporcional à temperatura e que taxa de condensação é função inversa da temperatura. Conclui-se que durante a saturação, o aumento da temperatura diminui a taxa de condensação permitindo ao ar suportar uma quantidade maior de moléculas de vapor água.

A Tabela 2.01, abaixo, apresenta quantidades de massa de água em gramas por quilogramas de ar ($\sim 1\, m^3$), em um volume saturado, que é diretamente proporcional à umidade absoluta volumétrica durante a saturação, para diferentes temperaturas. Os dados da tabela se referem ao ar úmido

sobre uma superfície plana de água pura, ao nível do mar, durante a saturação e em equilíbrio térmico.

Tabela 2.01 – Razões de mistura de saturação (ao nível do mar), massa de vapor de água dividido pela massa de ar, em função da temperatura

TEMPERATURA (° C)	**g/kg**
-40	0,1
-30	0,3
-20	0,75
-10	2
0	3,5
5	5
10	7
15	10
20	14
25	20
30	26,5
35	35
40	47

Fonte: GRIMM, A. M.

A fim de observar o comportamento da umidade absoluta durante a saturação em função da temperatura, realizou-se através do Scilab, software científico para computação numérica, uma interpolação cúbica que resultou no gráfico disposto na Figura 2.02.

Pode-se concluir que a umidade absoluta de saturação possui um comportamento aproximadamente exponencial crescente em função da temperatura.

Figura 2.02 – Gráfico da razão de mistura, massa de vapor de água dividido pela massa de ar, em função da temperatura

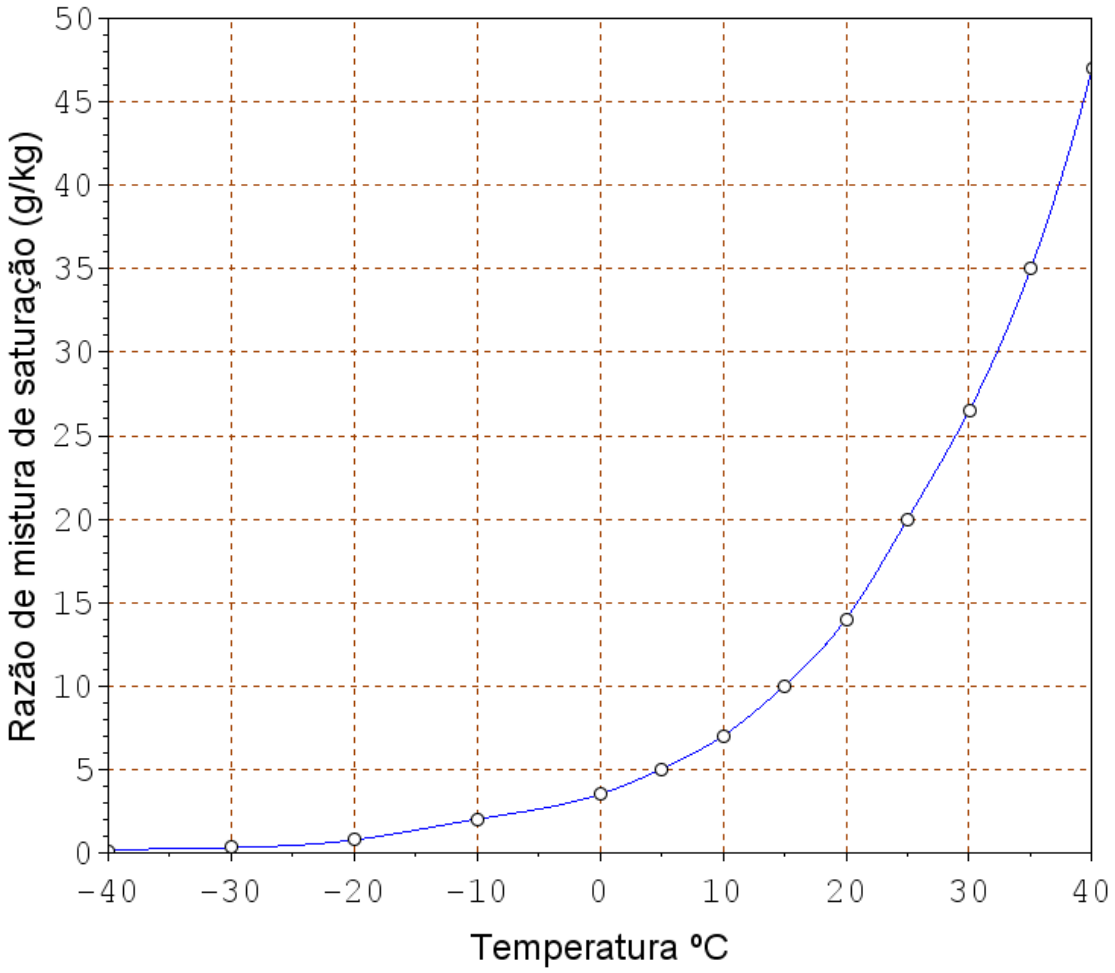


Figura 2.02: Gráfico da razão de mistura saturada (ar seco com vapor de água) em função da temperatura. A linha cheia representa uma interpolação cúbica dos dados da Tabela 2.01 (pontos abertos).

Fonte: Autor.

Considerando que a umidade absoluta na saturação aumenta em termos da temperatura, é de esperar que a pressão de saturação P_{vs}, também aumente em função do aumento da temperatura, uma vez que, P_{vs} indica a quantidade máxima de vapor de água que o volume pode suportar (umidade absoluta máxima).

A Figura 2.03 dispõem os dados de temperatura e pressão parcial de vapor de água durante a saturação (pressão de saturação) disponíveis em 2001 *Ashrae Fundamentals Handbook* (BAIRD, 2001), para um intervalo de -60 °C a 160 °C, com um passo de 1°C até a temperatura de 119 °C e prossegue com um passo de 2°C até os 160 °C, os dados analisados são da pressão de saturação para as temperaturas descritas.

Figura 2.03 – Gráfico da pressão parcial de vapor de água durante a saturação (dados BAIRD, 2001)

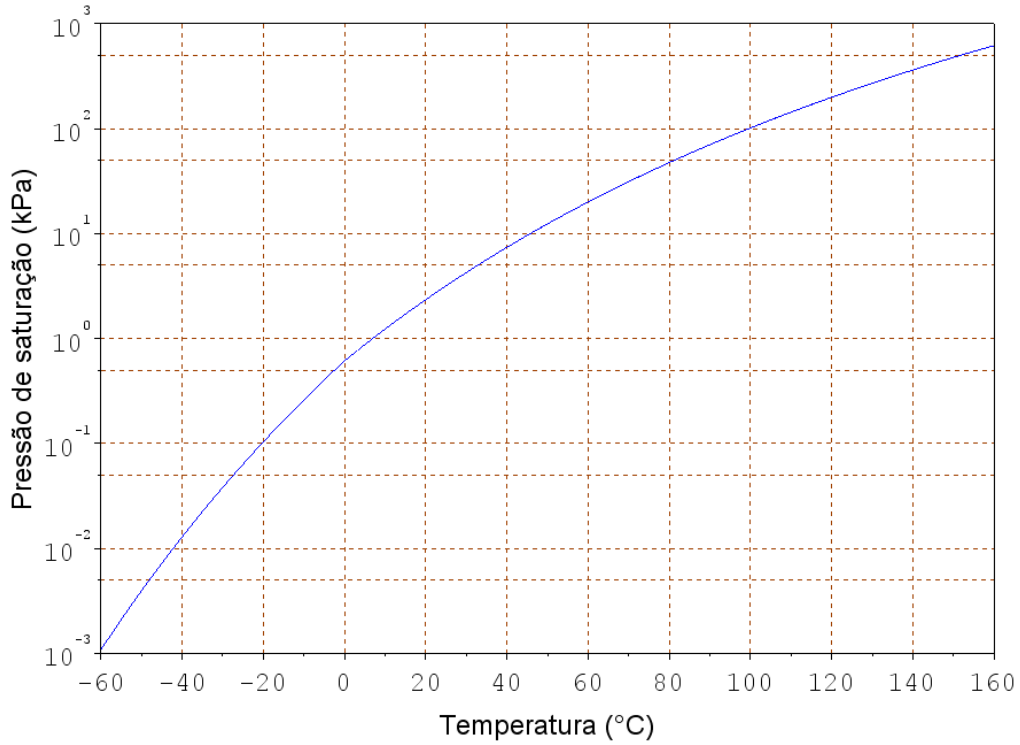


Figura 2.03: Gráfico de uma interpolação cúbico em escala logarítmica de base 10 para os dados da tabela Ashrae 2001 para pressão de saturação, feito no Scilab (os pontos tabelados forma omitidos, afim de não poluir a imagem).
Fonte: Autor.

Como esperado o comportamento da pressão de saturação P_{vs}, em relação à temperatura é aproximadamente uma exponencial crescente, porém para determinar a umidade precisa-se de uma função que retorne os valores pontuais de pressão de saturação em função da temperatura. Dessa forma ao aproximar a mistura (ar úmido) a uma mistura ideal de gases ideias e outras

considerações que serão realizadas a seguir pode-se obter a relação da pressão de saturação em função da temperatura.

2.07 Relação de Clausius–Clapeyron

A relação de Clausius-Clapeyron (IRIBARNE e GODSON, 1973, p.60), relaciona a pressão com a temperatura durante a transição de fase de uma substância homogênea.

Considerando uma substância homogênea, e partindo do postulado de estado termodinâmico, temos que a entropia molar em termos do volume molar e da temperatura é:

$$ds = \left(\frac{\partial s}{\partial v}\right)_T dv + \left(\frac{\partial s}{\partial T}\right)_v dT \left[\frac{J}{K}\right]. \tag{2.13}$$

Onde s é a entropia molar do sistema e v é o volume molar, isto é, $v = V/N$ e $s = S/N$, onde N é o número de moles do sistema.

Durante a transição de fase a temperatura do sistema descrito não alterar-se, logo reduzimos a equação 2.13 a:

$$ds = \left(\frac{\partial s}{\partial v}\right)_T dv \left[\frac{J}{K}\right]. \tag{2.14}$$

Pelas relações de Maxwell (CALLEN, 1985, p. 181) temos que a variação da entropia pelo volume a temperatura constante é igual à variação da pressão em função da temperatura a volume constante.

$$\left(\frac{\partial s}{\partial v}\right)_T = \left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_v \left[\frac{Pa}{K}\right]. \tag{2.15}$$

Substituindo em 2.14 temos:

$$ds = \left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_v dv \left[\frac{J}{K}\right]. \tag{2.16}$$

A volume constante a pressão só depende da temperatura, isto é, a derivada parcial equivale à derivada total.

$$ds = \frac{dP}{dT}\, dv \left[\frac{J}{K}\right]. \tag{2.17}$$

Integrando a partir de um estado inicial l (líquido) a um estado final g (gasoso):

$$\int_{s_l}^{s_g} ds = \int_{v_l}^{v_g} \frac{dP}{dT}\, dv \left[\frac{J}{K}\right]. \tag{2.18}$$

Neste caso o estado inicial l, refere-se ao estado líquido da água e o estado final g ao estado de vapor de água, assim sendo a transição de estado representa a transição de fase de água líquida para vapor de água.

$$\Delta s = \frac{dP}{dT}\Delta v \left[\frac{J}{K}\right]. \tag{2.19}$$

Uma mudança de fase é um processo internamente reversível e tratando-se de um sistema fechado, a variação da energia pode ser fornecida pela primeira lei da termodinâmica, logo temos:

$$du = \delta q - \delta w \quad [\,\mathrm{J}\,]. \tag{2.20}$$

Onde u é a energia molar do sistema, q o calor e w o trabalho, a letra grega delta minúscula (δ) quando associada a uma grandeza, simboliza uma pequena variação dessa, considerando apenas o trabalho mecânico do sistema a primeira lei retorna:

$$du = T\, ds - P\, dv \quad [\,\mathrm{J}\,]. \tag{2.21}$$

A entalpia H descreve a energia máxima de um sistema termodinâmico, incluindo a energia interna U e o trabalho mecânico exercido ou retirado pela

vizinhança do sistema. A representação matemática da variação da entalpia molar é dada por:

$$dh = du + P\,dv \ [\,\mathrm{J}\,]\,. \tag{2.22}$$

Através desta representação de entalpia pode-se concluir que a variação da energia molar do sistema é $du = dh - P\,dv$ [J], retornando essa expressão para a relação (2.21), obtém-se:

$$ds = \frac{dh}{T}\left[\frac{J}{K}\right]. \tag{2.23}$$

Sabendo que a temperatura T é constante e integrando a partir de um estado inicial l a um estado final g ambos os lados, obtêm-se:

$$\Delta s = \frac{\Delta h}{T}\left[\frac{J}{K}\right]. \tag{2.24}$$

Igualando as expressões encontradas para a variação da entropia (2.19) e (2.24), obtemos a relação:

$$\frac{\Delta h}{T} = \frac{dP}{dT}\Delta v \ \left[\frac{J}{K}\right]. \tag{2.25}$$

Durante uma transição de fase a variação da entalpia molar Δh [J] é proporcional ao calor latente específico $L\left[\frac{\mathrm{J}}{\mathrm{kg}}\right]$, uma vez que, este último trata-se da quantidade de energia necessária para que uma unidade de massa de uma dada substância, no caso a água, mude de fase. Dessa forma temos que a variação da entalpia durante a vaporização ou condensação de uma molécula de água é.

$$\Delta h = Lm_a \ [\,\mathrm{J}\,]\,. \tag{2.26}$$

Logo chegamos à relação de Clausius–Clapeyron:

$$\frac{dP}{dT} = \frac{Lm_a}{T\Delta v}\left[\frac{Pa}{K}\right]. \tag{2.27}$$

Na transição de fase da água líquida para vapor, o volume molar inicial v_l é muito menor do que o volume molar final v_g, isto é $v_g \gg v_l$. De forma prática pode-se dizer que o volume da fase líquida é mil vezes menor (ou mais) que o da fase vapor, causando um erro aproximado de 0.1%, logo a aproximação $\Delta v \cong v_g$ é plausível e a relação de Clausius–Clapeyron resumi-se a:

$$\frac{dP}{dT} = \frac{Lm_a}{Tv_g}\left[\frac{Pa}{K}\right]. \tag{2.28}$$

Lançando mão das aproximações enunciadas no início desta sessão, o volume molar v_g pode ser expresso abaixo, onde R é a constante universal dos gases.

$$v_g = \frac{RT}{P}\ [m^3]\,. \tag{2.29}$$

Substituindo na relação de Clausius–Clapeyron em (2.28) temos:

$$\frac{dP}{dT} = \frac{Lm_aP}{T^2R}\left[\frac{Pa}{K}\right]. \tag{2.30}$$

Separando as variáveis P e T:

$$\frac{dP}{P} = \frac{m_a}{R}\frac{L}{T^2}dT\,. \tag{2.31}$$

Essa última relação é uma equação diferencial com as variáveis (P e T) separadas, bastando agora integrá-la e obter a relação para a pressão de saturação em termo da temperatura, porém a o calor latente é também uma função da temperatura, e por tanto devemos explicitar a sua dependência antes de integrar.

2.08 O calor latente e sua dependência com a temperatura

Em princípio o calor latente de um determinado elemento no contexto da sua temperatura de mudança fase é uma constante, para o caso da água que tem uma temperatura de vaporização de $373{,}15\,K\ (100\,°\mathrm{C})$, a uma pressão de $1{,}01325\ \mathrm{x}\ 10^5\ \mathrm{Pa}$, o calor latente vale $2257{,}32\ \left[\frac{\mathrm{kJ}}{\mathrm{kg}}\right]$.

Dos trabalhos pesquisados, destacou-se o trabalho de Osborne, Stimson e Ginning, 1939 (OSBORNE, 1939), NIST, no qual sistematiza de forma cuidadosa a determinação experimental do calor latente L para diversas temperaturas entre $0°\mathrm{C}$ e $200°\mathrm{C}$. A Tabela 2.02 apresenta um resumo destes dados:

Tabela 2.02 – Dados experimentais para o calor latente pela temperatura

Temperatura $(°C)$	**Calor Latente** $\left[\frac{kJ}{kg}\right]$	**Temperatura** $(°C)$	**Calor Latente** $\left[\frac{kJ}{kg}\right]$
0	2500,72	60	2357,65
1	2497,92	70	2333,25
5	2488,34	80	2308,51
10	2476,73	90	2283,41
15	2464,81	100	2257,32
20	2453,36	130	2177,15
25	2441,31	150	2119,87
30	2429,43	170	2058,63
40	2405,87	200	1957,93
50	2381,84		

Fonte: OSBORNE, 1939.

Os dados da tabela acima foram sistematizados em um gráfico para evidenciar a proximidade com a uma função linear.

Figura 2.04 – Ajuste linear aos dados experimentais do calor latente da água (Tabela 2.01), temperatura expressa em Kelvin

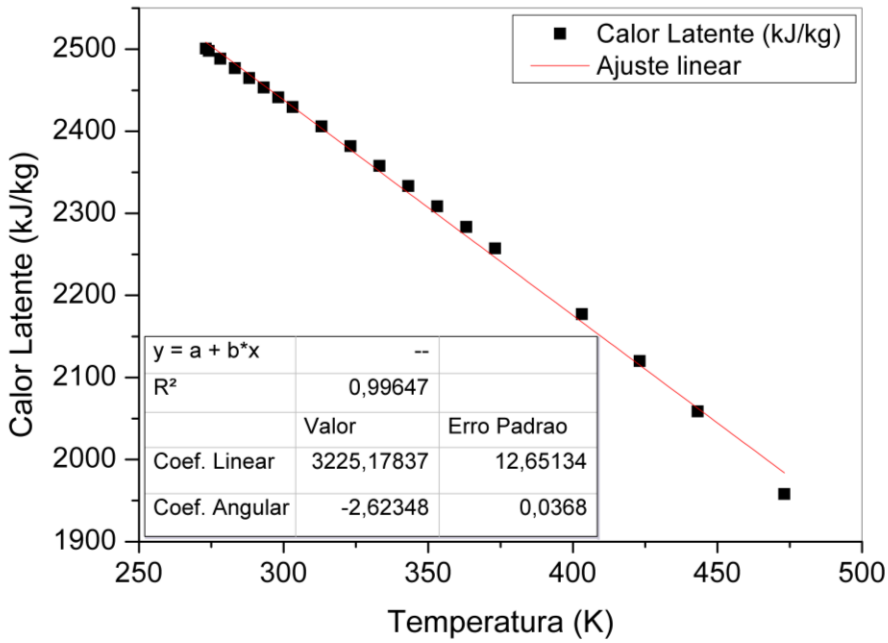


Figura 2.04: Ajuste linear aos dados experimentais (Tabela 2.01) para o calor latente, os dados foram disponibilizado por Osborne em 1939, NIST, com a temperatura expressa em Kelvin.

Fonte: Autor.

O ajuste linear resultou, dos dados da Tabela 2.01, na expressão 2.32, com um desvio médio quadrático de $0{,}999982$, onde a temperatura foi convertida de Celsius para Kelvin.

$$L = 2{,}50857416\ x\ 10^3 - 2{,}62348\ (T - 273.15)\ \left[\frac{kJ}{kg}\right]. \qquad (2.32)$$

Henderson (HENDERSON , 1984) estudou três equações do calor latente em termos da temperatura, com o intuito de averiguar suas validades, este trabalho estende este estudo acrescentando outra equação para o calor latente (BAIRD, 2001).

As três equações analisadas por Henderson foram:

$$L_1 = 2{,}500\ x\ 10^3 - 2{,}386\ (T - 273)\ \left[\frac{kJ}{kg}\right]. \quad (2.33)$$

$$L_2 = 2{,}50082\ x\ 10^3 - 2{,}358\ (T - 273)\ \left[\frac{kJ}{kg}\right]. \quad (2.34)$$

$$L_3 = 1{,}91846\ x\ 10^3\ \left(\frac{T}{T-33.91}\right)^2\ \left[\frac{kJ}{kg}\right]. \quad (2.35)$$

Apesar de $0°C = 273.15\ K$, as equações 2.33 e 2.35, apresentam o $0°C$ como sendo $273\ K$, porém devido as constantes, as relações foram mantidas.

A equação adicionada a este estudo é indicada pela Ashrae (BAIRD, 2001) para cálculo da pressão de saturação.

$$L_4 = \frac{R}{m_a}(-C_8 + C_{10}\,T^2 + 2C_{11}T^3 + 3C_{12}T^4 + C_{13}T)\ \left[\frac{kJ}{kg}\right]. \quad (2.36)$$

Os valores das constantes são:

$$C_8 = -5{,}8002206\ x\ 10^3$$

$$C_{10} = -4{,}8640239\ x\ 10^{-2}$$

$$C_{11} = 4{,}1764768\ x\ 10^{-5}$$

$$C_{12} = -1{,}4452093\ x\ 10^{-8}$$

$$C_{13} = 6{,}5459673$$

A equação 2.36, para o calor latente, foi obtida a partir da equação para a pressão de saturação 2.40, disponível em Ashrae (BAIRD, 2001), utilizando a relação de Clausius–Clapeyron na forma apresentada na equação 2.31.

A fim de comparar as equações para o calor latente foi indicado o desvio percentual dos pontos teóricos contra os pontos experimentais da Tabela 2.02, disponibilizados pelo NIST (dados experimentais). A Figura 2.05 apresenta o gráfico para todos os valores experimentais disponíveis na Tabela 2.02.

Figura 2.05 – Desvio percentual do calor latente da água, obtidos a partir das equações

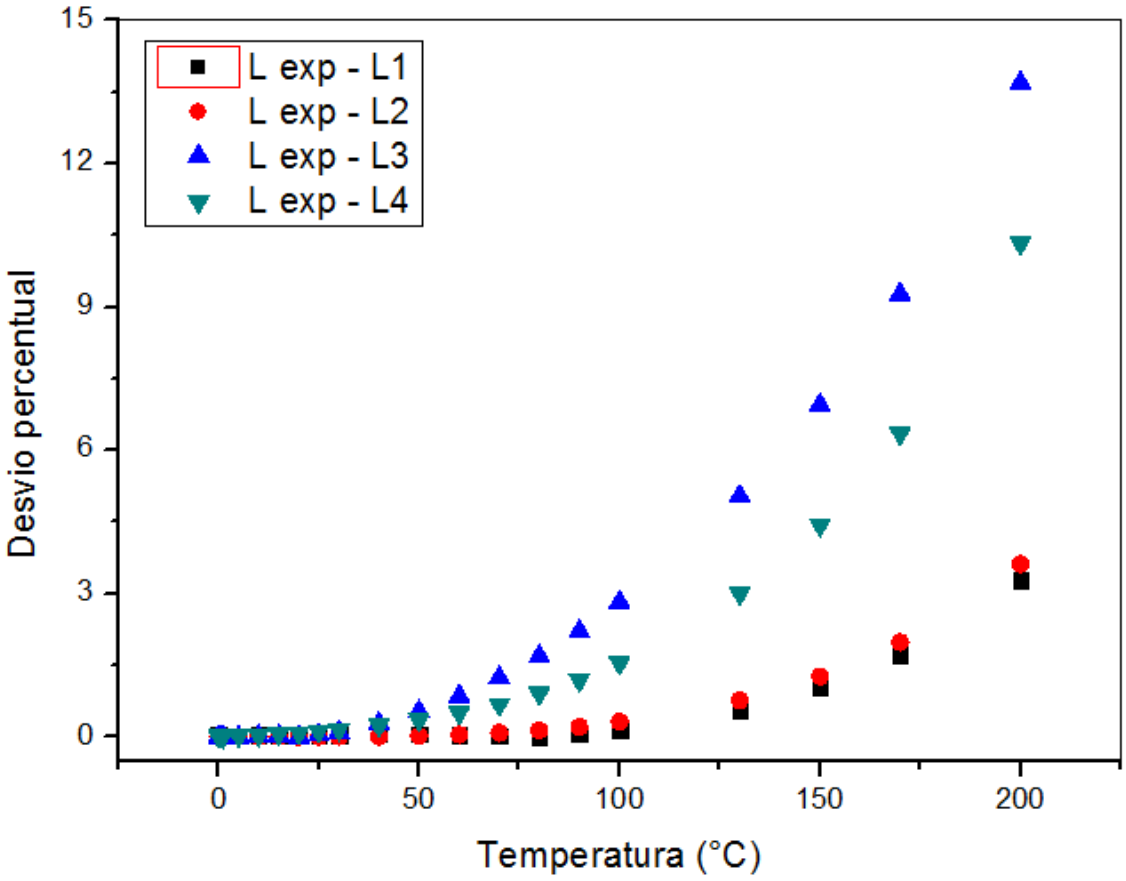


Figura 2.05: Gráfico é composto pelo desvio percentual das equações para o calor latente apresentadas, isto é, pelo erro relativo entre os valores obtidos com as equações 2.33 (L1), 2.34 (L2), 2.35 (L3) e 2.36 (L4) em relação aos dados experimentais relatados por Osborne em 1939 (Tabela 2.02).

Fonte: Autor.

Como o interesse é investigar fenômenos em condições ambientes, foi realizado o mesmo procedimento, porém analisando a faixa de $0°C$ a $50\ °C$.

Figura 2.06 – Desvio percentual do calor latente, obtidos a partir das equações de calor latente (L_1, L_2, L_3 e L_4) da água, até 50 °C

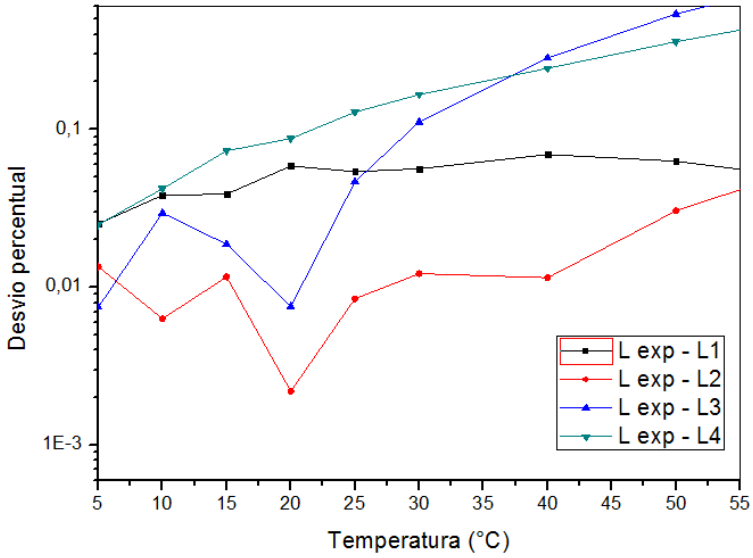


Figura 2.06**:** Desvio percentual das equações para o calor latente apresentadas, isto é, pelo erro relativo entre os valores obtidos com as equações 2.33 (L1), 2.34 (L2), 2.35 (L3) e 2.36 (L4) em relação aos dados experimentais relatados por Osborne em 1939 (Tabela 2.02). O gráfico está em escala logarítmica de base 10. Desvio zero significa concordância absoluta entre o modelo teórico (L_1, L_2, L_3 ou L_4) com os dados experimentais (Tabela 2.02).

Fonte: Autor.

A equação que mais se aproxima dos dados experimentais de $0°C$ a $50°C$, é a equação L_2, apresenta em 2.34.

2.09 Expressões para a Pressão parcial de saturação

Inserindo as expressões para o calor latente em função da temperatura (2.33, 2.34 e 2.35, L_1, L_2 e L_3 respectivamente) na relação de Clausius–Clapeyron na forma apresentada na equação 2.31 $\left(\frac{dP}{P} = \frac{m_a}{R}\frac{L}{T^2}dT\right)$ e integrando em termos de P e T obtemos, respectivamente:

$$P_{vs1} = 610{,}78 \exp\left[6828{,}6\left(\left(\frac{1}{273} - \frac{1}{T}\right) - 5{,}1701 \ \ln\left(\frac{T}{273}\right)\right)\right] [Pa]. \quad (2.37)$$

$$P_{vs2} = 610{,}78 \exp\left[6808{,}3\left(\left(\frac{1}{273} - \frac{1}{T}\right) - 5{,}1085 \ \ln\left(\frac{T}{273}\right)\right)\right] [Pa]. \quad (2.38)$$

$$P_{vs3} = 2{,}1718 \text{ x } 10^{10} \exp\left[-\frac{4157}{T - 33.91}\right] [Pa]. \quad (2.39)$$

As constantes de integração, obtidas em P_{vs1}, P_{vs2} e P_{vs3}, tem seus valores indicadas por Henderson (HENDERSON , 1984).

A equação P_{vs4} foi obtida da tabela Ashrae (BAIRD, 2001), cinco das seis constantes já foram apresentadas em 2.36, a constante faltante é $C_9 = 1{,}391499$.

$$P_{vs4} = exp\left[\frac{C_8}{T} + C_9 + C_{10}\,T + C_{11}T^2 + C_{12}T^3 + C_{13}\ln(T)\right] [Pa]. \quad (2.40)$$

Além das quatro equações apresentadas até o momento, há outras equações empíricas para a determinação da pressão de saturação, frequentemente usadas.

A equação para a pressão de saturação mais difundida foi apresentada por de Tetens (TETENS, 1930):

$$P_{vs5} = 661.2\, exp\left[17{,}2694\ \left(\frac{T}{T+237.3}\right)\ \right] [Pa]. \quad (2.41)$$

A NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) utiliza a equação de Tetens (NOAA), com as constantes apresentadas por David Bolton (BOLTON, 1980):

$$P_{vs6} = 0.6112\, exp\left[17{,}67\ \left(\frac{T}{T+243.5}\right)\ \right] [Pa]. \quad (2.42)$$

Arden Buck em 1981 (BUCK, 1981), também apresentou uma relação para a pressão de saturação:

$$P_{vs7} = 611.21\, exp\left[\left(18.678 - \frac{T}{234.5}\right)\left(\frac{T}{T+257.14}\right)\ \right] [Pa]. \quad (2.43)$$

Em uma referência recente (SEINFELD AND PANDIS, 2006) apresentaram no livro Atmospheric Chemistry and Physics, a pressão de saturação em termos a pressão atmosférica e temperatura:

$$P_{vs8} = \mathrm{P_{atm}}\, exp[a_1\theta + a_2\theta^2 + a_3\theta^3 + a_4\theta^4]\ [Pa] \qquad (2.44)$$

$$\theta = 1 - \frac{373.15}{T}$$

$$a_1 = 13.3185 \qquad a_2 = -1.97$$

$$a_3 = -0.6445 \qquad a_4 = -0.1299$$

2.10 Expressões para a Pressão parcial

Para calcular a umidade relativa, através da equação 2.12, ainda necessita-se definir a pressão parcial de vapor de água presente no ar P_v. Chen (2017) apresenta seis equações empíricas de P_v em função de $P_{vs(T_m)}$ e da depressão psicrométrica (2.45 a 2.50). A depressão psicrométrica é dada pela diferença entre a temperatura do ar (T), e a temperatura de uma fina superfície de água (T_m), essa questão será explicada com mais detalhes na descrição do psicrômetro, presente na próxima seção.

Penman equation	
$P_{v1} = P_{vs(T_m)} - P_{atm}\ 6{,}553\ x\ 10^{-4}\ (T - T_m)$	(2.45)
Goft-Cratch equation	
$P_{v2} = P_{vs(T_m)} - P_{atm}\ 6{,}631\ x\ 10^{-4}\ (T - T_m)$	(2.46)
British United Turkeys (BUT) equation	
$P_{v3} = P_{vs(T_m)} - P_{atm} 6{,}514\ x\ 10^{-4}\ (T - T_m)$	(2.47)
Harrison equation	
$P_{v4} = P_{vs(T_m)} - P_{atm}\ 6{,}612\ x\ 10^{-4}\ (1 + 1{,}15x\ 10^{-3}\ T_m)\ (T - T_m)$	(2.48)
World meteorological Organisation (WMO) equation	
$P_{v5} = P_{vs(T_m)} - P_{atm}\ 6{,}541\ x\ 10^{-4}\ (1 + 9{,}44\ x\ 10^{-4}\ T_m)\ (T - T_m)$	(2.49)
Nevia et al. equation	
$P_{v6} = P_{vs(T_m)} - P_{atm}\ 6{,}387\ x\ 10^{-4}\ (1 + 5{,}04x\ 10^{-3}\ T_m)\ (T - T_m)$	(2.50)
Chen equation[1]	
$P_{v8} = P_{vs(T_m)} - P_{atm}\ 6{,}4545\ x\ 10^{-4}\ (T - T_m)$	(2.51)

[1] Para temperaturas ambiente menores que 30 °C.

As expressões para P_v, apresentam $P_{vs(T_m)}$, que é a pressão de saturação para a temperatura de uma fina superfície de água presente no volume estudado.

Atualizando a expressão 2.12, temos agora a umidade relativa em termos da pressão de saturação P_{vs} para a temperatura do meio T, da pressão de saturação $P_{vs(T_m)}$ para a temperatura T_m, da pressão atmosférica P_{atm} e da depressão psicrométrica $(T - T_m)$.

$$U_r = \frac{P_v}{P_{vs}} 100\%. \tag{2.12}$$

$$U_r = \frac{P_{vs(T_m)} - A(T - T_m)}{P_{vs}} 100. \tag{2.52}$$

Onde A, é apresentado nas equações 2.45, 2.46, 2.47 e 2.51 como constante, e nas 2.48, 2.49 e 2.50 como função de T_m.

Relacionando as oito equações para P_{vs} e a as sete equações para P_v, chegamos a um total de cinquenta e seis equações para a umidade relativa, que serão analisadas de forma experimental, isto é, utilizando dados experimentais de temperatura e de depressão psicrométrica, para calcular das diversas formas a umidade relativa e comparar como dois sensores de umidade de conversão direta (SHT31 e SHT75), estes sensores serão discutidos em detalhes na próxima seção.

3.0 SENSORES E A MEDIÇÃO DA UMIDADE RELATIVA

Esta seção expõe uma discussão das várias técnicas para a determinação da umidade relativa, discute de forma detalhada o funcionamento do psicrômetro (instrumento didático proposto neste trabalho), abordando suas fontes erros, sensibilidade, resolução e acurácia na determinação da umidade relativa. As quantidades citadas anteriormente estão diretamente conectadas na determinação das temperaturas de bulbo seco e úmido, portanto uma discussão detalhada a respeito de medidas de temperatura por contato é realizada nesta seção, varrendo alguns tipos de sensores de temperatura (termopar, RTD, termistor e semicondutor) e explicitando os respectivos princípios básicos de funcionamento. Neste trabalho são utilizados os RTD tipo Pt100 e os semicondutores tipo integrado (LM35). Na última parte desta seção são discutidos os sensores de umidade relativa do tipo capacitivo, que são os comumente encontrados (de forma comercial), e devido a sua alta acurácia e precisão, são utilizados neste trabalho como sensores de referência na validação dos dados coletados com o psicrômetro.

A concentração de água (vapor) no meio (ar) influencia propriedades físicas de diversos objetos que compõem o ambiente comum, e dessa forma pode-se desenvolver inúmeros tipos de sensores de umidade relativa, em diversos níveis de complexidade, os mais simples envolvem normalmente a mudança de volume e ou de forma de certos materiais, como apresentado no portal de divulgação cientifica SEARA DA CIÊNCIA (SEARA DA CIÊNCIA) e por Silva (SILVA, 2002), que exploram o caráter educacional desses recursos.

Uma forma convencional e indireta de se medir a umidade relativa é através da temperatura de ponto de orvalho (T_p), que pode ser obtida ao se resfriar um recipiente até que a água condense em suas paredes, significando que a temperatura de ponto de orvalho foi atingida, quanto maior a umidade relativa maior será a temperatura do ponto de orvalho, para obter a umidade relativa em função da temperatura do ponto de orvalho, precisa-se manipular alguma relação para umidade relativa, como alguma das apresentadas na seção 2 deste mesmo trabalho. O equipamento que possui esse funcionamento é conhecido como higrômetro de espelho refrigerado.

Muitos dos sensores de umidade funcionam absorvendo e dessorvendo a água presente no ar, isto é, retirando e cedendo água (vapor) ao meio, pois os materiais que os compõem mudam suas propriedades em função da quantidade de água interna e não externa isso normalmente propicia uma curva de histerese.

Na presença de um estimo um sistema físico pode ser excitado para um estado diferente do seu estado inicial, espera-se que o sistema volte ao estado inicial quando cessar o estímulo, porém alguns sistemas oferecem uma persistência para transitar do estado excitado para seu estado anterior, esse efeito é conhecido como histerese. A magnetização residual é um exemplo de histerese, e pode ser observada em objetos ferromagnéticos com por exemplo alguns tipos de pregos e parafusos, que após permanecerem algum tempo em campos magnéticos (por exemplo em contato com imãs), começa a atrair outros objetos semelhantes.

Kronenberg et al. (KRONENBERG, 2002), apresentaram uma alternativa para se medir a umidade relativa através de um sensor FBG (*Fiber Bragg Grating*), a ideia é depositar na superfície da fibra (FBG) um material que tem sua geometria influenciada pela umidade relativa, tencionando a fibra e consequentemente alterando o parâmetro de rede da FBG, isso causa uma alteração no comprimento de onda de Bragg, para o ângulo de 90° (retrodifração). Correia et al. (CORREIA, 2012), mencionam diversas formas de medir a umidade relativa através da fibra ótica.

Outras soluções para mensurar a umidade relativa são possibilitadas através dos transdutores elétricos, que observam a variação de propriedades elétricas de certos materiais em função da concentração interna de água. As principais propriedades elétricas exploradas são a resistividade e a constante dielétrica. Ito (ITO, 2012) apresenta o desenvolvimento e funcionamento de um sensor cerâmico (resistivo) para umidade, mais adiante neste trabalho, serão discutidos os sensores capacitivos.

Uma das formas mais tradicionais para medir a umidade relativa é através do psicrômetro, que mede efetivamente as temperaturas T (do ar) e T_m (de uma fina superfície de água, obtida através de um bulbo úmido), porém para

obter uma melhor acurácia pode-se medir também a pressão local, este aparato será discutido na sequência.

3.1 O cabelo e a umidade relativa

O fio de cabelo é constituído de um padrão alfa-queratina, que é sensível a água (WANG, 2016), isto é, algumas propriedades do cabelo se alteram em função da quantidade de água presente nele, como por exemplo, a diminuição da rigidez e o aumento do volume, descrito também no artigo *Hair—the most sophisticated biological composite material* (POPESCU, 2007), onde Crisan e Hartwig discutem diversas propriedades do cabelo, entre elas a sua propriedade higroscópica.

Os higrômetros capilares (Figura 3.01) são bem difundidos, devido a sua facilidade de construção e grande oferta de matéria-prima, porém possuem baixa reprodutibilidade, uma vez que as intensidades a sua sensibilidade em função tipo de cabelo e outros problemas característicos da natureza de sua constituição.

Figura 3.01 – Um típico higrômetro de cabelo

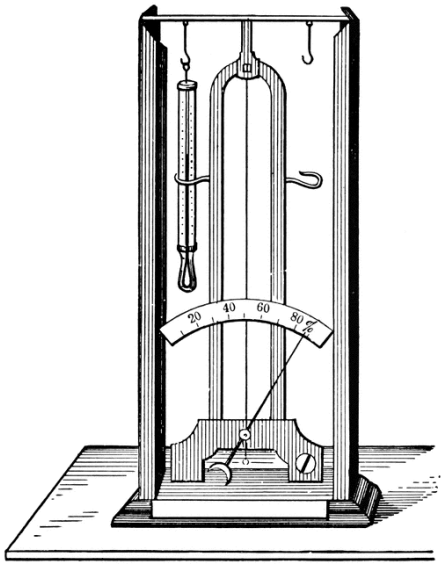


Figura 3.01: Conforme a umidade dentro do fio de cabelo muda, seu comprimento também muda, fazendo com que o ponteiro mude sua posição angular indicando assim a umidade relativa do meio.

Fonte: Frank Waldo, Elementary Meteorology, American Book Company, New York, 1896

A capacidade do cabelo em absorver as moléculas de água é diferente da capacidade de liberá-las e isto resulta em um comportamento tipo histerese, a sua taxa expansão radial em função da umidade relativa difere da taxa de expansão axial (comprimento), o que caracteriza um comportamento anisotrópico. A Figura 3.02 apresenta essas propriedades típicas para um fio de cabelo.

Figura 3.02 – Comportamento do fio de cabelo em relação à umidade relativa

(a) (b)

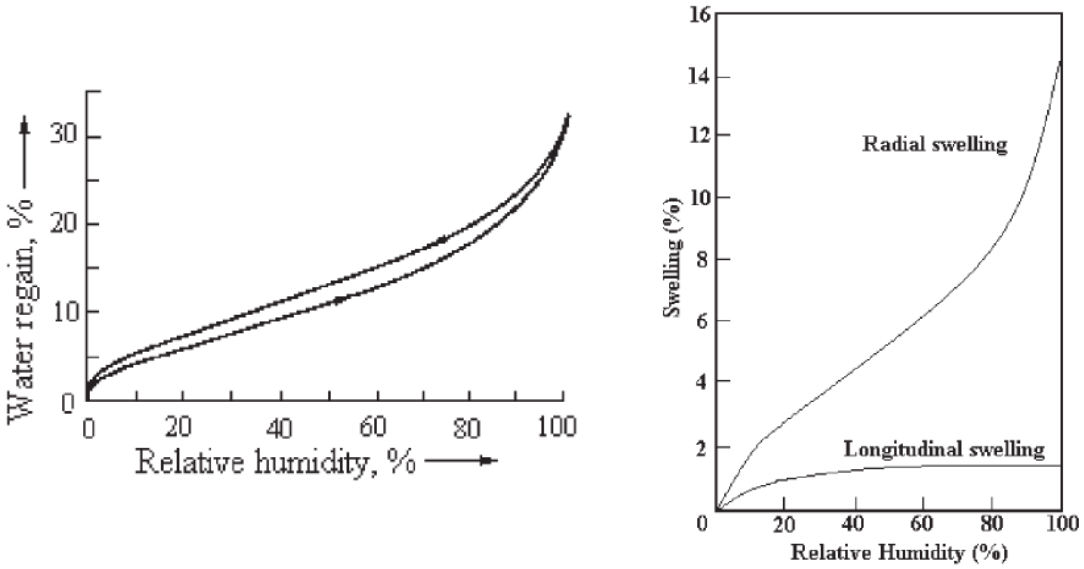


Figura 3.02: Em (a), tem-se um gráfico da retenção de água pela umidade relativa para um fio de cabelo, observa-se nele uma curva histerese, a curva de absorção não coincide com a de dessorção, já em (b) é apresentado à taxa percentual de expansão do fio em função da umidade relativa, onde se pode ver um comportamento anisotrópico, a expansão radial tem um comportamento diferente da longitudinal.

Fonte: POPESCU, 2007

Outra questão que se deve analisar é o comportamento logarítmico da expansão do comprimento, que dificulta a determinação de altos valores da umidade relativa. Outro complicador é que as intensidades de suas propriedades (sensibilidade) variam com o tempo, necessitando de frequentes calibrações durante o uso.

Atualmente há higrômetros desse tipo que utilizam fios sintéticos, porém muitos desses problemas continuam presentes, resultando em dificuldades nas medidas.

3.2 O psicrômetro e seu funcionamento

O psicrômetro é um instrumento para medição da umidade relativa normalmente de forma indireta, ele é composto por dois termômetros, um que mede a temperatura do ar (bulbo seco) T e outro que mede a temperatura de uma gaze (ou semelhantes) umedecida que o envolve T_m, a figura abaixo representa um exemplo de psicrômetro.

Figura 3.03 – Psicrômetro

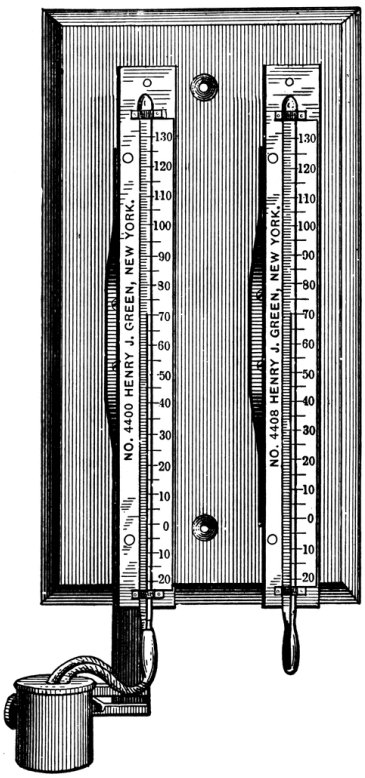


Figura 3.03: Psicrômetro, com seus dois termômetros, o da direita indica a temperatura do meio (bulbo seco), o da esquerda é envolvido com um tecido umedecido e indica a temperatura de equilíbrio entre a transferência de calor e de massa (bulbo úmido).

Fonte: Frank Waldo, Elementary Meteorology, American Book Company, New York, 1896

Na Figura 3.03, temos os dois termômetros (bulbo seco e bulbo úmido), parte da gaze que envolve o termômetro do bulbo úmido está dentro de um reservatório de água. Com essa técnica pode-se estimar a umidade relativa utilizando uma carta psicrométrica ou tabela de consulta da umidade relativa em função das temperaturas indicadas nos termômetros do psicrômetro.

A Figura 3.04 dispõe valores para umidade em função das temperaturas de bulbo seco e de bulbo úmido. Na primeira coluna da tabela encontram-se dispostas às temperaturas do bulbo úmido (T_m), na primeira linha a diferença entre a temperatura de bulbo seco e do bulbo úmido ($T - T_m$), denominada de depressão psicrométrica e no interior da tabela os valores para umidade em função dos parâmetros de entradas (T_m e $T - T_m$). Em destaque na Figura 3.04, a umidade relativa para uma temperatura de 28 °C no bulbo seco e 21°C no bulbo úmido, que corresponde a 51% de U_r.

Figura 3.04 – Tabela de consultas da umidade relativa para psicrômetro

Temp. t_m	DEPRESSÃO PSICROMÉTRICA (T - T_m)																			
°C	5,2	5,4	5,6	5,8	6,0	6,2	6,4	6,6	6,8	7,0	7,2	7,4	7,6	7,8	8,0	8,2	8,4	8,6	8,8	9,0
10	47	46	44	43	41	40	39	37	36	35	33	32	31	30	29	28	26	25	24	23
11	49	47	46	45	43	42	41	40	38	37	35	34	33	32	31	30	29	28	27	26
12	50	49	48	46	45	44	42	41	40	38	37	36	35	34	33	32	31	30	29	28
13	52	51	49	48	46	45	44	43	41	40	39	38	37	36	35	34	33	32	31	30
14	53	52	51	49	48	47	45	44	43	42	41	40	39	37	36	35	34	33	32	31
15	55	53	52	51	49	48	47	46	45	43	42	41	40	39	38	37	36	35	34	33
16	56	54	53	52	51	50	48	47	46	45	44	43	42	41	40	39	38	37	36	35
17	57	56	54	53	52	51	50	48	47	46	45	44	43	42	41	40	39	38	37	36
18	58	57	56	54	53	52	51	50	49	48	46	45	44	43	42	41	41	40	39	38
19	59	58	57	55	54	53	52	51	50	50	48	47	46	45	44	43	42	41	40	39
20	60	59	58	56	55	54	53	52	51	50	49	48	47	46	45	44	43	42	41	40
21	61	60	59	57	56	55	54	53	52	**51**	50	49	48	47	46	45	44	43	43	42
22	62	61	59	58	57	56	55	54	53	52	51	50	49	48	47	46	45	45	44	43
23	63	61	60	59	58	57	56	55	54	53	52	51	50	49	48	47	47	46	45	44
24	63	62	61	60	59	58	57	56	55	54	53	52	51	50	49	49	48	47	46	45
25	64	63	62	61	60	59	58	57	56	55	54	53	52	51	50	50	49	48	47	46
26	65	64	63	62	61	60	59	58	57	56	55	54	53	52	51	50	49	49	48	47
27	65	64	63	62	61	60	59	58	57	56	56	55	54	53	52	51	50	49	49	48
28	66	65	64	63	62	61	60	59	58	57	56	55	55	54	53	52	51	50	50	49
29	67	66	65	64	63	62	61	60	59	58	57	56	55	54	54	53	52	51	50	50
30	67	66	65	64	63	62	61	60	60	59	58	57	56	55	54	54	53	52	51	50
31	68	67	66	65	64	63	62	61	60	60	58	58	57	56	55	54	53	53	52	51
32	68	67	66	65	64	64	63	62	61	60	59	58	57	57	56	55	54	53	53	52
33	69	68	67	66	65	64	63	62	61	61	60	59	58	57	56	56	55	54	53	53
34	69	68	67	66	66	65	64	63	62	61	60	59	59	58	57	56	55	55	54	53
35	70	69	68	57	56	65	64	63	63	62	61	60	59	58	58	57	56	55	55	54
37	70	69	68	67	66	66	65	64	63	62	61	60	60	59	58	58	56	56	55	54
39	71	70	69	68	67	67	66	65	64	63	62	61	61	60	59	59	58	57	57	55

Figura 3.04: Tabela de consultas da umidade relativa pela temperatura de bulbo úmido (T_m) e a diferença entre o bulbo seco e o bulbo úmido (depressão psicrométrica, $T - T_m$).

Fonte: Silva, J., S., Secagem e Armazenamento de Produtos Agrícolas, 2008

O uso da tabela fornece apenas valores estimados para a umidade relativa, porém há um problema maior no seu uso, teoricamente a umidade relativa é também uma função da pressão que varia em função da altura local

(em relação ao nível do mar) e de fatores climáticos que variam no tempo, logo as tabelas fornecem apenas soluções particulares a nível local e temporal, ainda há outros erros, oriundos de aproximações teóricas que serão discutidos ao longo deste texto.

Uma questão intrigante é: Por que a temperatura do bulbo úmido é sempre menor que a do bulbo seco? Afinal não se observa valores negativos para a depressão psicrométrica ($T - T_m$) dispostos na tabela (Figura 3.04).

O termômetro do bulbo seco indica a temperatura do ar, isto é, a temperatura do meio, já o termômetro do bulbo úmido indica à temperatura na gaze úmida, que deveria estar em equilíbrio térmico com o meio, ou seja, a princípio ambos os termômetros estão em equilíbrio térmico com meio, e ainda indica um valor menor de temperatura em relação ao outro.

Uma das extremidades da gaze úmida está sempre em contato com um reservatório de água, e devido à ação capilar as moléculas de água são capazes de percorrer de uma extremidade da gaze para outra, garantido que todo o tecido externo ao reservatório, esteja sempre homogeneamente úmido (enquanto houver água no reservatório).

A nível microscópico, dizemos que a temperatura de uma porção de água é dada pela energia cinética média de suas moléculas. Mesmo a uma temperatura abaixo da temperatura de ebulição ($100°C\ e\ 1{,}01325\ x\ 10^5\ Pa$), algumas moléculas podem ter energia cinética suficiente para se desvincular da porção de água.

As moléculas da superfície necessitam de uma energia média menor para se desprenderem da porção de água do que as moléculas interiores. Dessa forma podemos dizer que a energia cinética mínima para uma molécula se desprender deve superar o trabalho (energia) de coesão, isto é, ser maior do que a diferença entre a energia de superfície antes e depois da evaporação. De fato a água que preenche a gaze possui uma elevada relação superfície/volume, o que facilita a perda de energia pela superfície.

Como as moléculas que se desprendem da superfície da gaze, são aquelas que possuem maior energia cinética, a energia cinética média das moléculas

presentes na porção de água diminui em função da evaporação, ou seja, o sistema resfria. Isso é conhecido como resfriamento evaporativo.

Em nível macroscópico, entendemos este processo através do calor latente, pois para cada quantidade de massa de água que evapora o sistema cede energia na forma de calor latente.

Essa diminuição de energia na gaze é sentida pelo termômetro de bulbo úmido que começa é indicar uma temperatura menor do que a do meio.

A temperatura do bulbo úmido não diminui indefinidamente, pois quando se estabelece um desequilíbrio térmico, entre o meio e o bulbo úmido, o meio começa a transferir energia térmica ao bulbo úmido que aquece, estabelecendo um regime estacionário.

Este processo deve alcançar um equilíbrio, entre a transferência de massa do bulbo úmido para o meio (taxa de evaporação da massa de água) e a transferência de calor do meio ao bulbo úmido. Uma vez atingido o equilíbrio, a temperatura será função da pressão, da temperatura do meio e da umidade absoluta presente no ar, logo será também função da umidade relativa.

Se o ar estiver saturado de vapor de água, a água contida na gaze não evaporara, fazendo com que a temperatura nos dois termômetros seja a mesma ($T = T_m$). Quanto mais seco estiver o ar, maior será a quantidade de moléculas de água evaporando do bulbo úmido, isto é, maior será a depressão psicrométrica.

Conhecendo-se as temperaturas T_m e T, pode-se calcular a umidade relativa U_r, através de qualquer uma das equações da forma apresentada em 2.52.

A determinação da umidade relativa através do psicrômetro possui algumas dificuldades. A primeira está relacionada às aproximações teóricas que já foram discutidas na seção anterior (seção 2, “A umidade relativa, uma aproximação teoria”) e o fato de se precisar medir as temperaturas absolutas de bulbo seco (T) e bulbo úmido (T_m) com acurácia e precisão. A forma como esses cuidados influenciam na incerteza da medida será discutida na seção 5, “Uma introdução ao Erro de Medição”.

Uma característica importante no uso de psicrômetros, e que se pode utilizá-los com ou sem ventilação forçada, porém, por questões de estabilidade é tradicionalmente adotada a ventilação forçada.

Entende-se por ventilação forçada, a exposição dos termômetros ou pelo menos do termômetro de bulbo úmido a uma circulação ininterrupta de ar a uma velocidade constante. Uma forma simples e confiável de se fazer isso é adicionar uma ventoinha (ventilador) à montagem, de modo que ela ventile os termômetros, antigamente se girava o termômetro de bulbo úmido ou a montagem inteira antes de se fazer a leitura.

Mudar de ventilação forçada para não forçada, implica na alteração dos valores das constantes psicrométricas das equações 2.45, 2.46, 2.47, 2.48, 2.49, 2.50 e 2.51 apresentadas na secção “Umidade”.

Na ventilação forçada ambos os termômetros de bulbo úmido e o seco são ventilados a uma velocidade constante. Com a ventilação forçada o termômetro de bulbo úmido indicara uma temperatura menor do que sem ventilação forçada, e tende a apresentar leituras mais estáveis.

A ventilação forçada provoca uma taxa constante de renovação do ar envolta do sensor, trocando o ar já saturado (devido à evaporação de água) envolta do sensor, por ar de umidade ambiente, menor do que a umidade do ar que estava entorno do sensor, garantindo assim que a taxa de evaporação não seja influenciada pela umidade que tende a acumular entorno do centro de evaporação (bulbo úmido).

Uma vez que o ar entorno do sensor está saturado a taxa de evaporação tende a cair, e consequentemente o equilíbrio termodinâmico acontecerá em uma temperatura superior, o que não é um problema, a questão é que assim que houver uma perturbação mínima no ar entorno do sensor a taxa de evaporação voltará a crescer estabelecendo um novo ponto de equilíbrio com uma temperatura inferior a anterior. Como é complicado garantir que não haja nenhuma perturbação no ar entorno do sensor, procura-se garantir que haja sempre uma perturbação constante (ventilação forçada).

A velocidade da ventilação forçada influencia na temperatura de equilíbrio do termômetro de bulbo úmido, porém há uma velocidade crítica para a qual a temperatura de equilíbrio deixa de depender da velocidade, que passa a influenciar apenas o tempo de estabilização da temperatura (que acontece apenas ao ligar a ventoinha), mais detalhes sobre essa questão podem ser consultadas no trabalho *Uncertainty Analysis in Humidity Measurements by the Psychrometer Method,* (CHEN, 2017).

3.3 Sensores de temperatura e suas incertezas

A qualidade dos sensores térmicos utilizados no psicrômetro influencia diretamente na medida da umidade feita pelo aparato, dessa forma deve-se optar por sensores de alta confiança.

Normalmente a qualidade de um sensor é indicada por: erro aleatório (que indica precisão) e erro sistemático (que indica acurácia), no caso de um sensor térmico esses parâmetros são influenciados, por ruídos (térmicos, eletromagnéticos, etc.), auto aquecimento, não linearidade, entre outros.

Dentre os sensores mais utilizados atualmente, temos os termopares, termistores, RTD (*Resistance Temperature Detector*), semicondutores, termômetros de expansão volumétrica e sensores óticos (pirômetro e infravermelho).

Os sensores de temperatura mais tradicionais funcionam com a expansão volumétrica, dentro dessa classe encontramos os termômetros de bulbo (tipicamente feitos com mercúrio, Hg, ou álcool), os termômetros bimetálicos comumente usados como sensor de temperatura limite (relé térmico), termômetros de gás, entre outros.

Os demais sensores térmicos citados são transdutores elétricos, ou seja, transformam uma variação térmica em uma variação elétrica (resistência ou potencial). As qualidades desses sensores são apresentadas na Tabela 3.01.

Tabela 3.01 – Características de alguns sensores térmicos populares

Parâmetros	**Termopar**	**RTD**	**Termistor**	**Semicondutores**
Faixa de Temperatura (°C)	-270 até +1800	-250 até +900	-100 até +450	-55 até +150
Sensibilidade	$10\ \frac{\mu V}{^{\circ}C}$	$0.00385\ \frac{\Omega}{\Omega^{\circ}C}$ (platina)	Diversos $\frac{\Omega}{\Omega^{\circ}C}$	Aproximadamente $-2\ \frac{mV}{^{\circ}C}$
Acurácia (°C)	± 0.5	± 0.01	± 0.1	± 1
Linearidade	Requer pelo menos um polinômio de quarta ordem ou equivalente	Requer pelo menos um polinômio de segunda ordem ou equivalente	Requer pelo menos um polinômio de terceira ordem ou equivalente	Linear dentro de + -1 ° C, não requer nenhuma linearização, a menos que seja desejada uma acurácia maior, resultados de alta acurácia exigem um polinômio de terceira ordem.
Robustez	Sua robustez depende da bitola dos fios e dos materiais de isolamento.	Suscetível a danos por vibrações, uma vez que os fios usados são finos (de # 26 a # 30 AWG), e assim podem quebrar. Caso seja de filme metálico é um pouco mais robusto, a vibrações. Deve haver cuidados no projeto devido a expansão térmica.	O elemento termistor é alojado em uma variedade de formas, no entanto, as unidades herméticas mais estáveis são envoltas em vidro, geralmente, termistores são difíceis de manusear, mas choque e vibração não os afetam.	Tão resistente quanto qualquer outro IC em embalagem plástica, ou metálica.
Responsividade em óleo agitado (seg)	Menor que 1.	De 1 a 10.	De 1 a 5.	De 4 a 60.
Excitação	Não requer.	Fonte de corrente.	Fonte de tensão.	Tipicamente, fonte de tensão.
Auto aquecimento	$0\ mW$	$0{,}1\ mW$	$1\ mW$	$1mW$
Tipo do sinal de saída	Voltagem.	Resistência.	Resistência.	Voltagem, corrente ou sinal digital.
Tamanho típico	O diâmetro da junção é cinco vezes o diâmetro do fio.	$0{,}25x0{,}25$ polegadas.	$0{,}1x0{,}1$ polegadas.	Do tamanho dos transistores TO-18.
Preço em Dolar	De $1 a $50	De $25 a $1000	De $2 a $10	De $1 a $10

Fonte: Adaptada de Baker, 2011 (a).

3.3.1 Termopares

Devido a sua robustez e grande faixa de temperatura de operação, o uso do termopar ganhou força na revolução industrial, onde começou a ser usado em fornos de alta temperatura. O termopar é composto de dois fios metálicos (daí sua resistência a temperaturas altas) que são ligados em uma extremidade por fundição (junção), quando essa configuração é exposta a um gradiente de temperatura produz uma diferença de potencial entre as duas outras extremidades (ver Figura 3.05).

Considere um fio condutor metálico exposto a um gradiente de temperatura. A energia cinética média dos elétrons da região mais quente é superior aos da região fria, então os elétrons começam a se acumular na região mais fria e dessa forma se estabelece uma diferença de potencial entre as extremidades do fio (Efeito *Seebeck*). Em um mesmo gradiente temperatura, metais diferentes geram diferentes potenciais, isso é traduzido no coeficiente de *Seebeck* que apesar de ser por vezes considerado constante é função da temperatura.

Figura 3.05 – Representação de um termopar

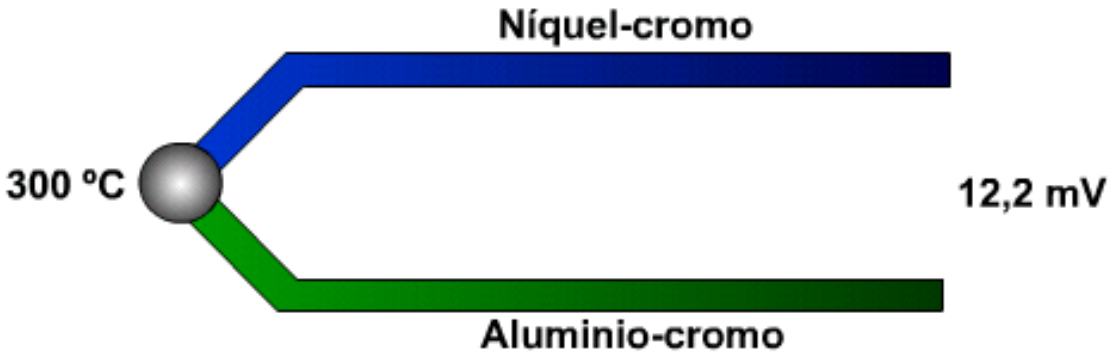


Figura 3.05: Esquema de um termopar de tipo K a uma temperatura de 300 ºC.
Fonte: Benítez, Termopares, Wikipedia, 2015, disponível em:
<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Termopar_tipo_K_(diagrama_simple)-LMB.png>

Em uma junção de dois metais diferentes (caso do termopar), o movimento dos elétrons dependerá da relação entre os coeficientes de *Seebeck* de cada material e dessa forma a diferença de potencial gerada pela junção também.

Há vários metais utilizados na fabricação de termopares, a Figura 3.06, apresenta os tipos mais comuns de termopares e suas características.

Figura 3.06 – Tipos de termopares e suas características

ANSI Code	Alloy Combination		Color Coding		Maximum Useful Temperature Range ++	Maximum Thermocouple Grade Temperature Range	EMF (mV) Over Max. Temperature Range	Standard Limits of Error** (above 0°C)	Special Limits of Error** (above 0°C)	International IEC 584-3	Comments Environment — Bare Wire	IEC Code
	+ Lead	- Lead	Thermocouple Grade	Extension Grade								
J	IRON Fe (magnetic)	CONSTANTAN COPPER-NICKEL Cu-Ni			Thermocouple Grade: 32 to 1382°F 0 to 750°C Extension Grade: 32 to 392°F 0 to 200°C	-346 to 2193°F -210 to 1200°C	-8.095 to 69.553	greater of 2.2°C or 0.75%	greater of 1.1°C or 0.4%		Reducing, Vacuum, Inert. Limited Use in Oxidizing at High Temperatures. Not Recommended for Low Temperatures.	J
K	CHROMEGA® NICKELCHROMIUM Ni-Cr	ALOMEGA® NICKEL-ALUMINUM Ni-Al (magnetic)			Thermocouple Grade: -328 to 2282°F -200 to 1250°C Extension Grade: 32 to 392°F 0 to 200°C	-454 to 2501°F -270 to 1372°C	-6.458 to 54.886	greater of 2.2°C or 0.75%	greater of 1.1°C or 0.4%		Clean Oxidizing and Inert. Limited Use in Vacuum or Reducing. Wide Temperature Range, Most Popular Calibration	K
T	COPPER Cu	CONSTANTAN COPPER-NICKEL Cu-Ni			Thermocouple Grade: -328 to 662°F -250 to 350°C Extension Grade: -76 to 212°F -60 to 100°C	-454 to 752°F -270 to 400°C	-6.258 to 20.872	greater of 1.0°C or 0.75%	greater of 0.5°C or 0.4%		Mild Oxidizing, Reducing Vacuum or Inert. Good Where Moisture Is Present. Low Temperature and Cryogenic Applications	T
E	CHROMEGA® NICKELCHROMIUM Ni-Cr	CONSTANTAN COPPER-NICKEL Cu-Ni			Thermocouple Grade: -328 to 1652°F -200 to 900°C Extension Grade: 32 to 392°F 0 to 200°C	-454 to 1832°F -270 to 1000°C	-9.835 to 76.373	greater of 1.7°C or 0.5%	greater of 1.0°C or 0.4%		Oxidizing or Inert. Limited Use in Vacuum or Reducing. Highest EMF Change Per Degree	E
N	OMEGA-P® NICROSIL Ni-Cr-Si	OMEGA-N® NISIL Ni-Si-Mg			Thermocouple Grade: -450 to 2372°F -270 to 1300°C Extension Grade: 32 to 392°F 0 to 200°C	-450 to 2372°F -270 to 1300°C	-4.345 to 47.513	greater of 2.2°C or 0.75%	greater of 1.1°C or 0.4%		Alternative to Type K. More Stable at High Temps	N
R	PLATINUM- 13% RHODIUM Pt-13% Rh	PLATINUM Pt	NONE ESTABLISHED		Thermocouple Grade: 32 to 2642°F 0 to 1450°C Extension Grade: 32 to 300°F 0 to 150°C	-58 to 3214°F -50 to 1768°C	-0.226 to 21.101	greater of 1.5°C or 0.25%	greater of 0.6°C or 0.1%		Oxidizing or Inert. Do Not Insert in Metal Tubes. Beware of Contamination. High Temperature	R
S	PLATINUM- 10% RHODIUM Pt-10% Rh	PLATINUM Pt	NONE ESTABLISHED		Thermocouple Grade: 32 to 2642°F 0 to 1400°C Extension Grade: 32 to 300°F 0 to 150°C	-58 to 3214°F -50 to 1768°C	-0.236 to 18.693	greater of 1.5°C or 0.25%	greater of 0.6°C or 0.1%		Oxidizing or Inert. Do Not Insert in Metal Tubes. Beware of Contamination. High Temperature	S
U	COPPER Cu	COPPER-LOW NICKEL Cu-Ni	NONE ESTABLISHED		Extension Grade: 32 to 122°F 0 to 50°C						Extension Grade Connecting Wire for R and S Thermocouples, Also Known as RX and SX Extension Wire.	U
B	PLATINUM- 30% RHODIUM Pt-30% Rh	PLATINUM- 6% RHODIUM Pt-6% Rh	NONE ESTABLISHED		Thermocouple Grade: 32 to 3092°F 0 to 1700°C Extension Grade: 32 to 212°F 0 to 100°C	32 to 3308°F 0 to 1820°C	0 to 13.820	0.5% over 800°C	NOT ESTABLISHED		Oxidizing or Inert. Do Not Insert in Metal Tubes. Beware of Contamination. High Temperature. Common Use in Glass Industry	B
G* (W)	TUNGSTEN W	TUNGSTEN- 26% RHENIUM W-26% Re	NONE ESTABLISHED		Thermocouple Grade: 32 to 4208°F 0 to 2320°C Extension Grade: 32 to 500°F 0 to 260°C	32 to 4208°F 0 to 2320°C	0 to 38.564	greater of 4.5°C or 1.0%	NOT ESTABLISHED		Vacuum, Inert, Hydrogen. Beware of Embrittlement. Not Practical Below 399°C (750°F). Not for Oxidizing Atmosphere	G (W)
C* (W5)	TUNGSTEN- 5% RHENIUM W-5% Re	TUNGSTEN- 26% RHENIUM W-26% Re	NONE ESTABLISHED		Thermocouple Grade: 32 to 4208°F 0 to 2320°C Extension Grade: 32 to 1600°F 0 to 870°C	32 to 4208°F 0 to 2320°C	0 to 37.066	greater of 4.5°C or 1.0%	NOT ESTABLISHED		Vacuum, Inert, Hydrogen. Beware of Embrittlement. Not Practical Below 399°C (750°F) Not for Oxidizing Atmosphere	C (W5)
D* (W3)	TUNGSTEN- 3% RHENIUM W-3% Re	TUNGSTEN- 25% RHENIUM W-25% Re	NONE ESTABLISHED		Thermocouple Grade: 32 to 4208°F 0 to 2320°C Extension Grade: 32 to 500°F 0 to 260°C	32 to 4208°F 0 to 2320°C	0 to 39.506	greater of 4.5°C or 1.0%	NOT ESTABLISHED		Vacuum, Inert, Hydrogen. Beware of Embrittlement. Not Practical Below 399°C (750°F)–Not for Oxidizing Atmosphere	D (W3)

Fonte: https://www.dewesoft.com/pro/course/temperature-measurement-2

A Figura 3.07 apresenta as curvas de resposta (potencial x temperatura) e dos coeficientes de *Seebeck* pela temperatura para os termopares tipo K, tipo S e tipo J.

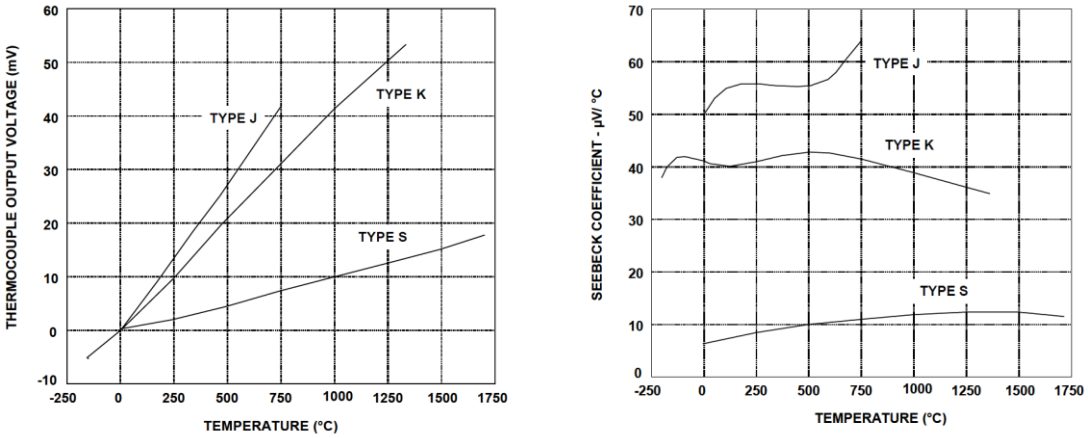
A dificuldade no uso dos termopares vem da própria natureza de seu funcionamento, quando se conecta um termopar a um aparelho de medida se estabelece duas novas junções, produzindo duas novas diferenças de potencial, que podem somar ou subtrair da produzida pela junção original.

A solução clássica é a técnica de Junção Fria (apresentada na Figura 3.08), que utiliza um segundo termopar conectado em contraposto com o primeiro de modo a não forma uma nova junção (na Figura 3.08, Metal B conectado com

Metal B), dessa forma tem-se quatro junções, a do primeiro termopar (na Figura 3.08, T1), a do segundo termopar (na Figura 3.08, T2) e as formadas pela conexão com o aparelho de leitura, porém estas últimas são junções de mesmo tipo (mesmos metais), mantidas a mesma temperatura ambiente e dispostas em sentidos opostos em relação a corrente, de modo que seus potenciais se anulam. A junção do segundo termopar é mantida a uma temperatura constante (normalmente $0°C$) para então ter seu potencial algebricamente somado do total.

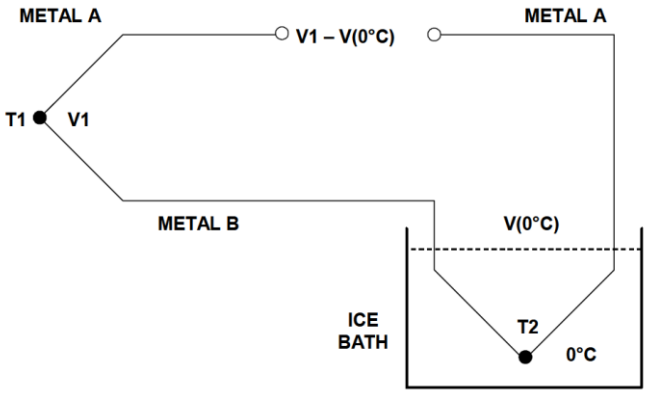
Figura 3.07 – Curvas de (a) tensão de (b) coeficiente de Seebeck com a temperatura

(a) (b)



Fonte: ZUMBAHLEN H., Linear Circuit Design Handbook, 2008

Figura 3.08 – Montagem clássica de termopar com junta fria



Fonte: ZUMBAHLEN H., Linear Circuit Design Handbook, 2008

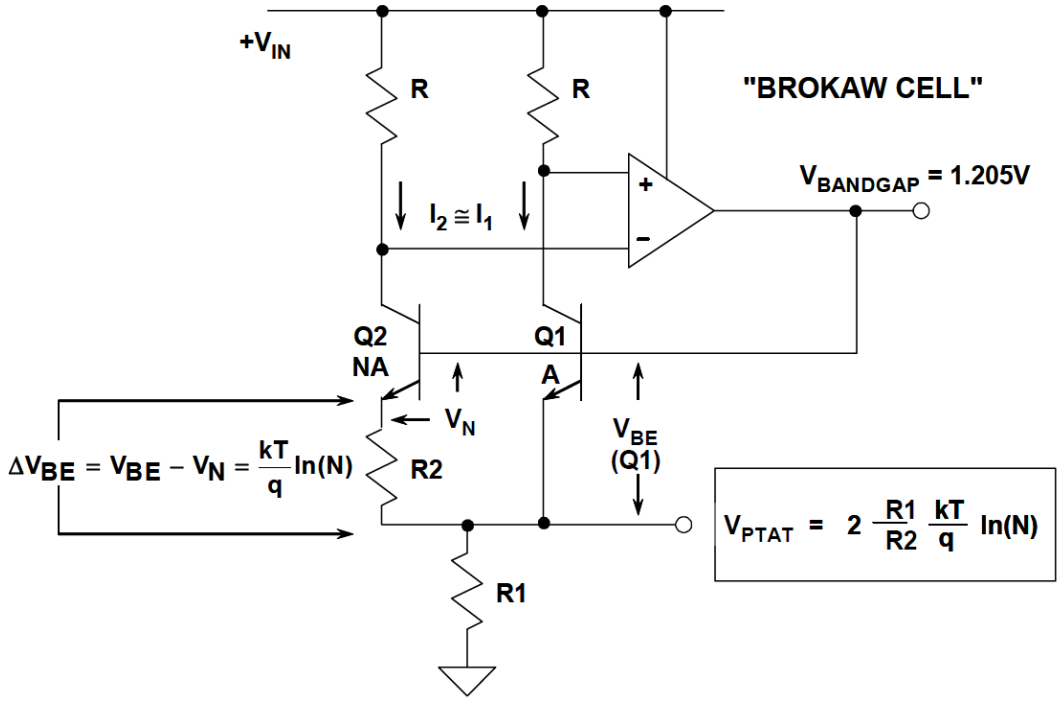
Ao se fazer uma calibração a subtração do potencial de junta fria é automaticamente realizada, porém repare que a confiança do sensor será dominada pela estabilidade da temperatura (de referência) da junta fria. A compensação eletrônica de junta fria eletrônica é uma técnica mais flexível, na qual é colocado outro sensor térmico para medir a temperatura da junta fria (que não necessita mais ser “fria”) e matematicamente (ou eletronicamente) o potencial da junta fria é subtraído do potencial total antes da conversão, porém a confiança do sistema é dominada pelo sensor que mede a temperatura da junta fria, que pode ocorrer de ser menos exato e preciso que o termopar, contudo pode apresentar uma grande acurácia em torno da temperatura ambiente, ao qual o instrumento de medida está expoto.

3.3.2 Semicondutores (Circuitos integrados - CI)

Os termômetros de semicondutores (CI) são viáveis a nível produção industrial (em larga escala) e funcionais a nível de utilização, pois normalmente não necessitam de condicionamento de sinal, isto é o sinal produzido pelo sensor pode ser diretamente lido (o sinal é internamente amplificado) por um microcontrolador e possui uma fácil conversão da leitura (tensão ou corrente) para temperatura (linear, dentro das especificações de acurácia e precisão).

Estes sensores térmicos são normalmente baseados no transistor de junção bipolar, cuja dependência da tensão base-emissor com a temperatura é bem conhecida, e tem sua configuração normalmente inspirada na “*Brokaw Cell*” (ZUMBAHLEN, 2008), que basicamente é um circuito de tensão de referência com baixa dependência com a temperatura (na Figura 3.09, $V_{bandgap}$), mas possui outras duas fontes de tensão (na Figura 3.09, V_{PTAT} e ΔV_{BE}) que dependem quase que exclusivamente da temperatura, e em uma configuração para compensar a variação térmica, no caso de uma fonte de tensão de referência ou quando se mede o desequilíbrio desta configuração, mede-se de forma proporcional a variação da temperatura, que pode ser previamente calibrado a um valor de referência.

Figura 3.09 – Sensor de temperatura tipo Bandgap clássico



Fonte: ZUMBAHLEN H., Linear Circuit Design Handbook, 2008

Dentre os circuitos integrados (IC) sensíveis a temperatura, destaca-se o LM35, utilizado na proposta prática para educação básica apresentada na seção 7, “Uma proposta de prática para educação básica”. O LM35 explora a sensibilidade térmica da fonte de tensão V_{PTAT} em um circuito semelhante ao apresentado na Figura 3.09 (US005519354A, 1996), cuja curva da tensão pela temperatura é dada pela expressão 3.01 (LM35, 2000), onde V_{out} é a tensão de saída do sensor e T a temperatura.

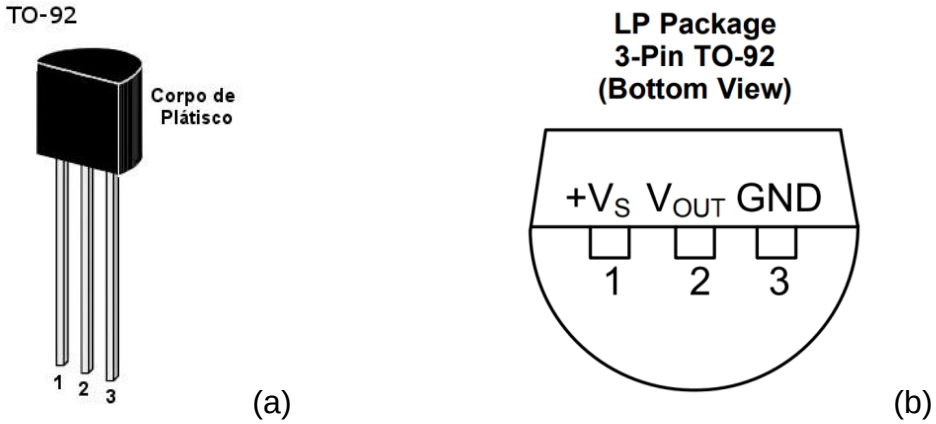
$$V_{out} = 10\,\frac{mV}{T}\,[V]\ . \qquad 3.01$$

As características do LM35 são atraentes, garantido um ótimo custo benefício, seu custo no Brasil é de \$1,00 a \$2,00 (Dólares), sua acurácia (erro estático) típica garantida pelo fabricante (LM35, 2000) é de $\pm 0{,}5°C$ e seu erro de Linearidade (precisão) típico é de $\pm 0{,}3\,°C$. Em outra oportunidade foram testados seis sensores LM35 (PEREIRA, 2017, e a diferença máxima entre os

sensores para uma dada temperatura foi de $0{,}54\,°C$ e a dispersão para uma coleta de 109800 leituras de um único sensor foi de $0{,}18\,°C$, ambos resultados concordam com as especificações do fabricante, ainda nesse trabalho discutiu-se a montagem para grandes distâncias entre o sensor e o sistema de leitura.

O invólucro típico do LM35 no Brasil é o TO-92 (menor custo, em relação ao TO-46) e sua pinagem é apresentada na Figura 3.10, onde o pino 1 (V_s) é a tensão de alimentação, o pino 2 (V_{out}) é o sinal de saída e o pino 3 (GND) é o terra.

Figura 3.10 – Pinagem LM35



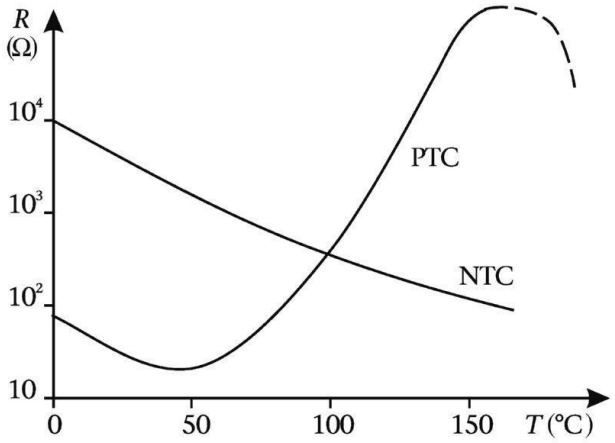
Fonte: (a) Autor (b) LM35, 2000

3.3.3 Termistores

Dos sensores mencionados na Tabela 3.01, o termistor é o mais sensível deles e possui um custo relativamente baixo, são normalmente feitos de óxidos (VASSALLO, 1987) que possuem propriedades de semicondutoras e podem ser do tipo PTC (*Positive Temperature Coefficient*) ou NTC (*Negative Temperature Coefficient*), porém possuem baixa linearidade.

Os termistores tipo PTC são normalmente usados como chaves térmicas enquanto os NTC são mais utilizados como termômetros (BAKER, 2011 (b)), isso acontece principalmente devido ao comportamento da resistência (PTC ou NTC) com a temperatura mostrado na Figura 3.11.

Figura 3.11 – Curvas características de termistores tipo NTC e PTC



Fonte: http://members.chello.nl/l.boncoeur/ntc.html

Através do gráfico da Figura 3.11 percebe-se que termistores do tipo NTC, possuem um comportamento mais previsível do que os termistores do tipo PTC, o que ajuda a reforçar o uso preferencial de NTC's como termômetros ao invés dos PTC's. Os PTC's são utilizados normalmente para determinar um liminar de temperatura em sistemas eletrônicos do tipo chave (liga/desliga) ou em circuitos eletrônicos para compensação de temperatura uma vez que os semicondutores que compõem os circuitos eletrônicos possuem um coeficiente de temperatura negativo.

Observa-se também a natureza exponencial da resistência de um NTC em função da temperatura (eixo dependente em escala log), o que indica (em uma primeira aproximação) uma curva do tipo apresentada na equação 3.02, onde A_2 é uma constante de proporcionalidade e β, resguarda propriedades do composto utilizado na fabricação do termistor e tem seu valor indicado pelo fabricante, $\beta = \frac{E_g}{k}$, onde E_g é energia da banda proibida e k a constante de Boltzmann.

$$R = A_2 e^{\frac{\beta}{T}} \ [\Omega] \ . \qquad 3.02$$

A equação 3.02 é normalmente escrita na forma da equação 3.03, que possui uma forma mais conveniente (uso mais cômodo), pois a constante A_2, nesta expressão é substituída por outras constantes que normalmente são fornecidas pelos fabricantes. A constante $R_{(T_0)}$ é a resistência na temperatura de referência T_0, que normalmente é $25°C$ $(298.15\ K)$.

$$R = R_{(T_0)} exp\left[\beta\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)\right][\Omega]\ . \qquad 3.03$$

A curva mais tradicional e normalmente utilizada para calibrar os sensores do tipo NTC é conhecida como a equação de Steinhart-Hart (STEINHART, 1968) (3.04), onde R é a resistência, T a temperatura e A_4, B_4 e C_4 são constantes a se determinar durante a calibração, segundo Baker este tipo de curva consegue uma boa acurácia (aproximadamente $\pm\, 0{,}1\ °C$) (Baker, 2011 (b)).

$$\frac{1}{T} = A_4 + B_4 \ln(R) + C_4(\ln(R))^3\ \left[\frac{1}{T}\right]. \qquad 3.04$$

Devido ao seu baixo custo e alta sensibilidade, foram realizados diversos estudos sobre curvas de calibração para termistores do tipo NTC, White no estudo intitulado *Interpolation Errors in Thermistor Calibration Equations* (WHITE, 2017), discute o erro de algumas das curvas mais usadas em treze tipos de termistores diferentes, e segundo ele a expressão 3.05 para uma faixa de temperatura de $200°C$ (por exemplo, de $20\ °C$ a $220\ °C$), possui um erro quadrático médio menor do que a $0{,}1\ °C$, e para uma faixa de até $80\ °C$ esse erro é menor do que $0{,}001\ °C$. A fim de minimizar os erros, é indicado que se tenham um número de pontos superior ao número de paramentos da curva escolhida, pois dessa forma o processo de calibração é capaz de retornar

valores que possam refletir a qualidade da curva final, como por exemplo o desvio quadrático médio.

$$\frac{1}{T} = A + B\ln\left(\frac{R}{R_0}\right) + C\left[\ln\left(\frac{R}{R_0}\right)\right]^2 + D\left[\ln\left(\frac{R}{R_0}\right)\right]^3\left[\frac{1}{T}\right]. \qquad 3.05$$

A equação 3.05 apresenta além das constantes multiplicativas a constante R_0 que apenas indica a resistência em T_0, isto é a resistência na dada temperatura inicial analisada.

A Figura 3.12 apresenta o resumo do estudo feito por White sistematizado em um gráfico, que dispõe valores médios quadráticos do erro para cada interpolação (curva de calibração) para os treze tipos de termistores estudado por White.

Figura 3.12 – Erro de interpolação para curvas de calibração de NTC's

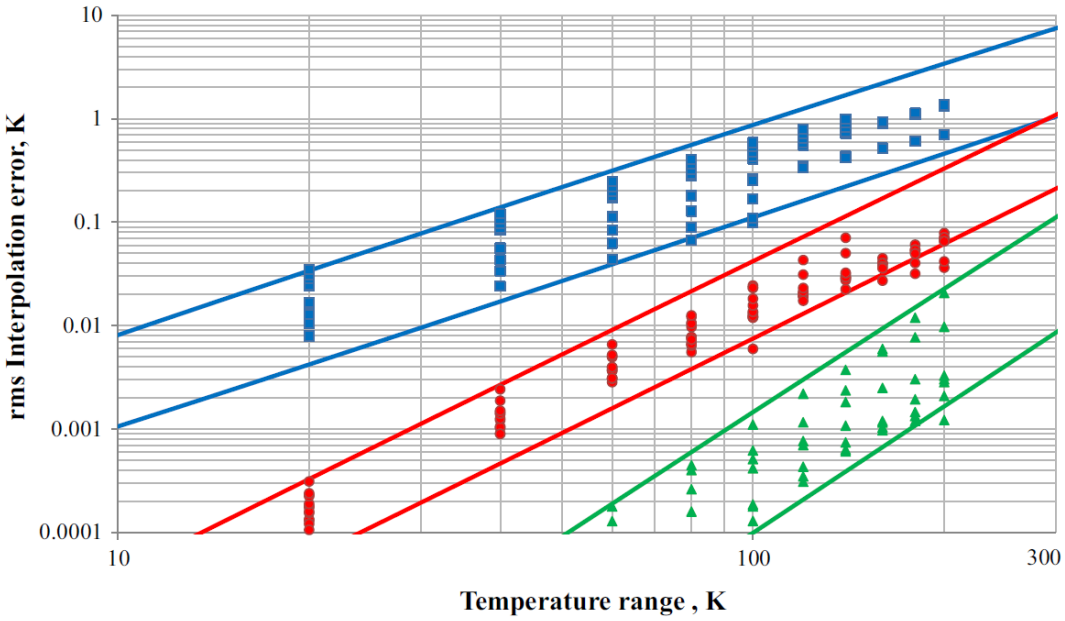


Figura 3.12: Erro de interpolação quadrático médio (rms) para uma gama de diferentes termistores em diferentes faixas de temperatura e para equação de interpolação de diferentes ordens (número de termos - N). Quadrados azuis: N = 2; pontos vermelhos: N = 3; triângulos verdes: N = 4. As linhas sólidas indicam os limites aproximados.

Fonte: WHITE, 2017

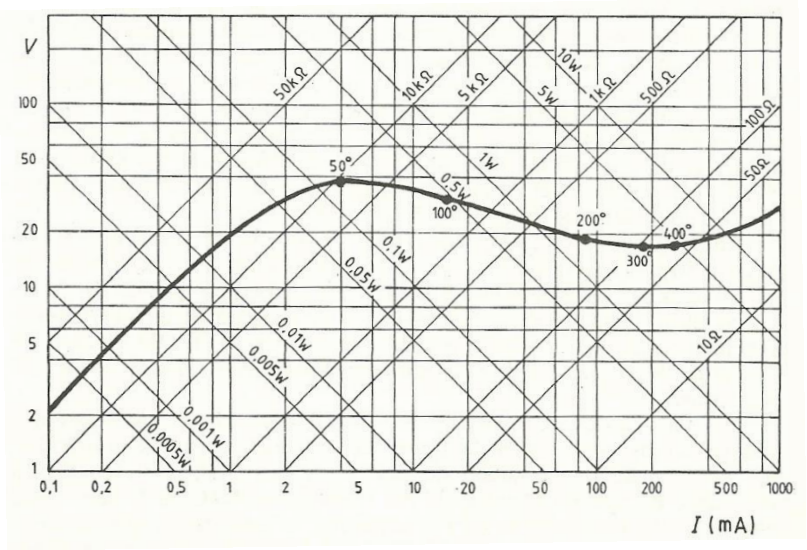
A estabilidade dos compostos que formam os termistores tende a melhorar com o passar do tempo (VASSALLO, 1987), por tanto esperar-se que o fabricante garanta um tempo de amadurecimento do composto antes da comercialização, para componentes de utilização como medidores de temperatura, para aplicações em que o interesse é um limiar de temperatura esse efeito não é importante (sensor tipo chave liga/desliga).

Com o intuito de minimizar o erro devido ao auto aquecimento do sensor (efeito Joule), procura-se trabalhar em uma região de baixa potência (no caso do NTC, normalmente até $10\,mW$, ver Figura 3.13), o erro devido ao auto aquecimento surge da própria natureza física dos termistores, que à medida que a temperatura aumenta sua resistência aumenta (PTC) ou diminui (NTC), no caso de um termistor com coeficiente positivo, isso não chega a ser um grande problema, pois ele acaba chegando a um equilíbrio, uma vez que com o aumentar da sua resistência a corrente do circuito diminui (à tensão continua), já para os NTC's que possuem um coeficiente negativo, conforme a temperatura aumenta a resistência diminui e a corrente aumenta, aumentado ainda mais o efeito de auto aquecimento, as aplicações como medidores de temperatura estão longe deste regime.

Existem aplicações que fazem uso dessa característica dos termistores, por exemplo, no caso do NTC, pode-se associá-lo em série a uma lâmpada de filamento com o intuído de evitar picos de correntes ao acionar o circuito.

A Figura 3.13 apresenta uma curva genérica da tensão pela corrente de um NTC à temperatura ambiente constante ($25\,°C$), o gráfico está em escala log, para que seja possível indicar por meio de retas os valores de resistência (retas crescentes) e de potência (retas decrescentes), nele pode-se observar uma região na qual a resistência é razoavelmente constante (até $10\,mW$), porém em uma instrumentação de medição de temperatura mais cuidadosa deve-se procurar a curva (V/I) específica do sensor utilizado, que está relacionada com as características térmicas e elétricas do sensor. De modo geral trabalhar em uma potência de até $1\,mW$ (por exemplo de $0{,}1\,mW$ a $1\,mW$), deve minimizar consideravelmente as variações da resistência por auto aquecimento sem comprometer a intensidade do sinal de saída do sensor (leitura).

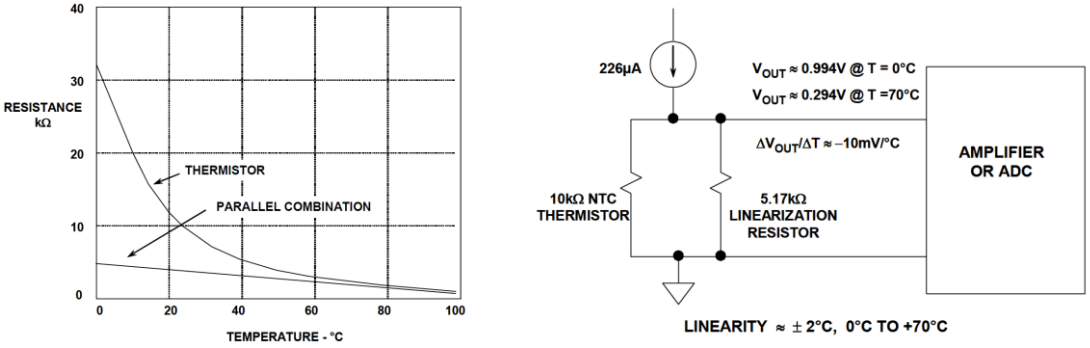
Figura 3.13 - Curva de tensão por corrente característica de termistores tipo NTC



Fonte: VASSALLO, 1987

Pode-se linearizar analogicamente o sinal de termistor (Figura 3.14), através da associação de uma resistência em paralelo ao NTC, porém essa técnica diminui consideravelmente a sensibilidade do sistema de medição. Na Figura 3.14, (a) apresentação das curvas de resistência em função da temperatura para um mesmo sistema linearizado e não linearizado, e (b) o esquemático de um exemplo de um circuito de linearização para NTC.

Figura 3.14 - (a) Resistência por temperatura para um sistema linearizado e um não linearizado, (b) exemplo circuito de linearização para NTC



(a) (b)

Fonte: ZUMBAHLEN H., Linear Circuit Design Handbook, 2008

O uso de termistores em aplicações mais refinadas, não é comum, pois sistemas de medição com estes sensores são normalmente poucos reprodutíveis (baixa intercambialidade), isso se deve à complexidade do processo de produção de termistores.

3.3.4 RTD

Assim como os termistores o RTD (*Resistance Temperature Detector*), é um resistor que varia sua resistência em função da temperatura, são feitos de metais nobre ou ligas metálicas quimicamente estáveis possuindo assim um coeficiente positivo. Por outro lado eles diferem-se dos termistores, por serem razoavelmente lineares e possuírem alta intercambialidade dentre sensores do mesmo modelo (reprodutibilidade). A Tabela 3.02 relaciona outros modelos de RTD e a Tabela 3.03 detalha diversos padrões de PT100.

De acordo com a Tabela 3.02, os RTD's mais confiáveis e por tanto mais utilizados são de feitos de platina (fio ou filme fino[2]) e são normalmente encontrados nos modelos Pt100 que possuem uma resistência (R_0) $100\,\Omega$ a $0°C$, Pt500 que possuem uma resistência (R_0) $500\,\Omega$ a $0°C$ e Pt1000 que possuem uma resistência (R_0) $1000\,\Omega$ a $0°C$.

[2] Depósito de uma fina camada (tipicamente < $1\mu m$) de material (metal, neste caso) em uma superfície (substrato), que pode ser uma cerâmica.

Tabela 3.02 – Comparação entre diversos padrões de RTD

RTD MATL	R 0°C OHMS	ALPHA α (Ω/Ω/°C)	TEMPERATURE RANGE	PRIMARY BENEFITS
Pt	100	0.00385	-260°C à 850°C	Melhor estabilidade, Boa linearidade, Faixa de funcionamento ampla
	1000	0.00385	-200°C à 660°C Típico	
	100	0.00392		
	100	0.00391		
	25.5	0.00392		
	200	0.00385		
	470	0.00392		
	500	0.00392		
	500	0.00391		
	500	0.00385		
	1000	0.00395		
	100	0.00393		
	100	0.00389		
	98.129	0.00392		
	200	0.00392		
Cu	9.035	0.00427	-100°C à 260°C	Melhor Linearidade
	100	0.00427	-80°C à 260°C Típico	
Ni	100	0.00618	-100°C to 260°C	Alta sensibilidade, Baixo custo
	120	0.00672	-80°C à 260°C Típico	
Ni-Fe	604	0.00518	-200°C à o 200°C	Baixo custo, Alta sensibilidade
	908.4	0.00527	0°C à 200°C Típico	
	1816.81	0.00527		

Fonte: ACROMAG, 2011

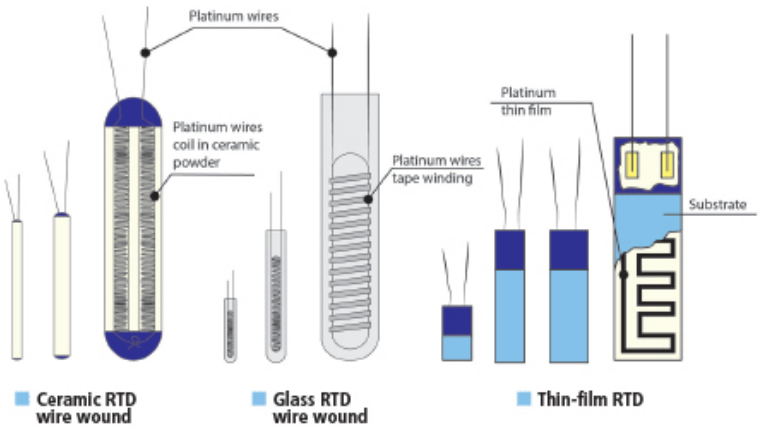
Tabela 3.03 - Classificação de diversos padrões de Pt100

R 0°C OHMS	**ALPHA α (Ω/Ω/°C)**	**REFERENCE**
100	0.00393	Highest purity Platinum
	0.003927	
	0.003926	ITS-90 Lab Standard Pt RTD, Requires ≥ 99.999% Purity. This is the laboratory standard platinum RTD which requires the high purity platinum wire (≥ 99.999%) and must be wound in a strain-free configuration which is difficult to achieve. However, some manufacturers come close and offer nominal TCR's of 0.00392 or 0.003923.
	0.003925	Very Pure Platinum for High Precision RTDs
	0.003923	SAMA
	0.003920	Old US Standard
	0.003916	Per JIS C1604-1981 and US Standard Curve, Common in US and Japan where it is the accepted standard
	0.00392	
	0.003911	This is the "American" or "US Industrial Standard" platinum RTD which has a lower TCR due to the imposition of strain imposed on the platinum wire from the hightemperature ceramic materials used in its construction.
	0.00391	
	0.003902	Another US Industrial Standard
	0.003900	Per BS 2G 148, Originally Specified for British Aircraft Industry
	0.00389	
	0.00385	Per IEC Publication 751-1983, DIN 43760, DIN-IEC-761, Majority standard outside US and Japan. This is the standard platinum RTD defined via DIN43760 and IEC 751 and the most popular one recognized nationally and internationally.
	0.00375	This is a low-cost alternative to the more expensive platinum RTDs outlined above.

Fonte: ACROMAG, 2011

Os RTD feitos de fio costumam ser mais confiáveis do que os feitos com filme fino (principalmente devido à estabilidade mecânica, pois existe o problema da expansão térmica quando aquecidos), na Figura 3.15 tem-se uma ilustração representado os três tipos típicos de estruturas de RTD de platina. Normalmente além do encapsulamento apresentado na Figura 3.15, esse tipo de sensor costuma ser usado dentro de uma cápsula de metal para melhora sua resistência mecânica e robustez.

Figura 3.15 - Os três tipos típicos de estruturas de um RTD de platina (Pt)



Fonte: http://brandfamily.isa.org/

A curva de calibração da resistência em função da temperatura não é linear e pode ser obtida através da equação Callender-Van Dusen (ACROMAG, 2011), equação 3.06, onde R_0 é a resistência nominal á $0°C$ em Ω (que para o Pt100 utilizado vale $100\,\Omega$), α é o coeficiente de temperatura em $\Omega/\Omega/°C$ (que para o Pt100 utilizado vale $0{,}00385\,\Omega/\Omega/°C$), δ é um coeficiente que depende do material, que para platina pura vale 1.49 (que para o Pt100 utilizado vale $1{,}4999$) e β vale zero para temperatura maior ou igual a $0°C$ e $\beta = 0.11$ (que para o Pt100 utilizado vale 0.10863).

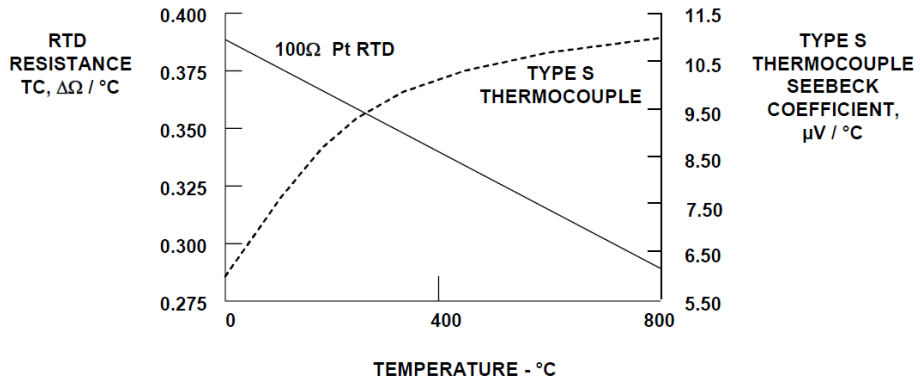
$$R_{(T)} = R_0 + R_0\alpha\left[T - \delta\left(\frac{T}{100} - 1\right)\left(\frac{T}{100}\right) - \beta\left(\frac{T}{100} - 1\right)\left(\frac{T}{100}\right)^3\right]\,[\Omega]\,. \qquad 3.06$$

Para Pt100 do modelo DIN EN 60751 ou IEC751, para temperaturas acima de $0°C$ a resistência em função da temperatura é indicada pela equação 3.07, onde R_0 é a resistência a $0\,°C$, T a temperatura em Celsius e as constantes $A_{pt} = 3{,}908\,x10^{-3}\,°C^{-1}$, $B_{pt} = -5{,}775\,x10^{-7}\,°C^{-2}$.

$$R_{(T)} = R_0\left(1 + A_{pt}T + B_{pt}T^2\right)[\Omega]\,. \qquad 3.07$$

Na Figura 3.16, temos as curvas dos coeficientes térmicos de um Pt100 e de um termopar tipo S, pela variação da temperatura. Percebe-se que o coeficiente do Pt100 é mais linear do que o do termopar, isso implica que a resposta do Pt100 a variação da temperatura é mais previsível, facilitando assim sua linearização.

Figura 3.16 - Curvas de resposta de um Pt100 (RDT de platina) e um termopar tipo S em função da temperatura



Fonte: ZUMBAHLEN H., Linear Circuit Design Handbook, 2008

Neste trabalho optou-se por utilizar como sensores térmicos dois Pt100AA fabricados pela OMEGA, calibrados contra um Pt100AAA do mesmo fabricante, e dessa forma atribuindo as características do sensor de referência aos utilizados, que possui uma acurácia de $\pm\,(0{,}03\ +\ 0{,}0005\,T)\,°C$ que equivale a um erro de $\pm\,0{,}012\,\Omega$ a $0°C$ em $100\,\Omega$.

Para a leitura dos dois Pt100's, utilizou-se um conversor ADC (*Analog Digital Converter*) de ganho ajustável, ADS1248, adaptado de *3-Wire RTD Measurement System Reference Design, -200°C to 850°C*, (ANDREWS, 2014), e o Arduino para realizar a interface com o computador.

Uma revisão, mas completa sobre termopares e RTD's pode ser encontrada em Acromag: *CRITERIA FOR TEMPERATURE SENSOR SELECTION OF T/C AND RTD SENSOR TYPES*, partes 1,2 e 3 (ACROMAG, 2011) e *How to Prevent Temperature Measurement Errors When Installing Thermocouple Sensors and Transmitters* (ACROMAG).

3.4 Sensores umidade capacitivos

Dos sensores de umidade relativa discutidos neste texto, os transdutores elétricos são os mais utilizados a nível de indústria e em produtos manufaturados, pois em geral possuem tamanhos pequenos, boa Intercambiabilidade que contribui na reprodutibilidade do produto ou processo e produzem diretamente um sinal elétrico que é um fator facilitador, visto que atualmente os processos de controle são elétricos/eletrônicos, diferentemente dos higrômetros capilares e psicrômetros.

Dentre os transdutores elétricos sensíveis à umidade relativa, destacam-se principalmente os resistivos e capacitivos, a Figura 3.17, apresenta parâmetros de qualidade e confiança para diferentes tipos de sensores de umidade na forma de uma tabela, onde pode-se ver, que os sensores capacitivos são na média mais estáveis, acuratos, lineares, intercambiáveis e funcionam em uma faixa de temperatura maior.

Figura 3.17 - Alguns tipos de transdutores elétricos sensíveis a umidade por tecnologia

Active Material	Thermo-set Polymer	Thermoplastic Polymer	Thermoplastic Polymer	Bulk Thermoplastic	Bulk AlO3	Lithium Chloride Film
Substrate	Ceramic or Silicon	Ceramic or silicon	Polyester or mylar film	N/A	N/A	Ceramic
Sensed Parameter	Capacitance	Capacitance	Capacitance	Resistance	Resistance	Conductivity
Measured Parameter	%RH	%RH	%RH	%RH	%RH	%RH
RH Change	0% to 100%	0% to 100%	0% to 100%	20% to 100%	2% to 90%	15% to <100%
RH Accuracy	±1% to ±5%	±3% to ±5%	±3% to ±5%	±3% to ±10%	±1% to ±5%	±5%
Interchangability	±2% to ±10% RH	±3% to ±20% RH	±3% to ±20% RH	±5% to ±25% RH	poor	±3% to ±10% RH
Hysterisis	<1% to 3% RH	2% to 5% RH	2% to 5% RH	3% to 6% RH	<2% RH	very poor
Linearity	±1% RH	±1% RH	±2% RH	poor	poor	Very poor
Risetime	15 s to 60 s	15 s to 90 s	15 s to 90 s	2 min to 5 min	3 min to 5 min	3 min to 5 min
Temperature Range	-40 °C to 185 °C	-30 °C to 190 °C	-25°C to 100 °C	10 °C to 40 °C	-10 °C to 75 °C	-
Long Term Stability	±1%RH/5 yr	±1%RH/yr	±1%RH/yr	±3%RH/yr	±3% RH/yr	>1% RH/°C

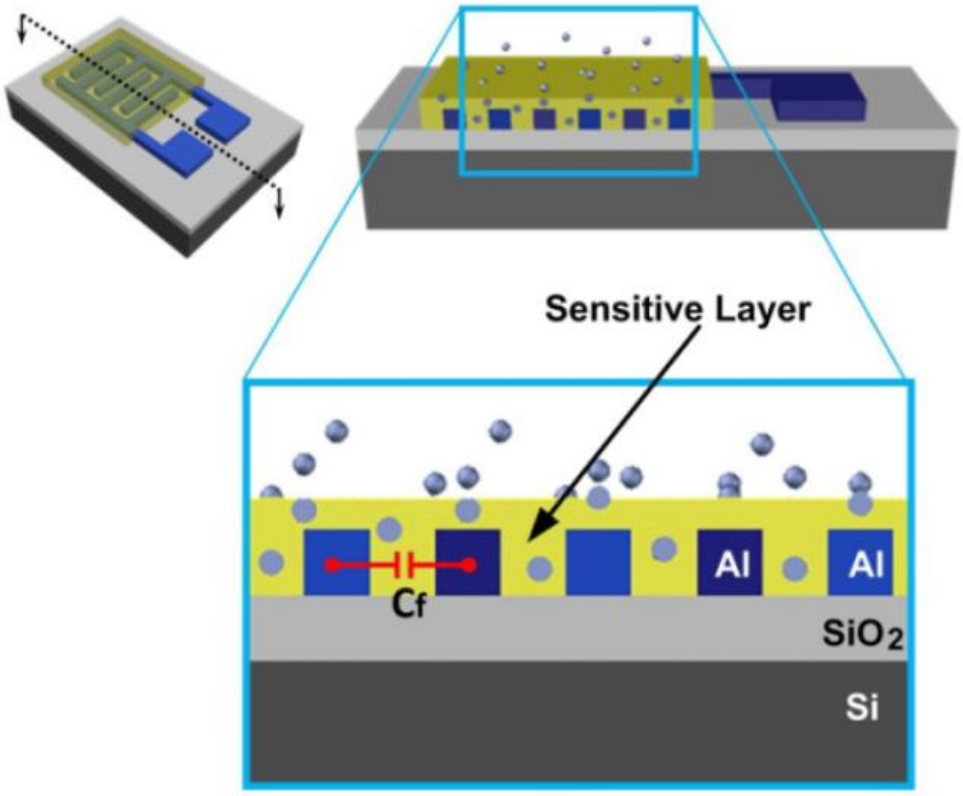
Fonte: https://www.engineersgarage.com/articles/humidity-sensor

Hoje em dia a tecnologia de fabricação de polímeros permite a construção de plásticos porosos (higroscópicos) e resistentes, características importantes para a fabricação de sensores de umidade, que podem explorar de duas formas diferentes essas características. Sensores do tipo capilar exploram a variação de propriedades mecânicas em função da quantidade de vapor de água contido no polímero, por exemplo seu tamanho e elasticidade, já os transdutores observam a variação de intensidade de suas propriedades elétricas, como por exemplo sua resistividade, condutividade e constante dielétrica.

A quantidade de moléculas de água no polímero altera sua constante dielétrica e consequentemente a capacitância do sensor, porém a capacidade de absorção de água do polímero muda com a temperatura e dessa forma se faz necessário uma correção, por isso é comum que os sensores capacitivos de umidade venham acompanhados de sensores térmicos, tornando possível a correção interna (quando há um processamento interno) ou externa.

Uma forma comum de construção de sensores de umidade capacitivos é apresentada na Figura 3.18, que explora a associação em paralelo de diversos capacitores.

Figura 3.18 - Exemplo de configuração de um sensor de umidade capacitivo



Fonte: Adaptada de "*A CMOS MEMS Humidity Sensor Enhanced by a Capacitive Coupling Structure*", HUANG, 2016

Para o desenvolvimento da parte experimental deste trabalho optou-se por utilizar os sensores capacitivos comerciais de diferentes gerações SHT-31 (SENSIRION, 2016) e SHT-75 (SENSIRION, 2011), ambos fabricados pela Sensirion (https://www.sensirion.com/en/) e com comunicação digital, isto é, o valor da umidade é pré-processado internamente, os seus parâmetros de qualidade de medição de umidade relativa já processados internamente estão dispostas na Tabela 3.04.

Tabele 3.04 - Parâmetros dos sensores SHT75 e SHT31

Parâmetros	SHT-75	SHT-31
Faixa de operação	$0\%\ Ur - \ 100\%\ Ur$	
Acurácia	$\pm 1.8\ \%\ Ur$	$\pm 2.0\ \%\ Ur$
Precisão	$\pm 0.1\ \%\ Ur$	$0.15\ \%\ Ur$
Não Linearidade	$\ll 1\ \%\ Ur$	Não Informado
Estabilidade de longo prazo	$< 0.5\ \%\ \frac{Ur}{ano}$	$< 0.25\ \%\ \frac{Ur}{ano}$
Constante de tempo ($\tau = \ 63\%$)	$8s$	$8s$
Histerese	$\pm 1.0\ \%\ Ur$	$\pm 0.8\ \%\ Ur$

Fonte: Datasheet SHT7x-DIS e Datasheet SHT3x-DIS

A Figura 3.19(a) apresenta o sensor SHT-31 em um modulo, a Figura 3.17 (b), apresenta uma foto de uma região interna do SHT31, tirada com o auxílio de um microscópio óptico, nela pode-se ver a complexidade da sua estrutura interna.

Figura 3.19 - Sensor SHT-31

(a) (b)

Figura 3.19: Imagem (a) em um modulo e (b) foto tirada com um microscópio da região aberta do sensor

Fonte: Autor

4.0 DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL

Uma vez definido o sensor de temperatura a ser utilizado, observou-se a necessidade de se verificar (e se necessário corrigir) sua acurácia contra um padrão de referência. Para isso foi montado um sistema de calibração térmica, na faixa da temperatura ambiente até aproximadamente $150\,°C$, com estabilidade térmica de $0{,}01\,°C$ ao longo de 30 segundos (tempo necessário para realizar as leituras de temperaturas) e automatizado para gerar patamares de temperatura. O sistema realiza a calibração contra um PT100 de referência categoria AAA da Omega (acurácia de $\pm\,0{,}03\,ºC$ a zero Célsius). Foi desenvolvido um medidor de temperatura duplo com 2 PT100´s de categoria AA, utilizando um único conversor ADC (responsável pelo pré-processamento do sinal) com estágio amplificador e entradas multiplexadas, integradas em um único componente. Desta forma são produzidos dois termômetros idênticos, pois compartilhando a mesma eletrônica elimina possíveis divergências devido ao estágio de pré-processamento de sinal e as correções devido aos sensores são realizadas no momento da calibração de temperatura contra o padrão de referência. Um dos parâmetros para a determinação da temperatura com o psicrômetro é a diferença de temperatura entre os termômetros de bulbo seco e bulbo úmido.

4.1 O sistema de calibração térmica

O sistema de calibração pretende calibrar um ou mais Pt100AA (classe AA) contra um Pt100AAA (classe AAA), conferindo assim as especificações do Pt100AAA para o menos preciso e acuráto Pt100AA.

O sistema deve gerar automaticamente um número de patamares (ou degraus) de temperatura (eixo vertical) estável, como uma escada, onde cada degrau representaria uma temperatura estável na qual são coletados os dados para calibração, a Figura 4.01 apresenta uma representação da resposta (temperatura) esperada do sistema, isto é, o que se espera dele, enfatizando as oscilações, no estágio de estabilização.

Figura 4.01 – Resposta desejada para o sistema de calibração térmica

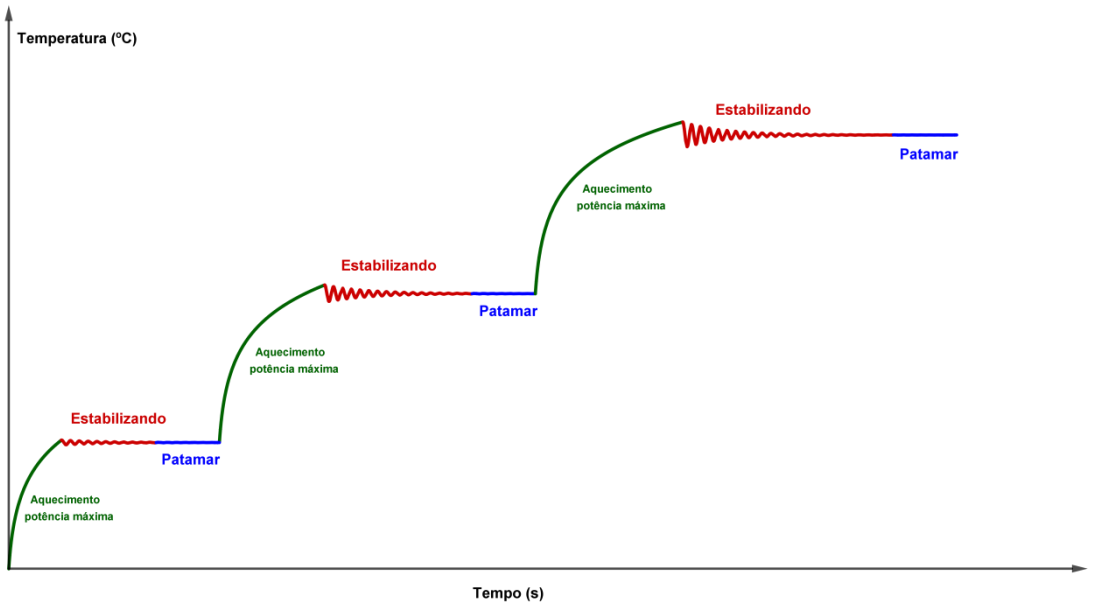


Figura 4.01: Representação da resposta desejada do sistema de calibração, eixo vertical indica a temperatura na câmara térmica e o eixo horizontal o tempo, valores arbitrários.

Fonte: Autor

Na Figura 4.01, as rampas de subida denominadas “aquecimento potência máxima”, referem-se à aplicação de uma potência de aproximadamente $15\,W$ ($15\,V$ e $\sim 1\,A$), pois a corrente máxima (limitada pelo programa) de $1\,A$ deve variar em função da resistência do aquecedor, que por sua vez muda com a temperatura, a tensão de $15\,V$ não muda pois o controle da fonte é sobre a tensão. Repare que o tempo de ação da curva de “aquecimento potência máxima” aumenta com a temperatura, ou seja, quanto maior a temperatura maior será o tempo de aquecimento com a potência máxima, para produzir o próximo patamar.

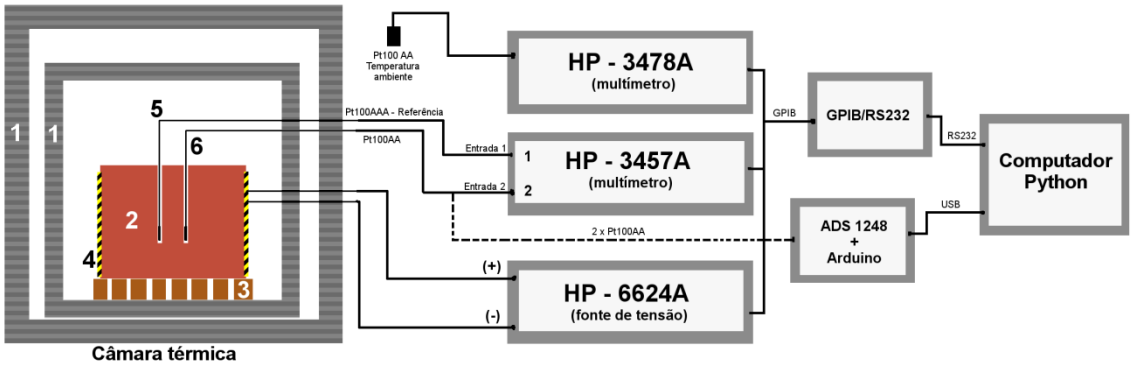
Ainda na Figura 4.01, as oscilações denominadas de “estabilizando”, referem-se ao processo de estabilização da temperatura, a oscilação enfatizada é produto da diferença de temperatura entre o meio externo e interno, fora e dentro da câmara térmica (ver Figura 4.02), a oscilação aumenta para temperaturas internas maiores, pois a temperatura externa permanece razoavelmente constante. Os momentos de realizar as medidas de calibração estão representados na Figura 4.01 pelas regiões denominadas de “Patamar”.

Sendo o Pt100 um sensor metálico (Platina) resistivo de temperatura, optou-se por utilizar a resistência durante o processo de calibração ao invés da temperatura, uma vez que os dois sensores respondem em resistência. Nada impede de utilizar o mesmo sistema para calibrar outros tipos de sensores, por exemplo, termopares, termistores e outros, para isso basta converter a resistência em temperatura, antes de gerar a curva de calibração, caso ocorra.

O sistema de calibração térmica, atua de forma auto interativa, verificando antes de cada medida a estabilidade do sistema, que não pode variar mais do que $6{,}67\ x\ 10^{-5}\ [\Omega/_S]$, o que corresponde aproximadamente a um $\Delta T = 0{,}005\ K$ em 30 segundos, caso a estabilidade não seja confirmada, inviabilizando o uso dos pares de medidas coletados durante o patamar, o programa volta a buscar a estabilidade, e quando alcançada, começa um novo conjunto de pares de medidas para aquele patamar. Um parâmetro de estabilidade foi escolhido em função do tempo médio entre três pares de medidas e da confiança do Pt100AAA, de modo que fosse obtida durante a calibração uma estabilidade maior a do sensor de referência, isto é, garantido que a fonte de erro na medida seja dominada pelo erro do sensor de referência.

Um par de medidas em um dado patamar (região de temperatura estável) é composto por: a) uma medida (média de 10 leituras e o tempo) do sensor de referencia (Pt100AAA); b) uma medida (média de 10 leituras e o tempo) do(s) sensor(es) a ser(em) calibrado(s), c) uma medida (média de 10 leituras e o tempo) da temperatura externa (Pt100AA). São esses pares de medidas que serão utilizados para gerar a curva de calibração, a temperatura externa é coletada com o propósito de buscar respostas para possíveis comportamentos indesejáveis na curva de resposta do sistema de calibração.

Figura 4.02 - Descrição esquemática do *hardware* do sistema de calibração



Fonte: Autor

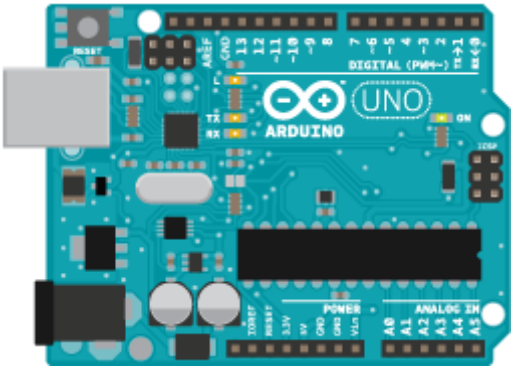
A Figura 4.02 apresenta o esquema do *hardware* do sistema de calibração, composto por (1) duas as caixas de isolação térmica (isopor), uma dentro da outra, com espaço (ar) entre as caixas, (2) bloco de cobre que tem a função de aumentar a inércia térmica e garantir o acoplamento térmico entre os sensores, (3) base de madeira perfurada para proteger o isopor do bloco de cobre aquecido, (4) fio resistivo envolvendo o bloco de cobre e (5 e 6) sensores térmicos (Pt100AAA e Pt100AA).

O multímetro HP-3457A, tem a função de medir as resistências do Pt100AAA (sensor de referencia, 5) e o Pt100AA (sensor a ser calibrado, 6), a entrada dois do HP, pode alternativamente não ser utilizada e no seu lugar, conectar o aparato de medida de temperatura composto por dois Pt100AA, ADS1248 e o Arduino (linha pontilhada), que foi utilizado para a montagem do psicrômetro, neste caso a intenção foi de calibrar o aparato como um todo e não só os sensores. O valor medido no sensor de referência é também usado no monitoramento da estabilidade da temperatura interna do sistema de calibração.

O Arduino (https://www.arduino.cc/), Figura 4.03, é uma plataforma eletrônica de código aberto, com hardware e software de fácel ultilização, placas Arduino podem ler em suas entradas sinais de sensores, e transformá-las em um sinal de saída, ativando atuadores. Para programa-la usa-se a linguagem de programação Arduino e o Software Arduino (IDE), baseado no

Processing (linguagem de programação de código aberto e ambiente de desenvolvimento integrado).

Figura 4.03 – Arduino, modelo UNO



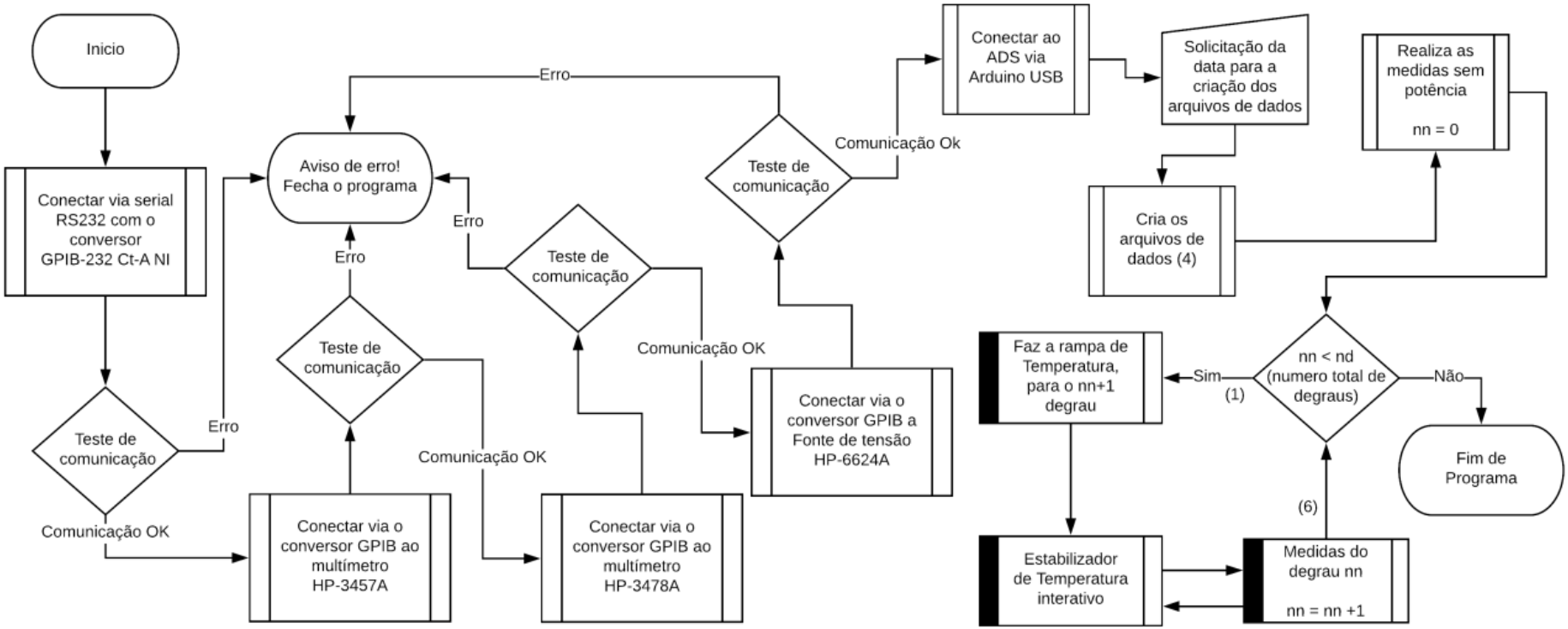
Fonte: https://cdn.arduino.cc

O multímetro HP-3478A, tem a função de monitorar a temperatura ambiente, que por sua vez é utilizada no cálculo da potência dos degraus (patamares) de temperatura, que será detalhado a seguir.

O programa, que controla o *hardware* foi construído em Python 2.7, no sistema operacional Ubuntu 16, que conforme o diagrama de *hardware* (Figura 4.02) indica, se comunica com os multímetros e com a fonte através de um conversor GPIB/RS232 (GPIB-232) da NI (*National Instruments*), portanto via serial RS232, e com o Arduino pela USB, porém o padrão de comunicação do Arduino também é serial (o Arduino possui um conversor USB/serial), dessa forma a comunicação básica entre o programa e o *hardware* é serial.

A Figura 4.04 mostra a representação do programa de controle do sistema de calibração em forma de fluxograma.

Figura 4.04 - Fluxograma geral do programa de controle do sistema de calibração



Fonte: Autor

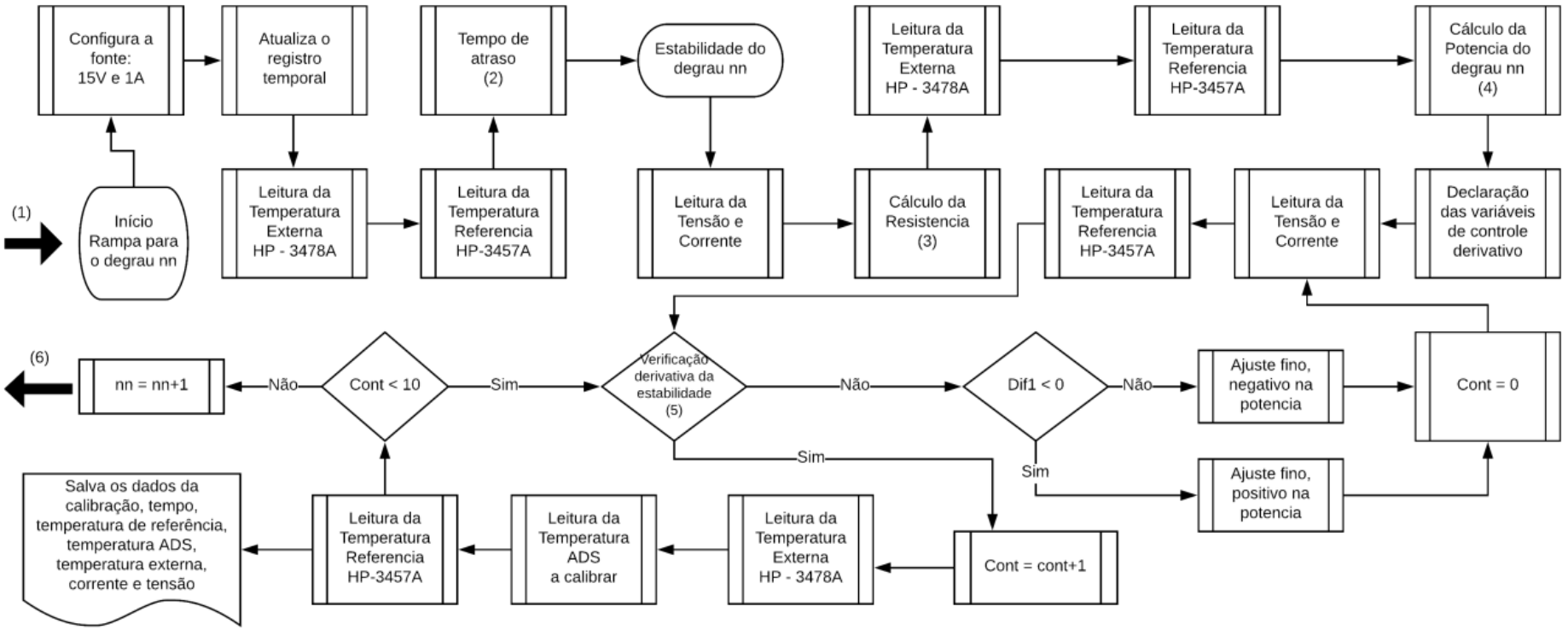
Como indicado no fluxograma da Figura 4.04, as primeiras ações do programa de controle do sistema de calibração, é estabelecer a comunicação com os periféricos (GPIB-232, HP-3457A, HP-3478A, HP-6624A e Arduino), e para cada periférico conectado há um teste de comunicação, que é essencialmente a verificação da sua identidade (nome, endereço GPIB e outras informações), o teste de comunicação do Arduino não está representado na Figura 4.04, ele é feito através da verificação da estrutura dos dados enviado pelo Arduino, isto é, ele feito toda vez que o barramento da comunicação com o Arduino é lido.

Após estabelecer a comunicação com os periféricos, o programa pede para o usuário (a única interação do usuário com o programa) informar a data e/ou outras informações, pois os arquivos que são criados para salvar os dados durante a calibração, possuem essa informação no seu nome, essa informação é incorporada ao nome dos arquivos através de uma concatenação de vetores (*strings*).

O programa cria um total de quatro arquivos, uma para as medidas sem potência, um que guarda as medidas durante a subidade (“aquecimento potência máxima”), um que guardas as medidas durante o processo de estabilização e um último que guarda os pares de medidas nos patamares (temperatura já estável). O último arquivo é o único utilizado no procedimento de calibração dos sensores de temperatura.

O *loop* (último verificador de condições), apresentado no canto direito inferior do fluxograma da Figura 4.04, é o núcleo do programa que controla o sistema de calibração, nesse fluxograma ele está representado de forma sucinta, a Figura 4.05, apresenta um fluxograma exclusivo para essa parte do programa de controle, e eles (fluxogramas) se comunicam através das conexões 1 e 6 presentes em ambos fluxogramas, repare que o verificador $nn < nd$, está presente apenas no fluxograma geral, nd é o número total de interações do loop, e cada interação desse loop gera uma nova rampa, um novo processo de estabilização e finalmente um novo patamar.

Figura 4.05 - Fluxograma do processo de rampa, estabilidade e medidas



Fonte: Autor

O primeiro processo descrito no fluxograma da Figura 4.05, é a configuração da fonte para a potência máxima ($15\,W$), na sequência há uma atualização temporal, a leitura da temperatura externa e interna de referência, seguido de um tempo de atraso (2: Processo 2 do fluxograma da Figura 4.05), esse tempo de atraso é diferente para cada ciclo (nn) do loop, pois quanto maior for à temperatura do patamar maior será a dificuldade de alcançá-la e mantê-la constate, dessa forma, o tempo de atraso (2) deve ir aumentado de um degrau para outro. O cálculo desse tempo é feito através da expressão 4.01, onde t_a é o tempo de atraso, t_i é o tempo mínimo (tempo do primeiro degrau), nn é o número do degrau e o fator 0.1 é um parâmetro de ajuste.

$$t_a = t_i + 0.1 t_i\, nn^2\ [s]. \qquad (4.01)$$

Em princípio o tempo necessário para chegar ao próximo patamar de temperatura (tempo de atraso), deve cresce exponencialmente, em função da diferença de temperatura entre meio e o próximo patamar, porém em uma primeira aproximação podemos escrever uma função exponencial como quadrática (expansão em série de potências), dessa forma foi testado à função quadrática 4.01 para o tempo de atraso em função de nn (número de degrau), que retornou patamares aceitáveis. Essa aproximação é valida, pois a potência entregue pela fonte e muitas vezes maior do que a potência retirada pelo meio, antes da função quadrática foi testada uma função linear, porém os patamares ficam muito próximos.

Após o tempo de atraso, começa o processo de estabilização do patamar (ou degrau) de temperatura, o primeiro passo desse processo é calcular a resistência (3) do fio resistivo que é usado para aquecer o bloco de cobre, isto é feito, pois a sua resistência varia em função da temperatura, e dessa forma devemos atualizar seu valor antes de procurar a potencia para manter a temperatura do patamar estável.

A resistência r_T é calculada em função da tensão V_{fonte} e da corrente I_{fonte} fornecidas pela fonte.

$$r_T = \frac{V_{fonte}}{I_{fonte}} \ [\Omega]. \tag{4.02}$$

Em sequência é feito o cálculo da tensão V_p (4) para manter a temperatura do patamar constante em função do tempo. Esse cálculo é feito através da expressão 4.03, onde $T_{patamar}$ é a temperatura do patamar, T é a temperatura ambiente (externa) e k é a constante de proporcionalidade entre a potência entregue e a potência da câmara térmica dissipada para o meio e o k também caracteriza a câmera térmica.

$$V_p = \sqrt{k(T_{patamar} - T)r_T} \ \ [V] \, . \tag{4.03}$$

A expressão 4.03 origina-se do equilíbrio entre as potências (taxa de energia pelo tempo). Para manter a temperatura do patamar constante, precisamos que potência do patamar P_p entregue pela fonte seja igual à retirada pelo meio.

A potência retirada pelo meio é dada pela lei do resfriamento de Newton, equação 4.04, onde dQ é a variação de energia térmica (calor) do bloco, dt é a variação do tempo, β é uma constante que depende da geometria e das características térmicas do objeto que está resfriando, β é expresso em $\frac{W}{K}$.

$$\frac{dQ}{dt} = \beta \left(T_{patamar} - T\right) [W] \, . \tag{4.04}$$

A potência entregue pela fonte é dada pela conservação entre a energia térmica e elétrica (no caso ideal seria um calorímetro), isso se resume matematicamente a expressão 4.05, onde α é uma constante de proporcionalidade característica da câmara térmica.

$$\frac{dQ}{dt} = \alpha \, P_{fonte} \, [W] \, . \tag{4.05}$$

Igualando as expressões 4.05 e 4.04, temos a expressão 4.06, onde k é a razão entre as constantes β e α, para obter a expressão 4.06, de 4.03, basta fazer $P_p = \frac{{V_p}^2}{r_T}$ e isolar V_p.

$$P_{fonte} = k\left(T_{patamar} - T\right)[W]. \qquad (4.06)$$

O processo seguinte ao cálculo da potência do patamar (4, passo 4 do fluxograma Figura 4.05) é a declaração das variáveis de controle derivativo, que armazenam as variações da temperatura interna (dentro da câmara térmica) medidas pelo sensor de referência em função do tempo.

Na sequência é lido a tensão e corrente da fonte e a temperatura do sensor de referência, e se verifica a condição estabilidade (5) da temperatura interna (sensor de referência), que devido às aproximações no cálculo das constantes, não deve ser aceita na primeira interação, e dessa forma o programa vai para a segunda verificação, que é saber se a temperatura está diminuindo ou aumentado em função do tempo ($Dif1 < 0$), onde $Dif1 = T_{ref} - T_{ref(anterior)}$, caso $Dif1$ seja maior que zero é feito um ajuste fino ($10\,mV$) diminuindo a potência entregue pela fonte, caso contrário o ajuste é positivo, aumentando levemente a potência entregue pela fonte. Toda vez que esse ajuste (positivo ou negativo) é feito o contador do loop é zerado $cont = 0$, pois isso significa que a temperatura da câmara não está estável.

Uma vez, que a condição de estabilidade (5) é aceita, é incrementada uma unidade ao contador do loop $cont = cont + 1$ e na sequência é lido e salvo um conjunto de medidas, temperatura externa, temperatura de referência, temperatura do sensor a ser calibrado e como são valores temporais, também é salvo seus respectivos tempos de leituras.

Seguindo o fluxograma da Figura 4.05, chegamos ao verificar do $cont < 10$, que caso seja aceito volta ao verificar de estabilidade (5), que por sua vez se não for aceito zera a variável $cont$ e recomeça o processo de estabilidade.

Quando o $cont = 10$, isto é, quando já tiverem sido coletados dez pares de medidas, o programa sai desse loop e volta para redefinir o número do patamar nn, e faz todo esse processo novamente até que $nn = nd$ e o programa acaba.

O programa representado pelos fluxogramas da Figura 4.04 e Figura 4.05 está no Apêndice A.

O sistema de calibração apresenta duas limitações além da faixa estabilidade já mencionada, o primeiro corresponde ao fato de não haver controle da potência retirada, isto é, não há um sistema de resfriamento, a potência retirada da câmara térmica se dá apenas pelas diferenças de temperatura interna e externa (temperatura ambiente), impossibilitando o controle de estabilidade para temperaturas abaixo do ambiente, além disso não é possível estabilizar na temperatura ambiente, pois o sistema atua apenas controlando a quantidade de potência injetada na câmara térmica.

O segundo problema se reflete ao fato do controle ser apenas derivativo o que dificulta a estabilização para uma temperatura específica, ou seja, o sistema poderia estabilizar em torno de um valor específico de temperatura mais não exatamente nele, isso poderia ser possível através do uso de um controle PID (Proporcional, Integrativo e Derivativo). Neste projeto não se fez necessário à calibração para uma temperatura específica, o objetivo é calibrar os sensores dentro de uma faixa de temperatura (da temperatura ambiente até $150\,°C$), dessa forma, obtendo estabilidade em quaisquer valores intermediários ao longo da faixa desejada, é o suficiente para calibração dos sensores térmicos.

A resposta típica desse sistema de calibração durante a estabilidade (dados utilizados para calibração) é apresentada a seguir na Figura 4.06, onde temos um gráfico da temperatura indicada pelos sensores internos (de referência e dois a calibrar) e pelo tempo.

Figura 4.06 - Resposta do sistema de calibração térmica

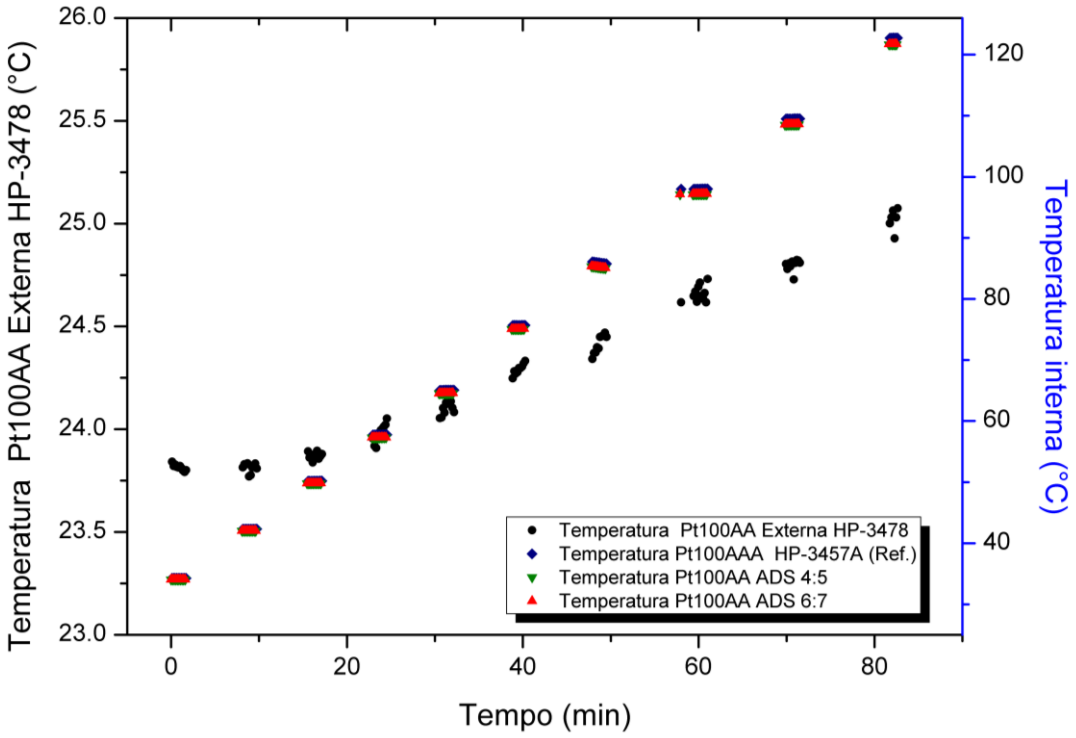


Figura 4.06: Resposta do sistema de calibração térmica, sensor de referência (losangos azuis) e sensores a calibrar (triângulos vermelhos e verdes) eixo vertical à direita (Temperatura interna, bloco de calibração), sensor externo – temperatura ambiente (círculos pretos) eixo vertical à esquerda. Pode-se observar os patamares de temperatura, neles os pontos estão sobrepostos, excerto os pretos.

Fonte: Autor

No gráfico apresentado na Figura 4.06, temos a variação da temperatura externa indicada pelos pontos pretos com leitura realizada no eixo dependente à esquerda, a temperatura interna do sensor de referência indicada pelos losangos azuis e os sensores a calibrar triângulos verdes e vermelhos, todos os três últimos descritos com leitura no eixo dependente à direita.

O gráfico da Figura 4.06, só apresenta os patamares de temperatura estável, ou seja, foram omitidos os dados das rampas de subida e dos processos de estabilização. Os pontos dos sensores internos são os únicos utilizados na calibração, a temperatura externa funciona apenas como um parâmetro de controle para gerar as rampas, eles estão apresentados no gráfico para mostrar que a variação da temperatura externa não influencia na estabilidade

interna, isso acontece por conta da grande inércia térmica da câmara térmica de dupla parede.

A visualização da diferença de temperatura indicada pelos sensores internos, o de referência e os a calibrar, não é perceptível na escala apresentada no gráfico da Figura 4.06, a Figura 4.07 apresenta com mais detalhes o último patamar de temperatura apresentado na Figura 4.06.

Figura 4.07 – Detalhes de um patamar de temperatura do sistema de calibração

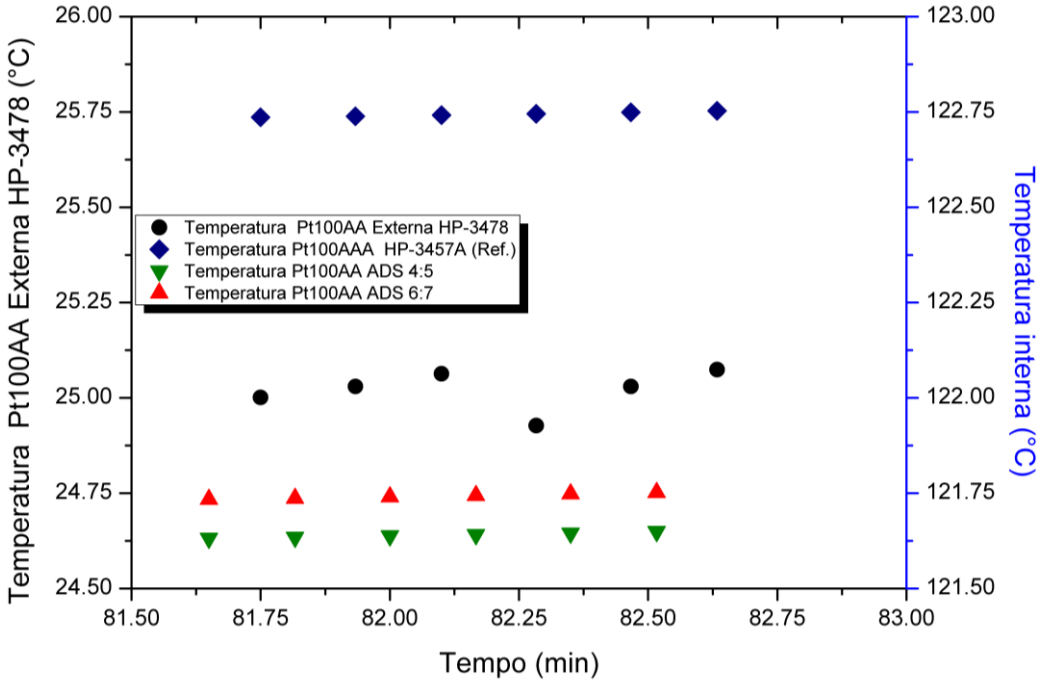


Figura 4.07: Zoom em apenas um patamar de temperatura da resposta do sistema de calibração térmica, sensor de referência (losangos azuis) e sensores a calibrar (triângulos vermelhos e verdes) eixo vertical à direita (Temperatura interna, bloco de calibração), sensor externo – temperatura ambiente (círculos pretos) eixo vertical à esquerda. Nessa escala é possível observar a diferença entre os sensores internos.

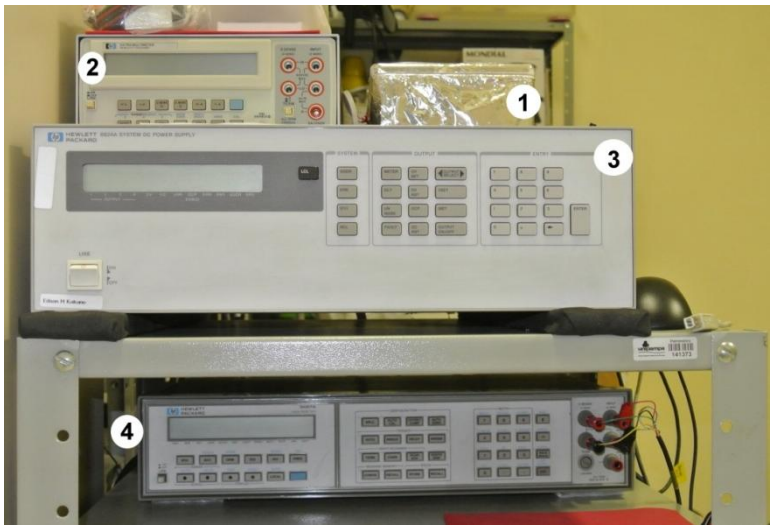
Fonte: Autor

A Figura 4.07 apresenta dados de um único patamar de temperatura estável, onde os pontos pretos se referem à temperatura indicada pelo sensor externo com a leitura no eixo dependente à esquerda, para os demais sensores (internos) a leitura segue a direita. Observa-se que há uma pequena variação

na temperatura externa e que essa não reflete em uma variação perceptível nos dados de calibração.

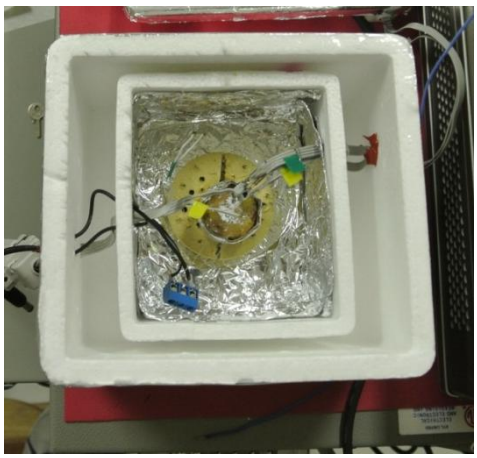
Na Figura 4.08 temos uma foto do sistema de calibração, que apresenta (1) a câmara térmica, (2) o multímetro HP-3478A temperatura externa, (3) a fonte de tensão HP-6624A e (4) o multímetro HP-3457A. A Figura 4.08 apresenta a câmara térmica sem as tampas e visto por cima, com o bloco de cobre sobre a chapa de madeira perfurada.

Figura 4.08 - Foto do sistema de calibração



Fonte: Autor

Figura 4.09 - Detalhe do sistema de calibração em destaque a câmara térmica



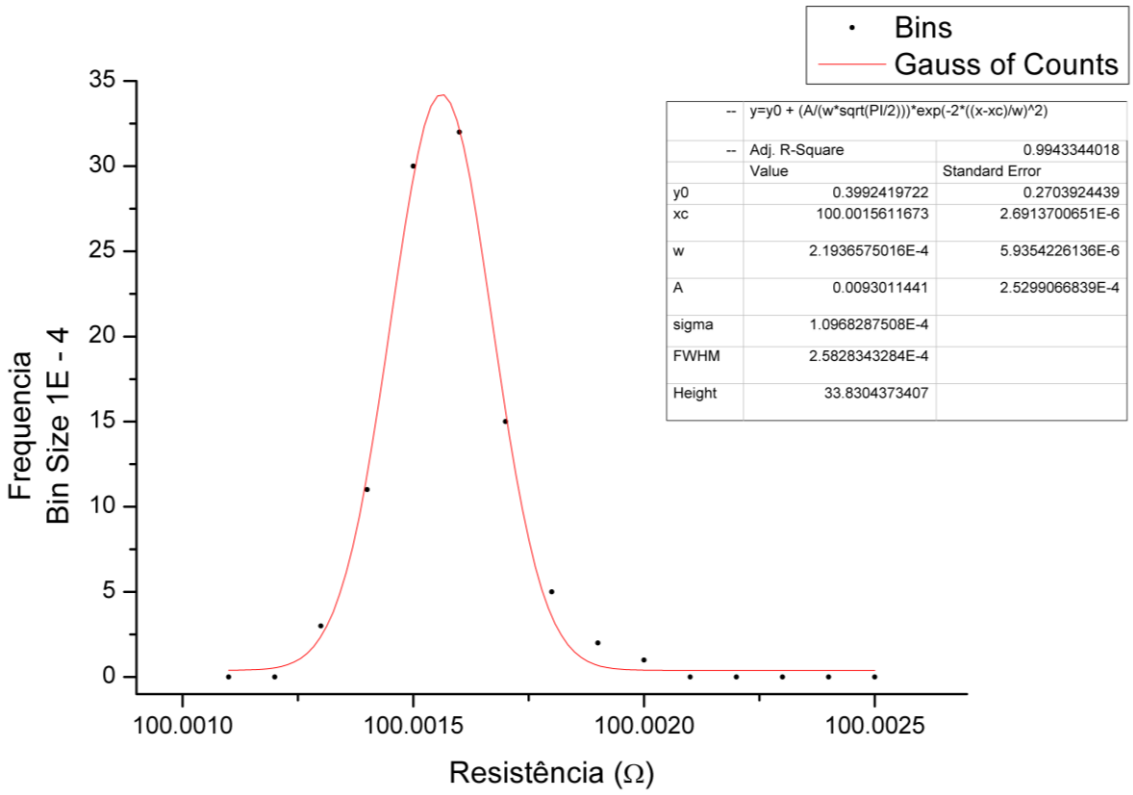
Fonte: Autor

4.1.1 A confiança do sistema de calibração térmica

A confiança do sistema de calibração está diretamente relacionada à confiança do sensor de referência Pt100AAA e à confiança do multímetro HP-3457A, instrumento usado para ler o sensor de referência. Os erros e incertezas relacionados ao Pt100AAA já foram descritas na seção “Sensores e a medição da umidade”.

Para averiguar a confiança do HP-3457A na faixa de interesse, fora utilizado três resistores de precisão (VISHAY, VHP103 e Z201T) de $100 \pm 0{,}005\ \Omega$ (RA, RB e RC) em quatro combinações diferentes (1, 2, 3 e 4), (1) medidas do RA sozinho, (2) RA e RC em serie (RA+RC), (3) RB em paralelo com RC (RB//RC) e (4) uma associação mista de RB em paralelo com RC em serie com RA (RB//RC + RA).

Figura 4.09 - Gaussiana de 100 medidas do resistor RA



Fonte: Autor.

Cada combinação foi medida cem vezes e os conjuntos de dados foram analisados através de um ajuste gaussiano, com o intuito de estimar o valor

mais provável para cada combinação dos resistores. Na Figura 4.09 é apresentado o resultado das medidas do resistor RA ($100 \pm 0{,}005\ \Omega$).

Os dados da análise estão condensados na Tabela 4.01, onde a primeira coluna representa as associações, a segunda os valores centrais medidos com o HP-3457A como o erro padrão e na terceira coluna os valores dos teóricos calculados através dos valores indicados pelo fabricante (Vishay) dos resistores com os respectivos erros.

Tabela 4.01 - Resultado do teste de confiança do HP-3457A

Associação	Valor Central	Valor dos fabricantes
RB//RC	$50{,}0004 \pm 2\,x\,10^{-5}\ \Omega$	$50{,}000 \pm 3{,}5\,x\,10^{-3}\ \Omega$
RA	$100{,}0016 \pm 3\,x\,10^{-6}\ \Omega$	$100{,}000 \pm 5\,x\,10^{-3}\ \Omega$
RA+RB//RC	$150{,}0029 \pm 2\,x\,10^{-6}\ \Omega$	$150{,}000 \pm 2{,}9x\,10^{-3}\ \Omega$
RB+RC	$199{,}9990 \pm 2\,x\,10^{-5}\ \Omega$	$200{,}000 \pm 3{,}5\,x\,10^{-3}\ \Omega$

Fonte: Autor

Os dados dispostos na Tabela 4.01 mostram a concordância entre os valores medidos pelo multímetro e os indicados pelos fabricantes, ou seja, os valores medidos concordam, dentro das tolerâncias especificadas pelo fabricante dos resistores, e dessa forma assumimos como exatos os valores fornecidos pelo HP-3457A, dentro da faixa de $50\ \Omega$ a $200\ \Omega$.

4.2 A calibração do sistema de medição de temperatura

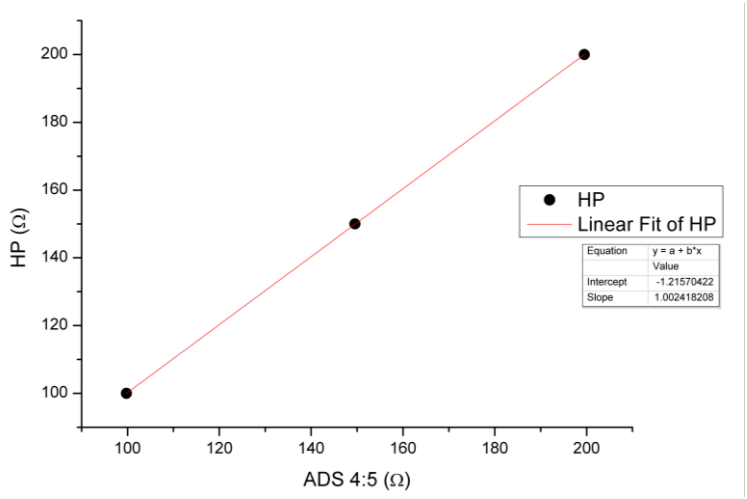
O sistema de medição de temperatura é constituído por dois Pt100AA conectados a uma eletrônica de condicionamento de sinal composto principalmente por um conversor alógico digital ADS1248, que denominaremos de ADS1248.

O primeiro passo da calibração do sistema de medição de temperatura foi calibrar a eletrônica de condicionamento de sinal que foi realizada através de resistências padrão, previamente aferidas utilizando o HP-3457A, foram medidos dois mil pontos pelo HP-3457A e pelo ADS1248. Os dados foram

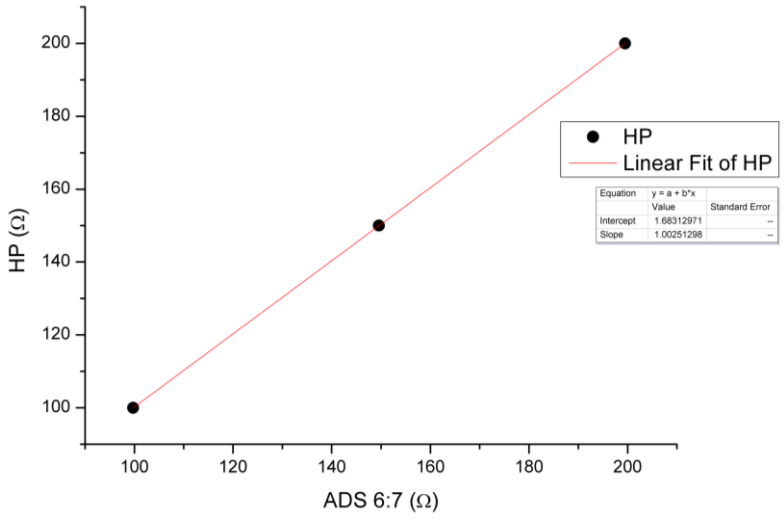
analisados através de ajustes gaussianos de forma análoga a apresentada na Figura 4.09.

Na Figura 4.10, temos apresentado as curvas de calibração para as entradas 4:5 (a), que coresponde ao Pt100A e 6:7 (b), que coresponde ao Pt100B, do ADS1248 utilizado.

Figura 4.10 - Curvas de calibração do ADS1248 utilizando as resistências padrão de 100Ω, 150Ω e 200Ω



(a)



(b)

Fonte: Autor

A calibração da eletrônica de condicionamento de sinal resultou nas equações de correção apresentadas em 4.07 para a entrada 4:5 e na 4.08 para a entrada 6:7, onde z é o valor medido e x o valor de resistência já corrigido.

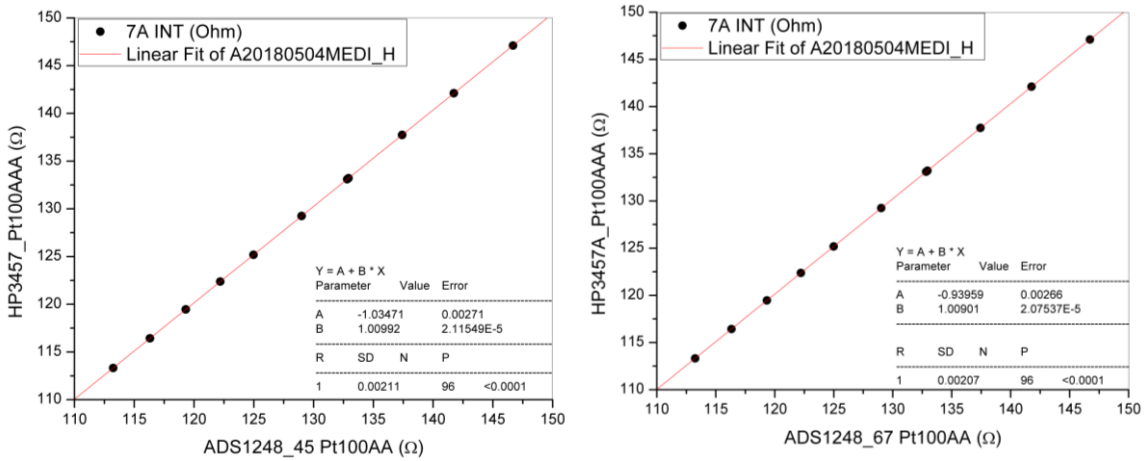
$$x_1(\Omega) = 1{,}00242\, z - 1{,}21570\ [\Omega]\,. \qquad 4.07$$

$$x_2(\Omega) = 1{,}00251\, z + 1{,}68313\ [\Omega]\,. \qquad 4.08$$

As equações de calibração apresentadas em 4.07 e 4.08 resultam respectivamente em uma correção de $0{,}97\ \%$ e $1{,}93\ \%$.

O segundo e último passo foi calibrar do sistema de medição de temperatura como um todo, e para tal se utilizou o sistema de calibração térmica, já descrito, os dados utilizados para a calibração já foram apresentados nas figuras 4.06 e 4.07. A Figura 4.11 apresenta as curvas geradas para calibração das entradas 4:5 (a) e 6:7 (b).

Figura 4.11 - Curvas de calibração do sistema de medição de temperatura ADS1248 com dois Pt100AA



(a) (b)

Fonte: Autor

O primeiro passo de calibração (da eletrônica de condicionamento de sinal) é realizado, pois pode-se utilizar a mesma eletrônica com outros sensores diferentes dos selecionados. A segunda etapa de calibração corrige os possíveis erros dos sensores, Pt100, e alguma pequena não linearidade restante do primeiro passo da calibração.

As equações resultantes do processo de calibração foram inseridas no programa do Arduino que lê as entradas 4:5 e 6:7 do ADS1248.

Os Pt100A e Pt100B apresentam a necessidade de uma pequena correção indicadas respectivamente pelas equações 4.09 e 4.10, onde y representa o valor corrido do PT1001 ou do Pt1002 e x o valor medido após a primeira correção (feita para o sistema de condicionamento de sinal) indicada pelas equações 4.07 e 4.08, que em principio corresponde à correção dos sensores em relação ao sensor de referência, Pt100AAA.

$$y_1(\Omega) = 1{,}00992\, x_1 - 1{,}03471\ [\Omega]. \qquad 4.09$$

$$y_2(\Omega) = 1{,}00901\, x_2 - 0{,}93959\ [\Omega]. \qquad 4.10$$

Considerando um valor medido (x) de $100\,\Omega$, temos uma correção percentual de $0{,}0427\,\%$ para o Pt100A e $0{,}0386\,\%$ para o Pt100B, portanto se trata de uma correção muito pequena, que para leitura de temperatura com o Pt100 corresponde a uma correção de aproximadamente $0{,}1\,°C$, que está dentro da tolerância indicada pelo fabricante (OMEGA, F2222-100-1/3B).

4.3 Montagem e coleta de dados com o SHT31, SHT75 e psicrômetro

Foram feito duas montagens, uma para recolher dados de umidade com o psicrômetro e com os sensores capacitivos SHT31 e SHT75, com intuído de averiguar parâmetros de confiança do psicrômetro (montagem e equações), comparando as medidas de umidades feitas através dele com as feitas pelos sensores capacitivos. A segunda montagem utiliza apenas o SHT31 e tem a intenção de acompanhar a temperatura e umidade externa (a céu aberto), a fim

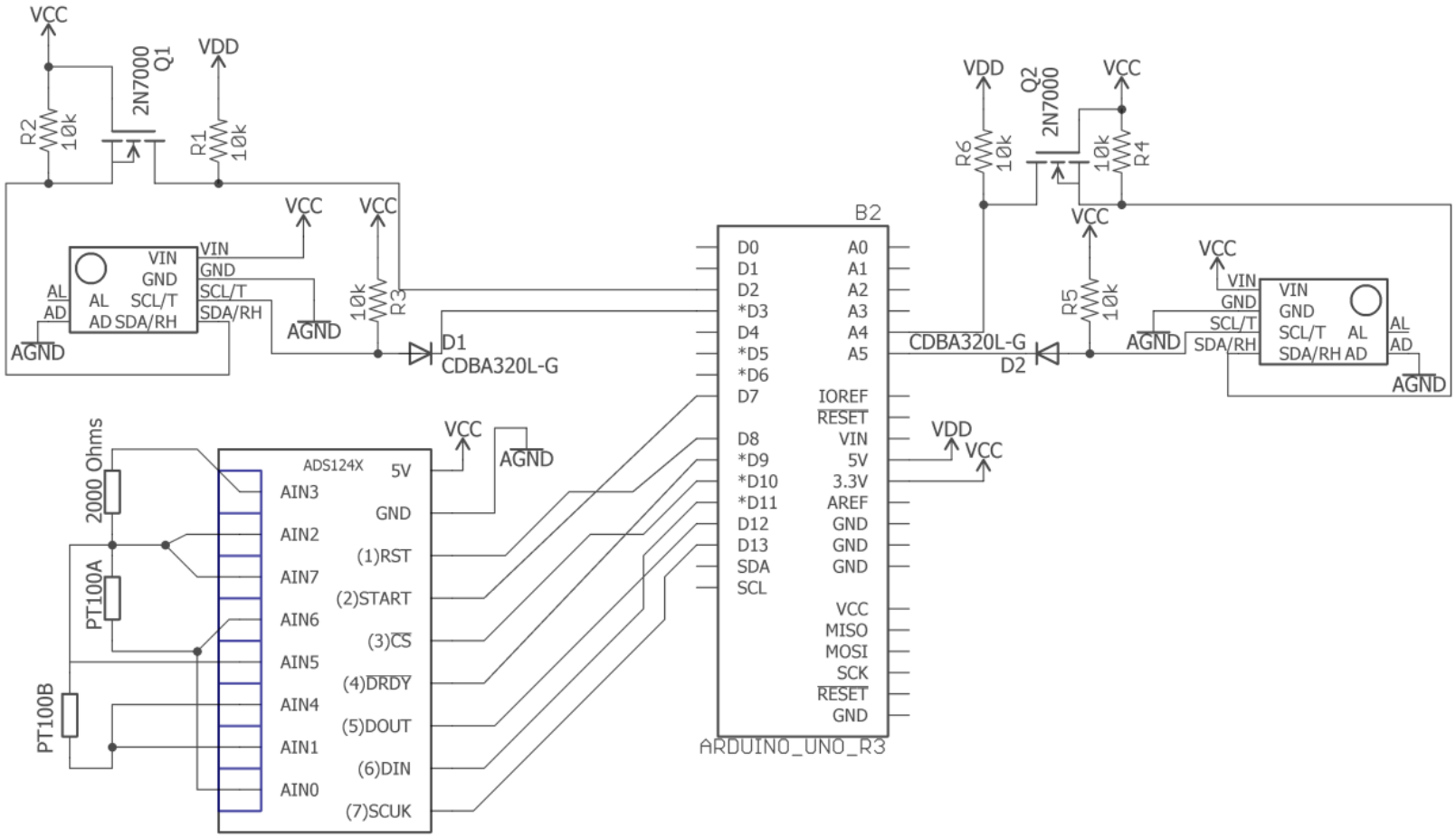
de possibilitar o estudo de tendências para as duas grandezas físicas (temperatura e umidade).

A montagem de comparação dos sensores utiliza o psicrômetro com ventilação forçada, e tem seu diagrama esquemático descrito na Figura 4.12. A montagem é composta pelo Arduino, o ADS1248 com os sensores de temperatura (Pt100AA) e os dois sensores de temperatura e umidade (SHT31 e SHT75).

No canto esquerdo inferior da Figura 4.12 está à placa com do conversor ADS1248, através dela estão conectados os sensores térmicos (Pt100A e Pt100B) e um resistor de referência de $2000\ \Omega \pm 0{,}01\%$, um dos Pt100 mede a temperatura de bulbo seco (T) e o outro a temperatura de bulbo úmido (T_m).

Ainda na Figura 4.12 está representado no canto superior direito SHT75, e no canto superior à esquerda o SHT31, no centro da imagem o Arduino.

Figura 4.12 - Esquemático da montagem de comparação dos sensores



Fonte: Autor

Além dos sensores mencionados é utilizado o sensor de pressão MS5534-CM, que coleta dados de pressão local a cada segundo com uma acurácia $\pm 1.5\, mbar$. Os dados de pressão são utilizados no cálculo da umidade relativa do psicrômetro.

O programa da montagem de comparação dos sensores retorna valores das resistências (que indica a temperatura) do Pt100A e do Pt100B e as temperaturas e umidades indicadas pelos sensores capacitivos SHT31 e SHT75, além dos respectivos tempos no qual foram feitas as leituras.

Figura 4.13 - Montagem de comparação dos sensores de umidade e psicrômetro

Fonte: Autor.

5.0 Uma introdução ao Erro de Medição

A qualidade de um sistema de mediação é normalmente inferida pela sua resolução, acurácia (exatidão) e precisão.

A resolução é uma característica do sistema de medição, e corresponde ao menor valor que ele consegue representar, independentemente de sua sensibilidade. Por exemplo, um instrumento de quatro dígitos, pode representar valores de 0000 a 9999 ou 10000 contagens, a sua resolução é de $1/10000$.

A sensibilidade é característica do um sensor utilizado no sistema de medição, e é representada pela razão entre a variação do sinal de saída pela a variação do sinal de entrada. Por exemplo, um sistema de medição de temperatura que utiliza o sensor do tipo RTD de platina e tem uma sensibilidade típica de $0{,}00385\ \Omega\ /\ \Omega\ /\ K$, isto é, para uma resistência de $1\ \Omega$ e submetida a variação de $1\ K$ a resistência varia de $0{,}00385\ \Omega$, como o $Pt\ 100$ possui uma resistência de $100\ \Omega$ a $0\ °C$ ($273{,}15\ K$), uma variação de $1\ K$ resulta em uma variação de $0{,}385\ \Omega$.

A acurácia ou exatidão de um sistema de medição diz respeito do quão próximo um valor medido por esse sistema está de um valor fidedigno. A acurácia não é expressa em valor numérico, porém pode ser indicada pelo valor do erro sistemático, portanto é comum encontrar na literatura técnica e ou didática, um valor numérico atribuído a ela.

Se um sistema de medição é dito mais acuráto ou exato do que outro isso significa que, a média de infinitas medidas de uma dada grandeza, que permaneça constante durante o tempo de medição, feita por esse sistema fornece um erro de medição menor (em relação ao “valor verdadeiro” usado como referência) do que a média de infinitas medidas da mesma grandeza feitas nas mesmas condições temporais pelo outro sistema.

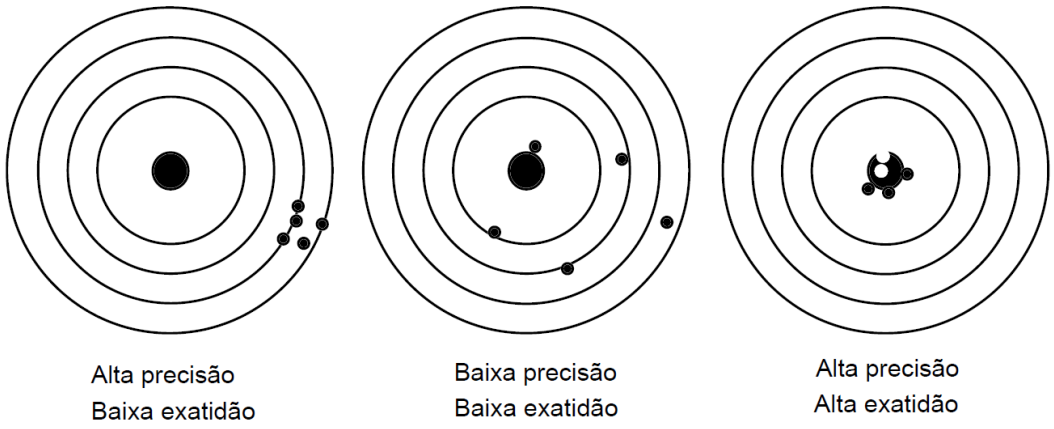
O erro de medição é a diferença entre o valor medido e um valor de referência. O erro de medição é composto pelo erro aleatório e erro sistemático. O erro sistemático é a parte do erro que possui um comportamento previsível, já o erro aleatório compreende a parte do erro de medição que não possui um comportamento previsível.

A precisão é o grau de coerência entre os valores medidos, durante medições repetidas, no mesmo objeto ou em objetos similares, em condições especificadas. Também representado pela palavra fidelidade. A precisão de uma medição não é expressa numericamente, mas é indicada pelo erro aleatório, que por sua vez pode ser expresso por características como, dispersão, desvio-padrão, variância ou pelo coeficiente de variação, desde que se mantenham as condições de medição especificadas que são, por exemplo, condições de repetibilidade, condições de precisão intermediária ou condições de reprodutibilidade.

Só é possível estimar a precisão de sistema de medição, se foram realizadas mais de uma medida da mesma grandeza em condições de repetibilidade.

A Figura 5.01, apresenta medidas de três sistemas, o primeiro da esquerda para direita, possui alta precisão e baixa acurácia, o segundo baixa precisão e baixa acurácia e o terceiro possui alta precisão e alta acurácia.

Figura 5.01 - A precisão e acurácia em medidas



Fonte: Guia para Física Experimental

5.1 A estatística na medição

As inferências das qualidades de acurácia e precisão são normalmente feitas através de uma análise estatística. Considerando que em uma medida o

erro aleatório está sempre presente e os desvios positivos e negativos devem ser distribuídos igualmente em torno do valor de referência, portanto em media de infinitas medidas esse erro deve convergi para zero, revelando a qualidade da acurácia, que é indicada pelo erro sistemático.

O erro sistemático absoluto (E_s), é obtido pela diferença entre o valor de referência (X_{ref}) e a média das infinitas medidas $\left(\bar{X} = \frac{1}{n}\sum_1^n X_i\right)$ de dada grandeza, realizada sobre condições de repetibilidade. Esse erro pode ser composto por uma sucessão erros sistemático, por exemplo, em uma determinação da densidade de um sólido, pode existir um erro sistemático na determinação do volume e outro erro sistemático na medida da massa.

A equação 5.01, pode ser usada para calcular o erro sistemático (E_s) de um conjunto de medidas, nela n representa o número total de medidas, X_i a i-enésima medida.

$$E_s = X_{ref} - \bar{X} = X_{ref} - \frac{1}{n}\sum_1^n X_i \,. \qquad (5.01)$$

O erro aleatório (E_a) indica o quanto uma medida se distância do valor esperado de seu conjunto de medidas, é normalmente representado pelo desvio padrão, ou por múltiplos do desvio padrão. O desvio padrão (Sd) de um conjunto de medidas é calculado, pela equação 5.02.

$$Sd = \sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_1^n (X_i - \bar{X})^2} \quad . \qquad (5.02)$$

Uma das formas mais comum de representar o erro aleatório de um conjunto de medidas é o erro padrão (E_p), que é um múltiplo do desvio padrão. A equação 5.03, indica seu cálculo.

$$E_p = \frac{Sd}{\sqrt{n}} \,. \qquad (5.03)$$

Apesar de o erro padrão ser comumente utilizado para representar o erro aleatório de um conjunto de medidas, não faz sentido utilizá-lo para representar a incerteza aleatória de um sistema de medição, para isso é utilizado o desvio padrão ou duas vezes o desvio padrão que contempla mais de 95% das medidas de um dado conjunto.

Para analisar as incertezas de um conjunto grandes de medidas, se utiliza uma curva de distribuição de ocorrências, no contexto de medições de grandezas físicas, a distribuição normal ou gaussiana é uma das mais usadas, na seção 7, “Uma proposta de prática para educação básica”, é apresentado de forma sucinta o processo de análise estatística mencionado, no caso é analisado um conjunto de medidas de temperatura feitas com o sensor de temperatura LM35.

O erro total de uma medição é representado pela raiz quadrada da soma quadrática do erro aleatório e sistemático.

$$E_t = \sqrt{{E_a}^2 + {E_s}^2}. \tag{5.04}$$

O erro total de uma medida é obtido através da comparação com um dado valor de referência (“valor real”), porém esse valor pode possuir uma incerteza, neste caso o erro total também é dado por uma equação do tipo apresentado em 5.04.

O erro total de uma medição obtida por mais de uma forma independente é estimado pela raiz quadrada do inverso da soma dos inversos dos quadrados dos erros individuais, equação 5.05. Por exemplo, no caso de se medir a umidade relativa com os sensores SHT75 e SHT31, que possuem respectivamente um erro sistemático de $1{,}8\,\%$ e $2{,}0\,\%$, o erro sistemático resultante dessa combinação é de $1{,}34\,\%$.

$$\frac{1}{{E_t}^2} = \frac{1}{{E_1}^2} + \frac{1}{{E_2}^2} \ldots \tag{5.05}$$

6.0 Resultados e análise dos erros

Nesta seção são apresentados e discutidos os resultados das medidas de umidade relativa obtida através da instrumentação desenvolvida, que foi apresentada na seção 4, além disso, é apresentado o procedimento de análise da propagação do erro na medida da umidade relativa.

6.1 Comparação entre as equações para umidade relativa

Para comparar as equações foi utilizado um subconjunto de dados de $5h$, recortado de um conjunto de $70h$, que corresponde as medidas de umidade relativa, temperatura (bulbo seco e bulbo úmido) e pressão atmosférica local, iniciadas em $19/05/2018$ (Sábado) as $00:48:16$ e finalizadas em $21/05/2018$ (Segunda-feira) as $18:43:18$, realizadas em uma sala de uso limitado, que esteve fechada durante a maioria do tempo de coleta.

O subconjunto de dados começa em $21/05/2018$ as $01:48:14$ e acaba em $21/05/2018$ as $06:48:14$, isto é, ele corresponde as medidas realizadas na madrugada de Segunda-feira.

A região de medidas do subconjunto foi escolhida em função da estabilidade das leituras dos sensores de umidade utilizados como referência (SHT75 e SHT31), em outras palavras, o subconjunto representa os dados coletados no horário onde se observa ter a menor variação de umidade relativa (ver Figura 6.01).

Na Figura 6.01, são apresentas às medidas de umidade relativa (a) do conjunto de dados e (b) do subconjunto que equivale à parte destacada do conjunto. A menor taxa de variação media da umidade relativa em relação ao tempo ocorre entre às $49h$ e $54h$ de coleta, que equivale a uma umidade relativa média de $63{,}08\,\% \pm 0.013\,\%$, mais a incerteza combinada dos sensores de $\pm 1{,}34\%$, que será utilizado como referência para estimar o erro das medidas feitas com o psicrômetro.

Figura 6.01 - Umidade relativa de Referência, 19/05/2018 – 21/05/2018

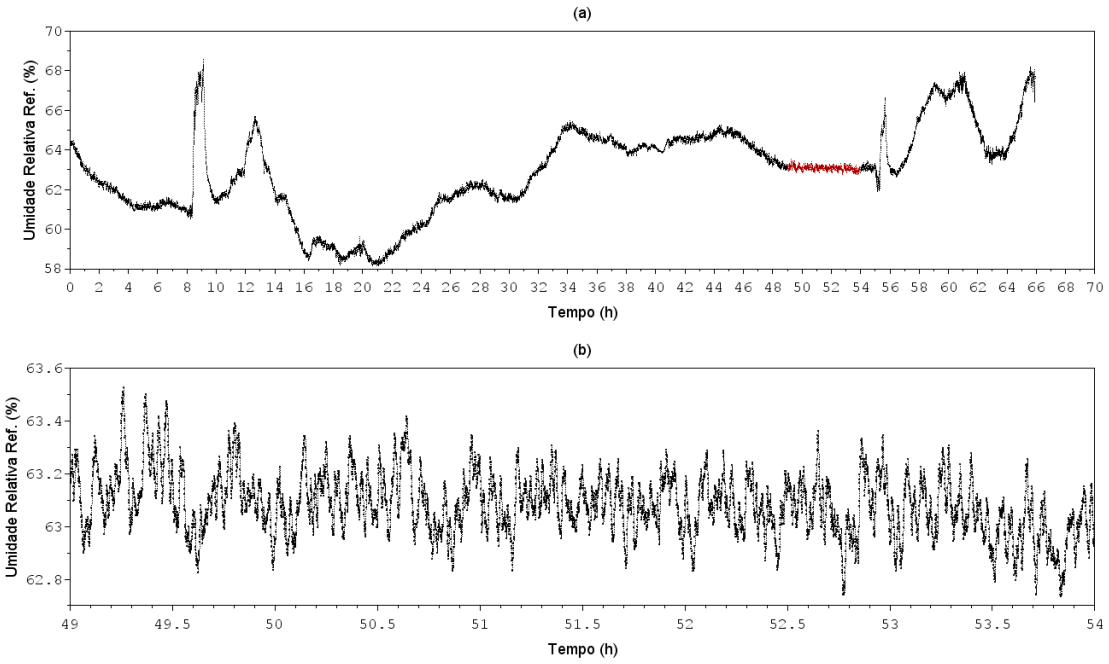


Figura 6.01 - Umidade relativa de Referência (SHT75+SHT31) ($\pm 1.34\ \%$), (a) conjunto de $70\ h$ e (b) subconjunto de $5h$.

Fonte: Autor

Os picos apresentados no primeiro gráfico da Figura 6.01, foram provocados pela circulação de pessoas na sala, onde se fez a coleta de dados, por exemplo às 9h no gráfico que corresponde às 8h do Sábado (19/05/2018) houve a limpeza da sala.

Como apresentado na seção 2, “A umidade relativa, uma aproximação teoria”, e na seção 3, “Sensores e a medição da umidade relativa”, a determinação da umidade relativa através do psicrômetro depende da pressão atmosférica local e das temperaturas absolutas de bulbo seco (ambiente) e de bulbo úmido, dessa forma, foram analisadas as estabilidades das medidas de temperaturas absolutas e da pressão, no intervalo de tempo escolhido para a comparação ($49h - 54h$).

As temperaturas absolutas (bulbo seco e bulbo úmido) são apresentadas na Figura 6.02. As regiões em destaque representam as temperaturas absolutas medidas no intervalo de tempo escolhido para a comparação, a temperatura média de bulbo seco a durante o intervalo foi de $290.19 \pm 0.001\ °C$ e a de

bulbo úmido $286.01 \pm 0.001\,K$. A incerteza dos sensores para as respectivas temperaturas é de $0{,}038\,K$ e $0{,}036\,K$, os sensores foram calibrados contra um Pt100 AAA da Omega (1PT100KN1515 W0.03 SENSOR TECHNOLOGY/ OMEGA).

Figura 6.02 - Temperaturas absolutas, 19/05/2018 – 21/05/2018

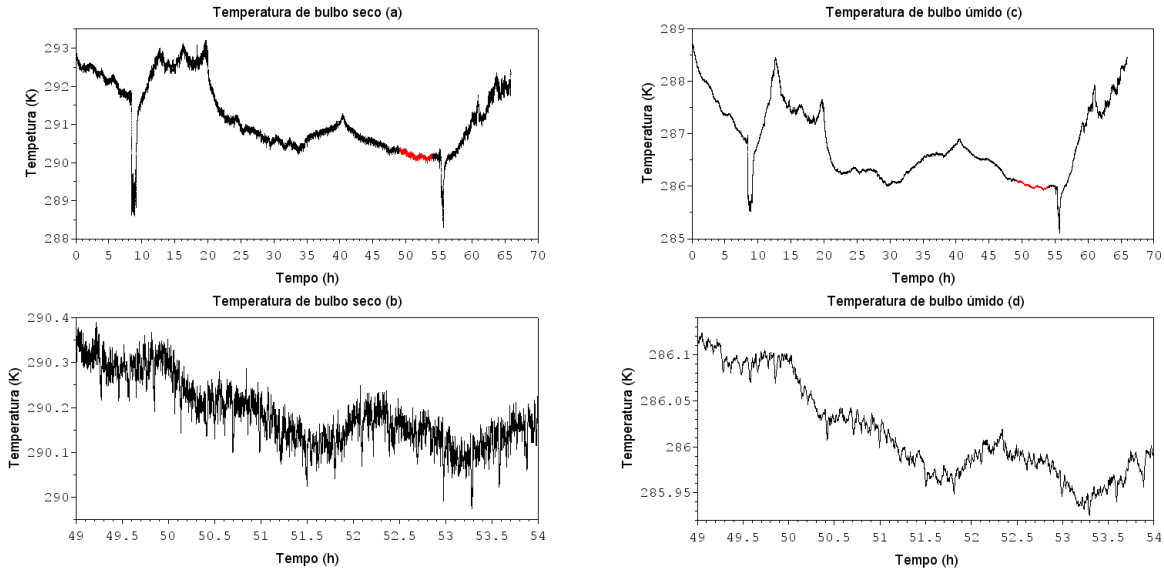


Figura 6.02 - Temperaturas absolutas, (a) bulbo seco e (c) bulbo úmido, para todo o conjunto de dados, e (c) e (d) para o subconjunto analisado.

Fonte: Autor

Realizando a mesma análise para a pressão (Figura 6.03) obteve-se, durante o período de interesse uma pressão atmosférica média de $97459.56 \pm 0.24\,Pa$, a incerteza do sensor utilizado (MS5534-BM/INTERSEMA SENSORIC AS, C4) é de $\pm 150\,Pa$.

Os gráficos das temperaturas (bulbo seco e úmido) também possuem dois picos nos mesmos horários (9h e 55h) que os apresentados no gráfico da umidade relativa, porém o comportamento é inverso, como já era esperado, foi atribuído para esse comportamento é a circulação de pessoas na sala.

Figura 3.06 - Pressão atmosférica , 19/05/2018 – 21/05/2018

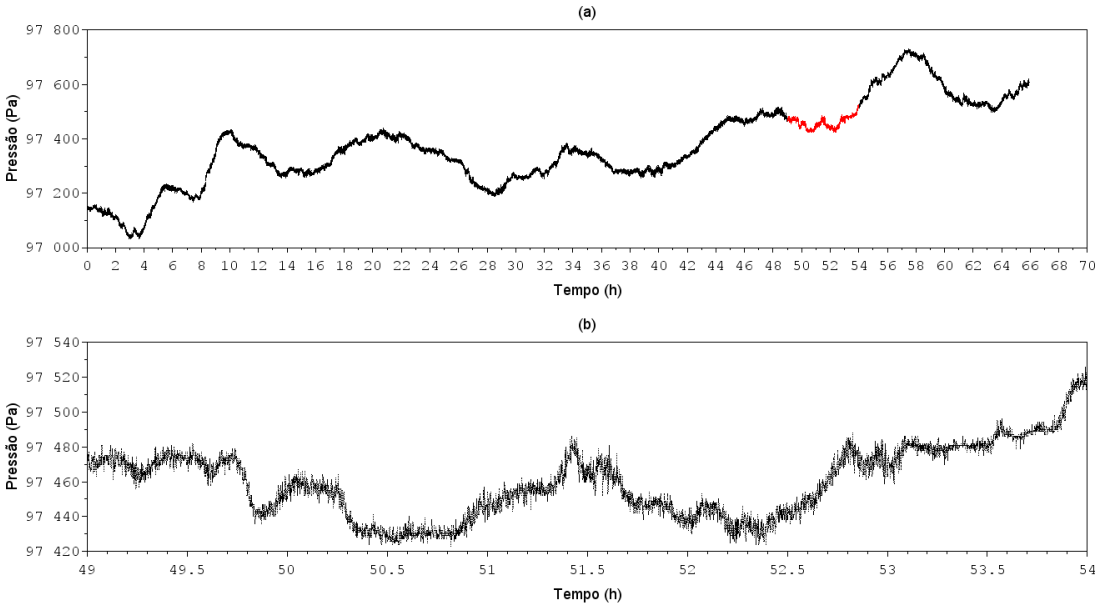


Figura 3.06 - Pressão atmosférica local (a) para o conjunto e (b) para o subconjunto de dados

Fonte: Autor

Conclui-se que a região selecionada possui estabilidade nas temperaturas absolutas, na pressão atmosférica e também na umidade relativa. Dessa forma é possível analisar o erro da medida com psicrômetro, para as diversas relações apresentadas.

Os erros da medição foram calculados através da diferença absoluta entre a medida de referência (SHT75 + SHT31) e a obtida através do psicrômetro, para cada combinação feita entre as equações apresentadas no final do capítulo 2, e a incerteza dos erros foi calculada através do desvio padrão. Os erros totais foram então calculados através da raiz quadrada da soma dos quadrados dos erros aleatórios e sistemáticos.

Na Tabela 6.01 estão dispostos os erros sistemáticos (Sis.), aleatórios (Ale.) e totais (Total) para as combinações de equações mencionadas. A célula em destaque apresenta o erro da combinação escolhida para análise da propagação do erro.

Tabela 6.01 – Erros do psicrômetro em comparação ao sensores de referências

Eq. Pvs	Equação Pv 2.45			Equação Pv 2.46			Equação Pv 2.47			Equação Pv 2.48			Equação Pv 2.49			Equação Pv 2.50			Equação Pv 2.51		
	Sis.	Ale.	Total	Sis.	Ale.	Total	Sis.	Ale.	Total	Sis.	Ale.	Total	Sis.	Ale.	Total	Sis.	Ale.	Total	Sis.	Ale.	Total
2.37	0,2236	0,2429	0,4480	0,3860	0,2435	0,4564	0,1417	0,2426	0,2810	0,6201	0,2449	0,6667	0,3638	0,2449	0,4385	0,7382	0,2464	0,7782	0,0189	0,2422	0,2429
2.38	0,2226	0,2429	0,4472	0,3851	0,2435	0,4556	0,1406	0,2426	0,2804	0,6193	0,2449	0,6660	0,3628	0,2449	0,4377	0,7374	0,2464	0,7775	0,0177	0,2422	0,2428
2.39	0,2259	0,2430	0,4497	0,3882	0,2436	0,4583	0,1439	0,2427	0,2822	0,6223	0,2449	0,6687	0,3660	0,2449	0,4404	0,7403	0,2464	0,7803	0,0211	0,2422	0,2431
2.40	0,3768	0,2435	0,5755	0,5407	0,2441	0,5932	0,2942	0,2432	0,3817	0,7768	0,2455	0,8147	0,5182	0,2455	0,5734	0,8959	0,2470	0,9293	0,1702	0,2428	0,2965
2.41	0,3719	0,2434	0,5712	0,5358	0,2440	0,5887	0,2892	0,2431	0,3778	0,7719	0,2454	0,8100	0,5133	0,2454	0,5690	0,8911	0,2469	0,9246	0,1652	0,2427	0,2936
2.42	0,3840	0,2436	0,5818	0,5479	0,2442	0,5999	0,3013	0,2433	0,3872	0,7843	0,2456	0,8218	0,5255	0,2456	0,5801	0,9035	0,2471	0,9367	0,1772	0,2429	0,3006
2.43	0,3777	0,2435	0,5762	0,5415	0,2441	0,5940	0,2950	0,2432	0,3823	0,7777	0,2455	0,8155	0,5191	0,2455	0,5742	0,8968	0,2470	0,9302	0,1710	0,2428	0,2969
2.44	0,3726	0,2435	0,5718	0,5364	0,2441	0,5894	0,2899	0,2432	0,3784	0,7726	0,2455	0,8107	0,5140	0,2455	0,5696	0,8917	0,2470	0,9253	0,1659	0,2427	0,2940

Obs.: A primeira coluna (Eq. Pvs) refere-se aos números das equações para a pressão do vapor de água em um meio saturado, apresentadas na seção 2. A primeira linha (Equação Pv) refere-se as equações para a pressão parcial de vapor de água, apresentadas na seção 2. No corpo da tabla estão dispostos os erros sistemáticos (Sis.), erros aleatórios (Ale.) e erros totais (Total) para cada combinação de equações.

Tabela 6.01: Erros das equações para o psicrômetro, para cada combinação entre as equações de pressão de vapor de água em um meio na saturado (P_{vs}) e pressão parcial de vapor de água (P_v), Os erros foram calculados sobre um conjunto de 6828 medidas durante 5h, onde a umidade relativa foi de $63{,}08\,\% \pm 0{,}013\,\%$, referenciada pela combinação dos sensores SHT75 e SHT31 obtendo um erro de $\pm\, 1{,}34$ no valor absoluto da umidade relativa.

Fonte: Autor.

Nota-se que na Tabela 6.01 que os menores erros em relação às medidas de referência são obtidos pelas combinações feitas com a relação de Jiunyuan Chen (Chen, 2017), onde o erro total é aproximadamente o erro aleatório, vale ressaltar que o erro aleatório acontece por conta dos erros aleatório dos sensores de temperatura (bulbo seco e bulbo úmido) e pressão.

A partir desses resultados, optou-se por analisar a propagação dos erros dos sensores de temperatura (bulbo seco e bulbo úmido) e pressão, na determinação da umidade relativa através do psicrômetro com a combinação da equação 2.51 para pressão parcial e 2.37 para a pressão parcial em um meio saturado, que resulta na expressão 6.01. É a combinação de equações em destaque na Tabela 6.01.

$$U_r = \frac{610{,}78\ exp\left[6828{,}6\left(\left(\frac{1}{273}-\frac{1}{T_m}\right)-5{,}1701\ ln\left(\frac{T_m}{273}\right)\right)\right]-P_{atm}6{,}4545\ x10^{-4}(T-T_m)}{610{,}78\ exp\left[6828{,}6\left(\left(\frac{1}{273}-\frac{1}{T}\right)-5{,}1701\ ln\left(\frac{T}{273}\right)\right)\right]}\ 100\%\ . \qquad 6.01$$

6.2 Análise da propagação do erro na determinação da Umidade Relativa através do psicrômetro

Comumente encontra-se trabalhos que consideram a pressão atmosférica constante na determinação da umidade relativa, com, por exemplo, os trabalhos de Jiunyuan Chen de 2017 (CHEN, 2017), Ling-Hsi Chen de 2018 (CHEN, 2018), Cunha 2013 (CUNHA, 2013) e 2014 (CUNHA, 2014), Orlando (ORLANDO, 2004) e Marin (MARIN, 2001), isso motivou uma primeira análise da influência da incerteza na determinação da pressão na incerteza de medição da umidade relativa através do psicrômetro.

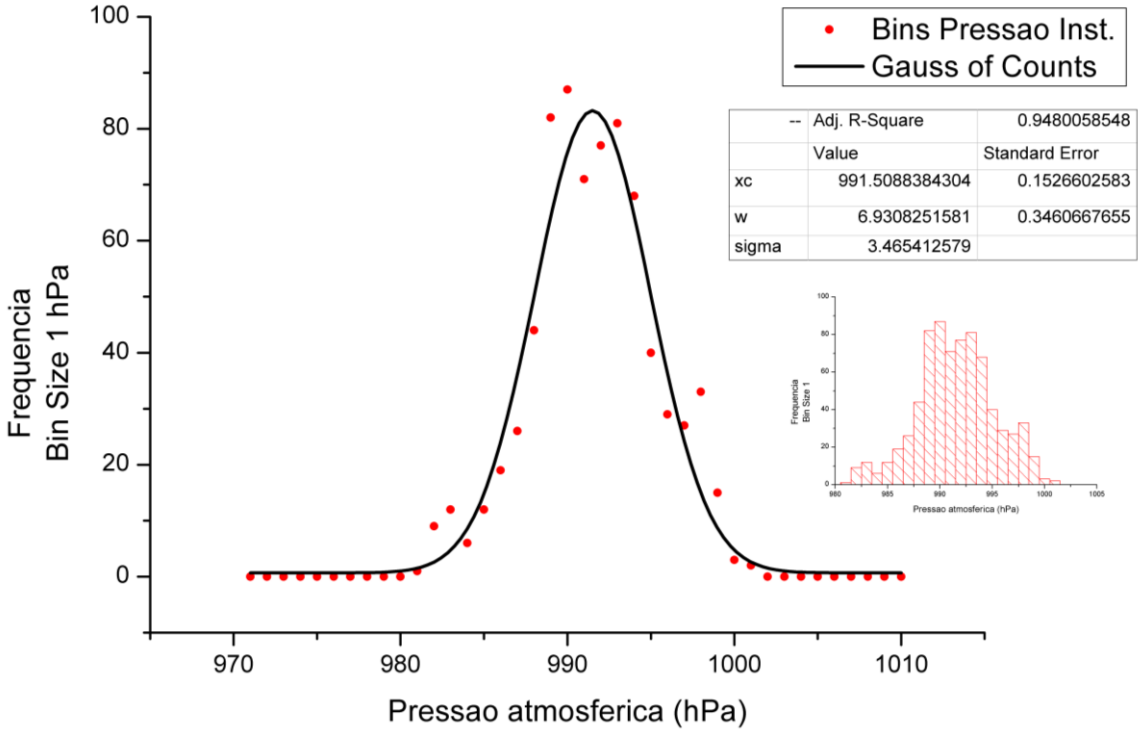
A propagação da incerteza da pressão na determinação da umidade relativa com o psicrômetro foi realizada através da inserção de uma incerteza de $\pm 10\ hPa$, a qual foi obtida através de uma análise da variação da pressão local (Bagé-RS) ao longo do mês de maio de 2018, os dados foram obtidos do site do INMET- Instituto Nacional de Meteorologia[3], onde é possível recolher dados da estação automática mais próxima (EMBRAPA, Bagé-RS), os dados foram organizados em um

[3] http://www.inmet.gov.br/portal/

histograma e posteriormente submetidos a uma regressão gaussiana, a fim de se obter um desvio padrão.

A Figura 6.04 apresenta a regressão gaussiana feita nos dados de pressão coletados pela estação automática de Bagé-RS durante o mês de maio de 2018, nela é possível notar que a dispersão é expressa em duas vezes o desvio padrão de $\pm 6{,}93\ hPa$, este desvio foi assumido o valor de $\pm 10\ hPa$, na análise da propagação na determinação da umidade relativa com o psicrômetro.

Figura 6.04 - Análise da dispersão da pressão atmosférica local (Bagé-RS), maio de 2018



Fonte: Autor

Para varrer a umidade relativa e observar a influência da incerteza da pressão, se fez variar a temperatura de bulbo seco (ambiente), fazendo assim variar a umidade relativa. A Figura 6.05, apresenta os resultados da análise em três gráficos, o primeiro de cima para baixo fornece a umidade relativa em função da temperatura de bulbo seco (ambiente), o segundo, o erro máximo devido a uma incerteza de $\pm 10\ hPa$ na pressão atmosférica local, e o terceiro o erro percentual.

Figura 6.05 - Erro máximo do psicrômetro para uma incerteza de $\pm 10\ hPa$ na pressão local

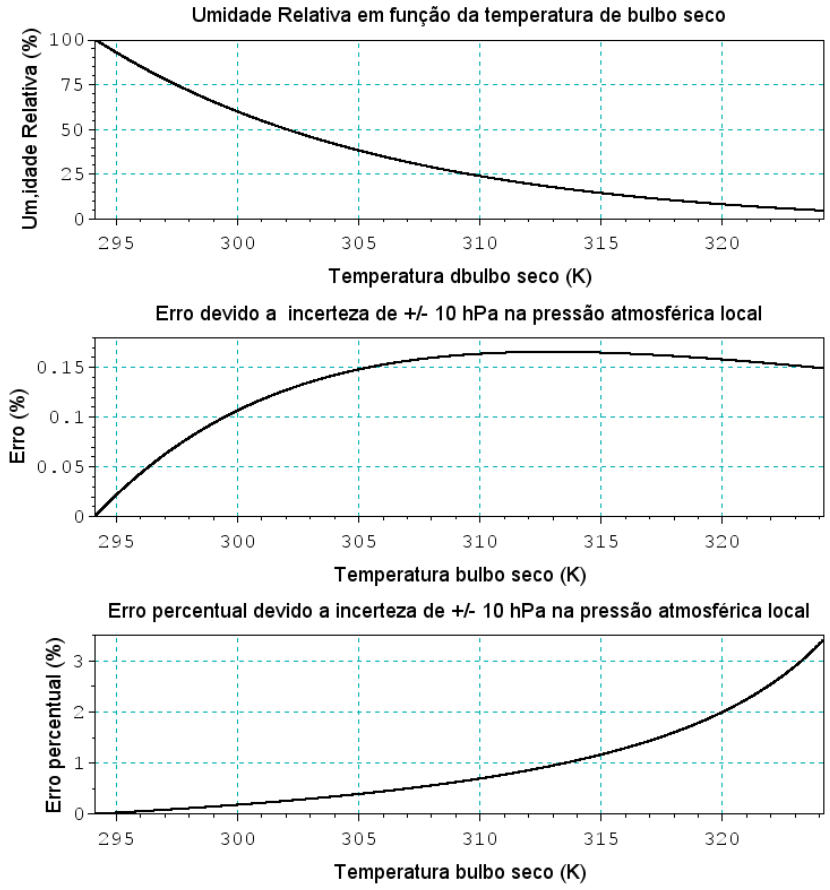


Figura 6.05: Erros máximos na determinação da umidade relativa obtida através do psicrômetro, com uma incerteza de $\pm\ 10\ hPa$ na pressão atmosférica local, a uma temperatura de bulbo úmido de $294{,}165\ K$. De cima para baixo: U_r a pressão constante, Erro absoluto máximo devido a incerteza de $\pm\ 10\ hPa$ e Erro percentual máximo devido a incerteza de $\pm\ 10\ hPa$.

Fonte: Autor

Considerando uma faixa de $10 - 100\ \%$ de umidade relativa, o erro percentual chega ao máximo de $\pm\ 2\%$, para baixos valores de umidade, o erro absoluto chega ao seu máximo entre $15 - 25\%$ de umidade relativa, onde corresponde a $\pm\ 0{,}15\ \%$. Conclui-se que na determinação da umidade relativa com o psicrômetro, ela é pouco sensível a incertezas na pressão atmosférica local, mas caso já se esteja trabalhando nesse faixa de erro, pode-se associar a instrumentação um sensor de pressão barométrica digital, que pode fornecer facilmente a pressão com uma acurácia de $\pm\ 100\ Pa$ (por exemplo, o BPM280 e BPM388, fabricados pela BOSCH),

com uma incerteza dessa ordem, o erro absoluto máximo na umidade relativa devido ao erro na pressão, corresponde a $0{,}02\ \%$.

Figura 6.06 - Erro absoluto máximos do psicrômetro para uma incerteza de $\pm 0{,}5\ K$ na temperatura de bulbo seco

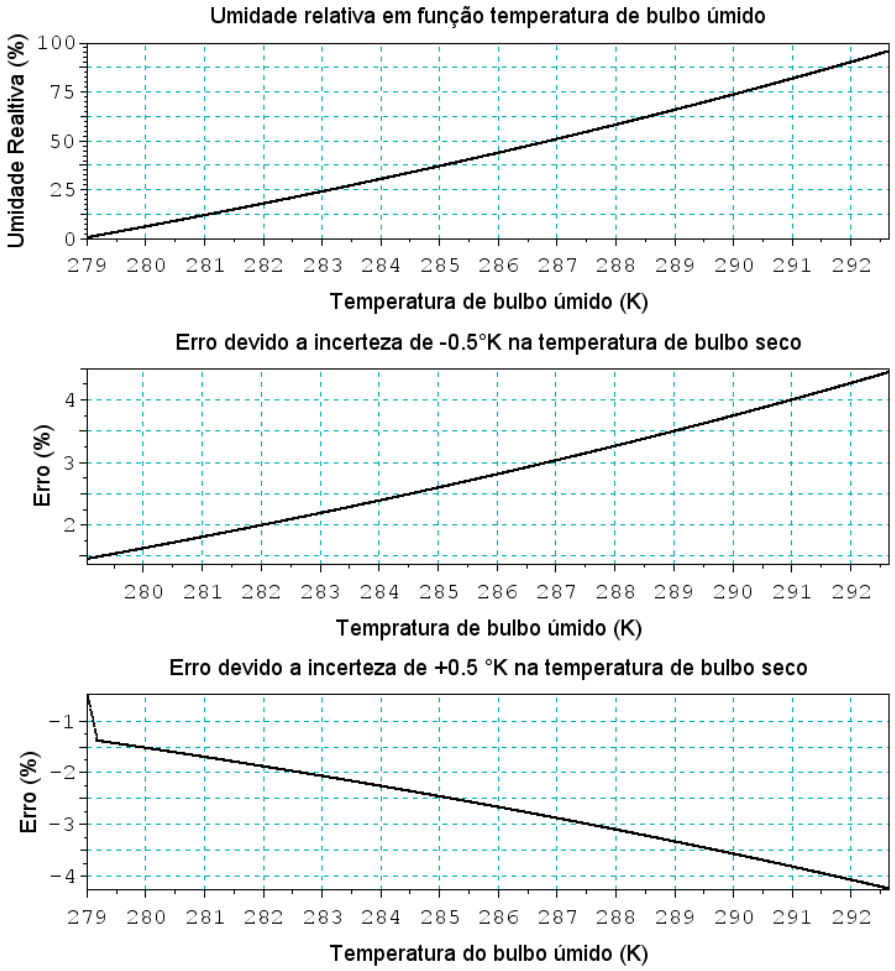


Figura 6.06: Erro absoluto máximo da umidade relativa obtida com psicrômetro, para temperatura de bulbo seco de $293{,}15 \pm 0{,}5\ K$ e uma pressão de $101325\ Pa$, em função da temperatura de bulbo úmido. De cima para baixo: U_r para uma temperatura T definida, Erro absoluto máximo devido à incerteza de $-0{,}5\ K$ e Erro absoluto máximo devido a incerteza de $+0{,}5\ K$.

Fonte: Autor.

O mesmo procedimento feito para a pressão foi repetido para a temperatura de bulbo úmido e de bulbo seco. Para observar a influência da incerteza da temperatura de bulbo seco, o parâmetro variado foi à temperatura de bulbo úmido, a incerteza adotada na temperatura de bulbo seco foi de $\pm\ 0{,}5\ K$, o que normalmente se tem em sensores de temperatura semelhantes ao LM35. A Figura 6.06, apresenta os

resultados dos erros absolutos máximos e a Figura 6.07 dos erros percentuais máximos.

De acordo com a Figura 6.06, o erro absoluto máximo na determinação da umidade relativa com o psicrômetro, obtido em uma temperatura de bulbo seco de $293{,}15\ K$, com uma incerteza de $0{,}5\ K$, foram de aproximadamente de $\pm\ 4{,}4\ \%$.

Figura 6.07 – Erro percentual máximo do psicrômetro para uma incerteza de $\pm 0{,}5\ K$ na temperatura de bulbo seco

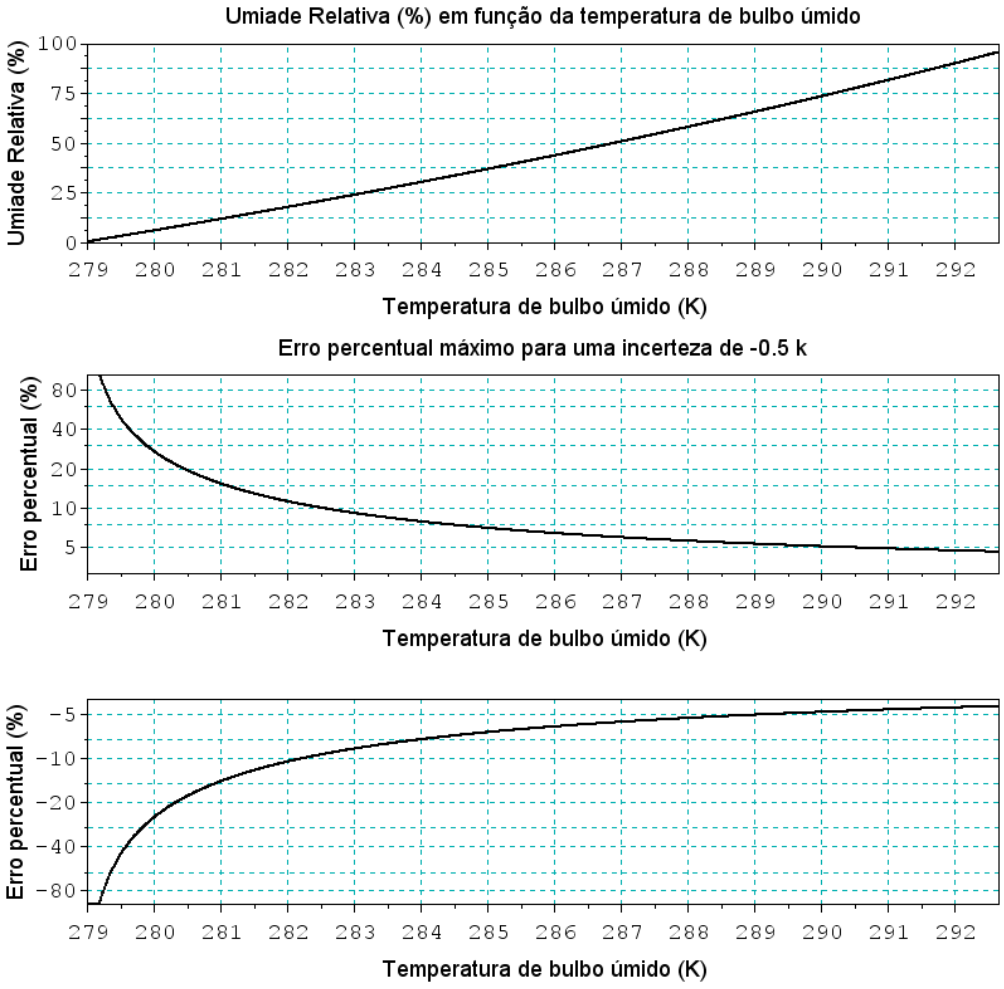


Figura 6.07: Erro percentual máximo na determinação da umidade relativa através do psicrômetro, com uma incerteza de $\pm\ 0{,}5\ K$ na temperatura de bulbo seco ($293{,}15\ K$) em uma pressão atmosférica de $101325\ Pa$, em função da temperatura de bulbo úmido. De cima para baixo: U_r para uma temperatura T definida, Erro percentual máximo devido à incerteza de $-\ 0{,}5\ K$ e Erro percentual máximo devido a incerteza de $+\ 0{,}5\ K$.

Fonte: Autor.

O erro percentual máximo apresentado em escala logarítmica na Figura 6.07, pode supera os $20\ \%$, para em umidade relativa entorno de 5%, conforme a umidade aumenta o erro diminui, em uma faixa de $30 - 90\%$, o erro percentual varia de $7{,}5 - 4{,}4\%$, com um comportamento aproximadamente exponencial.

Conclui-se que o sistema de medida (psicrômetro) é muito sensível a incerteza da temperatura de bulbo seco, e dessa forma deve optar por um sensor com o menor erro possível. Caso se utilize um sensor com uma incerteza de $0{,}1\ K$, o erro absoluto máximo para as mesmas condições citadas, seria de $0{,}86\ \%$, isto é, melhorando a incerteza do sensor de bulbo seco em cinco vezes, diminui-se a incerteza da umidade relativa em aproximadamente cinco vezes, para as mesmas condições apresentadas.

Na sequência, se fixou a temperatura de bulbo úmido em $274{,}15\ K$, com uma incerteza de $\pm\ 0{,}5\ K$, e se fez variar a temperatura de bulbo seco (ambiente) em uma faixa de $11\ K$, conseguindo uma variação de umidade relativa de $0 - 90\ \%$, o resultado é apresentado pela Figura 6.08.

O erro máximo encontrado foi de aproximadamente 8,2% para uma umidade de 90% e 4,5% para umidades relativas extremamente baixas ($0 - 10\%$), quase duas vezes maior do que o erro encontrado em função da temperatura de bulbo seco. A Figura 6.09 dispõe o erro percentual em função da temperatura de bulbo seco, que corresponde a variar a umidade.

Figura 6.08 - Erro absoluto máximo do psicrômetro para uma incerteza de $\pm 0{,}5\ K$ na temperatura de bulbo úmido

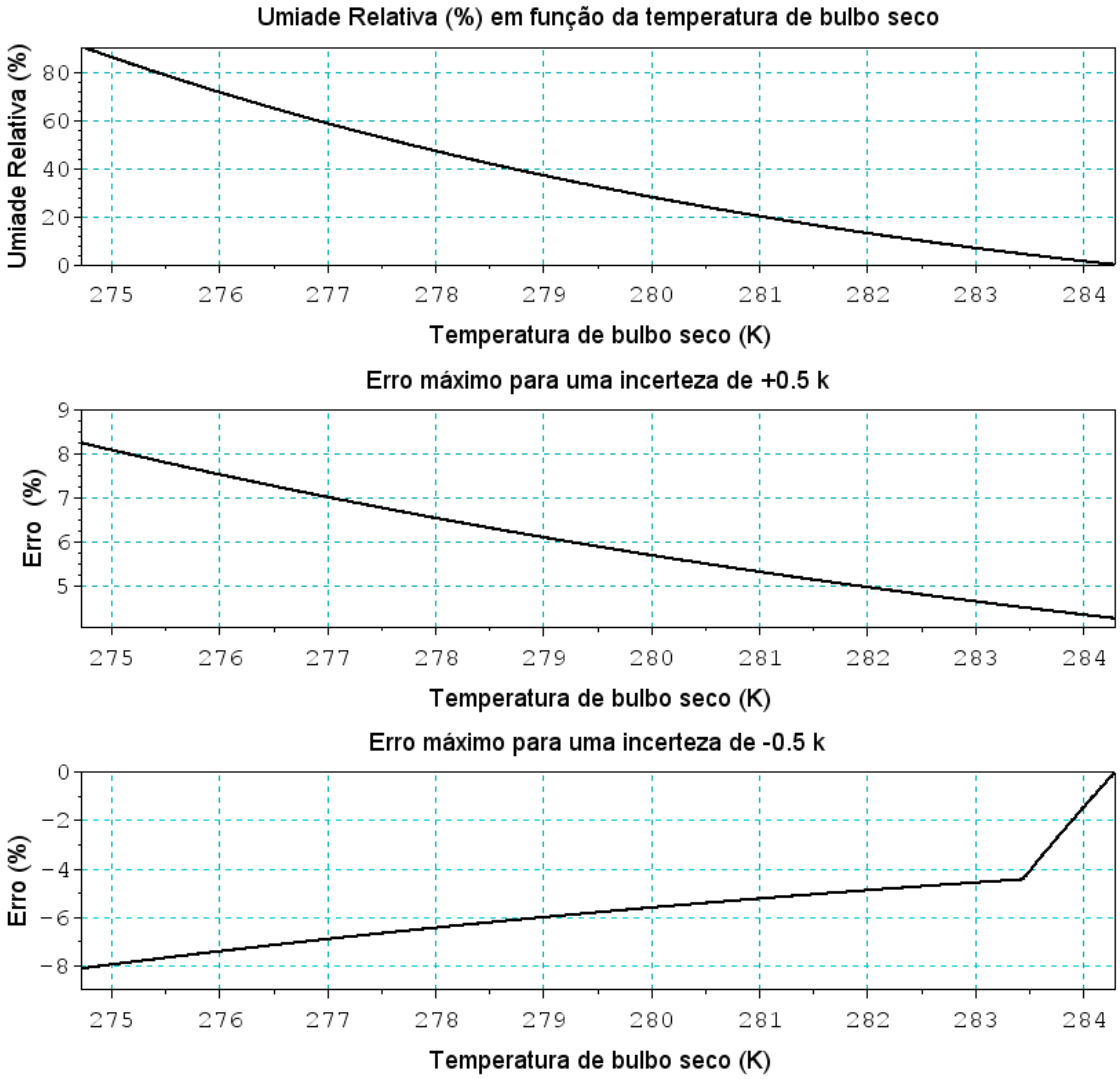


Figura 6.08: Erro absoluto máximo na determinação da umidade relativa através do psicrômetro, com uma incerteza de $\pm\ 0{,}5\ K$ na temperatura de bulbo úmido ($274{,}15\ K$) uma pressão atmosférica de $101325\ Pa$, em função da temperatura de bulbo seco. Segue a mesma descrição da Figura 6.06, trocando-se T por T_m.

Fonte: Autor.

Figura 6.09 - Erro percentual máximo do psicrômetro para uma incerteza de $\pm 0{,}5\ K$ na temperatura de bulbo úmido

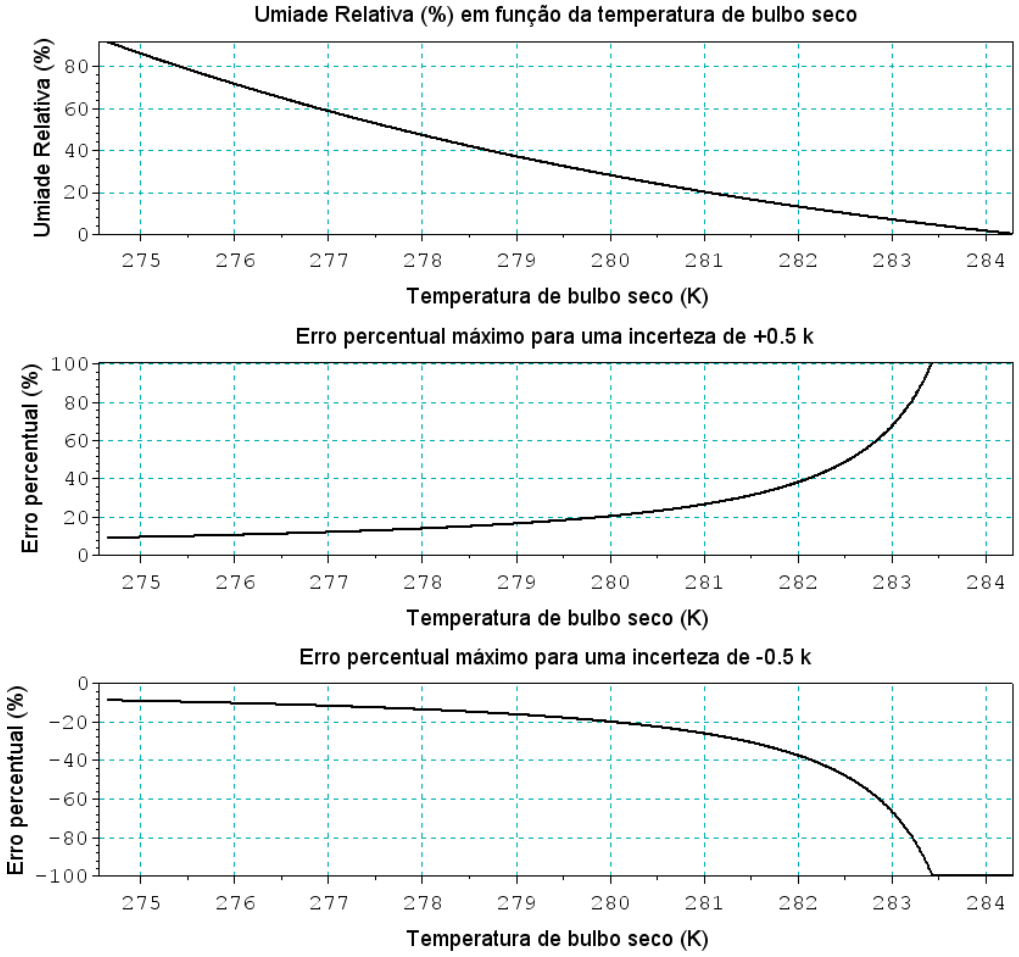


Figura 6.09: Erro percentual máximo na determinação da umidade relativa através do psicrômetro, com uma incerteza de $\pm\,0{,}5\ K$ na temperatura de bulbo úmido $(274{,}15\ K)$ uma pressão atmosférica de $101325\ Pa$, em função da temperatura de bulbo seco. Para os mesmo casos da figura anterior.

Fonte: Autor.

Nota-se que, apesar do comportamento ser semelhante ao apresentando para a incerteza do bulbo seco, o erro máximo, tanto em porcentagem quanto em valor absoluto, é aproximadamente o dobro. Pode-se concluir que a incerteza na temperatura absoluta do bulbo úmido é mais crucial do que a do bulbo seco, e fazendo a mesma análise que foi feita para o bulbo seco, se o sensor no bulbo úmido tiver uma incerteza de $\pm\,0{,}1\ K$, a incerteza resultante na umidade relativa devido ao erro do sensor, será de $\pm\,1{,}65\ \%$, ou seja, o erro final é diminuído em aproximadamente cinco vezes.

Por fim, analisou-se a propagação total das incertezas já consideradas, ou seja, $\pm 10\ h\ Pa$ para a pressão atmosférica local, $\pm 0{,}5\ K$ para as temperaturas absolutas de bulbo seco e úmido. O erro absoluto encontrado está disposto na Figura 6.10, onde além da curva de incerteza já mencionada (primeira de cima para baixo, curva azul), possui outras três que representam três situações que minimizam o erro final na umidade relativa.

Figura 6.10 – Erro máximo na umidade relativa, com incerteza de $\pm 0{,}5\ K$ nas temperaturas e incerteza de $\pm 10\ hPa$ na pressão

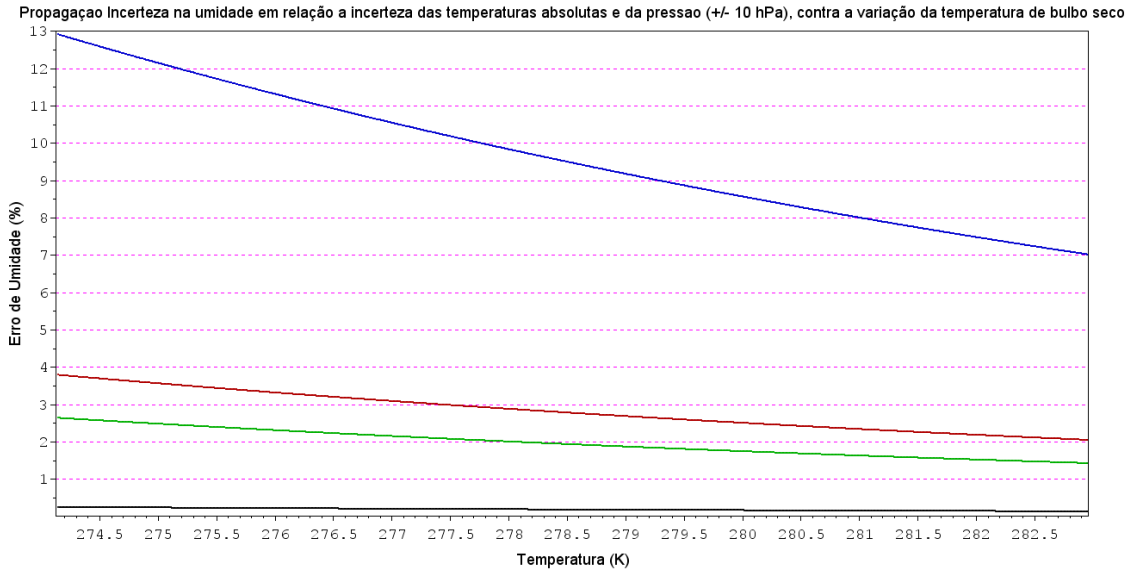


Figura 6.10: Erro absoluto máximo na determinação da umidade relativa através do psicrômetro, com uma incerteza de $\pm 0.5\ K$ nas temperaturas T_m- bulbo úmido $(274.15\ K)$ e T - bulbo seco uma pressão atmosférica de $100000\ Pa$ com incerteza de $\pm 10\ hPa$ em função da temperatura de bulbo seco, em quatro situações diferentes. As curvas próximas da origem das abscissas são oriundas de procedimentos com os sensores térmicos sugeridos por este trabalho.

Fonte: Autor.

O pior caso apresentado na Figura 6.10 (curva azul, primeira de cima para baixo) foi obtido apenas considerando as incertezas já mencionadas, nessa situação encontra-se um erro que vai de $\pm 7\%$ para uma umidade de aproximadamente 0% até $\pm 13\%$ para um ambiente saturado. Porém notou-se que se garantido a calibração entre os sensores térmicos (um contra o outro), o erro pode diminuir em um fator de $3{,}5$, que está representado pela curva vermelha segunda de cima para baixo na Figura 6.10.

Ainda na Figura 6.10, a terceira curva de cima para baixo (verde) representa o caso no qual se realiza a calibração dos sensores em relação a media indicada por eles, isto é, ao invés de se calibrar um sensor contra o outro, se calibra cada um deles contra a média deles. Neste caso a melhora para ser aproximadamente de cinco vezes.

Entretanto nada substitui um sensor mais exato e preciso, a última curva de baixo para cima (preta), representa o erro estimado de para um par de sensores que possuem uma incerteza de $\pm\ 0{,}05\ K$, dez vezes melhor do que a incerteza usada na analise. Dessa vez a melhora foi de aproximadamente cinquenta vezes, o sensor utilizado no processo de coleta dos dados trabalhados na subsecção anterior, dessa mesma seção, possui uma incerteza dessa ordem ($\pm\ 0{,}04\ K$), Pt100 AA calibrado.

Conclui-se que a incerteza na umidade relativa obtida pelo psicrômetro é dominada pelas incertezas dos sensores térmicos, e por isso, realizou-se a análise da relação entre a incerteza na determinação da umidade relativa pela incerteza das medidas de temperaturas absolutas, no caso de sensores térmicos com uma incerteza de 0,5 K, sem serem calibrados entre si, e calibrados contra a média entre ele, primeira e terceiro caso discutido anteriormente, a Figura 6.11 apresenta o resultado dessa análise.

Nota-se na Figura 6.11, que para altos valores de umidade (a umidade cresce da direita para a esquerda), a incerteza da temperatura chega a ser amplificada em mais de vinte e cinco vezes, no caso em que não se garante nenhuma calibração entre os sensores, já no caso em que se garante a calibração dos sensores contra a média, a incerteza é amplificada oito vezes no pior dos casos, logo se pode concluir, que essa simples prática (calibrar os sensores contra a média) resulta em uma melhora de três vezes na incerteza final.

Figura 6.11 – Razão entre as incertezas da umidade relativa contra

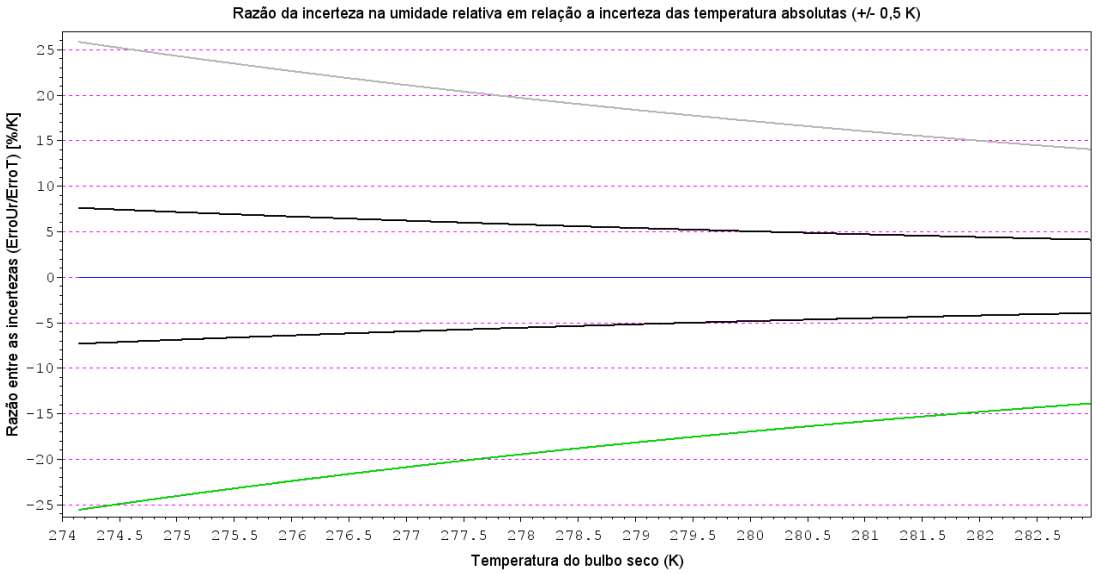


Figura 6.11: Razão da incerteza na umidade relativa em relação à incerteza das temperaturas absolutas (+/- 0,5 K)". A umidade cresce da direita (0%) para a esquerda (100%). Com e sem o procedimento proposto nesse trabalho.

Fonte: Autor.

A melhora acontece, pois como visto na seção anterior, quando se associa n sensores para medir a mesma grandeza, no mesmo intervalo de tempo e espaço, o valor da grandeza estimado melhora em um fator de raiz de n. E quando se calibra os sensores contra a mesma referência, no caso a média entre eles, eles começam a retornar a mesma resposta para o mesmo estímulo, evitando uma possível situação em que um erre positivamente enquanto o outro erre negativamente, uma seleção aleatória de sensores de temperatura.

7 Uma proposta de prática para educação básica

Como discutido na introdução e na seção 2 “A umidade relativa, uma aproximação teórica”, a medição e o controle da umidade relativa é importantíssimo na produção industrial, como por exemplo, na secagem e armazenagem de grãos (arroz, feijão, soja, milho, etc.), na produção de pães e outros produtos alimentícios, e na climatização de ambientes sejam estes para humanos (residências, salas comerciais, escolas, entre outros) ou outros seres (estufas de plantio de tomate, cogumelos, entre outros).

Considerando também que a medição da umidade relativa, tem o potencial de conciliar as áreas de conhecimentos Biológicos, Químicos e Físicos como, por exemplo, apresentado em UM HIGRÔMETRO DE VAGEM E A FÍSICA NO ENSINO FUNDAMENTAL (SILVA, 2002), e devido o caráter impreciso dos processos de medição é possível explorar o lado aleatório e sistemático do erro de medição, aproximando o aluno a nível introdutório à teoria da medição (metrologia).

Tabela 7.01 - Procedimentos e assuntos potenciais da primeira atividade

Procedimentos	**Tempo médio mínimo (h)**	**Assuntos potenciais**
Calibração entre sensores térmicos (LM35)	0,5 – 2 (Esse tempo varia em função de quantos pontos são considerados, no processo de calibração).	Erro sistemático e erro aleatório.
Montagem do psicrômetro e coleta de dados	0,5 – 1	Pressão parcial, pressão de saturação, e suas dependências com a temperatura.
Analise dos erros de medição com o psicrômetro	0,5 – 1	A propagação do erro.

Fonte: Autor

Este trabalho procura apresentar de forma sistemática como medir a umidade através da utilização do psicrômetro, discutido na seção 3, “Sensores e a medição da umidade relativa”, realizado como dois termômetros tipo CI LM35, que também foi descrito na seção 3, um para o bulbo seco e um para o bulbo úmido, ambos lidos

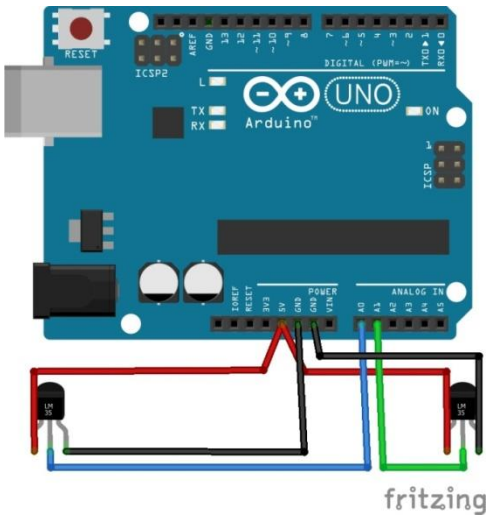
por um Arduino que além de ler os sensores, pode retorna os valores já processados de temperatura e umidade. A Tabela 7.1 apresenta assuntos potenciais, para serem abordados durante a atividade.

7.1 Calibração entre os sensores LM35-0 e LM35-1

Um dos sensores térmicos (o LM35-0 e o LM35-1), deverá estar em contado com água ou algo úmido (gaze umedecida), para proteger o CI da umidade, deve-se envolvê-lo com uma película protetora de baixa capacidade térmica, como por exemplo, o filme PVC (o mesmo tipo utilizado para embalar alimentos), proteja os dois sensores, para que ambos fiquem nas mesmas condições de inércia térmica.

Há duas abordagens possíveis para a calibração dos sensores: o primeiro a temperatura ambiente (ajuste de *off-set)* o segundo com quatro pontos ou mais: um a temperatura ambiente, outro acima ($+10\,°C$), outro um abaixo ($-10°C$) e um perto do $0\,°C$ (mistura de gelo picado e água). Para produção dos gráficos pode-se utilizar o programa gratuito SciDAVis - *Scientific Data Analysis and Visualization*, ou qualquer outro semelhante.

Figura 7.01 – Conexões de dois LM35 com o Arduino



Fonte: Autor

As conexões entre Arduino e os termômetros LM35-0 e LM35-1 (Figura 7.01), seguem a declaração de pinagem do Datasheet do LM35 (LM35, 2000) e são utilizadas paras as leituras as entradas analógicas A0 e A1 do Arduino. Resumindo as conexões temos: o pino 1 dos dois sensores é conectado a alimentação de 5V do

Arduino, o pino 2 do LM35-0 conectado a porta de entrada analógica A0, o pino 2 do LM35-1 conectado a porta de entrada analógica A1 e por fim os pinos 3 de ambos sensores conectados a entrada GND do Arduino.

O programa (Programa 7.01) utilizado para a coleta de dados da calibração realiza um único *loop*, onde lê as entradas analógicas A0 e A1 do Arduino, realiza a conversão do Programa digital para tensão e da tensão para temperatura, o programa realiza esse *loop* dez mil vezes e depois o programa se encerra.

Programa 7.01 - Programa para coleta de dados para a calibração

```
float volt, leitura, LM350, LM351;

void setup() {

 analogReference(INTERNAL); // Vref = 1.1
 Serial.begin(9600);

 for (int i = 0; i<10000; i++){

  leitura = 0;
  volt = 0;
  LM350 = 0;
  leitura = analogRead(A0);
  volt  = leitura*(1.1/1023); // Vref = 1.1
  LM350 = (volt/149.2)*1000;


  leitura=0;
  volt = 0;
  LM351 = 0;
  leitura = analogRead(A1);
  volt  = leitura*(1.1/1023); // Vref = 1.1
  LM351 = (volt/149.2)*1000;

   Serial.print (micros(),4);
   Serial.print ("\t");
   Serial.print (LM350,4);
   Serial.print ("\t");
   Serial.println (LM351,4);

}

  Serial.println ("Fim do programa");

}

void loop() {


}
```

Fonte: Autor

O programa retornara valores de temperatura e o tempo dentro um pequeno intervalo de tempo (< 6 min), com o intuito de que a variação de temperatura ambiente não influencie no procedimento. Para verificar essa influência pode-se realizar um gráfico da temperatura em relação ao tempo, e desde que a variação

total da temperatura em função do tempo seja menor do que $0{,}5°C$ (acurácia indicada pelo fabricante), pode-se considerar os dados válidos para a calibração.

Figura 7.02 – Gráfico de ruido aleatório de dois LM35

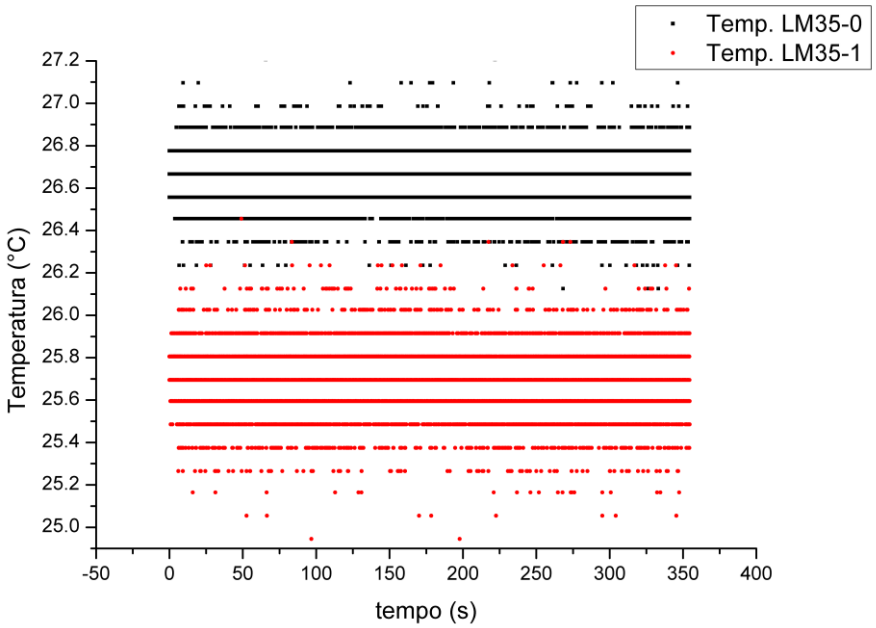


Figura 7.02: Gráfico da estabilidade de medida de dois sensores LM35 escolhidos aleatoriamente, em uma coleta de 13278 pontos sem banho térmico.

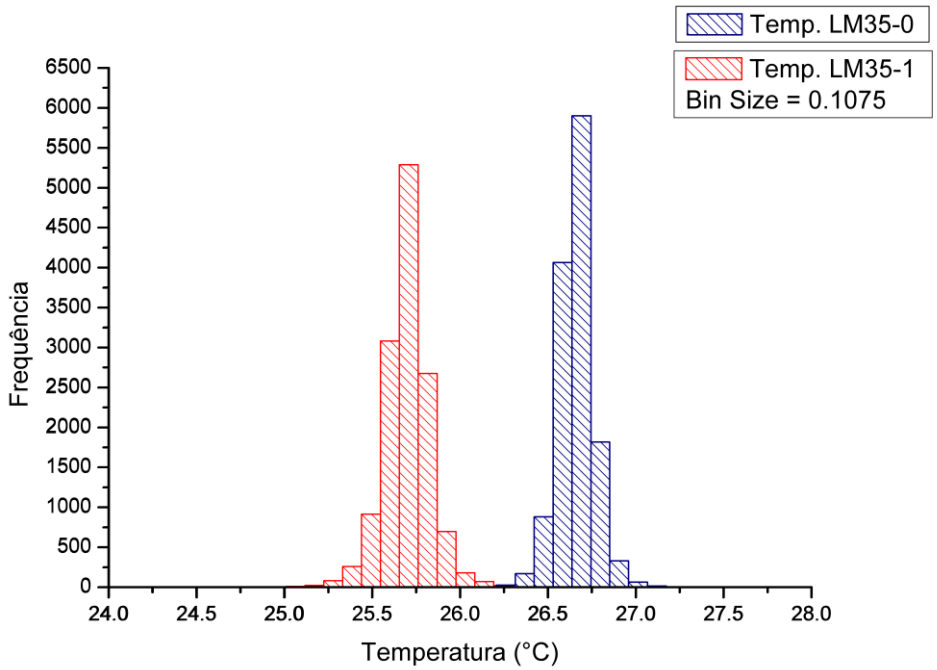
Fonte: Autor

A Figura 7.02 apresenta um gráfico de estabilidade temporal de medidas feitas com dois sensores (LM35) escolhidos aleatoriamente com 13278 pontos. Nota-se que não há tendência temporal perceptível, a largura da faixa de medidas se dá basicamente pela presença de ruídos (erro aleatório) durante a medida.

Para otimizar a estabilidade térmica dos sensores durante a calibração, pode-se utilizar para cada temperatura de interesse um banho térmico. Por exemplo, para o ponto da temperatura ambiente, utiliza-se um banho térmico com água a temperatura ambiente, para o ponto acima se utiliza um banho térmico com água morna, para um ponto abaixo se utiliza um banho térmico com água gelada (da geladeira) e para o ponto próximo a $0°C$ um banho térmico de gelo picado com água.

Uma vez com os dados coletados, realiza-se um histograma com um *Bin Size* de $0{,}1075\ °C$, que é o menor passo de conversão do ADC do Arduino para a referência interna ($1{,}1\ V$), para cada conjunto de pontos LM35-0 e LM35-1.

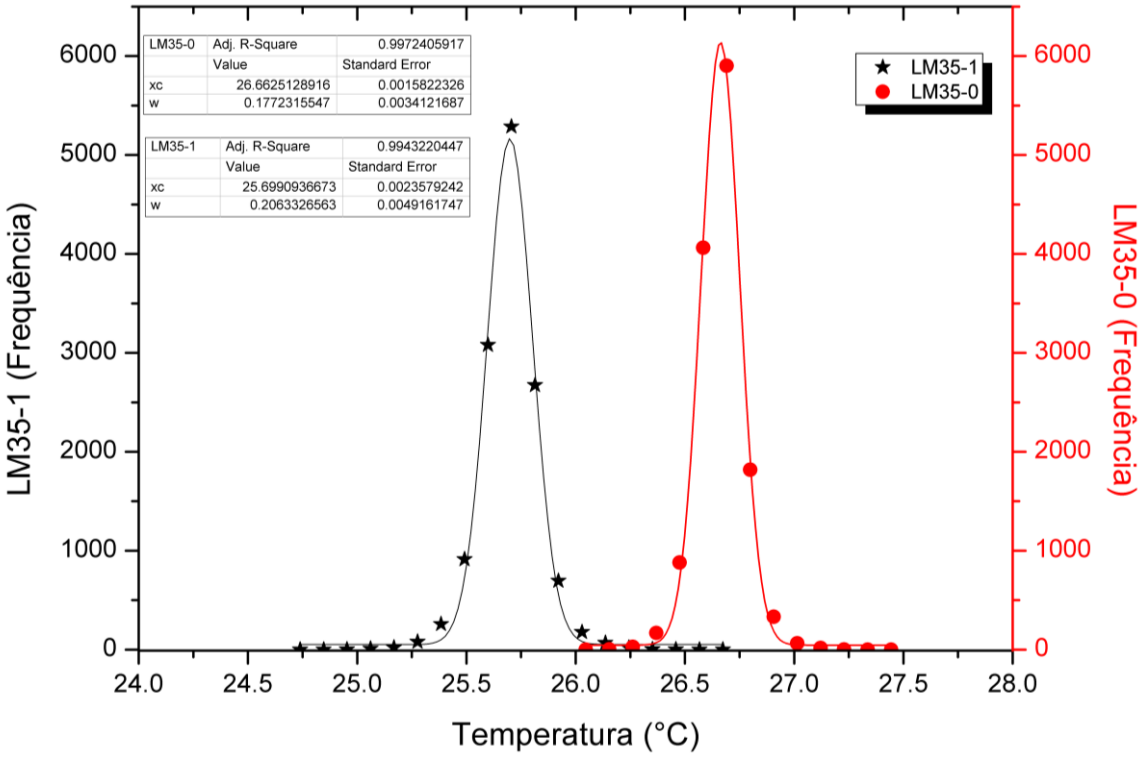
Figura 7.03 - Histograma de medidas de dois sensores de temperatura LM35, de 13278 pontos sem banho térmico



Fonte: Autor

Na Figura 7.03, temos os histogramas para os dois conjuntos de pontos, com este tipo de gráfico já é possível apresentar os conceitos de acurácia, indicada pelo erro sistemático, diferença entre os valores mais prováveis, e precisão indicada pelo erro aleatória, distribuição das medidas para cada sensor. Entretanto para uma análise mais fiel, deve-se realizar um ajuste gaussiano com as frequências de cada *Bin.* Cada *Bin* corresponde a uma das barras do histograma, a frequência corresponde ao número de ocorrências dentro de um intervalo pré-definido (*Bin*), a largura das barras (*Bin Size*) neste caso corresponde ao um passo de conversão do ADC do Arduino, convertido em temperatura.

Figura 7.04 - Ajuste Gaussiano de medidas de dois LM35, de 13278 pontos sem banho térmico



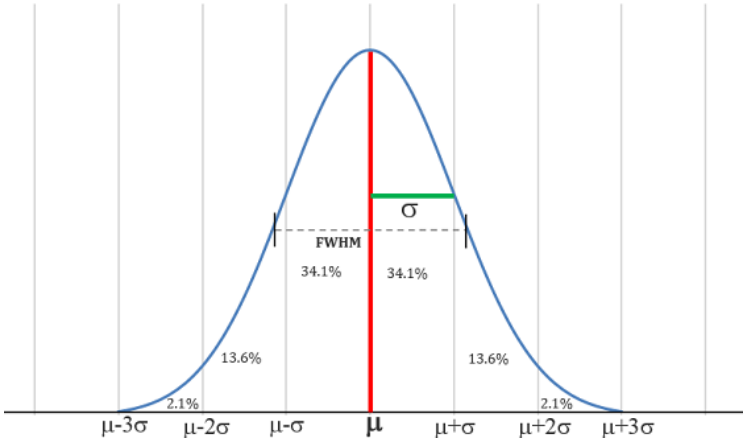
Fonte: Autor

A Figura 7.04, apresenta os ajustes gaussianos dos conjuntos de pontos tomados como exemplo (Figura 7.03), através desse tipo de ajuste é possível estimar com menor erro o valor mais provável dentre os coletados, que neste caso para o LM35-0 foi de $26{,}66\ °C$ e para o LM35-1 foi de $25{,}70\ °C$, fazendo a diferença entre os valores mais prováveis (centrais) pode-se encontrar o erro sistemático que neste caso vale $0{,}96°C$, o que concorda com as especificações do fabricante, que indicava uma acurácia de $\pm 0{,}5\ °C$. Portanto este erro ($0{,}96°C$) deve ser somado ao LM35-1, para que ele produza o mesmo resultado que o LM35-0, para o caso (a) de correção. Ou de posse de outros pares de coordenadas, montar um gráfico do tipo LM35-0 contra LM35-1 e a partir daí obter um ajuste linear ou quadrático, que será utilizado para corrigir as leituras do LM35-1, para que concordem com as leituras do LM35-0, correspondente a correção (b).

A precisão da medida é indicada pelo erro aleatório, que pode ser expresso através da largura da gaussiana a uma altura que compreende 95% dos pontos coletados, normalmente este valor é indicado por mais ou menos duas vezes o

desvio padrão, em outras palavras, $\mp 2\sigma$ (ver Figura 7.05). Neste exemplo o erro aleatório para as medidas feitas com o LM35-0 foi de $\pm 0{,}18\,°C$ e para LM35-1 $\pm 0{,}21\,°C$. Para saber se o ajuste gaussiano fornece uma estimativa confiável pode-se analisar o erro quadrático médio do ajuste que para este exemplo ficou muito próximo de um (1ª caso ideal).

Figura 7.05 - Representação do desvio padrão de uma curva gaussiana



Fonte: Nuclear e-cology; FWHM: Full Width Half Maximum, largura máxima a meia altura.

Esse procedimento de análise deve ser repetido, para todas as temperaturas usadas no processo de calibração, obtendo assim um valor central (valor mais provável), para cada sensor em cada temperatura. Dispondo desses valores pode-se fazer uma regressão linear ou quadrática, a que melhor se adequar, dos valores centrais para o LM35-0 em função do LM35-1 (ou vise-versa). A curva resultante dessa regressão é a curva de calibração de um sensor (LM35) contra o outro e sua erro sistemático continua sendo o mesmo encontrado anteriormente. Pode-se ainda calibrar ambos os sensores contra média entre eles, conforme discutido na seção 6, para qual se espera um erro sistemático menor, nenhum desses processos o erro aleatório se altera.

7.2 O psicrômetro com o LM35 e Arduino

O psicrômetro é um instrumento para se determinar a umidade relativa do ar e tem como princípio básico o fato de que a superfície de uma lâmina de água (bulbo úmido) resfria devido à evaporação, isto é, a água para mudar de fase, líquida para

vapor (evaporação), requer energia (que é retirada do meio – a água em volta, bulbo úmido) e esta energia é conhecida como calor latente, L.

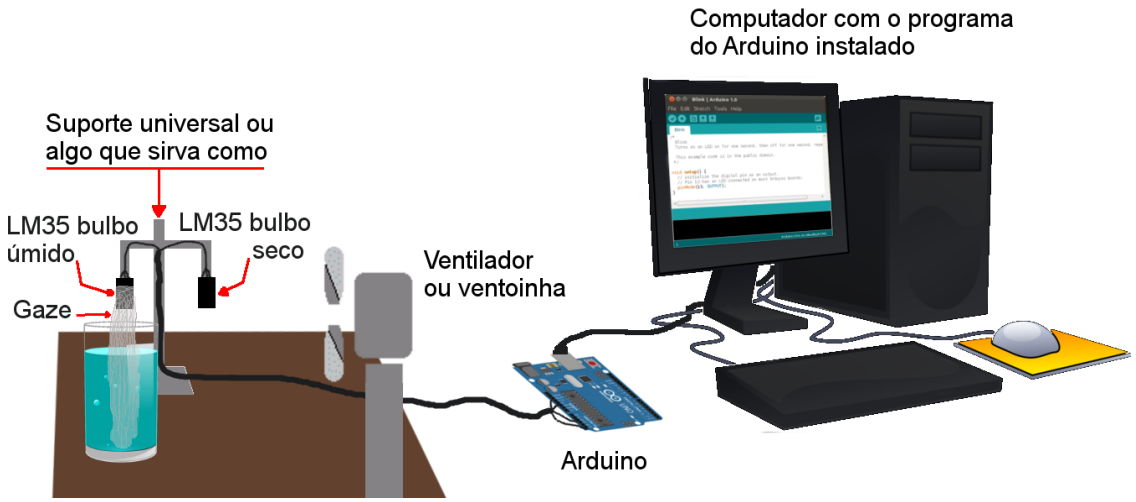
Como o meio cede energia para a água passar do estado (fase) líquido para vapor, este meio (bulbo úmido) diminui a temperatura. Se a umidade relativa do ar está baixa, isto propicia com que a taxa (o quanto rápido) de evaporação da água seja maior do que quando a umidade relativa do ar é alta, desta forma registrando uma diminuição maior na temperatura (no bulbo úmido), em outras palavras dizemos que a taxa de evaporação de água é inversamente proporcional à umidade relativa.

Existe uma quantidade máxima de vapor de água que o ar pode suportar, e neste limite é dito que o ar está saturado de vapor de água. Este limite de saturação depende principalmente da temperatura e da pressão do ar, sendo diretamente proporcional a cada uma destas grandezas. Para determinar a umidade relativa local através do psicrômetro, basta medir as temperaturas T do ambiente (bulbo seco) e T_m da superfície da água (bulbo úmido) e realizar a diferença entre delas (depressão psicrométrica). Além disso, precisa-se conhecer a pressão atmosférica do respectivo local, que pode ser medida, ou obtida em forma bem aproximada através do site http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=estacoes/estacoesautomaticas, INMET-Instituto Nacional de Meteorologia, onde se deve escolher a localidade mais próxima possível.

O esquema de uma possível montagem de psicrômetro, que utiliza a ventilação forçada, pode ser vista na Figura 7.06, onde os objetos não respeitam ordem de escala, a ventilação deve acontecer de modo igual nos dois sensores térmicos (LM35).

Na Figura 7.06, a gaze (ou algo semelhante) tem a função de: (a) evaporar a água do reservatório (copo) e (b) transportar a água por meio de sua capilaridade, do copo até o termômetro de bulbo úmido. Dessa forma o LM35 do bulbo úmido apresenta sistematicamente uma temperatura menor do que o LM35 do bulbo seco (excerto se a umidade relativa for igual o superior a 100%).

Figura 7.06 - Esquema de montagem do psicrômetro com ventilação forçada



Fonte: Autor

A porção de água utilizada na montagem representada pelo copo com água na Figura 7.06, deve estar em equilíbrio térmico com o meio, por isso, previamente reserve uma quantidade de água e a deixe alcançar o equilíbrio.

Para a coleta de dados das temperaturas pode-se utilizar o mesmo Programa apresentado anteriormente, caso se queira acompanhar a umidade relativa de um ambiente com a montagem sugerida, utiliza-se o Programa abaixo, onde deve-se substituir o valor padrão de pressão (101325 Pa) pelo valor local em Pascal.

Programa 7.02 - Programa para coleta de dados de umidade relativa com o psicrômetro sugerido.

```
float volt, leitura, LM350, LM351, Ur,
Pvs, Pv, Patm = 101325;

void setup() {

  analogReference(INTERNAL); // Vref =
1.1
  Serial.begin(9600);

}

void loop() {

    Serial.print (micros(),4);
    Serial.print ("\t");

    //Bulbo seco
    leitura = 0;

//Calculo da pressao de saturação
  Pvs = 611.21 * exp
(17.67*(LM350/(LM350 + 243.5)));

    //Calculo da pressao parcial de vapor
deagua
  Pv = 611.21 * exp (17.67*(LM351/(LM351
+ 243.5))) -
Patm*(6.553/10000000)*(LM350-LM351);

  //Calculo da umidade relativa
  Ur = Pv/Pvs;

    Serial.print (LM350,4);
    Serial.print ("\t");
    Serial.print (LM351,4);
```

```
  volt = 0;                                    Serial.print ("\t");
  LM350 = 0;                                   Serial.println (Ur,2);
  leitura = analogRead(A0);
  volt  = leitura*(1.1/1023); // Vref = 1.1   }
  LM350 = (volt/149.2)*1000;


  //Bulbo umido
  leitura=0;
  volt = 0;
  LM351 = 0;
  leitura = analogRead(A1);
  volt  = leitura*(1.1/1023); // Vref = 1.1
  LM351 = (volt/149.2)*1000;
```

Fonte: Autor

7.3 Análise do erro e sua propagação em medição de umidade com psicrômetro

Com os dados de temperatura do bulbo seco e temperatura do bulbo úmido (Programa 7.02), já coletados e armazenados, realiza-se um tratamento prévio semelhante ao realizando no procedimento calibração (histograma e ajuste gaussiano), e utilizar o valor mais provável, para a umidade e para as temperaturas de bulbo seco e bulbo úmido, na análise do erro e sua propagação.

Uma vez com os valores mais prováveis de temperatura de bulbo seco e úmido, calcula-se aproximadamente a umidade relativa através da equação 7.01, que foi discutido na seção 6, onde T_m é a temperatura indicada pelo bulbo úmido, T a temperatura indicada pelo bulbo seco P_{atm} a pressão atmosférica local.

$$U_r = \frac{610{,}78\ exp\left[6828{,}6\left(\left(\frac{1}{273}-\frac{1}{T_m}\right)-5{,}1701\ ln\left(\frac{T_m}{273}\right)\right)\right]-P_{atm}6{,}4545\ x10^{-4}(T-T_m)}{610{,}78\ exp\left[6828{,}6\left(\left(\frac{1}{273}-\frac{1}{T}\right)-5{,}1701\ ln\left(\frac{T}{273}\right)\right)\right]}\ 100\%\,. \qquad 7.01$$

Para estimar o erro sistemático (E_s) da medição da umidade relativa, desconsiderando o erro teórico, proveniente das relações empíricas, pode-se propagar o erro sistemático da temperatura, na equação acima, isso é feito substituindo o valor de T_m por $T_m \pm 0{,}5\ °C$, o valor de T por $T \pm 0,5\ °C$, e calculando os quatro valores da umidade relativa, com $T_m + 0{,}5\ °C$ e $T + 0{,}5\ °C$, com $T_m - 0{,}5\ °C$ e $T - 0{,}5\ °C$, com $T_m + 0{,}5\ °C$ e $T - 0{,}5\ °C$ e o último com $T_m - 0{,}5$ e $T + 0{,}5$. Destes, as duas últimas combinações produzem a maior diferença na estimativa da umidade relativa, o intervalo máximo do erro é expresso pelo valor absoluto da

diferença entre as duas últimas estimativas da umidade relativa. O valor de 0,5 °C é o erro sistemático (acurácia) indicado pelo fabricante (LM35, 2000).

A Figura 7.07, apresenta a umidade relativa obtida através de um psicrômetro montado com dois sensores térmicos LM35, onde se realizou uma comparação entre duas formas de calibração dos sensores térmicos (discutida na seção 6), em relação ao sensor de referência SHT-31. A dispersão apresentada na direção vertical resulta do ruído aleatório nas medidas dos sensores de temperatura, que pode ser facilmente minimizado pela realização de uma média das leituras de cada LM35, antes do calculo da umidade. Qual que um dos procedimento de calibração apresentados neste trabalho, resulta em um diminuição significativa do erro sistemático na determinação da umidade relativa, quando comparado ao sensor de referência SHT-31.

Figura 7.07 - Resposta do psicrômetro com LM35 com diferentes métodos

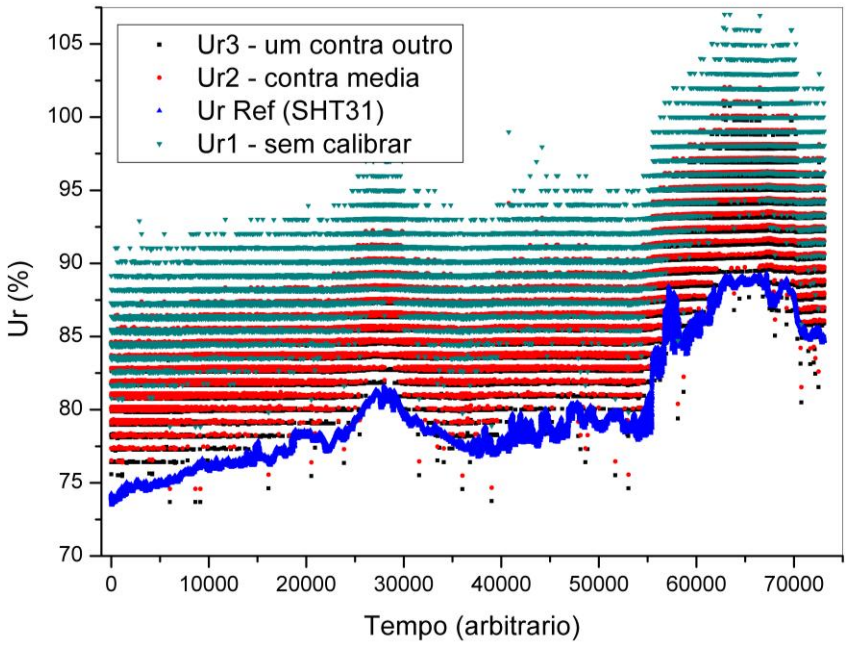


Figura 7.07: Ur Ref (triângulos azuis) é a umidade relativa medida com o sensor de referência SHT-31, Ur1 (triângulos verdes), Ur2 (pontos vermelhas) e Ur3 (pontos pretos) referem-se às medidas feitas com o psicrômetro, e respectivamente, sem calibração dos sensores térmicos, com calibração dos sensores contra a média deles e com calibração de um sensor contra o outro, foram utilizados dois sensores LM35.

Fonte: Autor

O mesmo processo se faz para o erro aleatório (E_a), porém no lugar de $\pm 0{,}5\ °C$, deve utilizar a incerteza encontra durante o processo de calibração entre os sensores. Para estimar o erro total da medição (E_t) de temperatura, soma-se o erro aleatório e o erro sistemático E_s do sensor.

$$E_t = \sqrt{{E_a}^2 + {E_s}^2}\ . \tag{5.04}$$

8 Conclusão

Neste trabalho foi apresentado uma proposta de trabalhar junto ao ensino médio (e também no superior) as questões referente a acurácia, precisão e resolução, através de um psicrômetro de fácil construção, utilizando a plataforma Arduino e sensores LM35. Um extenso suporte teórico foi apresentado através do texto, desde as definições fundamentas da termodinâmica envolvida na medição de umidade e uma revisão bibliográfica envolvendo as equações que modelam o psicrômetro. A determinação da umidade por meio do psicrômetro requer medidas acurátas de temperaturas, então uma extensa revisão teórica em relação a medidas de temperaturas por contato foi apresentada e a montagem e descrição de um sistema de calibração de sensores de temperatura com estabilidade melhor que 0,01 K ao longo de 30 segundos. Foi desenvolvido e montado um sistema duplo de medidas de temperaturas com acurácia (após o processo de calibração) melhor que 0,04 K a zero Celsius. Este sistema de medidas foi utilizado para montar um psicrômetro o qual gerou os dados para realizar a avaliação dos modelos teóricos (encontrados na literatura pesquisada) para o psicrômetro. Destas análises constatou-se que o erro na umidade relativa possui uma forte dependência com o erro na medida de temperatura em um fator de 20 vezes ou mais, para a equação estuda, em trabalhos futuros pretende-se estender essa análise para as demais equações citadas neste trabalho. Os resultados também mostram que o erro na temperatura do bulbo úmido é um pouco mais crítica do que o erro na temperatura do bulbo seco. O trabalho também mostra que um simples procedimento de calibração entre os termômetros de bulbo seco e bulbo úmido, melhoram em um fator de 3 ou mais no erro da umidade relativa. Ao final do trabalho foi apresentada uma proposta didática para a educação básica, que tem potencialidade de trabalhar as questões do erro na medição e alguns assuntos da termodinâmica, como o equilíbrio termodinâmico e a mudança de fase, que dependendo do nível pode ser facilmente explorado no ensino superior.

Abaixo são listados alguns dos trabalhos apresentados, em eventos que ocorreram durante o desenvolvimento deste trabalho, foram apresentados na forma de pôster e publicados na forma de resumo em livro Ata eletrônico (EEEFis) ou livro de Anais eletrônico (SIEPE):

(a) **VII ENCONTRO ESTADUAL DE ENSINO DE FÍSICA** – RS (EEEFis-RS)

Porto Alegre, Instituto de Física, UFRGS, 24 a 26 de agosto de 2017.

Ata: (http://www.if.ufrgs.br/mpef/7eeefis/Atas_VII_EEEFis-RS.pdf)

1- CARACTERIZAÇÃO DO CONVERSOR AD – HX711 PARA ARDUINO, **John Welvins Barros de Araújo**, Daniel Fonseca Corradini Ferrando, Edson Massayuki Kakuno, p.30, Anais VII EEEFis-RS.

2- CONTROLE DE TEMPERATURA PID COM ARDUINO, Daniel Fonseca Corradini Ferrando, **John Welvins Barros de Araújo**, Edson Massayuki Kakuno, p.34, Anais VII EEEFis-RS.

(b) **8º e 9º Salão Internacional de Ensino, Pesquisa e Extensão** (SIEPE)

Anais:
(http://seer.unipampa.edu.br/index.php/siepe/issue/archive?issuesPage=2#issues)

3- DESENVOLVIMENTO DE UMA PLATAFORMA PARA AUTOMAÇÃO **, John Welvins Barros de Araujo**, Edson Massayuki Kakuno, Daniel Fonseca Corradini Ferrando , V. 8,N. 2 (2016).

4- CONTROLE DE TEMPERATURA PID COM ARDUINO , Daniel Ferrando, Edson Massayuki Kakuno, John Welvins Barros de Araújo, **John Welvins Barros de Arraújo**, V.9, n.4 (2017).

5- PROPOSTA DA MEDIÇÃO DA VELOCIDADE DO SOM EM METAIS ATRAVÉS DO ARDUINO, Denilson Bahia de Souza Junior, **John Welvins Barros de Araújo**, Edson Massayuki Kakuno, Denilson Junior, Matheus Gonçalves dos Santos Schiavini, v.9, n.2 (2017).

6- UM OLHAR TÉCNICO PARA SENSORES E ENTRADA ANALÓGICA DO ARDUINO, **John Welvins Barros de Araujo**, Edson Massayuki Kakuno, Daniel Ferrando, v.9, n.4 (2017).

Referências

ACROMAG, CRITERIA FOR TEMPERATURE SENSOR SELECTION OF T/C AND RTD SENSOR TYPES, 2011 disponível em: https://www.acromag.com/page/application-notes-and-white-papers-index. Acessado em: 28 de maio de 2018.

ACROMAG, How to Prevent Temperature Measurement Errors When Installing Thermocouple Sensors and Transmitters, disponível em: https://www.acromag.com/page/application-notes-and-white-papers-index. Acessado em: 28 de maio de 2018.

ANDREWS, R., WELLS, C., 3-Wire RTD Measurement System Reference Design, -200°C to 850°C, SLAU520A, Texas Instruments, novembro de 2014, disponível em :www.ti.com/lit/ug/slau520a/slau520a.pdf. Acessado em: 28 de maio de 2018.

BAIRD, J., 2001 ASHRAE Fundamentals Handbook, 2001.

BAKER, B., Designing with temperature sensors, part five: IC temperature sensors, EDN NETWORK,19 de janeiro de 2012, disponível em:https://www.edn.com/electronics-blogs/bakers-best/4368885/Designing-with-temperature-sensors-part-five-IC-temperature-sensors. Acessado em:21 de julho de 2018.

BAKER, B., Designing with temperature sensors, part four: thermocouples, EDN NETWORK,15 de dezembro de 2011(d), disponível em:https://www.edn.com/electronics-blogs/bakers-best/4368765/Designing-with-temperature-sensors-part-four-thermocouples. Acessado em:21 de julho de 2018.

BAKER, B., Designing with temperature sensors, part one: sensor types, EDN NETWORK, 22 de setembro de 2011 (a), disponível em: https://www.edn.com/electronics-blogs/bakers-best/4368418/Designing-with-temperature-sensors-part-one-sensor-types. Acessado em: 21 de julho de 2018.

BAKER, B., Designing with temperature sensors, part three: RTDs, EDN NETWORK, 17 de novembro de 2011 (c), disponível em:https://www.edn.com/electronics-blogs/bakers-best/4368684/Designing-with-temperature-sensors-part-three-RTDs. Acessado em:21 de julho de 2018.

BAKER, B., Designing with temperature sensors, part two: thermistors, EDN NETWORK, 20 de outubro de 2011 (b), disponível em: https://www.edn.com/electronics-blogs/bakers-best/4368522/Designing-with-temperature-sensors-part-two-thermistors. Acessado em: 21 de julho de 2018.

BOLTN, D., The Computation of Equivalent Potential Temperature, American Meteorological Society, Monthy Weather Review, v. 108, p.1046-1053, Boston, julho de 1980, disponível em: https://journals.ametsoc.org/doi/pdf/10.1175/1520-0493%281980%29108%3C1046%3ATCOEPT%3E2.0.CO%3B2. Acessado em:21 de julho de 2018.

BUCK, A., L., New Equations for Computing Vapor Pressure and Enhancement Factor, Journal of Applied Meteorology, v. 20,p. 1527-1532, American Meteorological Society, 1981, disponível em: https://journals.ametsoc.org/doi/pdf/10.1175/1520-0450%281981%29020%3C1527%3ANEFCVP%3E2.0.CO%3B2. Acessado em: 21 de julho de 2018.

CALLEN, H.B., Thermodynamics and an Introduction to Thermostatistics, Segunda Edição. John Wiley & Sons, New York, 1985.

CHEN, J., CHEN, C., Uncertainty Analysis in Humidity Measurements by the Psychrometer Method, MDI Sensors, 17, 368, 2017, doi:10.3390/s17020368.

CHEN, L., CHEN, C., Uncertainty Analysis of Two Types of Humidity Sensors by a Humidity Generator with a Divided-Flow System, MDPI, SENSORS, 18, 637, 2018, doi: 10.3390/s18020637.

CORREIA, S. F. H., ANTUNES, P., PECORARO, E., LIMA, P. P.,VARUM, H., CARLOS, L. D., FERREIRA, R. A. S., ANDRÉ, P. S., Optical Fiber Relative Humidity Sensor Based on a FBG with a Di-Ureasil Coating, MDPI, Sensors, 12, 8847-8860, 2012, doi: 10.3390/s120708847.

CRUZ, C. H. B., FRAGNITO, H. L., COSTA, I. F., MELLO, B., A., Guia para Física Experimental Caderno de Laboratório, Gráficos e Erros, Instituto de Física, Unicamp, Campinas 1997, disponível em: https://www.ifi.unicamp.br/~brito/graferr.pdf. Acessado em: 03 de junho de 2016.

CUNHA, A. R., VOLPE C. A., Medidas Automatizadas de Psicrômetro de Termopar Aspirado Versus Não Aspirado, Revista Brasileira de Meteorologia, v. 29, n. 2, p. 271-280, 2014, disponível em: www.scielo.br/pdf/rbmet/v29n2/a10v29n2.pdf. Acessado em: 03 de junho de 2018.

CUNHA, A., R., PROGRAMAÇÃO, CONEXÃO E AVALIAÇÃO DE PSICRÔMETRO ASPIRADO DE TERMOPAR DE BAIXO CUSTO EM MICROLOGGER PARA ESTUDOS AGROMETEOROLÓGICOS, Revista Brasileira de Meteorologia, v.28, n.2, p. 221 - 232, 2013, disponível: http://www.scielo.br/pdf/rbmet/v28n2/v28n2a11.pdf. Acessado em: 21/07/2018.

GRIMM, A. M., disponível em: http://fisica.ufpr.br/grimm/aposmeteo/cap5/cap5-3-2.html. Acessado em: 22 de junho de 2017.

HENDERSON, B., A new formula for latent heat of vaporization of water as a function of temperature, Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, v. 110, p. 1186-1190, Reino Unido, 1984.

HUANG, J., LI, B., CHEN, W., A CMOS MEMS Humidity Sensor Enhanced by a Capacitive Coupling Structure, MDPI, Micromachines, 7, 74, 2016, DOI: 10.3390/mi7050074.

IRIBARNE, J., V., GODSON, W., L., Atmospheric Thermodynamics, Springer, 1973.

ITO, A. R. P., DESENVOLVIMENTO DE PROTÓTIPO DE SENSOR DE UMIDADE CERÂMICO, UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS, 2012, Dissertação de mestrado.

KRONENBERG, P., RASTOGI, P. K., GIACCARI, P., LIMBERGER, H. G., Relative humidity sensor with optical fiber Bragg gratings, OSA, OPTICS LETTERS, v. 27, n. 16, p. 1385-1387, 15 de agosto de 2002, doi: 10.1364/OL.27.001385.

LIDE, D. R., CRC Handbook of Chemistry and Physics, 1997.

LM35, Precision Centigrade Temperature Sensors, National Semiconductor, novembro de 2000, Datasheet.

MARIN,F., R, ANGELOCCI, L., R., COELHO, M., A., F., NOVA, N.,A., V., CONSTRUÇÃO E AVALIAÇÃO DE PSICRÔMETRO ASPIRADO DE TERMOPAR,

Scientia Agricola, v.58, n.4, p.839-844, out./dez. 2001, disponível: http://www.scielo.br/pdf/sa/v58n4/6306.pdf. Acessado em: 21/07/2018.

NOAA, Relative Humidity and Dewpoint Temperature from Temperature and Wet-Bulb Temperature, disponível em: http://www.crh.noaa.gov/images/epz/wxcalc/rhTdFromWetBulb.pdf. Acessado em: 20 de julho de 2018

ORLANDO, A. F., BRIONIZIO, J.D., LIMA, L. A., Calculation of Humidity Parameters and Uncertainties Using Different Formulations and Softwares, 9th Symposium on Temperature and Thermal Measurements in Industry and Science - Tempmeko, Dubrovnik-Cavtat, Croacia, 2004, disponível em: http://www.inmetro.gov.br/producaointelectual/obras_intelectuais/226_obraIntelectual.pdf. Acessado em: 03 de junho de 2018.

OSBORNE, N., S., STIMSON, H. F., GINNINGS, D. C., Measurements os Heat Capacity and Heat of Vaporization of Water in The Range 0° to 100° C, Journal of Research of the National Bureau of Standards, Volume 23, p. 197-260, Washington, 28 de maio de 1939.

PEREIRA, T.S.S., ARAÚJO, J. W. B., FERRANDO, D. F. C., KAKUNO, E. M., CONFIABILIDADE DE SENSORES UTILIZADOS COM O ARDUINO E RUÍDO DA ENTRADA ANALÓGICA, Terceiro ENCIF, 2017, disponível em: http://porteiras.s.unipampa.edu.br/pibid/files/2017/11/encif-2016_confiabilidade_de_sensores_utilizados_com_o_arduino_e_ruido_da_entrada_.pdf. Acessado em: 28 de maio de 2018.

POPESCU, C., HÖCKER, H., Hair—the most sophisticated biological composite material, Chemical Society Reviews, v. 36, p. 1282-1291, 2007, doi: 10.1039/b604537p.

RIMM, A. M., disponível em: http://fisica.ufpr.br/grimm/aposmeteo/cap5/cap5-3-2.html. Acessado em 22 de junho de 2017.

SEARA DA CIÊNCIA, Um higrômetro simples, disponível em: http://www.seara.ufc.br/sugestoes/fisica/flu9.htm. Acessado em: 28 de maio de 2018.

SEINFELD, J.H. and Pandis, S.N., Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change. 2nd Edition, John Wiley & Sons, 2006, New York.

SENSIRION, Datasheet SHT3x-DIS, Humidity and Temperature Sensor, v. 3, agosto de 2016.

SENSIRION, Datasheet SHT7x (SHT71, SHT75), Humidity and Temperature Sensor IC,v. 5, dezembro de 2011.

SILVA, J. S., Secagem e Armazenamento de Produtos Agrícolas, Capítulo 3 Princípios Básicos da Psicrométrica, Editora Aprenda fácil, Viçosa- MG, 2008.

SILVA, R. C., COPPETE, M. C., SILVA, A., LIMA, R. P., SILVA, J. S. A., MACHADO, S. S. L., UM HIGRÔMETRO DE VAGEM E A FÍSCA NO ENSINO FUDAMENTAL, Cad. Brás. Ens. Fís., v. 19, n.2, p. 242-252, ago.2002, disponi em: https://periodicos.ufsc.br/index.php/fisica/article/view/6624/6122. Acessado em: 21/07/2018

STEINHART, J., S., HART, S., R., Calibration curves for thermistors, Deep-Sea Research and Oceanographic Abstracts, v. 15, p. 497-503, Great Britain, 1968, doi:10.1016/0011-7471(68)90057-0.

TETENS, O., Über einige meteorologische Begriffe. Z. Geophys, v. 6, p. 207-309, Alemanha 1930.

US005519354A, INTEGRATED CIRCUITTEMPERATURE SENSORWTH A PROGRAMMABLE OFFSET, 1996 USA.

VASSALLO, F., R., COMPONENTES ELETRONICOS, EDICIONES CEAC S.A., Barcelona-ES, 1987

WANG, B. YANG W., MCKITTRICK, J., MEYERS, M. A., Keratin: Structure, mechanical properties, occurrence in biological organisms, and efforts at bioinspiration, ELSEVIER, Progress in Materials Science, v. 76, p. 226-318, 2016, doi: 10.1016/j.pmatsci.2015.06.001.

WHITE, D., R., Interpolation Errors in Thermistor Calibration Equations, Int J Thermophys, New York, 2017, doi: 10.1007/s10765-017-2194-x.

WYLEN, G., V., SONNTAG, R., E., BORGNAKKE, C., Fundamentos da Termodinâmica Clássica, 1ª Edição, Editora Edgard Blücher LTDA, São Paulo, 1995.

ZUMBAHLEN, H., Linear Circuit Design Handbook, Capítulo 3: Sensors Newnes/Elsevier, 2008, disponível em: http://www.analog.com/en/education/education-library/linear-circuit-design-handbook.html. Acessado em: 28 de maio de 2018.

APÊNDICE A – Programa de Calibração Térmica

```
#coding: utf-8

'''
21/10/2017 - UNIPAMPA-Usiversidade Federal do Pampa campus BAGÉ-RS
PIBID-Física
GRUPO-KAKI
John Welvins Barros de Araújo - johnwelvins@gmail.com
Programa para controle GPIB atravez da interface GPIB-232CT-A da NI
'''

import serial
import os
import time
import datetime
from datetime import datetime
import string
from math import*

id='GPIB-232CT-A '

#''' Caso queira fazer alguma operação matematica com os dados lidos, será necessario, transforma-lo em float, para isso pode-se chamar a função conversao abixo. No lugar de dado = leitura[1:14], faça dado = conrversao (leitura), dai só usar a varial dado para realizar as operações matematicas'''

def conversao (leitura,terminador1):

    sinal1 = leitura [0:1]
    lei = leitura[0:terminador1]
    terminador2 = terminador1+1
    terminador3 = terminador2+2
    sinal2 = leitura [terminador2:terminador3]
```

```
        terminador4 = terminador3+2
        tura = leitura[terminador3:terminador4]

        if (sinal1 == '-'):
                lei = 0 - float(lei)

        else:
                lei = float(lei)



        #print leitura; print sinal1; print lei; print sinal2; print tura

        if (sinal2 == '-'):
                tura = 0 - float(tura)
        else:
                tura = float(tura)

        LEITURA = lei*(10**(tura))
        #print LEITURA

        return LEITURA


    #cabeçario

    print '\n01/02/2017  UNIPAMPA-Usiversidade Federal do Pampa campus BAGÉ-RS\nGRUPO-KAKI\nPIBID-Física\nPrograma para controle GPIB atravez da interface GPIB-232CT-A da NI\n'

    #Selecioinando e configurando a porta serial, ('porta', bauds, timeout = segundos)
    GPIB = serial.Serial ('/dev/ttyS0', 1200, timeout = 3)
    id1 = GPIB.read (80) # leitura para limpar o buffer
```

```
    #Solicitando a identificação da interface GPIB-232, a fim de verificar a comunicação
    GPIB.write ('id\r\n')
    id1 = GPIB.read (80)

    if (id1[:13] != id):
        print 'Falha na comunicação com a interface GPIB-232.'
        time.sleep (1)
        exit ()

    else:
        print id1
        print '\nComunicação serial OK.\n'

    time.sleep (1)

    #Selecionando o HP3457A (multimetro), no endereço 22
    '''wrt é uma função da interface GPIB-232 e BEEP do HP3457A, BEEP é a função que seleciona o controle remoto no HP e será usado no fim de cada interação com o HP. Serão realizados dois teste de comunicação com o HP, um será o BEEP e o outro será  seu ID'''

    a = 22
    A = "{}".format(a)
    BeeP = 'wrt' + A + '\n BEEP\r\n'
    GPIB.write (BeeP)

    GPIB.write ('wrt 22\n ID? \r rd #7 22\r\n')

    id2=GPIB.read (10)

    ID2 = 'HP3457A7\r\n'

    if (id2 != ID2):
```

```
        print 'Falha na comunicação GPIB com HP3457A'
        time.sleep (1)
        exit ()

    else:
        print '\nComuinicação estabelecida com o HP3457A com sucesso\n'


    GPIB.write ('wrt 22\n RESET; TERM 2; TRIG AUTO; NRDGS 1, SYN; END ALWAYS; OHMF; BEEP\r\n')
    time.sleep (1)

    #Selecionando o HP6624A (fonte), no endereço 04

    GPIB.write ('wrt 04\n ID? \r rd #7 04\r\n')

    id3=GPIB.read (10)

    ID3 = 'HP6624A7\r\n'

    if (id3 != ID3):
        print 'Falha na comunicação GPIB com HP3457A'
        time.sleep (1)
        exit ()

    else:
        print '\nComuinicação estabelecida com o HP6624A com sucesso\n'

    time.sleep (1)

    GPIB.write ('wrt 04\n VSET2,0  \r\n')

    #Selecionando o  HP3478A (multimetro), no endereço 18
```

```
    GPIB.write ('wrt 18\n  F4 RA\r\n')

    GPIB.write ('rd #13 18\r\n')
    leitura=GPIB.read (17)

    byte = leitura [13:15]

    if (byte != '13'):
        print 'ERRO NA LEITURA'
        time.sleep (2)
        exit ()

    print '\nComuinicação estabelecida com o HP3478A com sucesso\n'


    # Seliciona e configura o Arduino
    def get_serial_port():
        return "/dev/"+os.popen("dmesg | egrep ttyACM | cut -f3 -d: | tail -n1").read().strip()

    ARDUINO = serial.Serial(get_serial_port(), baudrate=9600, timeout=1)
    ARDUINO.close()
    #ARDUINO.open()


    ##########################################################################################################################
    #Descarte das 10 primeiras medias no multimetros HP3457A e HP3478A
    n = 1
    for i in range (0,n):
        #HP3478A
        dado_8A = 0
        for i in range (0,n):
```

```
        GPIB.write ('rd #13 18\r\n')
        leitura = GPIB.read (17)
        byte = leitura [13:15]
        #print leitura
        if (byte != '13'):
                print 'ERRO NA LEITURA'
                time.sleep (2)
                GPIB.write ('wrt 04\n VSET2,0  \r\n')
                exit ()

        dado_8A = dado_8A + float (leitura [1:8])

dado_8A = dado_8A/n
print ("Descarte HP 3478A", '\t', dado_8A)

#HP3457A - TERM 1
dado_7A = 0
#GPIB.write ('wrt 22\n TERM 1\r\n')

for i in range (0,n):
        GPIB.write ('rd #16 22\r\n')
        leitura = GPIB.read (20)
        byte = leitura [16:18]

        if (byte != '16'):
                print 'ERRO NA LEITURA'
                time.sleep (2)
                GPIB.write ('wrt 04\n VSET2,0  \r\n')
                exit ()
        #print leitura
        dado_7A = dado_7A + conversao (leitura [1:16],9)

dado_7A = dado_7A/n
print ("Descarte HP 3457A", '\t', dado_7A)
```

```
    ##########################################################################
##########################################################################
##################
    #Criando os arquivos de dados, cuidado para não sobreescrever


    dia = "{}".format (raw_input ('Informe o ano-mes-dia\t'));print ('\n')

    #Criando o arquivo de dados da temperatura ambiente 1/4
    arq_nome = dia +"_sem_potencia"
    arq_abaixo = open (arq_nome, 'w')

    arq_abaixo.write ('tempo (s)'); arq_abaixo.write ('\t'); arq_abaixo.write ('8A EXT
(Ohm)');     arq_abaixo.write ('\t');
    arq_abaixo.write ('tempo (s)'); arq_abaixo.write ('\t'); arq_abaixo.write ('7A INT
(Ohm)');     arq_abaixo.write ('\t');
    arq_abaixo.write ('tempo (s)'); arq_abaixo.write ('\t'); arq_abaixo.write ('ADS1248
45 (Ohm)'); arq_abaixo.write ('\t');
    arq_abaixo.write('ADS1248 67 (Ohm)'); arq_abaixo.write ('\n');

    #Criando o arquivo de dados da rampa de subida 2/4
    arq_nome = dia +"_subida"
    arq_sub = open (arq_nome, 'w')

    arq_sub.write ('tempo (s)'); arq_sub.write ('\t'); arq_sub.write ('Tensão (V)');
arq_sub.write ('\t');
    arq_sub.write ('tempo (s)'); arq_sub.write ('\t'); arq_sub.write ('Corrente (A)');
arq_sub.write ('\t');
    arq_sub.write ('tempo (s)'); arq_sub.write ('\t'); arq_sub.write ('8A EXT (Ohm)');
arq_sub.write ('\t');
    arq_sub.write ('tempo (s)'); arq_sub.write ('\t'); arq_sub.write ('7A INT (Ohm)');
arq_sub.write ('\t');
```

```
    arq_sub.write ('tempo (s)'); arq_sub.write ('\t'); arq_sub.write ('ADS1248 45 (Ohm)'); arq_sub.write ('\t');
    arq_sub.write ('ADS1248 67 (Ohm)'); arq_sub.write ('\n');


    #Criando o arquivo de dados da estabilização (procurando um patamar) 3/4
    arq_nome = dia + "_estabilizando"
    arq_est = open (arq_nome, 'w')

    arq_est.write ('tempo (s)'); arq_est.write ('\t'); arq_est.write ('Tensão (V)'); arq_est.write ('\t');
    arq_est.write ('tempo (s)'); arq_est.write ('\t'); arq_est.write ('Corrente (A)'); arq_est.write ('\t');
    arq_est.write ('tempo (s)'); arq_est.write ('\t'); arq_est.write ('7A INT (Ohm)'); arq_est.write ('\t');
    arq_est.write ('tempo (s)'); arq_est.write ('\t'); arq_est.write ('8A EXT (Ohm)'); arq_est.write ('\t');
    arq_est.write ('tempo (s)'); arq_est.write ('\t'); arq_est.write ('ADS1248 45 (Ohm)'); arq_est.write ('\t');
    arq_est.write ('ADS1248 67 (Ohm)'); arq_est.write ('\n');

    #Criando o arquivo de dados do patamar estavel 4/4
    arq_nome = dia +"_medidas"
    arq_m = open (arq_nome, 'w')

    arq_m.write ('tempo (s)'); arq_m.write ('\t'); arq_m.write ('Tensão (V)'); arq_m.write ('\t');
    arq_m.write ('tempo (s)'); arq_m.write ('\t'); arq_m.write ('Corrente (A)'); arq_m.write ('\t');
    arq_m.write ('tempo (s)'); arq_m.write ('\t'); arq_m.write ('8A EXT (Ohm)'); arq_m.write ('\t');
    arq_m.write ('tempo (s)'); arq_m.write ('\t'); arq_m.write ('7A INT (Ohm)'); arq_m.write ('\t');
```

```
    arq_m.write ('tempo (s)'); arq_m.write ('\t'); arq_m.write ('ADS1248 45 (Ohm)');
arq_m.write ('\t');
    arq_m.write ('ADS1248 67 (Ohm)'); arq_m.write ('\n');

    ##########################################################################
##########################################################################
##################
    #Medindo a Temperatura Ambiente! - Estagio 1/4

    print "---medidas--Sem--potencia-"

    print "8A EXT (Ohm)","7A INT (Ohm)", "ADS1248 45 (Ohm)", "ADS1248 67
(Ohm)"
    n = 10
    for i in range (0,n):
        #HP3478A
        dado_8A = 0
        for i in range (0,n):
            GPIB.write ('rd #13 18\r\n')
            leitura = GPIB.read (17)
            byte = leitura [13:15]
            #print leitura
            if (byte != '13'):
                print 'ERRO NA LEITURA'
                time.sleep (2)
                GPIB.write ('wrt 04\n VSET2,0  \r\n')
                exit ()

            dado_8A = dado_8A + float (leitura [1:8])

        dado_8A = dado_8A/n
        now=datetime.now()
        microsegundos1 = now.microsecond + (now.second*1000*1000) +
(now.minute*60*1000*1000) + (now.hour*60*60*100*1000)
```

```
        segundos1 = microsegundos1/1000000

        arq_abaixo.write (str(segundos1)); arq_abaixo.write ('\t');arq_abaixo.write (str(dado_8A)); arq_abaixo.write ('\t')
        #print dado_8A

        #HP3457A - TERM 1
        dado_7A = 0
        #GPIB.write ('wrt 22\n TERM 1\r\n')

        for i in range (0,n):
                GPIB.write ('rd #16 22\r\n')
                leitura = GPIB.read (20)
                byte = leitura [16:18]

                if (byte != '16'):
                        print 'ERRO NA LEITURA'
                        time.sleep (2)
                        GPIB.write ('wrt 04\n VSET2,0  \r\n')
                        exit ()
                #print leitura
                dado_7A = dado_7A + conversao (leitura [1:16],9)

        dado_7A = dado_7A/n
        now=datetime.now()
        microsegundos1 = now.microsecond + (now.second*1000*1000) + (now.minute*60*1000*1000) + (now.hour*60*60*100*1000)
        segundos1 = microsegundos1/1000000

        arq_abaixo.write (str(segundos1)); arq_abaixo.write ('\t'); arq_abaixo.write (str(dado_7A)); arq_abaixo.write ('\t')
        #print dado_7A

        #leituras do arduino
```

```
        ARDUINO.open()
        a = True
        while(a):
                dado_AR = 0
                leitura = 0
                leitura = ARDUINO.readline()
                ## para garentir que nao ha nada na comunicacao-> len(dado)> 3, o dado valido vem na terceira leitura
                if (len(leitura)> 3):
                        leitura = ARDUINO.readline()
                        dado_AR =  leitura
                        a = False
        ARDUINO.close()
        #print dado_AR, '\n'

        arq_abaixo.write (str(segundos1)); arq_abaixo.write ('\t'); arq_abaixo.write (str(dado_AR)); arq_abaixo.write ('\t')
        arq_abaixo.write ('\n')

        print  dado_8A, '\t', dado_7A, dado_AR

   ##########################################################################################################################
   #Subindo! - Estagio 2/4

   degrau = 6
   alpha  = 0.1
   nn = 0

   while (nn < 12 ):
        print "---subindo-", "rampa", nn

        #Tensão e corrente da fonte HP6624A
```

```
        GPIB.write ('wrt 04\n ISET2,1  \r\n')
        GPIB.write ('wrt 04\n VSET2,15  \r\n')

        now=datetime.now()
        microsegundos1 = now.microsecond + (now.second*1000*1000) + (now.minute*60*1000*1000) + (now.hour*60*60*100*1000)
        segundos1 = microsegundos1/1000000
        seg = segundos1

        n = 10 # numero de leituras para media

        while (((segundos1 - seg)) < degrau + alpha*degrau*nn*nn): #5 minutos no argumento do if (...3) para sair de uns 20 até uns 100
                #fonte Tensão
                GPIB.write ('wrt 04\r VOUT?2 \r rd #9 04\r\n')
                leitura=GPIB.read (13)
                byte = leitura [9:10]

                if (byte != '9'):
                        print 'ERRO NA LEITURA'
                        time.sleep (2)
                        tensao = 0
                        Tensao = "{}".format(tensao)
                        escreve = 'wrt 04\n VSET2,' + Tensao +'\r\n'
                        GPIB.write (escreve)
                        exit ()

                dado_V = leitura [1:7]
                now=datetime.now()
                microsegundos1 = now.microsecond + (now.second*1000*1000) + (now.minute*60*1000*1000) + (now.hour*60*60*100*1000)
                segundos1 = microsegundos1/1000000
```

```
            arq_sub.write (str(segundos1)); arq_sub.write ('\t'); arq_sub.write
(str(dado_V)); arq_sub.write ('\t')
            #print dado_V
            tensao = float(dado_V)
            dado_V = 0

            #fonte Corrente
            GPIB.write ('wrt 04\r IOUT?2 \r rd #9 04\r\n')
            leitura=GPIB.read (13)
            byte = leitura [9:10]

            if (byte != '9'):
                  print 'ERRO NA LEITURA'
                  time.sleep (2)
                  tensao = 0
                  Tensao = "{}".format(tensao)
                  escreve = 'wrt 04\n VSET2,' + Tensao +'\r\n'
                  GPIB.write (escreve)
                  exit ()



            dado_I = leitura [1:7]

            now=datetime.now()
            microsegundos1 = now.microsecond + (now.second*1000*1000) +
(now.minute*60*1000*1000) + (now.hour*60*60*100*1000)
            segundos1 = microsegundos1/1000000

            arq_sub.write (str(segundos1)); arq_sub.write ('\t'); arq_sub.write
(str(dado_I)); arq_sub.write ('\t')
            #print dado_I
            corrente = float(dado_I)
            dado_I = 0
```

```
#HP3478A
dado_8A = 0
for i in range (0,n):
	GPIB.write ('rd #13 18\r\n')
	leitura = GPIB.read (17)
	byte = leitura [13:15]
	#print leitura
	if (byte != '13'):
		print 'ERRO NA LEITURA'
		time.sleep (2)
		GPIB.write ('wrt 04\n VSET2,0  \r\n')
		exit ()

	dado_8A = dado_8A + float (leitura [1:8])

dado_8A = dado_8A/n
now=datetime.now()
microsegundos1 = now.microsecond + (now.second*1000*1000) + (now.minute*60*1000*1000) + (now.hour*60*60*100*1000)
segundos1 = microsegundos1/1000000

arq_sub.write (str(segundos1)); arq_sub.write ('\t');arq_sub.write (str(dado_8A)); arq_sub.write ('\t')
#print dado_8A



#HP3457A - TERM 1
dado_7A = 0

for i in range (0,n):
	GPIB.write ('rd #16 22\r\n')
	leitura = GPIB.read (20)
	byte = leitura [16:18]
```

```
                if (byte != '16'):
                        print 'ERRO NA LEITURA'
                        time.sleep (2)
                        tensao = 0
                        Tensao = "{}".format(tensao)
                        escreve = 'wrt 04\n VSET2,' + Tensao +'\r\n'
                        GPIB.write (escreve)
                        exit ()

                dado_7A = dado_7A + conversao (leitura [1:16],9)

        dado_7A = dado_7A/n
        now=datetime.now()
        microsegundos1 = now.microsecond + (now.second*1000*1000) +
(now.minute*60*1000*1000) + (now.hour*60*60*100*1000)
        segundos1 = microsegundos1/1000000

        arq_sub.write (str(segundos1)); arq_sub.write ('\t'); arq_sub.write
(str(dado_7A)); arq_sub.write ('\t')

        #print dado_7A

        #leituras do arduino
        ARDUINO.open()
        a = True
        while(a):
                dado_AR = 0
                leitura = 0
                leitura = ARDUINO.readline()
                ## para garentir que nao ha nada na comunicacao-> len(dado)>
3, o dado valido vem na terceira leitura
                if (len(leitura)> 3):
                        leitura = ARDUINO.readline()
```

```
                    dado_AR =  leitura
                    a = False

            ARDUINO.close()
            #print dado_AR, '\n'

            arq_sub.write (str(segundos1)); arq_sub.write ('\t'); arq_sub.write (str(dado_AR)); arq_sub.write ('\t')
            arq_sub.write ('\n')

            print  dado_V, '\t', dado_I, '\t', dado_8A, '\t', dado_7A, dado_AR




        ##########################################################################################################################################
    #Estabilzando! - Estagio 3/4

    #Procurando o patamar de temperatura para estabilizar 1/2, ou seja, definindo a tensão inicial do patamar, 2 Volt é tensão necessaria para manter 100°C

        #HP3478A
        dado_8A = 0
        leitura = GPIB.read (20)
        for i in range (0,n):
            GPIB.write ('rd #13 18\r\n')
            leitura = GPIB.read (17)
            byte = leitura [13:15]
            #print leitura[1:13]
            if (byte != '13'):
                print 'ERRO NA LEITURA'
                time.sleep (2)
```

```
                tensao = 0
                Tensao = "{}".format(a)
                escreve = 'wrt 04\n VSET2,' + Tensao +'\r\n'
                GPIB.write (escreve)
                exit ()

        dado_8A = dado_8A + float (leitura [1:8]) #Não pode operar com string, convertendo leitura [1:8] para float

    dado_8A = dado_8A/n
    print dado_8A

    #HP3457A
    dado_7A = 0
    leitura = GPIB.read (20)
    for i in range (0,n):
        GPIB.write ('rd #16 22\r\n')
        leitura = GPIB.read (20)
        byte = leitura [16:18]

        if (byte != '16'):
            print 'ERRO NA LEITURA'
            time.sleep (2)
            tensao = 0
            Tensao = "{}".format(tensao)
            escreve = 'wrt 04\n VSET2,' + Tensao +'\r\n'
            GPIB.write (escreve)
            exit ()

        dado_7A = dado_7A + conversao (leitura [1:16],9)

    dado_7A = dado_7A/n
    print dado_7A
```

```
#dado = 0;


#Tensão e corrente da fonte HP6624A
k = 0.06299 #constante de proporcionalidade da potencia entrege com a variação da temperatura devido a temperatura externa
R = tensao/corrente # R é a resietncia do fio resistivo (aquecedor)
print "Resisencia = ", R
tensao = sqrt (k*(dado_7A - dado_8A)*R)
Tensao = "{}".format(tensao)
escreve = str ('wrt 04\r VSET2,' + Tensao +'\r\n')
GPIB.write (escreve)

print "tensão = ",tensao
print "\n"

#Verificando a estabilidade 2/2
##########################################################################
##################################
print "---estabilizando-"
n = 10 # numero de leituras para media
dado_old1 = 0; dado_old2 = 0; dado_old3 = 0; segundos1_old = 0; segundos1_old1 = 0; segundos1_old2 = 0; segundos1_old3 = 0

cont = 0;
while (cont<10):

    if (cont == 0):
        now=datetime.now()
        microsegundos1 = now.microsecond + (now.second*1000*1000) + (now.minute*60*1000*1000) + (now.hour*60*60*100*1000)
        segundos1_old1 = microsegundos1/1000000

        #fonte Tensão
```

```
                    dado_V = 0
                    GPIB.write ('wrt 04\r VOUT?2 \r rd #9 04\r\n')
                    leitura=GPIB.read (13)
                    byte = leitura [9:10]

                    if (byte != '9'):
                            print 'ERRO NA LEITURA'
                            time.sleep (2)
                            tensao = 0
                            Tensao = "{}".format(tensao)
                            escreve = 'wrt 04\n VSET2,' + Tensao +'\r\n'
                            GPIB.write (escreve)
                            exit ()

                    dado_V = leitura [1:7]
                    now=datetime.now()
                    microsegundos1 = now.microsecond + (now.second*1000*1000)
+ (now.minute*60*1000*1000) + (now.hour*60*60*100*1000)
                    segundos1 = microsegundos1/1000000

                    arq_est.write (str(segundos1)); arq_est.write ('\t');
        arq_est.write (str(dado_V)); arq_est.write ('\t')
                    #print dado_V

                    #fonte Corrente
                    dado_A = 0
                    GPIB.write ('wrt 04\r IOUT?2 \r rd #9 04\r\n')
                    leitura=GPIB.read (13)
                    byte = leitura [9:10]

                    if (byte != '9'):
                            print 'ERRO NA LEITURA'
                            time.sleep (2)
                            tensao = 0
```

```
                    Tensao = "{}".format(tensao)
                    escreve = 'wrt 04\n VSET2,' + Tensao +'\r\n'
                    GPIB.write (escreve)
                    exit ()


                dado_A = leitura [1:7]
                now=datetime.now()
                microsegundos1 = now.microsecond + (now.second*1000*1000)
+ (now.minute*60*1000*1000) + (now.hour*60*60*100*1000)
                segundos1 = microsegundos1/1000000

                arq_est.write (str(segundos1)); arq_est.write ('\t');
      arq_est.write (str(dado_A)); arq_est.write ('\t')
                #print dado_A

                #HP3457A - TERM 1
                dado_7A = 0
                for i in range (0,n):
                    GPIB.write ('rd #16 22\r\n')
                    leitura = GPIB.read (20)
                    byte = leitura [16:18]
                    #print leitura
                    if (byte != '16'):
                        print 'ERRO NA LEITURA'
                        time.sleep (2)
                        tensao = 0
                        Tensao = "{}".format(tensao)
                        escreve = 'wrt 04\n VSET2,' + Tensao +'\r\n'
                        GPIB.write (escreve)
                        exit ()

                    dado_7A = dado_7A + conversao (leitura [1:16],9)
```

```
                    dado_7A = dado_7A/n

                    now=datetime.now()
                    microsegundos1 = now.microsecond + (now.second*1000*1000)
+ (now.minute*60*1000*1000) + (now.hour*60*60*100*1000)
                    segundos1 = microsegundos1/1000000

                    arq_est.write (str(segundos1)); arq_est.write ('\t');
      arq_est.write (str(dado_7A)); arq_est.write ('\n')
                    #print dado_7A

                    print dado_V, '\t', dado_I, '\t', dado_7A, '\n'

            dif = (0.002/30)
            dif1 = ((dado_7A-dado_old1)/(segundos1 - segundos1_old1))
            dif2 = ((dado_7A-dado_old2)/(segundos1 - segundos1_old2))
            dif3 = ((dado_7A-dado_old3)/(segundos1 - segundos1_old3))

            if ((abs(dif1) < dif) and (abs(dif2) < dif) and (abs(dif3) < dif)):
                    #Extavel, coletando dados da calibração 4/4
                    cont = cont + 1
                    print "---medidas--",'\n'

                    #HP3478A
                    dado_8A = 0
                    for i in range (0,n):
                            GPIB.write ('rd #13 18\r\n')
                            leitura = GPIB.read (17)
                            byte = leitura [13:15]
                            #print leitura
                            if (byte != '13'):
                                    print 'ERRO NA LEITURA'
                                    time.sleep (2)
                                    GPIB.write ('wrt 04\n VSET2,0  \r\n')
```

```
                    exit ()

                dado_8A = dado_8A + float (leitura [1:8])

            dado_8A = dado_8A/n
            now=datetime.now()
            microsegundos1 = now.microsecond + (now.second*1000*1000)
+ (now.minute*60*1000*1000) + (now.hour*60*60*100*1000)
            segundos1 = microsegundos1/1000000

            arq_m.write (str(segundos1)); arq_m.write ('\t'); arq_m.write
(str(dado_V)); arq_m.write ('\t')#Tensão
            arq_m.write (str(segundos1)); arq_m.write ('\t'); arq_m.write
(str(dado_A)); arq_m.write ('\t')#Corrente

            arq_m.write (str(segundos1)); arq_m.write ('\t'); arq_m.write
(str(dado_8A));arq_m.write ('\t')
            #print dado_8A

            #leituras do arduino
            ARDUINO.open()
            a = True
            while(a):
                dado_AR = 0
                leitura = 0
                leitura = ARDUINO.readline()
            ## para garentir que nao ha nada na comunicacao-> len(dado)>
3, o dado valido vem na terceira leitura
                if (len(leitura)> 3):
                    leitura = ARDUINO.readline()
                    dado_AR =  leitura
                    a = False

            ARDUINO.close()
```

```
                    #print dado_AR, '\n'

                    now=datetime.now()
                    microsegundos1 = now.microsecond + (now.second*1000*1000)
+ (now.minute*60*1000*1000) + (now.hour*60*60*100*1000)
                    segundos_arduino = microsegundos1/1000000

                    #HP3457A - TERM 1
                    dado_7A = 0
                    for i in range (0,n):
                        GPIB.write ('rd #16 22\r\n')
                        leitura = GPIB.read (20)
                        byte = leitura [16:18]

                        if (byte != '16'):
                            print 'ERRO NA LEITURA'
                            time.sleep (2)
                            GPIB.write ('wrt 04\n VSET2,0  \r\n')
                            exit ()
                        #print leitura
                        dado_7A = dado_7A + conversao (leitura [1:16],9)

                    dado_7A = dado_7A/n
                    now=datetime.now()
                    microsegundos1 = now.microsecond + (now.second*1000*1000)
+ (now.minute*60*1000*1000) + (now.hour*60*60*100*1000)
                    segundos1 = microsegundos1/1000000
                    #print dado_7A

                    arq_m.write (str(segundos1)); arq_m.write ('\t'); arq_m.write
(str(dado_7A)); arq_m.write ('\t')

                    arq_m.write (str(segundos_arduino)); arq_m.write ('\t');
arq_m.write (str(dado_AR)); arq_m.write ('\t')
```

```
                arq_m.write ('\n')

                print dado_V, '\t', dado_I, '\t', dado_8A, '\t', dado_7A, dado_AR

        if (abs(dif1) > dif or abs(dif2) > dif or abs(dif3) > dif):
                cont = 0
                if (dif1 > 0 ):
                        #diminui a tensão
                        tensao = tensao - 0.01
                        Tensao = "{}".format(tensao)
                        escreve = str('wrt 04\r VSET2,' + Tensao +'\r\n')

                        GPIB.write (escreve)

                if (dif1 < 0):
                        #aumenta a tensão
                        tensao = tensao + 0.01
                        Tensao = "{}".format(tensao)
                        escreve = str ('wrt 04\r VSET2,' + Tensao +'\r\n')

                        GPIB.write (escreve)


        print "cont = ", cont,  "tensao = ",tensao, '\n'
        print "dif = ", dif, "dif1 = ", dif1, "dif2 = ", dif2, "dif3 = ", dif3,'\n'

        dado_old3 = dado_old2
        dado_old2 = dado_old1
        dado_old1 = dado_7A
        segundos1_old3 = segundos1_old2
        segundos1_old2 = segundos1_old1

nn= nn + 1
```

```
#encerrando o programa
print "encerrando o programa"

GPIB.write ('wrt 04\n VSET2,0  \r\n')

arq_sub.close()
arq_est.close()
arq_m.close()
arq_abaixo.close()

exit();
```