

GUSTAVO NEVES MARGARIDO

**AVALIAÇÃO DE MEDIÇÃO DA UMIDADE RELATIVA DO AR PELO  
MÉTODO DO PONTO DE ORVALHO USANDO MATERIAIS  
ACESSÍVEIS E SISTEMA DE CONTROLE CONVENCIONAL**

Dissertação apresentada ao Instituto Federal de Educação,  
Ciência e Tecnologia de São Paulo – IFSP como requisito  
para obtenção do título de Mestre em Automação e Controle  
de Processos.

São Paulo  
2014

M28a MARGARIDO, Gustavo Neves.

Avaliação de medição da umidade relativa do ar pelo método do ponto de orvalho usando materiais acessíveis e sistema de controle convencional / Gustavo Neves Margarido. São Paulo: [s.n.], 2014.

128 f.: il.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Frajuca.

Dissertação (Mestrado Profissional em Automação e Controle de Processos) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, IFSP, 2014.

1. Higrômetro de espelho resfriado
  2. Ponto de orvalho
  3. Higrômetro de referência
  4. Medição de umidade
- II. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo. III. Título

CDU 681.0



## ATA DE EXAME DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO

Nome do Programa: **Mestrado Profissional em Automação e Controle de Processos**

Nome do(a) Aluno(a): **Gustavo Neves Margarido**

Nome do Orientador: **Prof. Dr. Carlos Frajuca**

Nome do Co-orientador: **Prof. Dr. Fabio da Silva Bortoli**

Título do Trabalho: **"Avaliação de medição da umidade relativa do ar pelo método do ponto de orvalho usando materiais acessíveis e sistema de controle convencional"**

Abaixo o resultado de cada participante da Banca Examinadora

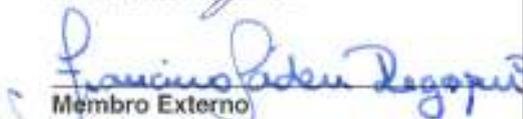
Nome completo dos Participantes Titulares da Banca	Sigla da Instituição	Aprovado / Não Aprovado
Prof. Dr. Carlos Frajuca – Orientador	IFSP - SPO	<i>Aprovado</i>
Prof. Dr. Francisco Tadeu Degasperri - Membro Externo	FATEC - SP	<b>APROVADO</b>
Prof. Dr. Ricardo Pires- Membro Interno	IFSP - SPO	<i>Aprovado</i> <i>R. Pires</i>
Nome completo dos Participantes Suplentes da Banca	Sigla da Instituição	Aprovado / Não Aprovado
Prof. Dr. Ênio Carlos Segatto – Membro Interno	IFSP - SPO	_____
Prof. Dr. Eduardo Guy Perpétuo Bock- Membro Interno	IFSP - SPO	_____

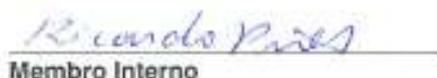
Considerando-o:  APROVADO  
 NÃO APROVADO

Assinaturas

São Paulo, 21 de março de 2014

  
Presidente da Banca

  
Membro Externo

  
Membro Interno

Observações:

*Para a versão final o candidato deve observar os comentários / correções da banca.*

## **DEDICATÓRIA**

Dedico esse trabalho à minha família e amigos, pelo incentivo, paciência e apoio.

Aos meus pais que sempre incentivaram meus estudos.

## AGRADECIMENTOS

Reservo inicialmente, um especial agradecimento ao orientador e amigo, Prof. Dr. Carlos Frajuca, professor titular do IFSP, pela paciência e atenção dispensada no tratamento das dúvidas que foram surgindo no percurso desta jornada, com seu vasto conhecimento na área da metrologia, além das dicas, conselhos, e pela dedicação e o incentivo à este trabalho.

Agradeço ao coorientador, Prof. Fábio da Silva Bortoli, pela atenção dispensada ao trabalho.

Um especial agradecimento ao amigo, Prof. Dr. Júlio Carlos Teixeira, professor titular da UFABC, pela ideia, sugestão e incentivo de trabalhar esse tema, além dos conselhos e pela ajuda proporcionada pelo seu vasto conhecimento na área da metrologia, principalmente no início do trabalho.

Agradeço a atenção e as sugestões do Prof. Dr. Ricardo Pires, professor titular do IFSP.

Um agradecimento especial ao Prof. Dr. Francisco Tadeu Degasperi, professor titular da FATECSP, por aceitar fazer parte da comissão julgadora, além da atenção e das valiosas contribuições dadas ao trabalho com seu vasto conhecimento na área da metrologia.

Ao IFSP pela promoção do curso de pós-graduação stricto sensu em nível de mestrado, especialmente pelo oferecimento no período noturno, o que possibilita aos pesquisadores poderem contribuir com suas vivências profissionais em trabalhos científicos.

Aos servidores da secretaria de pós-graduação do IFSP, pela educação, atenção e pelo bom trabalho oferecido aos alunos.

Agradeço à direção e aos colegas do IPEM-SP, pela disponibilização de seus laboratórios para a realização dos ensaios, possibilitando assim, a produção de resultados confiáveis para a metodologia testada.

Ao INMETRO pela política nacional de incentivo aos estudos na área de metrologia e qualidade, bem como, pela disponibilização de base de dados com um vasto e valioso conhecimento metrológico.

## RESUMO

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um sistema de medição de umidade relativa do ar, baseado no fenômeno do ponto de orvalho, que é a temperatura na qual a umidade presente no ar começa a entrar no processo de condensação. Utilizando componentes de custos mais baixos e de fácil aquisição, o sistema visa a promover uma maior adesão à metodologia. Para tanto, foi utilizado um sistema óptico que acusa a condensação de água em uma superfície espelhada, que é resfriada através de uma placa de Peltier, reconhecendo-se dessa forma, que é atingida a temperatura de ponto de orvalho. Após a abordagem da montagem, é realizada uma série de medições e comparações com padrões, para promover uma análise dos erros e das incertezas de medição, relativos ao método e ao instrumento montado. Os resultados mostram que a metodologia é reprodutível e pode ser utilizada para medição da umidade ambiental, proporcionando mais uma opção de higrômetro a ser utilizado pelos laboratórios.

**Palavras-chave:** *higrômetro de espelho resfriado, ponto de orvalho, higrômetro de referência, medição de umidade.*

## **ABSTRACT**

This paper presents the development of a system for measuring relative humidity, based on the phenomenon of dew point, which is the temperature at which moisture in the air begins to enter the condensation process. Using components from lower cost and easy to purchase, the system aims to promote greater adherence to the methodology. For this purpose, an optical system that accuses the condensation of water on a mirror surface, which is cooled by a Peltier cooler, recognizing that is reached the temperature of the dew point. After addressing the assembly, is performed a series of measurements and comparisons with standards, to promote an analysis of errors and measurement uncertainties concerning the method and the assembled instrument. The results show that the method is reproducible and can be used to measure the ambient humidity, offering a further option of hygrometer to be used by the laboratories.

**Keywords:** *chilled mirror hygrometer, dew point, reference hygrometer, humidity metering.*

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação de uma carta psicrométrica.....	25
Figura 2 - Filtros de elementos sensores de higrômetros eletrônicos.....	28
Figura 3 – Higrômetro mecânico simples usando fio de cabelo.....	32
Figura 4 – Diagrama com relação entre umidade e resistência elétrica apresentada por sensor resistivo de umidade. ....	33
Figura 5 - Diagrama com relação entre umidade relativa e capacitância elétrica (seta à esquerda), e tensão de saída (seta à direita), apresentado por sensor capacitivo de umidade. .	34
Figura 6 – Psicrômetro de parede (termômetro de bulbo seco e bulbo úmido).....	35
Figura 7 – Diagrama de bandas de valência e condução para materiais isolantes, semicondutores e condutores.....	40
Figura 8 - Desenho construtivo e esquemático de um LED. ....	41
Figura 9 – Princípio de funcionamento e desenho esquemático de um Fotodiodo. ....	42
Figura 10 - Composição de uma placa de Peltier. ....	43
Figura 11 – Montagem e funcionamento de uma célula de Peltier.....	44
Figura 12 - Representação da lei do circuito homogêneo com: circuito homogêneo (A) e circuito não-homogêneo (B).....	50
Figura 13 - Representação da lei dos metais intermediários em termopares.....	50
Figura 14 - Representação da lei das temperaturas intermediárias em termopares.....	51
Figura 15 - Unidades internas de um microprocessador.....	54
Figura 16 - Unidades internas de um microcontrolador.....	55
Figura 17 - Representação de funcionamento do circuito PWM.....	56
Figura 18 - Representação de fornecimento da metade da potência.....	57
Figura 19 - Representação da variação da potência fornecida pela largura do pulso.....	57
Figura 20 - Condição do pulso: Ideal e Real.....	58
Figura 21 - Esquema de montagem dos módulos do dispositivo de medição.....	59
Figura 22 – Placa polida de aço inoxidável usada como sensor do instrumento.....	61
Figura 23 – Montagem do dissipador de calor na placa de Peltier.....	62
Figura 24 – Montagem do conjunto com cooler para o dissipador de calor.....	62
Figura 25 - Vista explodida do conjunto principal do dispositivo.....	64
Figura 26 - Detalhe do insuflador de ar para a placa e circuito de controle.....	65
Figura 27 - Esquema do circuito amplificador da placa de Peltier.....	66
Figura 28 - Caixa de acrílico utilizada nos ensaios.....	68
Figura 29 - Termômetro digital e sensor termopar da placa.....	69
Figura 30 - Montagem do conjunto para realização dos ensaios.....	70
Figura 31 - Instrumentação empregada nos ensaios.....	71
Figura 32 - Disposição do conjunto e instrumentos na capela de laboratório.....	72
Figura 33 - Unidade de chaves de comando do sistema.....	73
Figura 34 - Montagem dos dispositivos de emissão e detecção de luz.....	74
Figura 35 - Detalhe da placa refletora no estado "normal" de reflexão.....	75
Figura 36 - Detalhe da placa refletora após condensação em sua superfície.....	75
Figura 37 - Conjunto emissor-detector de luz durante embaçamento da placa.....	77
Figura 38 - Esquema de montagem do dispositivo de medição com captura de imagem.....	116
Figura 39 - Imagem da placa em condição plena de refletância.....	117
Figura 40 - Imagem da placa no início da condensação da umidade.....	117
Figura 41 - Detalhe da câmera refletido pela placa sem resfriamento.....	118
Figura 42 - Detalhe da câmera refletido pela placa no início de condensação.....	119
Figura 43 - Possibilidade de medição com uso de computador integrado ao processo.....	120

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Ensaio com ventilação - 1ª faixa.....	85
Tabela 2 - Incertezas de medição - 1ª faixa (com ventilação) .....	86
Tabela 3 - Ensaio com ventilação - 2ª faixa.....	88
Tabela 4 - Incertezas de medição - 2ª faixa (com ventilação) .....	89
Tabela 5 - Ensaio com ventilação - 3ª faixa.....	91
Tabela 6 - Incertezas de medição - 3ª faixa (com ventilação) .....	92
Tabela 7 - Ensaio com ventilação - 4ª faixa.....	93
Tabela 8 - Incertezas de medição - 4ª faixa (com ventilação) .....	94
Tabela 9 - Ensaio com ventilação - 5ª faixa.....	96
Tabela 10 - Incertezas de medição - 5ª faixa (com ventilação) .....	97
Tabela 11 - Ensaio sem ventilação - 1ª faixa .....	99
Tabela 12 - Incertezas de medição - 1ª faixa (sem ventilação).....	100
Tabela 13 - Ensaio sem ventilação - 2ª faixa .....	102
Tabela 14 - Incertezas de medição - 2ª faixa (sem ventilação).....	103
Tabela 15 - Ensaio sem ventilação - 3ª faixa .....	105
Tabela 16 - Incertezas de medição - 3ª faixa (sem ventilação).....	106
Tabela 17 - Ensaio sem ventilação - 4ª faixa .....	108
Tabela 18 - Incertezas de medição - 4ª faixa (sem ventilação).....	109
Tabela 19 - Ensaio sem ventilação - 5ª faixa .....	110
Tabela 20 - Incertezas de medição - 5ª faixa (sem ventilação).....	111
Tabela 21 - Comparação dos valores de erros das duas metodologias .....	113

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Comportamento do fotodetector (ensaio com ventilação) .....	78
Gráfico 2 - Comportamento do fotodetector (ensaio sem ventilação).....	79
Gráfico 3 - Representação das medições - 1ª faixa (com ventilação) .....	87
Gráfico 4 - Representação das medições - 2ª faixa (com ventilação) .....	90
Gráfico 5 - Representação das medições - 3ª faixa (com ventilação) .....	92
Gráfico 6 - Representação das medições - 4ª faixa (com ventilação) .....	95
Gráfico 7 - Representação das medições - 5ª faixa (com ventilação) .....	98
Gráfico 8 - Representação das medições - 1ª faixa (sem ventilação).....	101
Gráfico 9 - Representação das medições - 2ª faixa (sem ventilação).....	104
Gráfico 10 - Representação das medições - 3ª faixa (sem ventilação).....	107
Gráfico 11 - Representação das medições - 4ª faixa (sem ventilação).....	109
Gráfico 12 - Representação das medições - 5ª faixa (sem ventilação).....	112
Gráfico 13 - Comparação de erros das duas metodologias .....	114

## LISTA DE SIGLAS

CPU	-	Central Processing Unit
DITER	-	Divisão de Metrologia Térmica (INMETRO)
FATECSP	-	Faculdade de Tecnologia de São Paulo
GUM	-	Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement
IFSP	-	Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo
INMETRO	-	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
IPEM-SP	-	Instituto de Pesos e Medidas do Estado de São Paulo
ISO	-	International Organization for Standardization
LAHIG	-	Laboratório de Higrometria (INMETRO)
LED	-	Light Emitting Diode
NPL	-	National Physical Laboratory
PWM	-	Pulse Width Modulation
RAM	-	Random Access Memory
REMESP	-	Rede Metrológica do Estado de São Paulo
ROM	-	Ready Only Memory
RTD	-	Resistance Temperature Detectors
SPMET	-	Sociedade Portuguesa de Metrologia
TLV	-	Termômetro de líquido em vidro
UC	-	Unidade de Controle
UFABC	-	Universidade Federal do ABC
ULA	-	Unidade Lógico-Aritmética
USB	-	Universal Serial Bus
VIM	-	Vocabulário Internacional de Metrologia

## LISTA DE SÍMBOLOS

$P$	-	pressão
$v$	-	volume
$n$	-	número de moles
$R$	-	constante universal dos gases perfeitos
$T$	-	temperatura
$e_s$	-	pressão de vapor saturado
$e_a$	-	pressão de vapor atual
$UR$	-	umidade relativa
$t_u$	-	temperatura de bulbo úmido
$t_s$	-	temperatura de bulbo seco
$A$	-	constante da equação do psicrômetro
$\theta$	-	temperatura
$q$	-	fluxo de calor
$V_{\min(\text{off})}$	-	tensão mínima no fotodetector com a placa desligada
$V_{\max(\text{off})}$	-	tensão máxima no fotodetector com a placa desligada
$V_{\text{leitura}}$	-	tensão no fotodetector no início do ponto de orvalho
$V_{\text{off}}$	-	tensão no fotodetector com a placa desligada
$T_{\text{Amb}}$	-	temperatura do ar do ambiente
$T_{\text{placa}}$	-	temperatura da placa
$t_a$	-	temperatura do ar do ambiente
$t_p$	-	temperatura da placa
$U_U$	-	incerteza de medição expandida (método)
$u_{t_a}$	-	incerteza relativa à temperatura do ar do ambiente
$u_{t_p}$	-	incerteza relativa à temperatura da placa
$U_H$	-	incertezas envolvidas na leitura dos padrões de umidade
$c_{t_a}$	-	coeficientes de sensibilidade de $u_{t_a}$
$c_{t_p}$	-	coeficientes de sensibilidade de $u_{t_p}$

# SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	14
1.1 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA .....	14
1.2 OBJETIVO GERAL.....	16
1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	16
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	16
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	18
2.1 UMIDADE: CONCEITOS TERMODINÂMICOS .....	18
2.2 TEMPERATURA DO PONTO DE ORVALHO .....	25
2.3 A MEDIÇÃO DE UMIDADE .....	27
2.4 OS INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO.....	28
2.5 TIPOS DE HIGRÔMETROS .....	31
2.6 O HIGRÔMETRO DE PONTO DE ORVALHO .....	36
2.6.1 Componentes do higrômetro de ponto de orvalho .....	38
2.7 OS SEMICONDUTORES.....	39
2.7.1 Semicondutores emissores e detectores de luz .....	40
2.7.2 Placas de Peltier .....	42
2.8 SENSORES DE TEMPERATURA .....	44
2.9 SISTEMAS DE CONTROLE.....	51
2.9.1 Microprocessadores e microcontroladores.....	54
2.9.2 Controlador PWM .....	56
3. MÉTODOS .....	59
3.1 MATERIAIS UTILIZADOS .....	59
3.2 PROCEDIMENTO .....	60
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	77
4.1 CÁLCULO DOS ERROS E INCERTEZAS.....	80
4.2 ENSAIO COM VENTILAÇÃO .....	84
4.3 ENSAIO SEM VENTILAÇÃO.....	98
4.4 COMPARAÇÃO DOS ERROS ENTRE OS MÉTODOS.....	112
4.5 ANÁLISE DE MEDIÇÃO UTILIZANDO IMAGENS.....	115
5. CONCLUSÕES .....	121
REFERÊNCIAS.....	122
Apêndice A – Cálculo dos coeficientes de sensibilidade .....	125
Apêndice B – Programa usado no microcontrolador .....	126
Anexo A – Especificações do microcontrolador .....	127
Anexo B – Especificações da placa de peltier .....	128

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

O conhecimento da quantidade de vapor de água presente no ar mostra-se muito importante no estudo de sistemas de condicionamento de ar para conseguir serem alcançadas as condições de conforto ambiental, uma vez que o conforto térmico não depende apenas da temperatura, mas também da quantidade de vapor de água presente no ar. O controle da umidade também tem elevada importância nos ambientes onde esta influencia as atividades exercidas no local. Tais como laboratórios, onde a umidade pode influenciar nos resultados de exames, medidas e ensaios, bem como nos armazéns de grãos e cereais, onde a umidade pode comprometer grandes estoques destes materiais, exercendo também grande influência na conservação de alimentos em geral bem como de outras mercadorias (cimento, cal, etc.). A umidade, ainda é um fator importante para o funcionamento de certos equipamentos, tais como: circuitos eletrônicos de alta impedância, componentes sensíveis à eletricidade estática, dispositivos de alta tensão, mecanismos finos, etc. (FRADEN, 2004, p. 393).

A necessidade do valor controlado de umidade pode variar de valores muito baixos, para as chamadas “salas limpas”, até valores propositalmente altos encontrados em algumas salas hospitalares. Para o conforto humano (e de animais), é necessário o controle da umidade em certos patamares. Para FRADEN (2004), a “regra de ouro”, para um ambiente comum, é garantir uma umidade relativa próxima a 50% com uma temperatura ambiente entre 20 e 25 °C.

O higrômetro é o instrumento utilizado para a medição da umidade de um gás ou atmosfera, e é utilizado especialmente para medir a quantidade de vapor de água na atmosfera. Os principais tipos de higrômetros são: o mecânico, o eletroeletrônico, o químico e os psicrômetros. Geralmente, os higrômetros apresentam a medição da umidade relativa: que pode ser entendida como o quociente de vapor de água realmente presente no ar e a máxima massa possível de vapor de água no ar. A umidade relativa se expressa geralmente como percentagem (%).

Há fenômenos que são observados, que podem indicar a umidade presente no ar ou em algum gás, tais como a temperatura de ponto de orvalho, que é definida como a temperatura na qual o resfriamento de ar úmido conduz a formação de água de condensação. Isto significa que: quando o ar úmido se resfria até o ponto de condensação, a umidade relativa sobe a 100%. O método que utiliza este fenômeno para medir a umidade é o chamado: “espelho de ponto de orvalho”. Neste, a temperatura de uma superfície refletora (espelho) se esfria até o ponto onde começa a condensação. A temperatura medida neste ponto corresponde à temperatura do ponto de orvalho, da qual se pode calcular a umidade. A utilização desse método resulta em um procedimento muito preciso para a medição de umidade relativa.

Os medidores de umidade que trabalham com o fenômeno do ponto de orvalho, geralmente utilizam aparatos óticos, tais como superfícies espelhadas (ou espelhos), detectores de luminosidade, medidor de temperatura e sistema para controle de temperatura da superfície espelhada (com elemento de aquecimento), além do sistema de resfriamento do espelho (geralmente através de compressor). Esse sistema de medição acaba sendo menos utilizado frente aos demais devido ao custo, mesmo sendo considerado um instrumento que apresenta uma boa exatidão nas medições (LUFFT, s.d.).

## **1.2 OBJETIVO GERAL**

O objetivo deste trabalho é desenvolver um sistema de medição de umidade relativa do ar, baseado no fenômeno do ponto de orvalho, utilizando componentes de baixo custo, de forma que seja possível ser montado e utilizado em laboratórios, promovendo assim a popularização do mesmo no uso como padrão de umidade. Os usuários desta metodologia poderiam então, ganhar maior precisão nas medidas de umidade.

## **1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Estudar a utilização de componentes de baixo custo, para confecção do sistema, e um sistema de controle para que o sistema seja resfriado com velocidade compatível com a possibilidade de leitura do indicador de temperatura do sistema. Após a montagem, serão realizados ensaios utilizando o modelo estudado. De posse dos valores alcançados nos ensaios, e com as informações de leitura de padrões de umidade (usados para comparação), serão analisadas algumas características metrológicas do método e do instrumento montado.

## **1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO**

O trabalho foi dividido em cinco capítulos, sendo o primeiro capítulo reservado à introdução, explorando a motivação e objetivos do trabalho. No segundo capítulo é apresentada uma revisão bibliográfica, explorando a teoria dos diversos tópicos envolvidos no estudo.

A metodologia e detalhes da montagem do dispositivo e realização dos ensaios são

apresentados no capítulo 3. No capítulo 4 são apresentados os resultados obtidos em cada ensaio, juntamente com as observações consideradas.

O capítulo cinco apresenta a conclusão do trabalho, com as devidas considerações finais e sugestões para o estudo que foi realizado.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A montagem de um dispositivo para a realização de medições envolve diversas técnicas e considerações. Assim sendo, torna-se fundamental o conhecimento da grandeza que se deseja trabalhar.

### 2.1 UMIDADE: CONCEITOS TERMODINÂMICOS

Pode-se definir a umidade como a quantidade de água contida em um líquido, sólido ou gás, que pode ser removida sem alterar as suas propriedades químicas. A umidade pode ser expressa de muitas maneiras, muitas vezes dependendo do meio a ser utilizado seu conhecimento (indústria, laboratórios, agropecuária, meteorologia, etc.). A umidade dos gases pode ser expressa pela massa de vapor de água para um dado volume.

O ar atmosférico é um gás formado por uma mistura de gases. O ar seco é principalmente composto de nitrogênio (corresponde à aproximadamente 78% da mistura) e oxigênio (que participa com 21%, aproximadamente), contendo outros gases em menor quantidade, como: argônio (corresponde aproximadamente a 0,9%), dióxido de carbono (contribuição aproximada de 0,05%), hidrogênio, hélio, etc. (POTTER; SCOTT, 2007, p. 250). No conceito de gás ideal, um gás pode ser formado pela mistura de gases ideais. Pode ser aplicada nesse caso, a equação universal dos gases perfeitos para estudar tal composição:

$$Pv = nRT$$

onde,

$P$  - é a pressão do gás

$v$  - é o volume do recipiente

$R$  - é a constante universal dos gases perfeitos

$T$  - é a temperatura do gás

$n$  - é o número de moles

A pressão total de uma mistura de gases ideais é igual à soma das pressões parciais dos gases ideais componentes dessa mistura (TIPLER; MOSCA, 2009, p. 578). A pressão desse gás poderia ser escrita como:

$$P_{\text{total}} = P_1 + P_2 + P_3 \dots$$

A expressão descrita é conhecida como modelo de Dalton, e tem grande importância na determinação da umidade do ar atmosférico, já que esta é simplesmente vapor de água (água na fase gasosa), que pode ser considerado também como um gás, sendo aplicáveis as regras relativas às pressões parciais. Assim a pressão padrão do ar atmosférico (aproximadamente 101,3 kPa), é a soma das pressões parciais do nitrogênio, oxigênio, dos vários outros gases (que estão em quantidades muito menores no ar) e também por vapor de água (POTTER; SCOTT, 2007, p. 250).

A pressão parcial máxima que pode ser exercida pelo vapor de água é estabelecida pela temperatura do gás, sendo esta pressão conhecida como a pressão de vapor saturado, representada pelo símbolo “ $e_s$ ”, sendo a pressão de vapor do estado atual de um gás representada pelo símbolo “ $e_a$ ” (ambos em Pa). A relação das variáveis é diretamente

proporcional, assim aumentando-se a temperatura interna do sistema, aumentará o nível energético das moléculas e resultará em aumento da evaporação. Quanto mais alta a temperatura, mais alta a pressão do vapor de saturação e mais vapor de água o ar consegue conter. Assim, o ar quente tem maior capacidade de conter vapor de água do que o ar frio.

Pode ser calculada a pressão de vapor saturado ( $e_s$ ), utilizando modelos matemáticos empíricos, sendo um dos primeiros, e mais conhecido o modelo de Magnus (1844), para o cálculo da pressão (em Pa), de saturação de vapor de água puro (RIBEIRO; MARTINS, 2007), sendo definido por:

$$e_s = \alpha \cdot e^{\frac{\beta \cdot t}{\lambda + t}}$$

A fórmula é escrita em função de  $t$ , que é a temperatura do ar úmido. Os valores de  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\lambda$ , são constantes determinadas de forma experimental ou por simulação computacional.

Encontramos em *A guide to the measurement of humidity* (NPL, 1996, p. 53), a recomendação de utilização do modelo com as seguintes constantes (chamado no documento de *Magnus formula*):

$$\ln e_w(t) = \ln 611,2 + \frac{17,62 \cdot t}{243,12 + t}$$

Onde,  $t$  é a temperatura dada em graus Celsius ( $^{\circ}\text{C}$ ).

Neste modelo, o valor de  $e_w$  corresponde ao valor de  $e_s$ , e é dado em pascals (Pa). Este mesmo modelo pode ser escrito, seguindo o molde anteriormente exibido, como:

$$e_s = 611,2 \times \exp\left(\frac{17,62 \times t}{243,12 + t}\right)$$

As constantes utilizadas na fórmula acima são ditas constantes do modelo de Sonntag (1990). Outra forma muito encontrada, da mesma fórmula com outros coeficientes, é o modelo de Tetens, que escreve a fórmula da seguinte maneira:

$$e_s = 610,8 \times \exp\left(\frac{17,3 \times t}{237,3 + t}\right)$$

Tanto o modelo de Sonntag quanto o modelo de Tetens, resultam o valor da pressão em pascals (Pa), sendo as fórmulas, funções da temperatura do gás (ar, no caso), dada em grau Celsius (°C).

Como já menciona COSTA JÚNIOR (2011): “[...]o ar funciona como um “reservatório” que se expande ou contrai com acréscimo ou decréscimo da temperatura, sendo que a temperatura do ar determina sua pressão de saturação [...]”. O estudo da pressão de vapor, em conjunto com outros fatores como temperatura e velocidade do vento, tem grande importância na determinação da taxa de evaporação da água líquida, sendo este dado muito importante nos estudos meteorológicos aplicados em atividades de agronomia.

Algo que deve ser considerado nos gases, é aplicação inversa do modelo de Dalton, ou seja, a promoção de alteração na pressão total de um gás promoverá uma alteração nas pressões parciais de todos os gases componentes, e por consequência, o vapor de água. Uma duplicação da pressão total promoveria a duplicação das pressões parciais de todos os gases componentes. Assim, a pressão de vapor atual ( $e_a$ ) é aumentada, porém a pressão do vapor saturado ( $e_s$ ), permanece com mesmo valor, pois é função apenas da temperatura. É observado em tanques onde há aumento de pressão (como em compressores), formação de água condensada, daí a necessidade de drenos nesses equipamentos.

Nos líquidos e nos sólidos, a umidade por vezes é expressa como uma porcentagem de água pela massa total, podendo usar como base o peso úmido (mais comum), mas também podendo usar como base seu peso seco. A umidade em líquidos com baixa miscibilidade é normalmente expressa pela água contida, como partes por milhão em peso (FRADEN, 2004, p. 393). Quando a medida da umidade em um gás é referente à massa de vapor de água para um dado volume, tem-se o conceito de umidade absoluta. A relação fica:

$$\text{Umidade Absoluta} = \frac{\text{Massa do vapor de água}}{\text{Volume do gás}}$$

Assim a umidade acaba sendo relacionada como uma medida absoluta de densidade do componente vapor de água em um gás. Quando se refere à umidade do ambiente, a umidade absoluta normalmente é expressa em gramas por metro cúbico de ar ( $\text{g/m}^3$ ). Assim, pode ser medida a umidade do ar, fazendo passar uma quantidade deste ar através de um absorvente de umidade e descobrir a massa de água pela diferença de valores obtidos pela pesagem deste absorvente antes e após o processo de absorção.

A umidade absoluta é um parâmetro mais utilizado nos processos de secagem, assim como também, é comum o conceito de taxa de mistura, que pode ser entendido como a relação entre a massa do vapor de água e a massa do gás seco (sendo geralmente expressa em gramas por quilograma de ar seco).

Um conceito mais utilizado para o ar atmosférico é a umidade relativa, que é definida como a razão entre a pressão de vapor de água atual do ar para uma temperatura ( $e_a$ ), e a pressão de vapor saturado ( $e_s$ ), na mesma temperatura. A umidade relativa (UR) pode ser definida como:

$$UR = \frac{e_a}{e_s} \times 100(\%)$$

O cálculo da umidade relativa fica dependente da temperatura do ar, já que o valor do denominador é função dessa variável. Assim em um ambiente com uma umidade relativa de 50%, para uma certa temperatura, pode ser observada a diminuição dessa umidade relativa com o aumento da temperatura. A pressão também altera a umidade relativa em proporção direta, assim a duplicação da pressão do ar promove a duplicação da umidade relativa, sob temperatura constante.

O valor da pressão de vapor atual ( $e_a$ ), pode ser calculado com o auxílio da equação do psicrômetro, encontrada em *A guide to the measurement of humidity* (NPL, 1996, p. 53), que é descrita como:

$$ea = es(t_u) - AP(t_s - t_u)$$

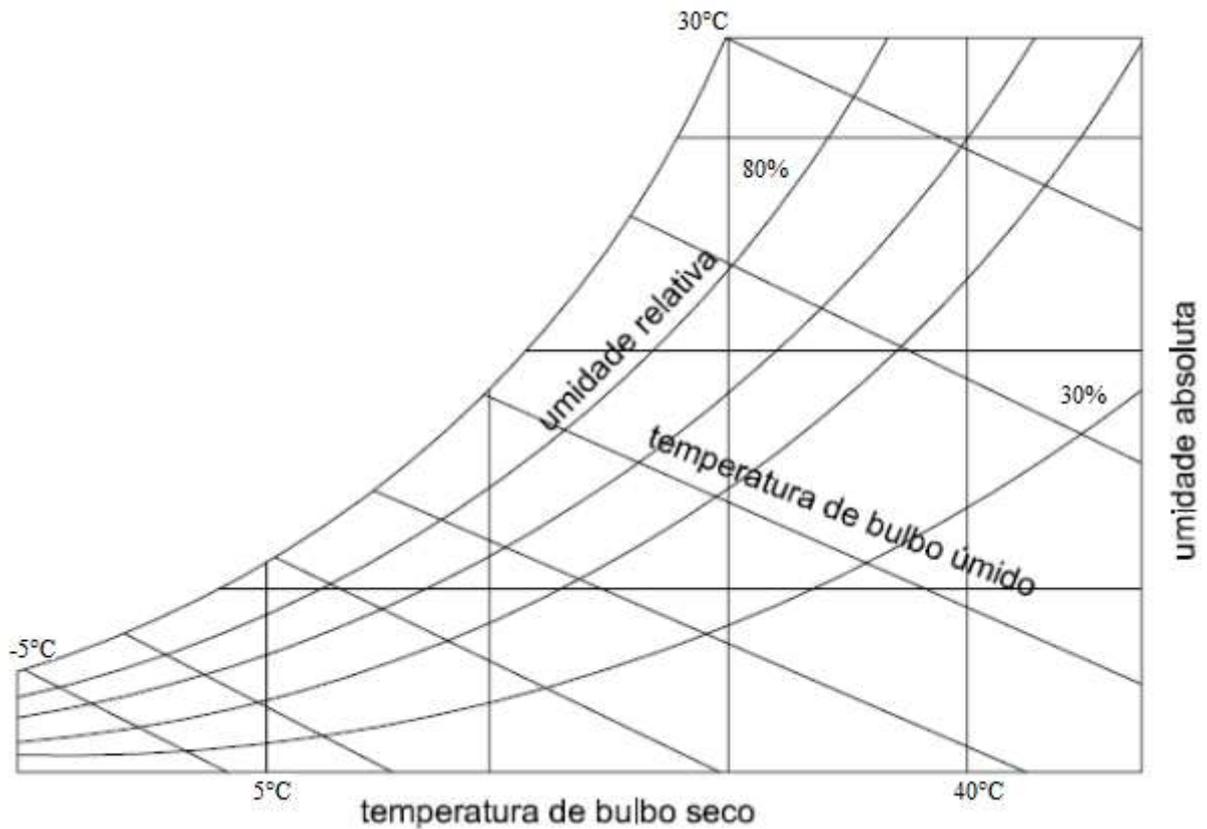
Na fórmula,  $P$  é a pressão atmosférica (em Pa), e  $A$  é uma constante psicrométrica que depende da condição do psicrômetro quanto à circulação de ar, sendo:

$A = 6,66 \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  para psicrômetros com ventilação forçada

$A = 8,0 \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  para psicrômetros sem ventilação forçada

Na equação,  $es(t_u)$  é o valor da pressão de vapor de saturação utilizando a temperatura de bulbo úmido como variável. A temperatura de bulbo úmido ( $t_u$ ), é a temperatura indicada por um termômetro embrulhado numa bacia de algodão molhado. A temperatura de bulbo seco ( $t_s$ ) é a temperatura exibida por um termômetro normal e representa a temperatura do ar do ambiente.

A umidade relativa também pode ser obtida com a utilização de cartas psicrométricas (figura 1), com o cruzamento entre as linhas de indicação de temperatura (de bulbo seco e úmido), e as linhas de indicação de umidade relativa ou umidade absoluta. Nestas cartas, as linhas verticais representam a temperatura de bulbo seco, e as linhas inclinadas representam a temperatura de bulbo úmido.



**Figura 1 - Representação de uma carta psicrométrica**

Também pode ser calculado o valor da pressão de vapor atual ( $e_a$ ), de água no ar, de forma mais precisa com o cálculo da pressão de vapor saturado da temperatura de ponto de orvalho, já que nessa condição, corresponde a mesma pressão de vapor atual para um mesmo valor de umidade do ar (MORAN, SHAPIRO, 2008, p. 458).

## **2.2 TEMPERATURA DO PONTO DE ORVALHO**

Conforme abordado anteriormente, o ar atmosférico age como um reservatório de água capaz de retê-la na forma de vapor, sendo que essa quantidade dependerá da temperatura do ar: quanto maior a temperatura, maior a capacidade de retenção. Havendo a situação do contínuo resfriamento dessa mistura gasosa, chega-se a um estado no qual qualquer redução

da temperatura, além do ponto chegado, fará com que a água contida no ar, em forma de vapor, torne-se líquida durante um processo chamado condensação. A temperatura na qual ocorre esse fenômeno é chamada de "temperatura de saturação", ou "temperatura de ponto de orvalho" ("*dew point*" em inglês), nessa temperatura a fase líquida e de vapor de água apresentam-se em equilíbrio.

A formação de orvalho é o fenômeno que ocorre de madrugada nas folhas de plantas, com o aparecimento de pequenas gotas de água devido ao esfriamento do ar, sendo que o princípio de formação é o mesmo que ocorre na condensação sobre vidros e formação de nuvens. O fenômeno ocorre quando a pressão de vapor atual do ar ( $e_a$ ) se torna maior do que a pressão de vapor saturado ( $e_s$ ), que aumenta ou diminui em função da temperatura do ar. A temperatura do ponto de orvalho fica mais precisamente definida como: a temperatura na qual a pressão parcial do vapor de água, contido em um gás úmido, estaria em seu máximo, ou em outras palavras, na condição de vapor de saturação. Se a temperatura do ponto de orvalho estiver abaixo de  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , então usa-se o termo "temperatura do ponto de congelamento", já que nessas condições o fenômeno promoveria a formação de gelo ao invés de água. A fórmula de cálculo da pressão de saturação do gelo é diferente da fórmula de cálculo da pressão de saturação da água.

Quando a umidade relativa é igual a 100%, significa que a temperatura ambiente é igual à temperatura do ponto de orvalho, assim quanto menor a temperatura do ponto de orvalho comparada à temperatura do gás, mais seco é esse gás. As medições do ponto de orvalho são muito comuns nos processos de secagem (ar seco e secagem de ar comprimido), bem como nos estudos de meteorologia, com a previsão de formação de neblinas e geadas.

### 2.3 A MEDIÇÃO DE UMIDADE

Como foi descrito anteriormente, o conhecimento e controle da umidade presente na atmosfera tem grande importância na produção, estocagem, e na qualidade de diversos produtos, e ainda tem influência no funcionamento de diversos equipamentos. Assim a medida precisa do valor de umidade apresenta grande importância. Verificando a etimologia da palavra “higrometria”, que podemos considerar como a ciência que estuda a umidade dos corpos, observa-se que a palavra é derivada do grego “hygros”, que significa umidade, e “metria”, que significa medida (COSTA JÚNIOR, 2011).

O instrumento utilizado para a realização de medição da umidade do ar é chamado de higrômetro. Na confecção desse instrumento, é utilizada alguma substância com capacidade de absorver a umidade atmosférica de forma que este vapor de água interagir com o elemento sensor. De acordo com sua natureza de funcionamento e construção, o higrômetro pode ser do tipo mecânico, químico ou eletro-eletrônico. Outro instrumento utilizado na medição da umidade ambiental é o chamado psicrômetro, que é a composição de dois termômetros: um termômetro de “bulbo seco”, e um termômetro de “bulbo úmido”.

As condições do ambiente em que está sendo realizada a medição de umidade podem influenciar nos resultados obtidos, assim é desejável que seja escolhido um local de medição que represente bem o ambiente a ser medido, principalmente em que não haja diferenças de temperatura já que, conforme explicado, a temperatura do ar influi nos valores obtidos da umidade. Outra recomendação é a de certificar-se da livre passagem de ar (ou gás) pelo elemento sensor do instrumento, de forma que o instrumento possa realizar uma boa

amostragem, e caso esse sensor esteja submetido a uma atmosfera contaminante, talvez seja interessante utilizar filtros ou outros dispositivos de proteção (figura 2).

Fonte: <http://www.vaisala.com>



**Figura 2 - Filtros de elementos sensores de higrômetros eletrônicos**

## **2.4 OS INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO**

Os higrômetros, assim como outros instrumentos utilizados em medições, apresentam características próprias que irão fazer parte da chamada identidade metrológica, sendo esta constituída de variáveis de fundamental importância para a orientação da correta forma de utilizar tais instrumentos nos processos de medições, bem como (e principalmente), a interpretação correta dos resultados proporcionado por estes, e a previsão de possíveis desvios e resultados errôneos.

As principais características são: o erro, a sensibilidade, a exatidão, a resolução, a histerese (de medição) e a deriva. Tais características são determinadas ou conhecidas, por um processo denominado de calibração, que é definida pelo Vocabulário Internacional de Metrologia (INMETRO, 2012, p. 27), como:

Operação que estabelece, sob condições especificadas, numa primeira etapa, uma relação entre os valores e as incertezas de medição fornecidos por padrões e as indicações correspondentes com as incertezas associadas; numa segunda etapa, utiliza esta informação para estabelecer uma relação visando a obtenção dum resultado de medição a partir duma indicação.

A caracterização metrológica faz-se então necessária para saber-se mais sobre as qualidades e peculiaridades do instrumento, bem como o tipo de utilização que será indicado, do ambiente em que ele poderá ser utilizado, das condições às quais poderá ser submetido e da frequência em que ele poderá ser utilizado, sendo que algumas dessas características serão influenciadas não só pelas características metrológicas, mas também pela forma como o instrumento é fabricado e dos materiais utilizados em sua fabricação.

Como foi mencionado, o erro é apontado pelo processo de calibração, apresentando grande importância para o correto uso do instrumento ou medida materializada e também estando diretamente ligado à característica metrológica referente à exatidão. O valor do erro é definido pelo Vocabulário Internacional de Metrologia (INMETRO, 2012, p. 21), como: “Diferença entre o valor medido duma grandeza e um valor de referência”. Assim podemos utilizar a seguinte relação:

$$\text{Erro} = \text{Valor medido} - \text{Valor de referência (Padrão)}$$

Um fator importante que está envolvido na apresentação dos resultados obtidos pela calibração é a incerteza de medição (“*uncertainty measurement*” em inglês), que é definida pelo Vocabulário Internacional de Metrologia (INMETRO, 2012, p. 24), como: “Parâmetro não negativo que caracteriza a dispersão dos valores atribuídos a um mensurando, com base nas informações utilizadas”.

Para as incertezas envolvidas nos processos de medição e calibração, podemos considerar dois tipos distintos de acordo com a origem da incerteza. O VIM (INMETRO, 2012, p. 24), explica da seguinte forma:

A incerteza de medição geralmente engloba muitas componentes. Algumas delas podem ser estimadas por uma avaliação do Tipo A da incerteza de medição, a partir da distribuição estatística dos valores provenientes de séries de medições e podem ser caracterizadas por desvios-padrão. As outras componentes, as quais podem ser estimadas por uma avaliação do Tipo B da incerteza de medição, podem também ser caracterizadas por desvios-padrão estimados a partir de funções de densidade de probabilidade baseadas na experiência ou em outras informações.

Para o cálculo da incerteza de medição do tipo A, que está relacionada à dispersão dos valores obtidos pela realização das medidas, é fundamental o cálculo da variância dos valores obtidos, como é definido no “Guia para a expressão de incerteza de medição” (GUM do inglês “*guide to the expression of uncertainty in measurement*”), que exhibe a fórmula para o cálculo da variância (INMETRO, 2012, p. 10):

$$s^2(q_k) = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (q_j - \bar{q})^2$$

Sendo a média dos valores obtidos nos ensaios, obtida pela seguinte fórmula (INMETRO, 2012, p. 10):

$$\bar{q} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n q_k$$

A fórmula a seguir calcula a variância da média, conforme o GUM 2008 (INMETRO, 2012, p. 10):

$$s^2(\bar{q}) = \frac{s^2(q_k)}{n}$$

A incerteza pode ser expressa pela variância média das medidas, da seguinte forma (INMETRO, 2012, p. 10):

$$u^2(x_i) = s^2(\bar{X}_i)$$

Temos que, para o cálculo da combinação das incertezas (para a incerteza total), deve ser aplicada a seguinte fórmula (INMETRO, 2012, p. 19):

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \left( \frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i)$$

Já as incertezas do tipo B não são obtidas através das variâncias das medições, mas sim através de avaliação baseada em informações (LIRA, 2009, p. 93), tais como: medições anteriores, experiência ou conhecimento do comportamento e propriedades dos materiais e instrumentos, especificações fornecidas pelo fabricante, dados de calibração e certificados, incerteza obtida de manuais, etc.

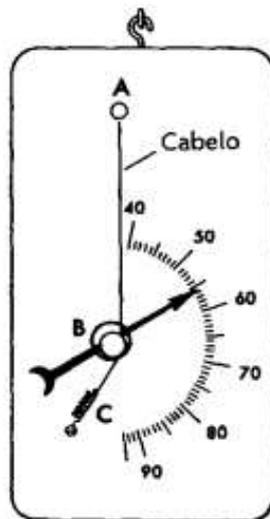
## 2.5 TIPOS DE HIGRÔMETROS

O primeiro higrômetro foi construído em 1820 pelo cientista inglês John Frederic Daniell (1790-1845), explorando-se o fenômeno de condensação (ponto de orvalho), utilizando-se um par de tubos de ensaio com cobertura de prata no fundo. Ar forçado a passar pelo fundo de um dos tubos ocasionava o arrefecimento, e este a condensação de água nas paredes de prata, quando atingido o ponto de orvalho. Os principais higrômetros podem ser do tipo mecânico (ou de absorção), eletroeletrônicos, os de condensação (como o exemplo

acima), os químicos e os psicrômetros.

Os higrômetros mecânicos tem seu funcionamento baseado na dilatação e contração de alguns materiais que são sensíveis à variação da umidade. Cabelos e pêlos são alguns bons exemplos destes materiais, sendo que se encontra a utilização de pêlos de cavalo em alguns instrumentos de medição e controle de umidade. Nesses tipos de higrômetros, a variação no comprimento do elemento será proporcional à variação da umidade no ambiente (figura 3). Os higrômetros de cabelo requerem manutenção regular para evitar o ressecamento e a quebra dos fios, devendo estes serem tratados.

Fonte: <http://www.sobiologia.com.br>



**Figura 3 – Higrômetro mecânico simples usando fio de cabelo.**

Os sistemas eletroeletrônicos de medição de umidade se baseiam em dois tipos principais de sensores:

- Sensor resistivo: este é feito com material especial que está apto a absorver umidade, e esta irá alterar a resistividade do elemento sensor (figura 4). A variação de resistividade será então lida e relacionada à umidade do ambiente.

Fonte: WILSON - *Sensor technology handbook*

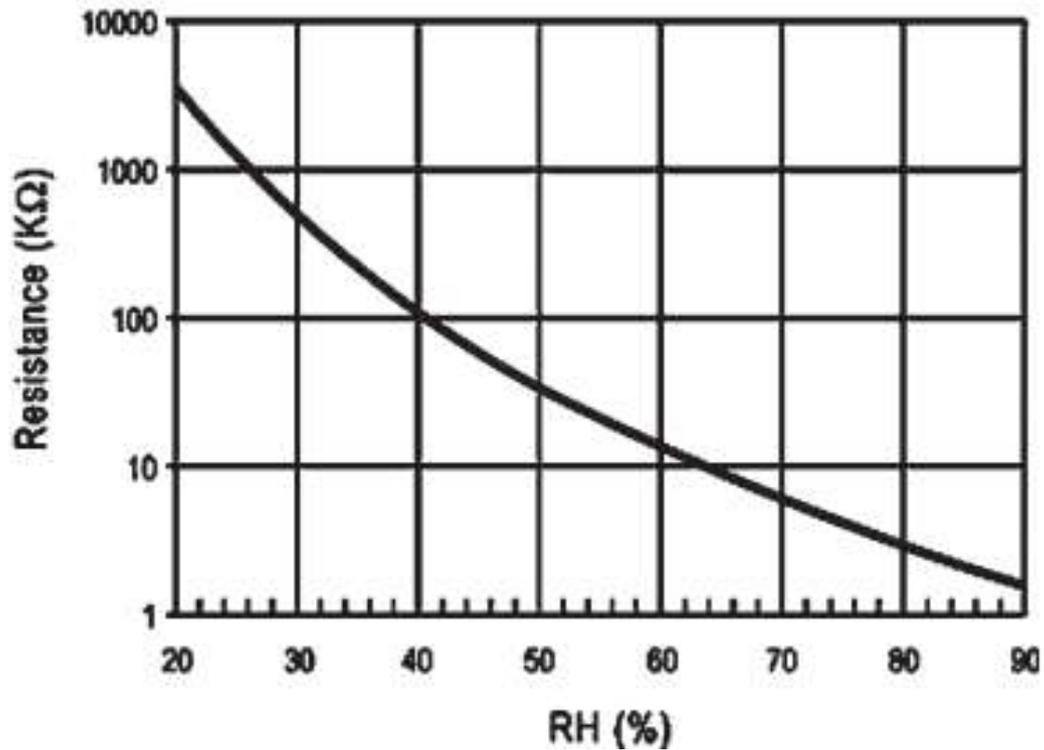
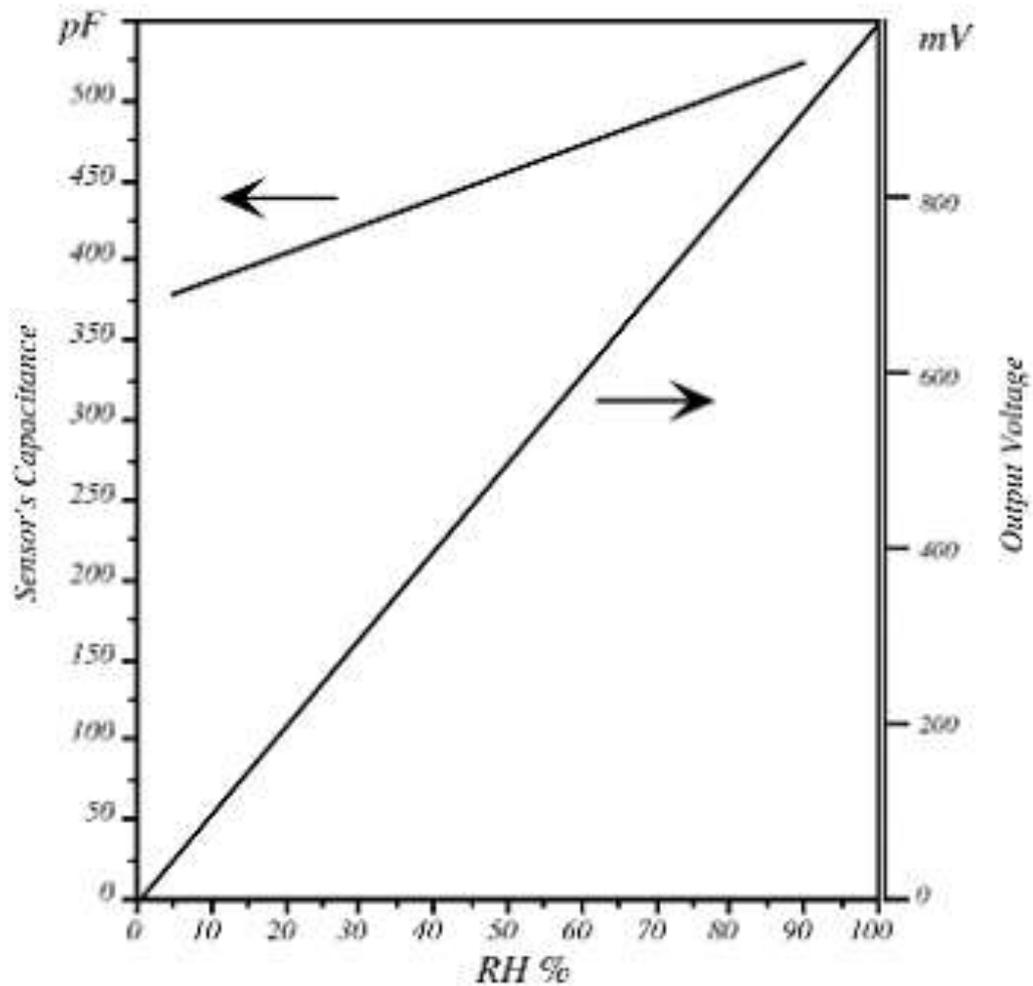


Figura 4 – Diagrama com relação entre umidade e resistência elétrica apresentada por sensor resistivo de umidade.

– Sensor capacitivo: há a variação da capacitância de acordo com a absorção de umidade do material dielétrico. Consiste em dois eletrodos planos, entre os quais está situado um encapsulado higroscópico sintético, eletricamente isolado. Este elemento, agindo como dielétrico, pode absorver a água presente no ar. Com o aumento da umidade do ar a capacitância do condensador, sensível à umidade, também aumenta (figura 5).

Fonte: FRADEN - *Handbook of modern sensors*



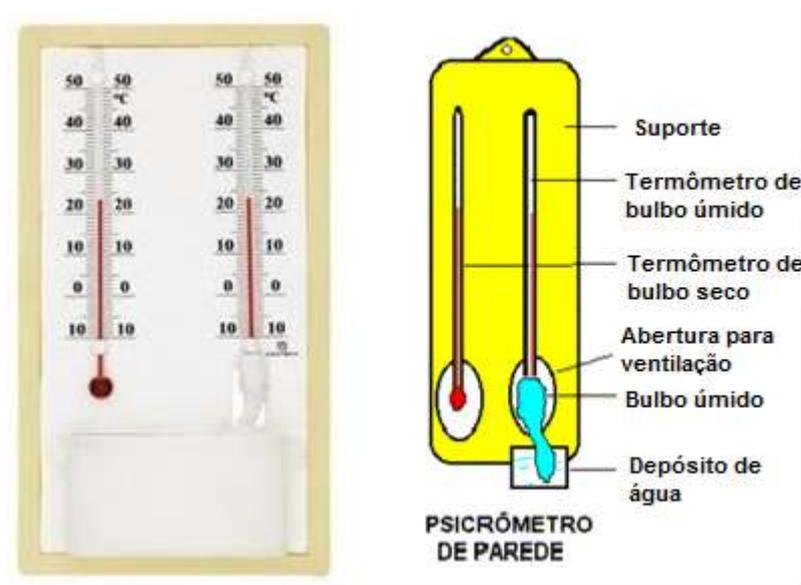
**Figura 5 - Diagrama com relação entre umidade relativa e capacitância elétrica (seta à esquerda), e tensão de saída (seta à direita), apresentado por sensor capacitivo de umidade.**

O sensor capacitivo é o mais comumente usado por apresentar um bom custo benefício para o uso em instrumentos de medição de umidade, apresentando como desvantagem a necessidade de compensação de temperatura nas medidas.

O higrômetro de termômetro de bulbo úmido e seco, também chamado de psicrômetro, é formado por dois termômetros colocados um ao lado do outro, sendo que um trabalha com o bulbo de forma seca e o outro com o bulbo mantido molhado pelo envolvimento de uma mecha de algodão em contato com reservatório de água destilada (figura 6). O princípio de

funcionamento se baseia no fato de que o termômetro com o reservatório úmido registrará uma temperatura mais baixa do que o que tem o reservatório seco, devido ao resfriamento pela perda de calor pela evaporação da água. A diferença de temperatura verificada possibilita chegar ao valor da umidade relativa presente no ar, através de cálculos ou cruzando os valores lidos nos instrumentos em uma carta psicrométrica.

Fonte: <http://dc151.4shared.com>



**Figura 6 – Psicrômetro de parede (termômetro de bulbo seco e bulbo úmido).**

Entre os problemas de utilização dos psicrômetros para a medição de umidade, pode ser destacada a necessidade do constante controle do nível da água no reservatório do termômetro de bulbo úmido, e a necessidade de que o instrumento não fique exposto ao sol.

Como exemplo de higrômetro químico, cita-se o sistema que utiliza um tubo contendo ácido sulfúrico que absorve a água de um volume de ar. Pelo aumento da massa do tubo determina-se a massa de vapor de água retida pelo ácido. Esse tipo de higrômetro requer que o material químico seja trocado constantemente, fora o problema de ser necessário fazer medições de massa do sistema.

## 2.6 O HIGRÔMETRO DE PONTO DE ORVALHO

Este higrômetro baseia a medição de umidade pelo conhecimento do ponto de orvalho, utilizando para isso, um procedimento onde se avalia a temperatura de uma superfície onde ocorre o fenômeno de condensação do vapor de água presente na atmosfera, sendo que isto ocorre quando sua temperatura abaixa além do ponto de orvalho. Este é o mais eficiente método de medição da temperatura do ponto de orvalho para o cálculo da umidade absoluta ou relativa (FRADEN, 2004, p. 402).

A maioria dos sensores de umidade apresentam alguns problemas de repetibilidade, especialmente de histerese com um valor típico de 0,5% a 1 % de umidade relativa. Nesse contexto, os métodos de medições baseados na higrometria ótica apresentam melhores resultados em confiabilidade na medição. Essa maior confiabilidade na precisão acaba sendo a grande justificativa para utilização desses métodos óticos apesar de apresentarem um custo maior do que as outras metodologias com sensores convencionais (FRADEN, 2004, p. 402).

Consegue-se um procedimento muito preciso de medição de umidade, quando utilizamos uma superfície espelhada, que se esfria até o ponto de orvalho, sendo que esta temperatura é medida por um termômetro digital. “Trata-se de um método que, a priori, não necessita de calibração, contudo o sistema deve ser capaz de detectar com precisão o momento exato de início da condensação” (GÜTHS, PAULO, 1998, p. 29). Temos que um dos departamentos do INMETRO, a Divisão de Metrologia Térmica (DITER), tem um laboratório para a guarda e manutenção dos padrões de referência em umidade do país, utilizando higrômetros de ponto de orvalho, como já menciona Brionizio (2005):

[...] a Divisão de Metrologia Térmica do Inmetro (Diter) desenvolveu um laboratório para ser utilizado como base para a guarda e manutenção dos padrões de referência em umidade do país. O Laboratório de Higrometria (Lahig) iniciou a prestação de serviços de calibração em 1998 tendo como padrão de referência um higrômetro de ponto de orvalho, do tipo espelho resfriado, para a faixa de  $-75^{\circ}\text{C}$  a  $+20^{\circ}\text{C}$  de temperatura de ponto de orvalho. A limitação da faixa na temperatura de ponto de orvalho de  $20^{\circ}\text{C}$  causava diversas restrições. Para a calibração de higrômetros, os pontos de umidade relativa eram geralmente medidos na temperatura de  $20^{\circ}\text{C}$ . Quanto mais se excedia a temperatura de  $20^{\circ}\text{C}$ , mais se restringia o limite superior da faixa de umidade relativa. Para acabar com essa limitação, o laboratório adquiriu em 2001 um novo higrômetro de ponto de orvalho, do tipo espelho resfriado, para ser utilizado como padrão de referência na faixa de  $-40^{\circ}\text{C}$  a  $+80^{\circ}\text{C}$  de ponto de orvalho. [...]

Quanto à questão da rastreabilidade que os referidos padrões nacionais de umidade proporcionam, em relação aos padrões internacionais, Brionizio (2005), esclarece:

Os higrômetros de referência do laboratório estão rastreados aos padrões de institutos nacionais de metrologia de outros países. A calibração dos instrumentos foi realizada através de geradores de referência. A maioria dos institutos nacionais de metrologia utilizam geradores de umidade como padrões de referência. Tais geradores geralmente baseiam-se no princípio de duas temperaturas ou de duas pressões.

A ideia básica do higrômetro ótico é a utilização de uma bomba de calor para regular a temperatura da superfície espelhada. A temperatura é abaixada até a formação de orvalho (condensação de água na superfície). Se o espelho estiver submetido à temperatura de ponto de orvalho, o ar (ou gás), em sua superfície, liberta umidade sob a forma de gotículas de água. As propriedades reflexivas do espelho sofrem mudanças com a condensação de água, porque essas gotículas de água causam dispersão dos raios de luz que incidem no espelho. Isso pode ser detectado por um fotodetector apropriado. Uma placa de Peltier (descrita adiante), pode ser usada como bomba de calor.

O sistema de detecção ótica de condensação pode ser feito com um emissor de luz posicionado a um ângulo de  $45^{\circ}$  em relação a um espelho, e um detector de luz simetricamente oposto ao emissor, de forma a receber a luz do emissor refletida pelo espelho.

Acima do ponto de orvalho, o espelho está seco e sua refletividade é a mais alta. Com a redução da temperatura do espelho através da bomba de calor, no momento em que ocorre a condensação da água, a refletividade do espelho cai abruptamente, sendo acusado pelo detector de luz. Neste instante, é determinada a temperatura do ponto de orvalho.

Há alguns problemas associados a este método, sendo que um deles está relacionado ao custo do instrumento, que é relativamente elevado. Outro problema é o potencial de contaminação do espelho, além de uma potência relativamente elevada de consumo pela bomba de calor (FRADEN, 2004, p. 403).

Seguindo esta metodologia, tendo-se a informação da temperatura do ponto de orvalho, que é obtida pelo método ótico descrito, aliada com a informação da pressão barométrica e temperatura do ar (ou gás), pode-se calcular com precisão, a umidade, ou ainda encontrar o seu valor pelo cruzamento de informações em cartas psicrométricas, além de outros parâmetros de umidade, tais como a umidade relativa (UR), e a pressão de vapor.

### **2.6.1 Componentes do higrômetro de ponto de orvalho**

O higrômetro de ponto de orvalho utiliza alguns componentes eletrônicos, como: a placa de Peltier, que irá proporcionar o resfriamento da superfície espelhada; o dispositivo de emissão de luz e o dispositivo de detecção de luz, que deverão atuar em conjunto, de forma que a luz proporcionada pelo dispositivo emissor seja refletida pela superfície espelhada (que estará sendo resfriada), e detectada pelo dispositivo de detecção. Dessa forma, este conjunto irá atuar como um sensor de condensação da superfície espelhada para a indicação do momento de leitura do sensor de temperatura da placa.

Esses componentes se baseiam na tecnologia de materiais semicondutores, e irão atuar no sistema de medição de forma a proporcionar uma medida rápida e confiável.

## 2.7 OS SEMICONDUTORES

Fazendo-se testes de condutividade elétrica observa-se que alguns materiais apresentam-se como melhores ou piores condutores de eletricidade. Uma das explicações para tal acontecimento está baseada nas bandas de energia consideradas para um cristal unidimensional (SWART, s.d). Há também a teoria do gás eletrônico, a qual explica que, para os metais os elétrons estão em movimento contínuo, numa dada “nuvem” de elétrons, facilitando a condutividade e explicando assim o fato de que geralmente os metais são bons condutores.

Para a teoria das bandas de energia, temos que cada banda contém uma quantidade de estados quânticos e a condutividade irá depender da ocupação de elétrons nestas bandas. Assim temos que os condutores não têm sua última banda totalmente preenchida, ou apresentarem sua última banda totalmente preenchida, mas com sobreposição da banda seguinte. Os isolantes tem sua última banda totalmente preenchida, sem sobreposição com a banda seguinte, e ainda, uma banda proibida larga que torna improvável a passagem de um elétron para a banda de condução (figura 7).

Os materiais semicondutores são materiais que podem ser considerados de natureza isolantes, tendo como diferença a magnitude da banda proibida de energia do seu diagrama de bandas de até 3 eV, sendo que os materiais isolantes apresentam valores maiores. Em temperaturas um pouco acima de 0 K, temos que em um material semicondutor, com largura

da banda proibida reduzida, alguns elétrons da banda de valência adquirem energia térmica da rede e poderão passar para a banda de condução. Neste caso o material apresentará um estado, em que, tanto a banda de valência como a banda de condução (parcialmente preenchida), podem conduzir corrente elétrica, diferentemente dos materiais isolantes.

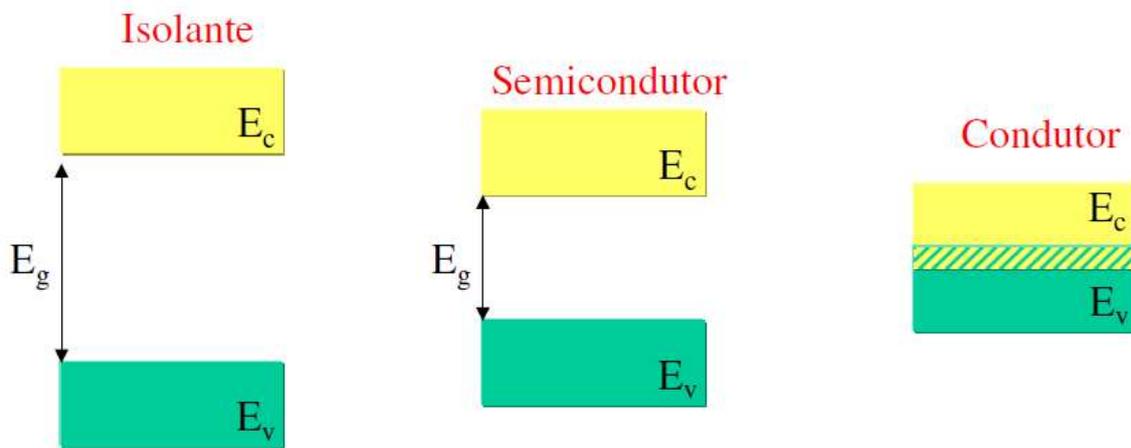


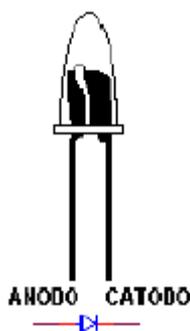
Figura 7 – Diagrama de bandas de valência e condução para materiais isolantes, semicondutores e condutores.

O material semicondutor intrínseco, ou puro, irá apresentar uma estrutura com organização atômica regular em que os átomos são mantidos em suas posições por ligações chamadas de ligações covalentes, porém o material semicondutor ainda pode ser “dopado”, que é o processo em que se introduz um pequeno número de átomos de impureza, tornando o material semicondutor do tipo n (com maior carga negativa e com facilidade de doação de elétrons), ou p (maior carga positiva e com facilidade de receber elétrons). O diodo semicondutor é basicamente uma junção pn no qual a corrente elétrica encontra forte condução em um sentido e quase nula no sentido inverso.

### 2.7.1 Semicondutores emissores e detectores de luz

Em um diodo com polarização direta, os elétrons livres atravessam a junção e combinam-se com as lacunas. À medida que esses elétrons caem de um nível mais alto de energia para um mais baixo, eles irradiam energia. No diodo emissor de luz (LED), a energia é irradiada na forma de luz. Os LEDs (figura 8), apresentam como principais características: baixa tensão de funcionamento, vida longa e rápida mudança de estado entre ligado e desligado. Os materiais semicondutores comumente utilizados nesses dispositivos são: arsenieto de gálio, fosfeto de gálio e índio.

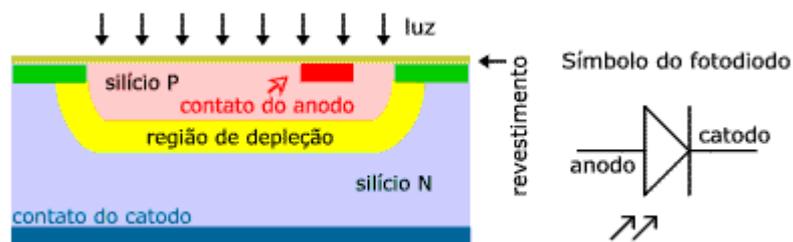
Fonte: SOUZA, PEREIRA - Fotodiodos e Fototransistores



**Figura 8 - Desenho construtivo e esquemático de um LED.**

O fotodiodo é um dispositivo que converte a luz recebida em uma determinada quantidade de corrente elétrica. Quanto à construção, pode ser definido como um diodo de junção construído de forma especial, de modo a possibilitar a utilização da luz como fator determinante no controle da corrente elétrica, com um dispositivo de junção pn semicondutor cuja região de operação é limitada pela região de polarização reversa e com característica de ser sensível à luz (figura 9). A aplicação de luz à junção resultará em uma transferência de energia das ondas luminosas incidentes (na forma de fótons) para a estrutura atômica, resultando em um aumento do número de portadores minoritários e um aumento do nível da corrente reversa.

Fonte: <http://www.mspc.eng.br>



**Figura 9 – Princípio de funcionamento e desenho esquemático de um Fotodiodo.**

O fototransistor é uma combinação de do diodo fotodetector, porém associado ao efeito transistor. Ele pode, ao mesmo tempo, detectar a incidência de luz e fornecer um ganho dentro de um único componente.

### 2.7.2 Placas de Peltier

Encontramos hoje pequenos resfriadores (principalmente para automóveis), de pequenas dimensões, que funcionam por um processo conhecido como efeito Peltier. Os “refrigeradores termoelétricos” são bombas de calor de estado sólido usadas para estabilização de temperatura ou para resfriamento, sendo construídos com dispositivos termoelétricos baseados no efeito Peltier, que consiste na produção de um diferencial de temperatura quando uma corrente elétrica é aplicada a uma junção formada por dois materiais diferentes. O físico francês Jean Charles Athanase Peltier, observou, em meados de 1834, que quando uma corrente elétrica passa por uma junção de dois metais diferentes um efeito térmico ocorre, fazendo com que o calor seja transferido de um lado ao outro da junção agindo como uma bomba de calor (SPANHOLI, FOLMER, 2008). Assim um lado da junção esfria e o outro lado aquece.

Os dispositivos de efeito Peltier geralmente usam semicondutores para uma maior densidade de corrente, e assim, de potência. São as chamadas pastilhas termoelétricas compostas de junções geralmente feitas com o material semicondutor feito de telureto de bismuto ( $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ ), (ALVES, 2007).

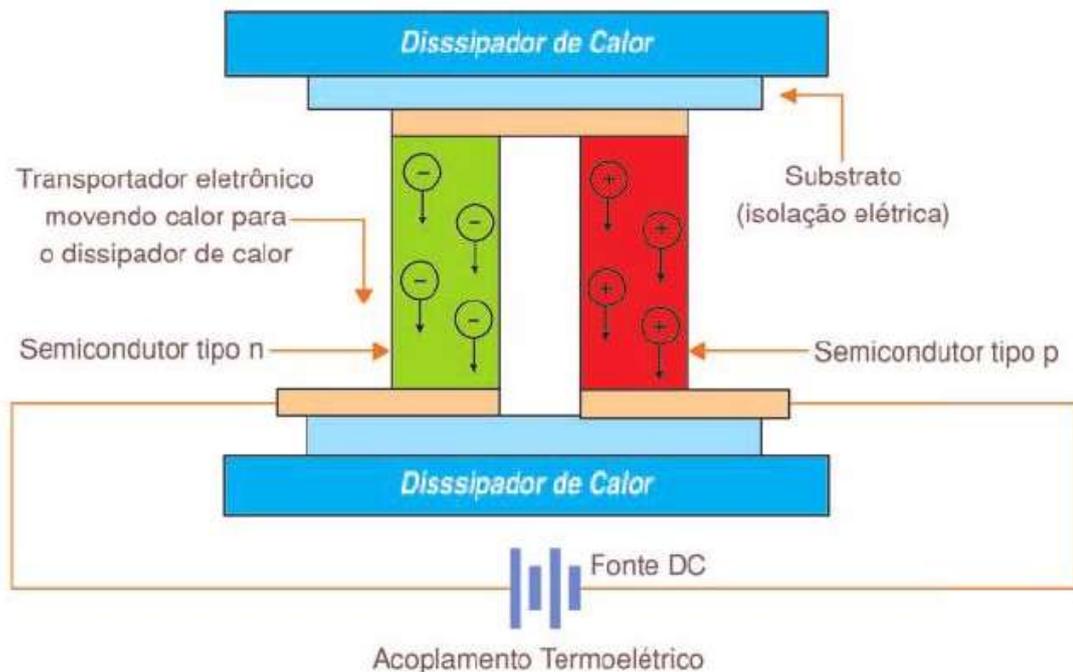
Fonte: <http://www.sabereletronica.com.br>



**Figura 10 - Composição de uma placa de Peltier.**

Uma dos lados é dopado para atuar como um material do tipo p, e o outro lado para atuar como um material do tipo n. Ao se aplicar uma corrente elétrica contínua no terminal de material do tipo n, elétrons migram do material do tipo p para o material do tipo n. Com isso, essas junções irão permitir o fluxo de calor, fazendo com que uma superfície resfria-se, e a outra aqueça, sendo esse calor dissipado.

Fonte: <http://www.sabereletronica.com.br>



**Figura 11 – Montagem e funcionamento de uma célula de Peltier.**

## 2.8 SENSORES DE TEMPERATURA

A temperatura pode ser considerada uma propriedade física que determina a relação de equilíbrio térmico entre dois corpos (MORAN; SHAPIRO, 2008, p.10). A temperatura está diretamente relacionada à energia molecular, ou do estado de agitação da matéria como uma medida da energia cinética de vibração das partículas (FRADEN, 2004, p. 95), assim quanto mais forte for o movimento, maior será a temperatura de cada partícula. A variável temperatura tem importância significativa no controle e monitoramento dos processos e dos materiais. Nesse contexto entra o trabalho dos sensores de temperatura, que tem como função detectar mudanças de temperatura em função de uma alteração de um parâmetro físico monitorado, tais como a resistência ou a tensão de saída.

Existem dois tipos básicos de medição de temperatura que definem os sensores empregados: a medição com contato e sem contato. Os sensores de temperatura para a medição por contato requerem o contato físico direto com o meio ou objeto que está sendo medido. Estes sensores podem ser usados para monitorar a temperatura de sólidos, líquidos ou gases, e podem apresentar variação elétrica ou mecânica em função da variação da temperatura.

Dentre os dispositivos que medem a temperatura, também conhecidos como termômetros, entre os mais utilizados, que utilizam sensores que se baseiam no efeito mecânico em resposta a uma variação de temperatura, destacam-se três tipos:

1. Termômetros bimetalícos: como o nome indica, utilizam dois metais diferentes, ligados em conjunto sob calor e pressão para formar uma única tira de material. A submissão desse sensor a uma dada temperatura causa variações dimensionais diferentes nos metais devido a estes apresentarem coeficientes de dilatação diferentes. O resultado é a observação de deformações mecânicas do conjunto em função da temperatura, que podem ser lidas com o auxílio de uma escala;
2. Termômetros de líquido em vidro (TLVs): utilizam como sensor um bulbo de vidro com uma substância líquida que irá expandir ou contrair no curso de um tubo fino de vidro denominado capilar. O bulbo age como uma espécie de reservatório do líquido termométrico que irá expandir ou contrair em função da temperatura. Geralmente é utilizado como líquido termométrico o mercúrio, ou ainda substâncias orgânicas com corante, como o álcool ou a querosene (LIRA, 2009, p. 179);

3. Termômetros a gás: têm funcionamento baseado na lei dos gases ideais, sendo que para um volume conhecido de gás exposto a uma dada temperatura, apresentará uma pressão desse gás proporcional à temperatura experimentada.

Para os sensores elétricos de temperatura, de contato direto, há a divisão em duas categorias de acordo com o fenômeno: os sensores que apresentam variação da resistência elétrica e os que apresentam mudança de valor de diferença de potencial (ou voltagem), também conhecidos como termopares. Entre os sensores que tem o funcionamento baseado na mudança na resistência elétrica, temos os RTDs (*Resistance Temperature Detectors*), que consistem de um elemento sensor feito com uma bobina de fio ou de película condutora de metal encapsulados em cerâmica ou vidro. Os RTDs são sensores quase lineares e apresentam grande precisão e estabilidade na realização das leituras e do comportamento do sensor com o tempo de uso (baixa deriva). Esses sensores são menos utilizados devido a serem mais caros que outros tipos e à sua fragilidade a choques mecânicos. Geralmente são utilizados por laboratórios, onde são mais adequados.

Outro tipo de sensor baseado na alteração de resistência elétrica são os “termistores” (*thermistors*, em inglês). São construídos com óxidos de metal que são sinterizados em um material de base cerâmica (NEWNES, 2005, p. 534). Há dois tipos: O PTC, com coeficiente de temperatura positivo, ou seja, há o aumento da resistência com o aumento da temperatura, e o NTC, com coeficiente de temperatura negativo, ou seja, há a diminuição da resistência com o aumento da temperatura. A mudança na resistência dos termistores é normalmente grande, proporcionando um elevado grau de sensibilidade.

Os termopares pertencem à classe dos sensores de geração de tensão, e são formados por dois condutores elétricos de metais ou ligas diferentes, unidas na extremidade. Um termopar é um sensor passivo, pois gera tensão em resposta à temperatura, não necessitando de qualquer fonte externa de excitação (FRADEN, 2004, p. 481), e por sua construção, podem suportar temperaturas muito mais elevadas que os outros sensores analisados. O princípio de funcionamento é baseado em um fenômeno termoelétrico conhecido efeito Seebeck, descoberto por Thomas Seebeck em 1821. A diferença de temperatura entre dois pontos de um fio condutor (gradiente de temperatura), resulta em uma diferença de potencial elétrico entre estes dois pontos do material, que é provocada pela diminuição de cargas elétricas em um dos extremos e aumento no outro.

Para a realização de medidas de temperatura com um termopar, é necessário a utilização de duas junções: uma delas inserida no meio ao qual deseja-se realizar a medição da temperatura, e a outra junção irá servir como uma referência de temperatura, sendo que esta junção deverá ser medida por outro sensor de temperatura, como um termistor, ou RTD, ou ainda, poderá ser inserida em um meio com temperatura conhecida, como o chamado “banho de gelo” cujo estado da mistura água e gelo encontra-se próximo a 0°C.

Quando as extremidades são sujeitas a diferentes temperaturas, uma corrente irá fluir nos fios e será proporcional à diferença de temperatura. A Temperatura na junção de medição é determinada pelo conhecimento do tipo de termopar utilizado, os quais apresentam potenciais em milivolts em função da temperatura que está sendo medida, e da temperatura da junta de referência.

A seguir são listados os principais tipos de termopares, com os elementos que os compõem e algumas recomendações:

- 1) Tipo T (cobre-constantan): são resistentes à corrosão em atmosfera úmida.
  - Material do fio positivo: cobre.
  - Material do fio negativo: cobre-níquel.
  - Faixa de medição: -200 °C a 350 °C.
  
- 2) Tipo J (ferro-constantan): adequados no vácuo e em ambiente oxidante ou redutor.
  - Material do fio positivo: ferro.
  - Material do fio negativo: cobre-níquel.
  - Faixa de medição: -40 °C a 750 °C.
  
- 3) Tipo E (cromel-constantan): são recomendados para uso em atmosferas oxidante ou inerte.

É o que desenvolve maior força eletromotriz por grau dos tipos vulgarmente usados.

  - Material do fio positivo: níquel-cromo.
  - Material do fio negativo: cobre-níquel.
  - Faixa de medição: -200 °C a 900 °C.
  
- 4) Tipo K (cromel-alumel): devido à sua resistência à oxidação é frequentemente usado em temperaturas acima de 540 °C.
  - Material do fio positivo: níquel-cromo.
  - Material do fio negativo: níquel-alumínio-mangânês-silício.
  - Faixa de medição: -200 °C a 1200 °C.

- 5) Tipo R: considerado um “termopar nobre” devido aos materiais utilizados, são recomendados para uso contínuo em atmosferas inertes ou oxidante.
- Material do fio positivo: platina (87%) e ródio (13%).
  - Material do fio negativo: platina.
  - Faixa de medição: 0 °C a 1600 °C.
- 6) Tipo B: também considerado um termopar nobre, não deve ser utilizado em atmosferas redutoras.
- Material do fio positivo: platina (70%) e ródio (30%).
  - Material do fio negativo: platina (94%) e ródio (6%).
  - Faixa de medição: 600 °C a 1700 °C.

Para realizar-se medidas de temperatura com o uso de termopares, é importante considerar nas montagens e nas medições, três leis básicas que ocorrem nos fenômenos termoelétricos (FRADEN, 2004, p. 482):

1. Lei do Circuito Homogêneo: Esta lei estabelece que um material não homogêneo é necessário para a circulação de corrente termoelétrica. Se um condutor é homogêneo, independentemente da temperatura submetida e do comprimento deste, a tensão resultante é igual à zero (figura 12). A junção de dois condutores diferentes é condição necessária para a geração de voltagem.

Fonte: FRADEN - *Handbook of modern sensors*

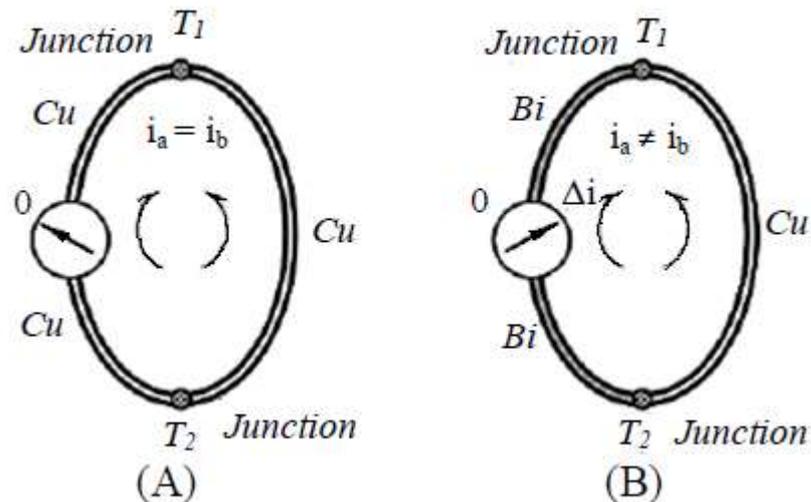


Figura 12 - Representação da lei do circuito homogêneo com: circuito homogêneo (A) e circuito não-homogêneo (B)

2. Lei dos Metais Intermediários: A lei estabelece que um material adicional “C” (figura 13) pode ser inserido em qualquer braço do circuito termoeletrico sem afetar a tensão resultante, com a condição de que suas junções estejam submetidas à mesma temperatura. Não há limitação do número de condutores inseridos, desde que ambos os contatos estejam submetidos à mesma temperatura. Dessa forma as juntas podem ser formadas por torção, fusão ou solda (com a utilização de outro metal em volta da junção), sem afetar a precisão de medição.

Fonte: FRADEN - *Handbook of modern sensors*

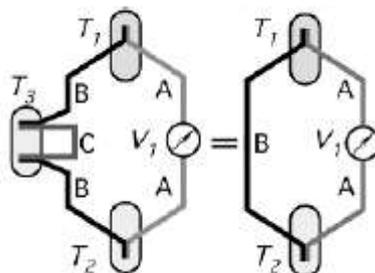
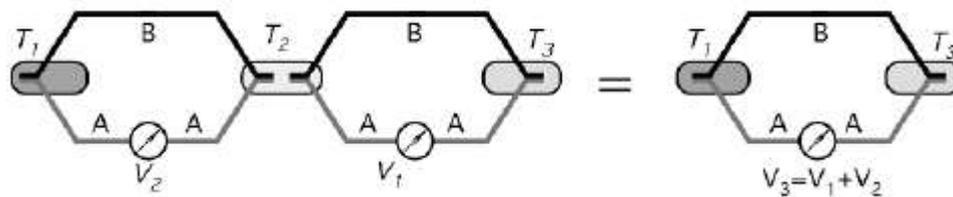


Figura 13 - Representação da lei dos metais intermediários em termopares.

3. Lei das Temperaturas Intermediárias: Se temos duas junções, uma à temperatura  $T_1$  e outra a uma temperatura  $T_2$ , que produzem uma tensão  $V_2$  pelo efeito seebeck, e as temperaturas  $T_2$  e  $T_3$ , que produzem uma tensão  $V_1$ , então as temperaturas  $T_1$  e  $T_3$  produzirão uma tensão equivalente à  $V_3 = V_2 + V_1$  (figura 14).

Fonte: FRADEN - *Handbook of modern sensors*



**Figura 14 - Representação da lei das temperaturas intermediárias em termopares.**

A medição de temperatura sem contato é baseada na interpretação da energia radiante de uma fonte de calor na forma de radiação infravermelha. Esta metodologia de medição é utilizada em sólidos não refletores e líquidos, mas não é eficaz com gases devido à sua transparência. Todos os objetos emitem energia infravermelha desde que a sua temperatura esteja acima do zero absoluto, sendo que há uma correlação direta entre essa energia e sua temperatura (NEWNES, 2005, p. 532), dessa forma, sensores infravermelhos podem ser usados para medir a temperatura.

## 2.9 SISTEMAS DE CONTROLE

O termo “sistema” pode ser definido como a combinação de componentes que agem em conjunto para atingir um determinado objetivo. Os sistemas térmicos são sistemas nos quais estão envolvidos o armazenamento e o fluxo de calor por condução, convecção ou

radiação (OGATA, 1998, p. 03).

Os sistemas funcionam a partir da interação das chamadas “variáveis” ou “sinais”. A variável controlada, ou de saída é a grandeza controlada. A variável de controle é a grandeza modificada pelo controlador, que mudará o valor da variável controlada. As variáveis usadas para descrever o comportamento de um sistema térmico são:

$\theta$  = temperatura [K]

$q$  = fluxo de calor [W]

A modelagem dos sistemas consiste basicamente na transformação da representação física em modelos matemáticos descritos por equações diferenciais ordinárias. Para os principais sistemas (mecânicos, elétricos, fluídicos e térmicos), são considerados os seguintes fenômenos físicos que relacionam as variáveis: a resistência, a capacitância e a inércia (ou indutância). Os sistemas térmicos apresentam apenas a resistência ao fluxo de calor e a capacitância térmica (FELÍCIO, 2010, p. 50).

Há maneiras de fazer com que esses sistemas se comportem de maneira previamente determinada. O controle é então, o ramo do conhecimento que estuda de forma sistemática, a promoção de comportamento desejado de um determinado sistema. Basicamente, há dois tipos de sistemas de controle: sistemas de controle de malha fechada e sistemas de controle de malha aberta.

Os sistemas de controle em malha fechada, também conhecidos como: sistemas de controle de feedback, funcionam basicamente com a alimentação de um circuito fechado com

sinal de erro, que é a diferença entre o sinal de entrada e o sinal de saída (ou uma função desse sinal), de forma a induzir a saída do sistema para um valor adequado para reduzir o erro. Nos sistemas de controle de malha aberta, não há realimentação do sistema com valor de erro, assim este não influi no comportamento do sistema. Os sistemas de controle de malha aberta são programados para um comportamento do sistema, e geralmente esse programa trabalha em função do tempo. Como exemplos de controle de malha aberta, podem ser citados os sistemas de controle de tráfego e os controladores de máquinas de lavar roupas, que trabalham com uma programação em função do tempo, sem uma realimentação do sistema em busca de um resultado esperado.

A precisão dos sistemas de controle de malha aberta, para alcançar um determinado resultado, depende de calibrações periódicas. Esses sistemas apresentam um projeto simples de construção e com baixo custo, apresentando ainda boa estabilidade e facilidade para a realização de manutenção, dessa forma esse tipo de sistema acaba se tornando atrativo para utilização em algumas atividades.

A maioria dos sistemas de controle atuais são realizados por circuitos eletrônicos microprocessados, que seguem uma programação feita para uma finalidade determinada. Isso foi possível com o surgimento do microprocessador em 1971, lançado pela Intel Corporation: o 4004, um microprocessador de 4 bits que tinha internamente o equivalente a 3.000 transistores.

### 2.9.1 Microprocessadores e microcontroladores

O microprocessador é um dispositivo lógico programável que age sob o controle de um programa armazenado em memória, executando operações aritméticas e de lógica, além de possibilitar a comunicação com outros dispositivos (figura 15). Este dispositivo dispõe das seguintes unidades básicas:

- Unidade Lógico-Aritmética (ULA): É a parte do processamento responsável pela realização das operações lógicas e aritméticas;
- Unidade de Controle (UC): Decodifica e executa as instruções, fornecendo ainda sinais de temporização para o processador;
- Registradores: Realiza o armazenamento de dados, endereços e instruções de processamento.

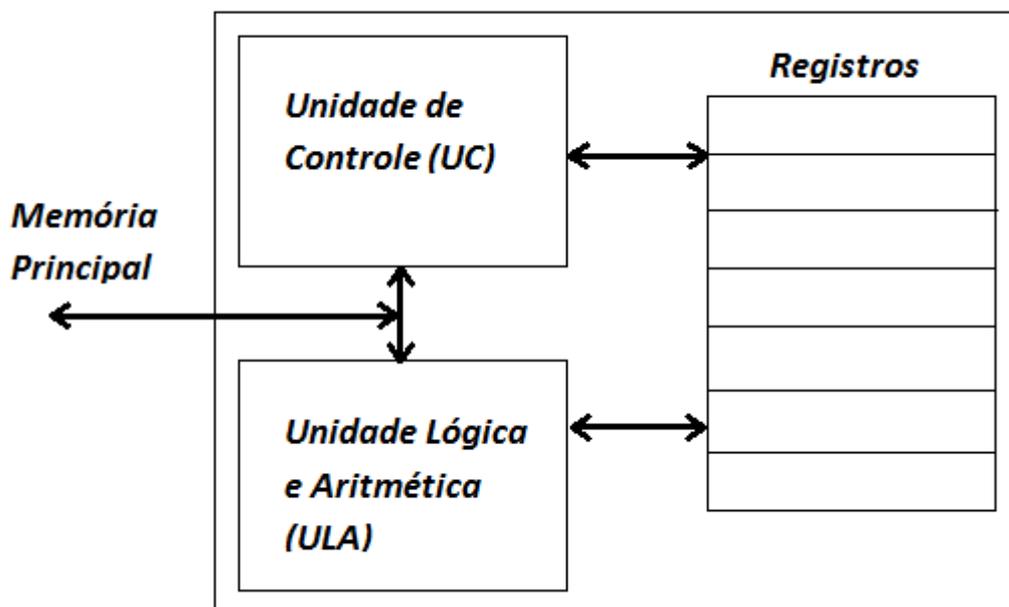


Figura 15 - Unidades internas de um microprocessador.

O programa nada mais é do que o conjunto de instruções organizadas e bem definidas, com o objetivo de informar ao processador qual a tarefa ou função, que ele deverá executar. Os Programas, em geral, são armazenados na memória do sistema. A memória, basicamente, pode ser de dois tipos:

- a) RAM (Random Access Memory): memória volátil, em que desligando o sistema perdem-se os dados. É considerada uma memória de leitura e de escrita;
- b) ROM (Ready Only Memory): memória não-volátil, em que desligando o sistema não perde-se os dados.

Os microcontroladores são dispositivos que dispõem, de forma integrada, de um microprocessador simplificado, um sistema de memória volátil, um sistema de memória não-volátil (para a gravação da programação a ser executada), e sistema de recebimento e envio de dados de outros dispositivos (figura 16). Os microcontroladores, geralmente, são mais atrativos para a utilização em atividades de controle.

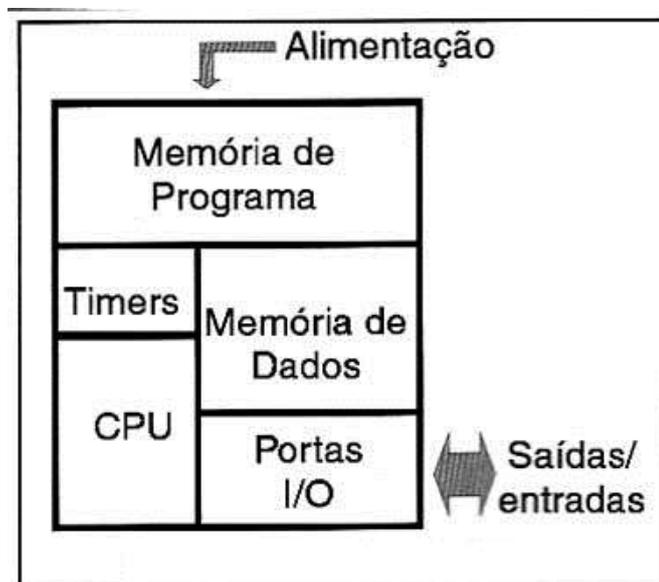


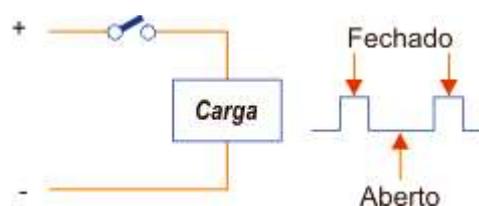
Figura 16 - Unidades internas de um microcontrolador

### 2.9.2 Controlador PWM

O controle de potência fornecida a uma carga, conhecido como “linear”, no qual altera-se a corrente aplicada com a variação da resistência de um potenciômetro ligado a essa carga, apresenta o problema de dissipar uma considerável parte da energia em forma de calor. Logo o sistema de controle começa a solicitar mais potência que o necessário à fonte por dissipar uma parte dessa.

Há outras metodologias que podem ser utilizadas no lugar do controle linear, como é o caso do PWM, que é a abreviação de Pulse Width Modulation (Modulação de Largura de Pulso, em português). Essa tecnologia vem sendo muito usada nas fontes chaveadas de alimentação, que são encontradas nos microcomputadores e carregadores de baterias. Com a variação da largura do pulso de corrente aplicada a uma carga é conseguida a variação da potência fornecida na mesma proporção. Quando não há pulso, o circuito está aberto e não há corrente na carga, nesse caso a potência aplicada é nula. No instante em que o circuito envia um pulso, a carga recebe a tensão total da fonte e a potência aplicada é máxima (figura 17). Geralmente é utilizado como interruptor algum dispositivo de estado sólido como transistores e SCRs (BRAGA, 2005, p.160).

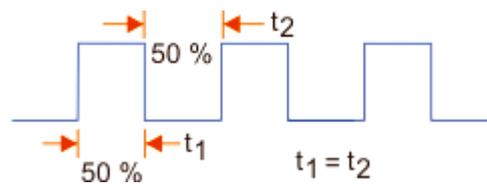
Fonte: <http://www.newtoncbraga.com.br>



**Figura 17 - Representação de funcionamento do circuito PWM.**

Se houver a situação, por exemplo, de que um circuito tenha a chave de controle de alimentação da carga, aberta em 50% do tempo e fechada nos outros 50%, então este circuito, teria em média metade da potência aplicada no tempo considerado, que será proporcional à tensão média aplicada à carga (figura 18).

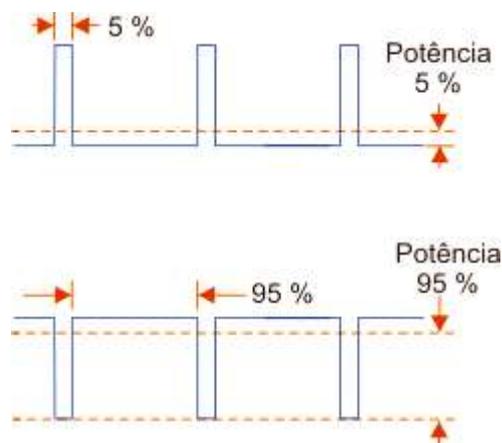
Fonte: <http://www.newtonbraga.com.br>



**Figura 18 - Representação de fornecimento da metade da potência**

Com a variação da tensão média aplicada à carga, proporcionada pela variação da frequência dos pulsos, consegue-se o controle da potência fornecida à carga, variando-se de um pequeno valor percentual até um valor máximo da potência da fonte (figura 19).

Fonte: <http://www.newtonbraga.com.br>



**Figura 19 - Representação da variação da potência fornecida pela largura do pulso**

Com o circuito aberto, não há circulação de corrente, e na condição de fechado, o circuito apresentaria resistência nula, assim não haveria queda de tensão, proporcionando em

ambas as condições que não fosse dissipada potência no controle. Porém na prática, os dispositivos usados precisam de um tempo para mudar de estado, e por isso não são capazes de abrir e fechar o circuito de forma “ideal” (figura 20). Neste intervalo de transição, há tensão e a corrente no controle e, portanto, potência dissipada em forma de calor, porém muito menores quando em comparação ao método de controle linear.

Fonte: <http://www.newtonbraga.com.br>



**Figura 20 - Condição do pulso: Ideal e Real**

### 3. MÉTODOS

Para a realização dos ensaios, usando a metodologia estudada, foram montados os módulos integrantes do dispositivo de medição de umidade (figura 21).

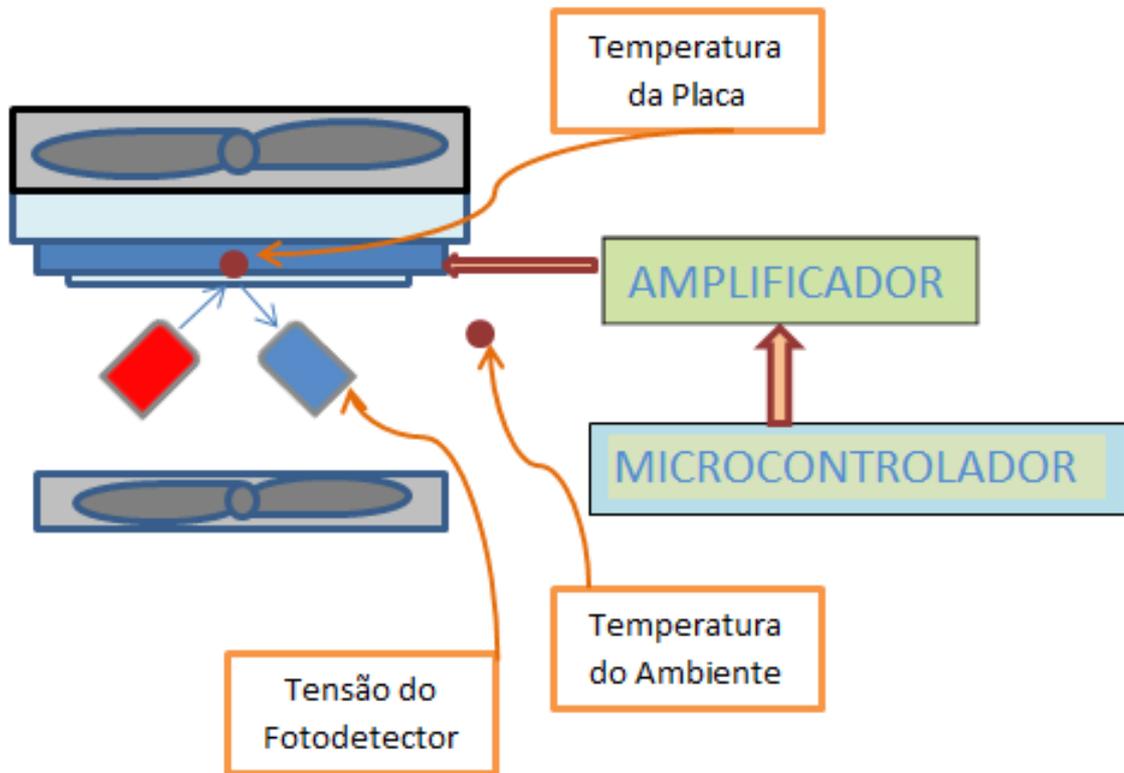


Figura 21 - Esquema de montagem dos módulos do dispositivo de medição

#### 3.1 MATERIAIS UTILIZADOS

A montagem dos módulos do dispositivo de medição de umidade e realização dos ensaios necessitaram da utilização de alguns componentes, peças, instrumentos, e materiais.

Os principais são:

- Placa de Peltier de 71 W;
- LED de luz branca (Ø 5mm);

- Fototransistor para o espectro visível;
- Microcontrolador Atmega 328P;
- Amplificador operacional;
- Transistor de potência TIP41;
- Dissipador de calor de alumínio com ventilação;
- Ventilador para microprocessadores;
- Placa de aço inoxidável polida;
- Multímetro digital;
- Termômetro digital, com sensor termopar ( $r = 0,1 \text{ } ^\circ\text{C}$ );
- Termômetro digital, com sensor RTD ( $r = 0,1 \text{ } ^\circ\text{C}$ );
- Medidores padrões de umidade ( $r = 0,1 \text{ } \%$ );
- Conectores, resistores, capacitores e dispositivos diversos para a montagem.

### **3.2 PROCEDIMENTO**

Inicialmente, foi montado o conjunto para a medição de umidade pelo método estudado, sendo que o elemento sensor, e objeto de principal importância para viabilização do método, era uma placa polida de aço inoxidável (figura 22), que estaria instalada junto ao lado de resfriamento da placa de Peltier, de modo que ao ser resfriada, tornaria evidente em sua superfície, a condensação da água presente no ar, ao atingir a temperatura de ponto de orvalho.



**Figura 22 – Placa polida de aço inoxidável usada como sensor do instrumento**

A escolha de utilizar a placa de aço inoxidável, é devida à necessidade um material que pudesse apresentar um bom índice de reflexão luminosa e ao mesmo tempo ser um bom condutor de calor, de forma a proporcionar agilidade nas trocas térmicas entre os meios em que está inserido, além da necessidade de apresentar resistência química à oxidação, ou qualquer outra alteração de sua superfície que estaria em contato constante com umidade.

No lado que aquece em funcionamento, na placa de Peltier, foi colocado um dissipador de calor (figura 23), que tinha a finalidade de ajudar a transferir o calor retirado do lado de resfriamento. Para melhorar o contato térmico e as trocas térmicas entre o dissipador e o lado de aquecimento da placa de Peltier e entre placa de aço e o lado de resfriamento da placa de Peltier, foi utilizada pasta térmica, tipicamente utilizada na montagem de dissipadores de calor em processadores de computador.



**Figura 23 – Montagem do dissipador de calor na placa de Peltier.**

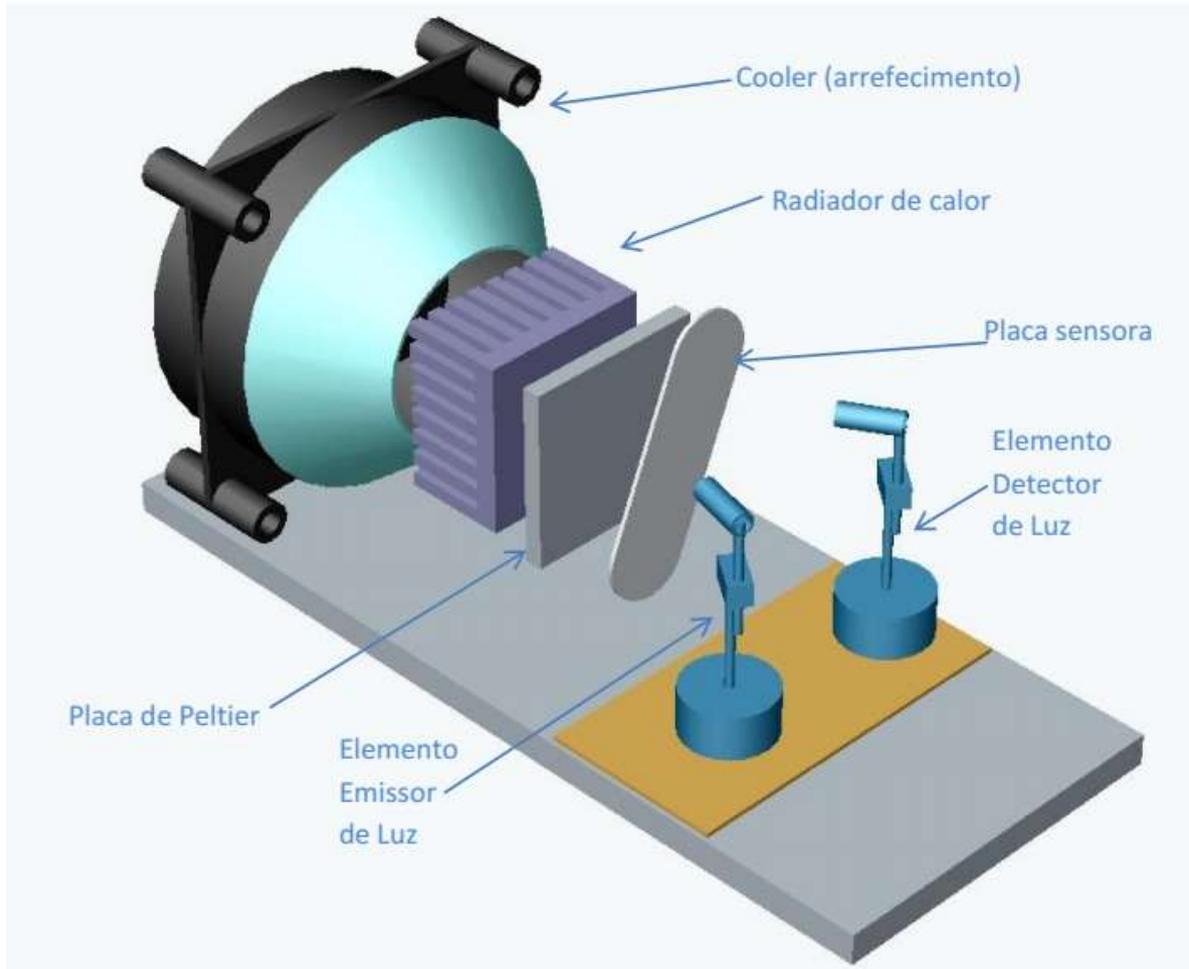
O conjunto foi completado com um cooler, desses utilizados como exaustor de calor em fontes de computador. Ele foi acoplado, através de um dispositivo, junto ao dissipador de calor colocado na placa de Peltier (figura 24), com a finalidade de aumentar a circulação de ar por este dissipador, promovendo uma melhora na troca de calor entre esse dissipador e o ar do ambiente.



**Figura 24 – Montagem do conjunto com cooler para o dissipador de calor.**

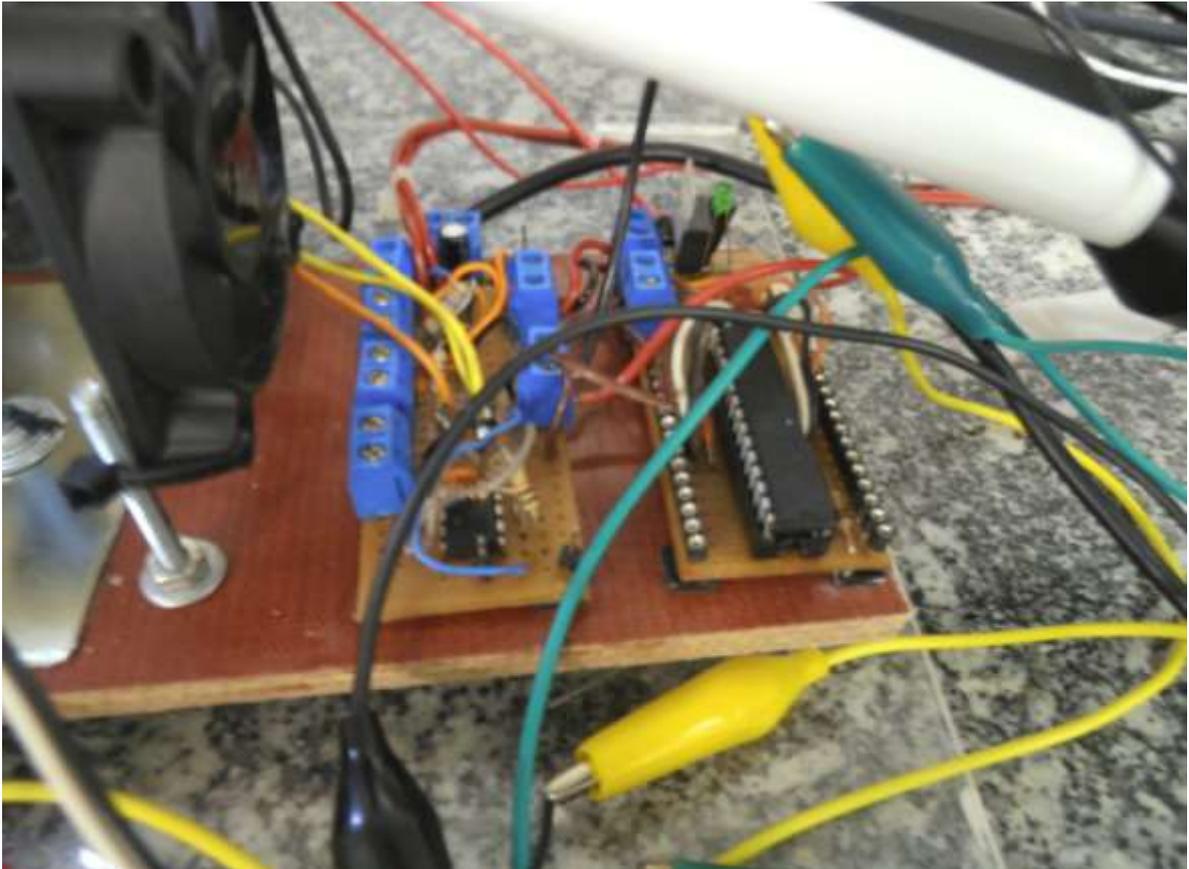
Após a montagem do conjunto, foram montados o dispositivo emissor e o dispositivo detector de luz, respectivamente, utilizando o de luz branca como emissor de luz e o fototransistor como elemento para a detecção dessa luz. O LED foi montado em um dispositivo cônico, com a finalidade de ajudar a manter o foco de luz em um ponto específico da placa refletora. O fototransistor também foi montado em um dispositivo cônico, de acrílico, com elemento de reflexão em suas paredes, com a finalidade de concentrar a luminosidade recebida na placa, no fototransistor. Tanto o dispositivo emissor de luz, tanto o detector, foram alimentados com uma fonte de 12 V, sendo então montados circuitos compostos por resistores para a adequação dessa tensão fornecida pela fonte, para a tensão de trabalho requerida para estes componentes.

Foi montado o conjunto principal do aparato para a realização dos ensaios, composto pela placa usada como elemento sensor com o subconjunto responsável pelo seu resfriamento, os dispositivos emissor e detector de luz montados de forma a iluminar e detectar a luminosidade refletida de um ponto da placa sensora, e um termômetro digital medindo a temperatura da placa sensora. O conjunto deveria ser montado seguindo a ordem de composição dos elementos principais como ilustrado no desenho de vista explodida (figura 25).



**Figura 25 - Vista explodida do conjunto principal do dispositivo**

Mais dois elementos foram adicionados ao conjunto de medição: um cooler (ventoinha), para insuflar ar diretamente para a placa sensora e os circuitos de controle e alimentação da placa de Peltier (figura 26). O cooler para insuflar ar foi colocado para poder ser realizados os ensaios simulando a situação de circulação de ar. Foi adicionada ao circuito uma chave de energia para o controle do funcionamento desse cooler, promovendo ou cessando a ventilação forçada.

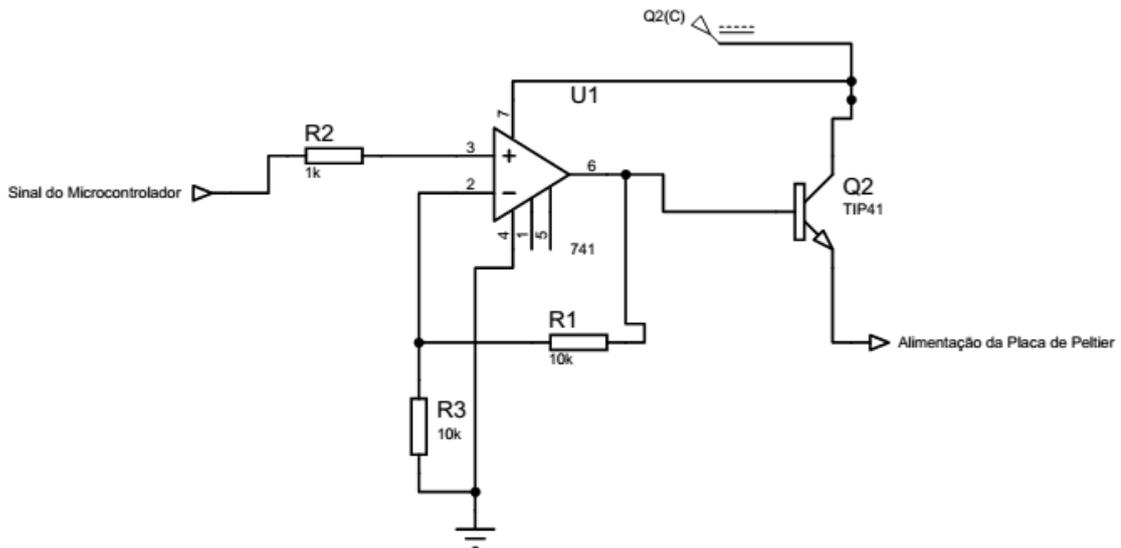


**Figura 26 - Detalhe do insuflador de ar para a placa e circuito de controle**

O controle de alimentação da placa de Peltier seria promovido por um microcontrolador programável. No caso foi optado pelo Atmega328P montado em uma placa padronizada e programado para gerar uma função do tipo rampa, promovendo variação de tensão de saída de um valor próximo a zero até o valor máximo de saída que este circuito poderia promover (no caso 5 V). A razão para esta variação ascendente de tensão seria a promoção de um resfriamento lento e controlado em função do tempo pela placa de Peltier, que resultaria em confiabilidade na leitura dos valores dos ensaios. O microcontrolador empregado trabalha com tensão máxima de 5,5 V e para promover um fornecimento confiável de energia para o componente, foi optado pela utilização de um regulador de tensão para saída de 5 V, já que seria utilizada uma fonte de tensão aproximada de 12 V para alimentação de todo o sistema. Juntamente com o regulador foi ligado em paralelo um capacitor de 10  $\mu\text{F}$

para agir como um filtro para possíveis flutuações promovidas pela fonte.

Como a corrente de trabalho do microcontrolador é limitada, bem menor do que a corrente que a placa de Peltier necessita para trabalhar, foi necessária a utilização de um circuito para interagir entre o sinal de saída enviado pelo microcontrolador e a alimentação da placa de Peltier. O modelo do circuito (figura 27), consta basicamente, de um amplificador operacional e um transistor de potência. O amplificador operacional teria a função de amplificar proporcionalmente o sinal de tensão gerado pelo microcontrolador, de forma que seu sinal máximo de saída (aproximadamente 5 V), seria amplificado para o valor máximo da alimentação fornecida para a placa de Peltier (aproximadamente 12 V, no caso).



**Figura 27 - Esquema do circuito amplificador da placa de Peltier**

Após o conjunto estar montado, o sistema foi colocado em funcionamento, com a utilização de uma fonte de energia de 12 V e 300 mA, sendo monitorada com um voltímetro a tensão aplicada na placa de Peltier. Foi observado que todo o sistema entrou em funcionamento, porém verificou-se que a tensão máxima alcançada pela placa de Peltier não

chegava a 5 V, e houve um grande aquecimento do transistor do circuito amplificador. Foi optado pela utilização de uma fonte chaveada de 12 V e 1 A, sendo observada uma pequena melhora, e posteriormente por uma fonte chaveada de 15 V e 3 A.

Uma das medidas adotadas para minimizar os efeitos de aquecimento do transistor foi a utilização de um dissipador de calor de alumínio. Outra medida foi o abandono da estratégia de variação da tensão fornecida à placa de Peltier, como forma de controle de resfriamento desta no decorrer do tempo, para a utilização do conceito de controle por Modulação de Largura de Pulso (PWM, em inglês), que proporcionaria a variação de energia fornecida para a placa no decorrer do tempo, com pulsos de tensão nominal fornecida pela fonte. A placa só receberia a potência nominal da fonte, ou seja, 100%, após 16 segundos do início da operação. Até atingir o tempo final, o sistema de controle iria aumentar gradativamente o valor inicial, com valor aproximado de 10% da energia disponível.

Comprovado o funcionamento do aparato, parte-se para a preparação do ambiente ao qual este ficará acondicionado e que também será o objeto de medição do equipamento. Tal ambiente ficou restrito ao volume aproximado de 30 ℓ proporcionado por uma caixa de acrílico (figura 28). Inicialmente foram colocados desecantes, que são substâncias capazes de absorver a umidade presente no ar, com a finalidade de baixar a umidade inicialmente presente na atmosfera interna da caixa.



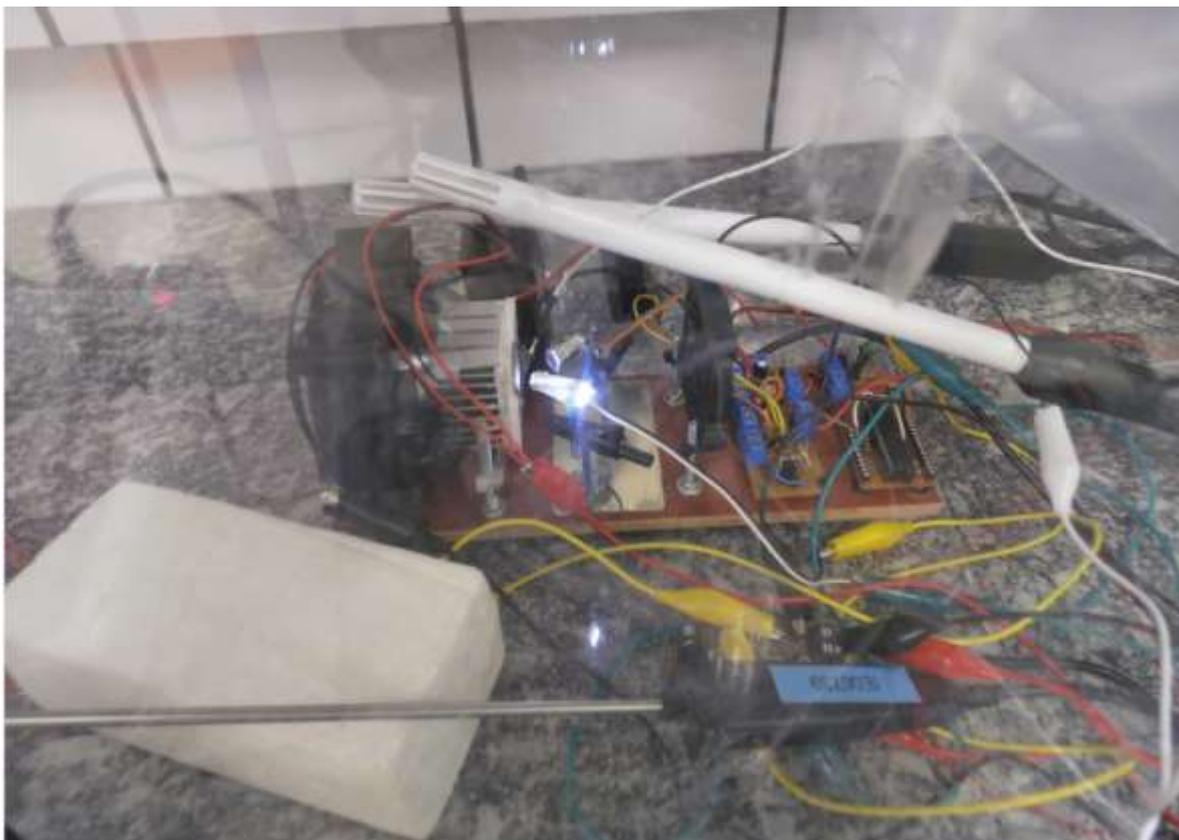
**Figura 28 - Caixa de acrílico utilizada nos ensaios**

Foi fixado junto à placa sensora do dispositivo, um sensor de temperatura termopar do tipo “k”, para a leitura da temperatura da placa durante todo o processo. O sensor termopar, juntamente ao módulo digital de leitura de temperatura (figura 29), foram devidamente calibrados em comparação a um padrão de melhor resolução e com valores de medição rastreados aos padrões internacionais. Os valores de erros e incertezas serão considerados nos cálculos envolvidos no processo de medição.



**Figura 29 - Termômetro digital e sensor termopar da placa**

Todo o aparato foi montado para a realização dos ensaios, com a alocação do dispositivo montado para o ensaio do ponto de orvalho na caixa de acrílico, juntamente com um sensor de temperatura para a medição da temperatura do ar ambiente (que entra como uma das principais variáveis para o cálculo da umidade do ar), e mais dois sensores de umidade (figura 30). Todos esses instrumentos encontravam-se devidamente calibrados, e os valores de erros e incertezas desses instrumentos, apontados em seus respectivos certificados de calibração, serão oportunamente considerados nos cálculos envolvidos no processo de medição.



**Figura 30 - Montagem do conjunto para realização dos ensaios**

O sensor de temperatura ambiente utilizado foi um RTD de platina de  $100 \Omega$  (Pt-100), e os sensores de umidade empregados foram do tipo capacitivo. A resolução dos dois higrômetros utilizados para a comparação com o dispositivo era de 0,1 %, sendo que os higrômetros exibiam os resultados na condição de umidade relativa, e a resolução dos dois termômetros envolvidos no processo era de  $0,1 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Foi utilizado um multímetro analógico para indicar variação de tensão aplicada à placa de Peltier, e ainda um multímetro digital para realizar as medidas de queda de voltagem entre os terminais do fotodetector (no caso um fototransistor), tendo ainda a finalidade de detectar o início do ponto de orvalho na placa sensora. Os instrumentos ficaram lado-a-lado (figura 31), sendo ainda utilizado um cronômetro digital com a finalidade de orientação do instante de tempo de ocorrência de mudança dos valores observados.



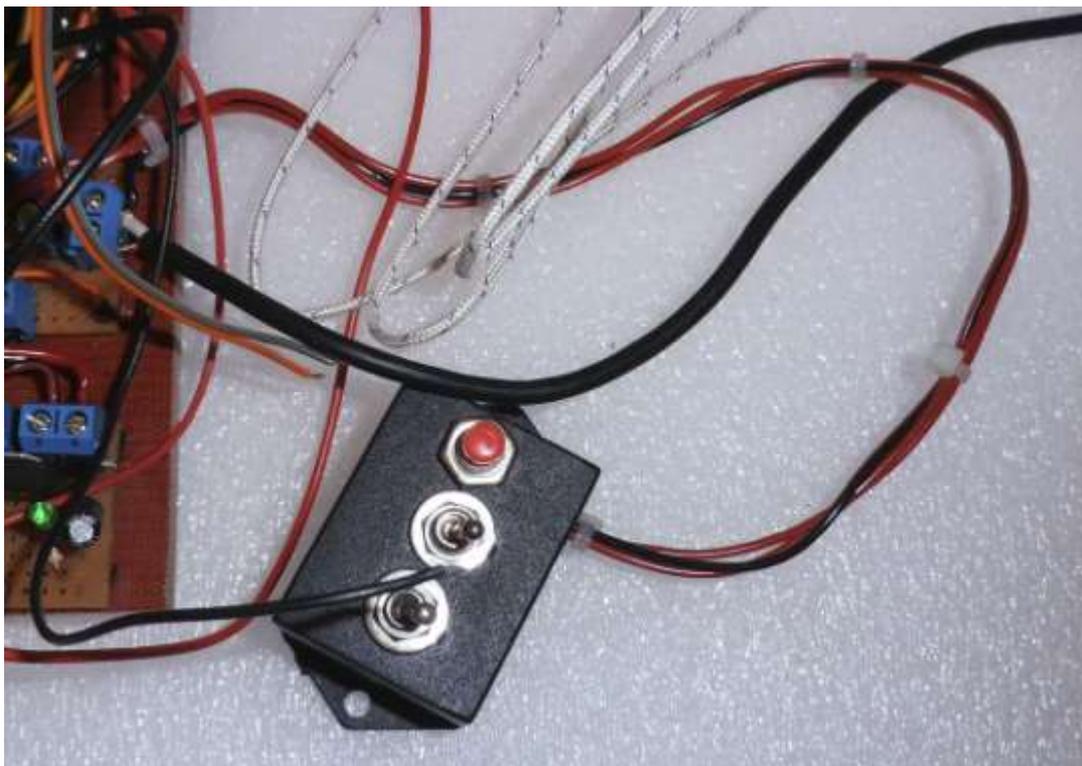
**Figura 31 - Instrumentação empregada nos ensaios**

O sistema de medição e os instrumentos foram montados em uma bancada de granito com paredes (em forma de capela), com acesso único frontal (figura 32), de forma a evitar assim possíveis circulações de ar que poderiam dificultar os ensaios. Apresentava ainda considerável robustez, que ajudaria a evitar a influência de alguma vibração e outras perturbações mecânicas na realização dos ensaios.



**Figura 32 - Disposição do conjunto e instrumentos na capela de laboratório**

Com o conjunto montado, o sistema foi colocado em funcionamento, com a alimentação dos sistemas envolvidos através da fonte chaveada. Foi montada, junto aos circuitos do dispositivo de medição de umidade, uma pequena unidade cabeada para realizar o comando do sistema (figura 33), com o objetivo de acionamento do dispositivo à distância do ambiente em que ele estaria confinado. Tal unidade dispunha de uma chave para ligar o sistema, que acionaria os circuitos de controle e alimentação da placa de Peltier, bem como seu sistema de exaustão de calor, exercido por um cooler. Ainda encontrava-se na unidade, uma chave para ligar ou desligar o sistema de ventilação forçada, que seria utilizado somente em alguns ensaios, além de uma chave do tipo “normalmente fechada” para reiniciar o sistema.



**Figura 33 - Unidade de chaves de comando do sistema**

Para a detecção do momento de condensação de água na superfície sensora (ponto de orvalho), foi montado o dispositivo para emitir um ponto luminoso através de um LED de alta intensidade luminosa. Foi optado pela utilização de LED de alta intensidade para proporcionar um maior fluxo luminoso, a fim de evitar que a interferência da iluminação externa no fotodetector pudesse influir nos resultados dos ensaios. A detecção seria feita por um dispositivo próximo ao emissor, que utilizaria para isso, um fototransistor direcionado ao feixe de luz refletido. O conjunto emissor-detector de luz (figura 34) ficaria posicionado de forma que seu dispositivo emissor pudesse direcionar e concentrar um feixe de luz na placa sensora, e esta refletisse esse feixe diretamente ao dispositivo detector de luz, que já estaria posicionado para somente captar esse feixe refletido.



**Figura 34 - Montagem dos dispositivos de emissão e detecção de luz**

A placa sensora reflete a luz incidida em sua superfície como um espelho (figura 35). Mas quando essa placa sensora é resfriada pela placa de Peltier, até o ponto de orvalho, ela apresenta condensação de água em sua superfície (figura 36). A superfície ficaria então embaçada, ocasionando uma atenuação na reflexão luminosa desta placa sensora. O fenômeno da condensação dessa umidade presente no ar seria então observado pela variação de tensão nos terminais do fototransistor. Disso poderia ser concluído que a temperatura apresentada pelo termômetro na placa sensora corresponderia à temperatura do ponto de orvalho do ar para aquela condição ambiental.



**Figura 35 - Detalhe da placa refletora no estado "normal" de reflexão**



**Figura 36 - Detalhe da placa refletora após condensação em sua superfície**

Após o início do resfriamento da placa, foram monitorados os valores da tensão nos terminais do fototransistor, até que houvesse alguma mudança significativa desses valores, indicando condensação de água na placa (figura 37). A temperatura correspondente na placa sensora seria registrada, juntamente com as condições ambientais de temperatura e umidade relativa do ar, verificados nos padrões que acompanhavam os ensaios junto ao processo de medição. Os valores obtidos de temperatura da placa e temperatura do ar foram corrigidos e utilizados para o cálculo da umidade relativa experimental.

Inicialmente o ar do meio estava menos úmido pela utilização de dessecante, porém foi proporcionado um aumento proposital dessa umidade relativa, para que fosse realizado o ensaio para outras faixas de medição de umidade relativa. Foram realizadas ao todo cinco medições para cada faixa com ventilação forçada e cinco medições sem ventilação forçada.

Os valores experimentais de umidades relativas foram calculados com os valores obtidos nos ensaios, e comparados aos valores corrigidos dos padrões de umidade relativa, encontrando-se assim, os erros e discrepâncias para as medidas realizadas. Posteriormente com os resultados obtidos, foi calculada a incerteza de medição relativa ao processo.

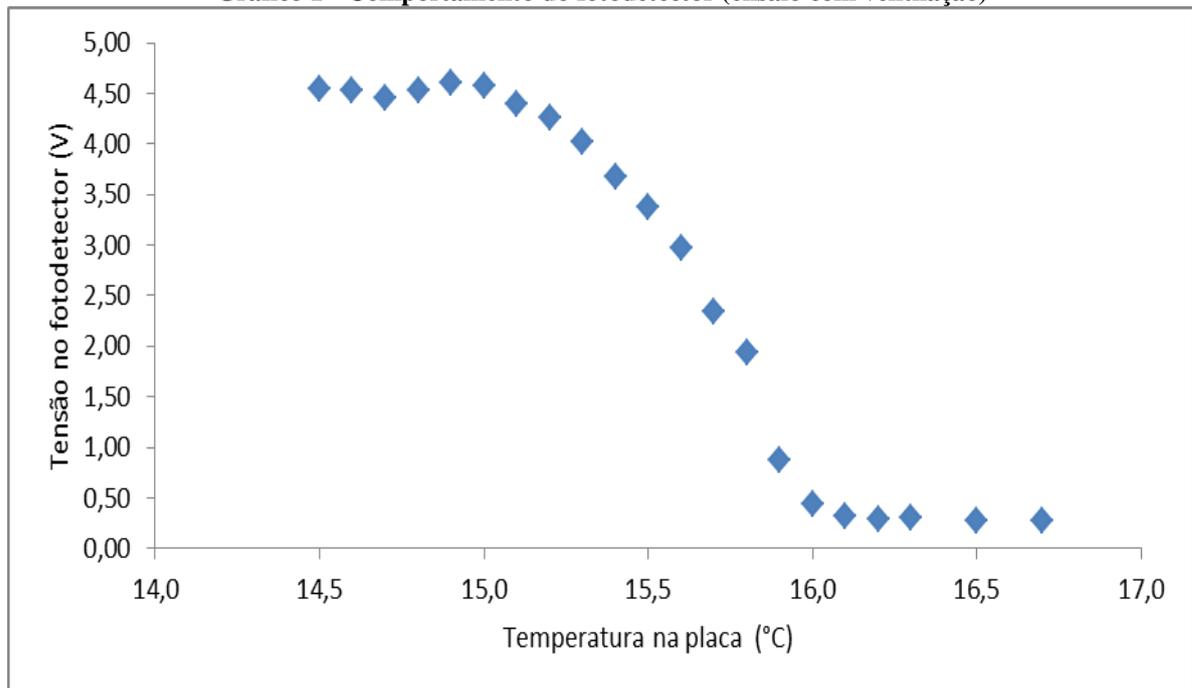


**Figura 37 - Conjunto emissor-detector de luz durante embaçamento da placa**

#### **4. RESULTADOS E DISCUSSÕES**

Inicialmente foram realizados ensaios para verificar o comportamento do sistema ótico do sistema durante a transição de um índice inicial de refletância da placa, para uma rápida atenuação dessa refletância provocada pelo fenômeno do ponto de orvalho. Os ensaios de medição utilizando a metodologia do ponto de orvalho foram divididos em duas categorias principais de teste: o ensaio com uso de ventilação forçada, com um pequeno ventilador insuflando ar diretamente na placa sensora (placa espelhada), e o ensaio com as medições sem o uso dessa ventilação forçada (ventilador frontal inoperante). Foi então verificado o comportamento do fotodetector durante o resfriamento da placa, com a utilização de ventilação forçada (gráfico 1).

Gráfico 1 - Comportamento do fotodetector (ensaio com ventilação)



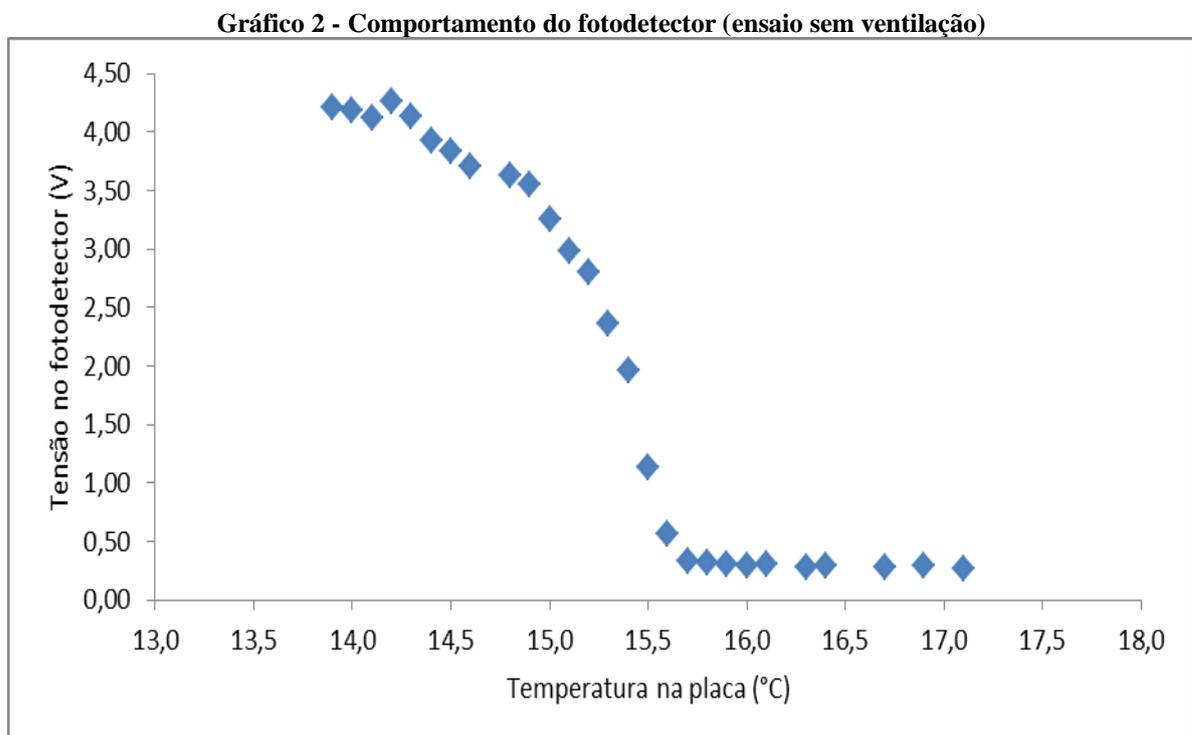
As condições ambientais quando foi realizada o ensaio apresentavam os seguintes valores para o ar: 72,2 % de umidade relativa e 20,4 °C de temperatura. Esses valores apresentados levaram em consideração os valores de erros dos padrões envolvidos para a faixa utilizada, e suas respectivas correções.

Pode ser observado pelo gráfico, que inicialmente, sem o resfriamento da placa, o fotodetector mantém certa estabilidade, apresentando apenas pequenas oscilações, na tensão que apresenta em seus terminais, devido à luminosidade que recebe do LED refletida pela placa espelhada. Ao passo que essa placa é resfriada pelo elemento Peltier, a condição inicial permanece a mesma, até que seja atingida a temperatura de início do ponto de orvalho, que resultará no “embaçamento” da placa espelhada por conta da água de condensação do ar que se forma em sua superfície, resultando em uma grande atenuação da refletância promovida pela placa espelhada.

A atenuação da refletância pode ser observada no gráfico pelo rápido aumento de tensão nos terminais do fotodetector, que aumenta até um determinado patamar (no caso do ensaio, aproximadamente 4,5 V), onde mesmo com a continuidade de resfriamento da placa, não são observados notáveis mudanças de tensão.

Verifica-se, pelo gráfico, que esta atenuação da refletância pode ser bem detectável devido à rápida transição de tensão no detector, que ao indicar esse estado de mudança, está indicando o início do fenômeno de ponto de orvalho, bastando observar a temperatura da placa no momento da mudança, que será a temperatura de ponto de orvalho, já que foi a temperatura promovedora da mudança de estado.

A seguir foi repetido o ensaio, porém sem a utilização de ventilação forçada, com o devido registro da variação da temperatura na placa sensora e os valores de tensão observados nos terminais do fotodetector (gráfico 2).



Para essa etapa do ensaio, verificamos que as condições ambientais apresentavam os seguintes valores para o ar: 71,8 % de umidade relativa e 20,4 °C de temperatura. Lembrando que os valores apresentados levaram em consideração os valores de erros dos padrões envolvidos para a faixa utilizada, e suas respectivas correções.

Pode ser observado pelo gráfico, que o comportamento da curva é muito parecido com o apresentado no gráfico 1, com a apresentação de pequenas oscilações na tensão do fotodetector com a luminosidade recebida do LED refletida pela placa espelhada, mantida com o resfriamento da placa, até o “embaçamento” desta por conta do fenômeno do ponto de orvalho, onde observa-se a grande atenuação da refletância promovida pela placa espelhada, com o rápido aumento de tensão nos terminais do fotodetector, que aumenta até um determinado patamar (no caso do ensaio, aproximadamente 4,5 V).

Observando os dois gráficos, verifica-se que o início do fenômeno de ponto de orvalho pode ser detectável pela rápida transição de tensão no detector, indicando a atenuação da refletância da placa. A temperatura da placa, neste ponto, será então igual à temperatura de ponto de orvalho, bastando então monitorar a temperatura da placa e os valores do detector, que indicará o início do fenômeno.

#### **4.1 CÁLCULO DOS ERROS E INCERTEZAS**

Os ensaios foram realizados para uma dada faixa de umidade relativa, sendo registrados os valores de temperaturas (do ar e da placa resfriada), e a respectiva tensão encontrada nos terminais do fototransistor no momento de leitura, em tabelas organizadas em função de cada faixa de umidade medida e tipo de ensaio realizado.

Foram calculados os valores de  $e_s$ , que corresponde à pressão de vapor saturado, usando a relação encontrada em *A guide to the measurement of humidity* (NPL, 1996, p. 53), chamada de *Magnus formula* :

$$\ln e_w(t) = \ln 611,2 + \frac{17,62 \cdot t}{243,12 + t}$$

Onde,  $t$  é a temperatura dada em graus Celsius ( $^{\circ}\text{C}$ ). O valor de  $e_w = e_s$ , e é dado em pascals (Pa).

Encontram-se também, nas tabelas, os valores calculados da pressão de vapor atual do ar  $e_a$ , encontrado pelo cálculo do vapor de saturação da temperatura de ponto de orvalho. A umidade relativa (UR) foi calculada para cada uma das leituras tabeladas, pela seguinte relação:

$$UR = \frac{e_a}{e_s} \times 100\%$$

Foi calculado o erro de medição para os valores de umidade relativa encontrados pelo método ensaiado (constante nas tabelas), pela comparação com os valores encontrados nos padrões de umidade que acompanhavam o processo, com a seguinte relação:

$$\text{Erro} = \text{Valor medido} - \text{Valor de referência (Padrão)}$$

No caso, como os valores comparados são dados em porcentagem, o erro tem como valor absoluto um número dado em %.

Para a análise dos dados obtidos pelos ensaios, foram consideradas as incertezas envolvidas na metodologia de medição e no processo de comparação. Para tanto foram calculadas as incertezas de medição ( $U_U$ ), relativas ao método utilizado para a medição de umidade, através da composição das incertezas dos instrumentos envolvidos, pela seguinte fórmula:

$$U_U = k \times \sqrt{(c_{tp} \times u_{tp})^2 + (c_{ta} \times u_{ta})^2}$$

O valor da incerteza do termômetro usado para a leitura da temperatura do ar do ambiente ( $u_{ta}$ ), foi composta pelas incertezas de leitura (tipo B) e a constante em seu certificado de calibração (tipo A). Para a incerteza de leitura, como se tratava de um instrumento digital, foi considerado o valor de sua resolução dividido por  $\sqrt{2}$ , considerando uma distribuição retangular para a medida. O valor da incerteza ficou então:

$$u_{ta} = \sqrt{\left(\frac{0,1}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{0,14}{2}\right)^2}$$

Para a composição da incerteza do termômetro usado para a leitura da temperatura da placa, que seria a mesma que a temperatura de ponto de orvalho do ar ( $u_{tp}$ ), foi considerada a incerteza de leitura (tipo B), e a constante em seu certificado de calibração (tipo A). Como foi usado um termômetro digital, foi considerado o valor de sua resolução dividido por  $\sqrt{2}$ , considerando uma distribuição retangular para a medida. O valor da incerteza ficou então:

$$u_{tp} = \sqrt{\left(\frac{0,1}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{0,16}{2}\right)^2}$$

Na fórmula para o cálculo da incerteza, aparecem os seguintes coeficientes:  $c_{ta}$  e  $c_{tp}$ , sendo estes chamados coeficientes de sensibilidade da incerteza da temperatura do ar do ambiente e da temperatura da placa (ponto de orvalho), respectivamente. Os valores para esses coeficientes são achados em decorrência dos valores das variáveis envolvidas em um determinado ponto de medição quando aplicadas nas equações vindas das respectivas derivadas parciais em relação a cada variável analisada. Assim a fórmula para o cálculo de  $c_{ta}$  é achada derivando-se a fórmula geral para o cálculo da umidade relativa (UR), em relação a variável  $t_a$ , e para  $c_{tp}$  deriva-se a fórmula geral em relação à  $t_p$ . Daí temos:

$$\frac{\partial}{\partial t_a} \left( \frac{611,2 \exp\left(\frac{17,62t_p}{243,12 + t_p}\right)}{611,2 \exp\left(\frac{17,62t_a}{243,12 + t_a}\right)} \right) = \left( - \frac{4283,77 \times \exp\left(\frac{17,62t_p}{243,12 + t_p} - \frac{17,62t_a}{243,12 + t_a}\right)}{(243,12 + t_a)^2} \right)$$

$$\frac{\partial}{\partial t_p} \left( \frac{611,2 \exp\left(\frac{17,62t_p}{243,12 + t_p}\right)}{611,2 \exp\left(\frac{17,62t_a}{243,12 + t_a}\right)} \right) = \left( \frac{4283,77 \times \exp\left(\frac{17,62t_p}{243,12 + t_p} - \frac{17,62t_a}{243,12 + t_a}\right)}{(243,12 + t_p)^2} \right)$$

Para essa medição é considerado o fator de abrangência,  $k = 2$ , que corresponde ao fator multiplicativo para adequar a incerteza da medida para um intervalo de confiança, com aproximadamente 95% de probabilidade.

Foram consideradas, para a comparação dos valores obtidos no método de medição, as incertezas envolvidas na leitura dos padrões de umidade usados nos ensaios. A incerteza foi composta pelas contribuições da incerteza envolvida na leitura e da incerteza declarada em seus certificados de calibrações. O processo seguiu a mesma metodologia utilizada nos termômetros envolvidos no processo (já que os padrões utilizados, também eram instrumentos digitais). A maior incerteza declarada em seus respectivos certificados foi de 1,9 %, logo o cálculo da incerteza ficou:

$$U_H = 2 \times \sqrt{\left(\frac{0,1}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{1,9}{2}\right)^2}$$

## **4.2 ENSAIO COM VENTILAÇÃO**

Inicialmente foram realizados os ensaios de medições divididos em faixas de umidade relativa do ambiente controlado, utilizado no teste, com a utilização ainda de insuflação de ar direto à placa sensora do dispositivo montado para medição de umidade. Os resultados foram tabelados com cinco medidas realizadas para cada faixa de umidade (tabela 1).

**Tabela 1 - Ensaio com ventilação - 1ª faixa**

Comparação de Medição de Umidade entre Valores do Método e Padrões							
Faixa de Medição:		52,6 à 53,6%		Tipo:		Com Ventilação	
Medidas		1	2	3	4	5	Unid
Valores de Leitura	Padrão A	53,4	53,4	52,6	53,1	53,1	%
	Padrão B	53,6	53,5	52,8	53,4	53,4	%
	Temp. amb	25,8	25,8	25,7	25,8	25,9	°C
	V min(off)	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	V
	V max(off)	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	V
	V leitura	0,37	0,41	0,41	0,41	0,38	V
	Temp. placa	17,2	17,3	16,9	16,6	17,3	°C
Valores de Erro	Padrão A	-0,7	-0,7	-0,7	-0,7	-0,7	%
	Padrão B	-0,7	-0,7	-0,7	-0,7	-0,7	%
	T Amb	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	°C
	T placa	0,1	0,1	0,2	0,2	0,1	°C
Valores Corrigidos	Padrão A	54,1	54,1	53,3	53,8	53,8	%
	Padrão B	54,3	54,2	53,5	54,1	54,1	%
	T amb	25,8	25,8	25,7	25,8	25,9	°C
	T placa	17,1	17,2	16,7	16,4	17,2	°C
Cálculo UR	ea (T placa)	1945,547	1957,889	1896,859	1861,048	1957,889	Pa
	es (T amb)	3313,88	3313,88	3294,301	3313,88	3333,561	Pa
	UR (%)	58,70903	59,08147	57,58001	56,1592	58,73267	%
Incerteza dos Padrões		1,91	1,91	1,91	1,91	1,91	%
Erro (comp. padrão A)		4,609033	4,981474	4,280009	2,3592	4,932667	%
Erro (comp. padrão B)		4,409033	4,881474	4,080009	2,0592	4,632667	%
Média - Erro (p. A)		4,232477	Média Geral			Desvio	
Média - Erro (p. B)		4,012477	4,12247659			1,051051377	

Pode ser observado na tabela, que os valores de tensão encontrados nos terminais do fotodetector, foram da ordem de 0,4 volts (aproximadamente), que correspondia ao valor da rápida transição de atenuação de reflexão causada pela formação de água de condensação na placa (embaçamento), causado por sua vez, pelo fenômeno de ponto de orvalho devido ao

resfriamento da placa. Foram registados também, os valores de tensão nos terminais do fotodetector na condição de refletância normal, ou seja, fora da temperatura de ponto de orvalho, com valores mínimos -  $V_{\min}(\text{off})$ , e máximos -  $V_{\max}(\text{off})$ .

Com os valores corrigidos de temperatura da placa ( $T_{\text{placa}}$ , em  $^{\circ}\text{C}$ ), obtidos no início do ponto de orvalho, foram calculadas as pressões parciais nas condições em que se encontrava o ar naqueles instantes –  $e_a$  (Pa). As pressões parciais de saturação –  $e_s$  (Pa), foram calculadas com os valores corrigidos de temperatura do ar ( $T_{\text{amb}}$ , em  $^{\circ}\text{C}$ ). Com esses valores foram calculadas os respectivos valores de umidade relativa para cada ponto ensaiado.

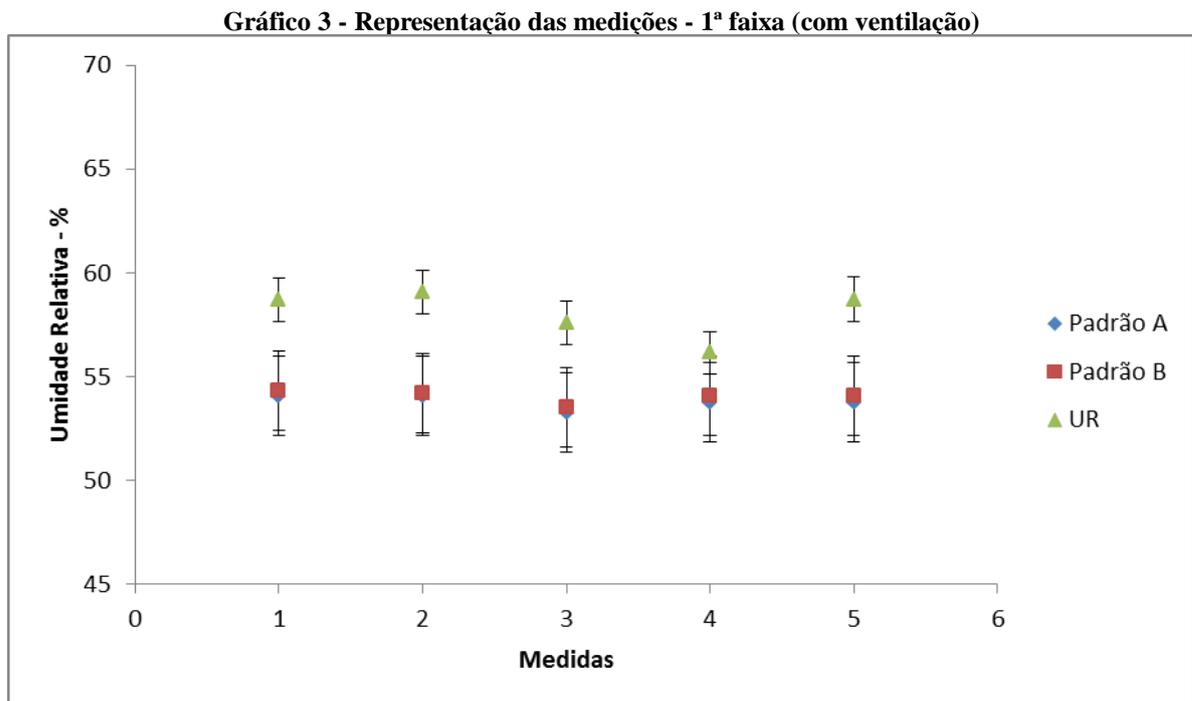
É observado que o erro de medição, quando comparado aos valores corrigidos apresentados pelos padrões, teve valor médio (considerando os dois padrões), em 4,1 %, com desvio-padrão de 1,1 %. Ambos os valores são apresentados na unidade de umidade relativa (%).

Posteriormente ao registro dos valores de leitura e cálculo da umidade, foram realizadas as considerações e cálculos relativos à incerteza de medição relativa ao método utilizado para medição de umidade. Os valores foram tabelados (tabela 2).

**Tabela 2 - Incertezas de medição - 1ª faixa (com ventilação)**

Cálculo da Incerteza do Método [%]					
$c_{ta}$ (T amb)	-0,03478	-0,035	-0,03413	-0,03327	-0,03476
$u_{ta}$ (T amb)	0,099499	0,099499	0,099499	0,099499	0,099499
$c_{tp}$ (T placa)	0,037141	0,037348	0,036539	0,03572	0,037127
$u_{tp}$ (T placa)	0,106771	0,106771	0,106771	0,106771	0,106771
$U_u$ (k=2)	1,052588	1,058804	1,034485	1,009964	1,052214

Com os valores calculados de umidade relativa e suas respectivas incertezas de medição, que ficaram em torno de 1,1% (tabela 2), foi montado um gráfico para exibir esses valores em comparação aos valores lidos nos padrões para cada uma das cinco medidas realizadas. As barras de erros representam as incertezas do método e dos padrões (gráfico 3), cujo valor foi calculado em 1,91 %.



Prosseguindo os ensaios com uso de ventilação forçada, passou-se ao ensaio do segundo ponto, que correspondia a uma faixa de medição que variava de 57,9 a 58,0 % de umidade relativa. Os valores são exibidos à seguir (tabela 3):

Tabela 3 - Ensaio com ventilação - 2ª faixa

Comparação de Medição de Umidade entre Valores do Método e Padrões							
Faixa de Medição:		57,9 a 58,0%		Tipo:		Com Ventilação	
Medidas		1	2	3	4	5	Unid
Valores de Leitura	Padrão A	57,9	57,8	58,0	58,1	58,2	%
	Padrão B	57,9	57,8	58,0	58,1	58,2	%
	Temp. amb	21,7	21,8	21,8	21,8	21,8	°C
	V min(off)	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	V
	V max(off)	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	V
	V leitura	0,38	0,39	0,34	0,39	0,37	V
	Temp. placa	13,7	13,9	13,7	13,7	13,9	°C
Valores de Erro	Padrão A	-0,8	-0,8	-0,8	-0,8	-0,8	%
	Padrão B	-0,8	-0,8	-0,8	-0,8	-0,8	%
	T Amb	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	°C
	T placa	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	°C
Valores Corrigidos	Padrão A	58,7	58,6	58,8	58,9	59,0	%
	Padrão B	58,7	58,6	58,8	58,9	59,0	%
	T amb	21,7	21,8	21,8	21,8	21,8	°C
	T placa	13,4	13,6	13,4	13,4	13,6	°C
Cálculo UR	ea (T placa)	1534,334	1554,426	1534,334	1534,334	1554,426	Pa
	es (T amb)	2589,578	2605,439	2605,439	2605,439	2605,439	Pa
	UR (%)	59,25034	59,66081	58,88965	58,88965	59,66081	%
Incerteza dos Padrões		1,91	1,91	1,91	1,91	1,91	%
Erro (comp. padrão A)		0,550336	1,060809	0,089652	-0,01035	0,660809	%
Erro (comp. padrão B)		0,550336	1,060809	0,089652	-0,01035	0,660809	%
Média - Erro (p. A)		0,470252	Média Geral			Desvio	
Média - Erro (p. B)		0,470252	0,470251573			0,412934108	

Pode ser observado na tabela, que os valores de tensão encontrados nos terminais do fotodetector durante a transição, foram da ordem de 0,38 V (aproximadamente).

É observado que o erro médio de medição ficou em 0,47 %, (considerando os dois padrões) com desvio-padrão de 0,41 %. Ambos os valores são apresentados na unidade de

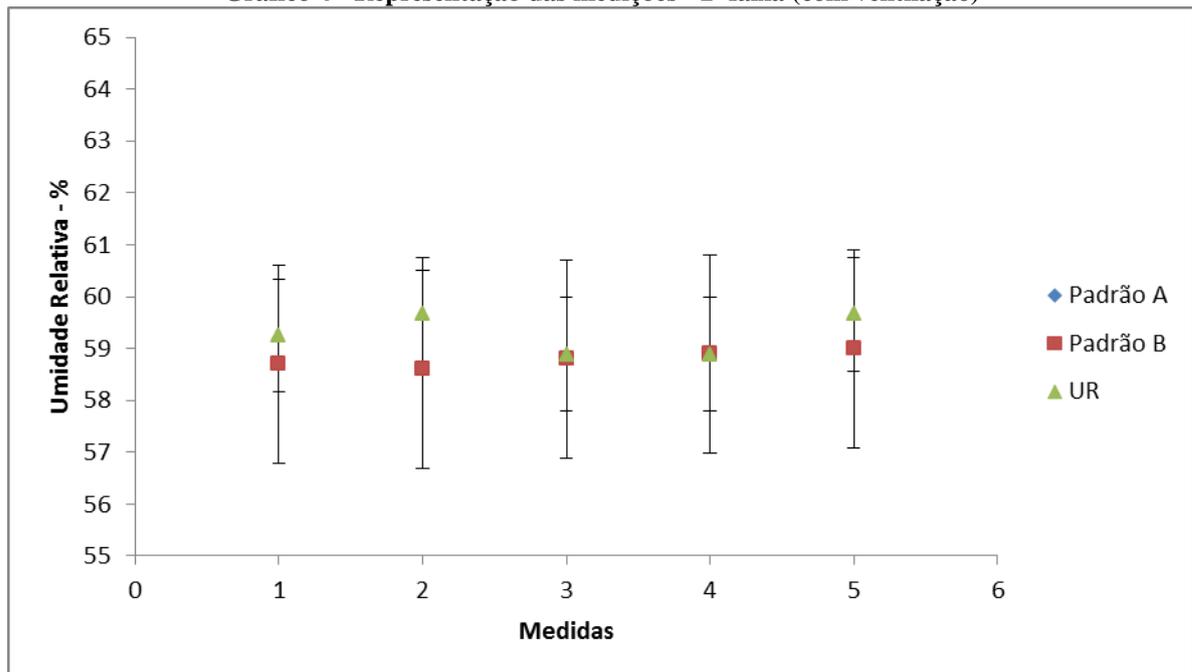
umidade relativa (%). Tanto os valores de erro quanto o valor de desvio-padrão apresentaram uma sensível melhora em relação aos valores encontrados no ponto ensaiado anteriormente.

Com os valores de leitura e cálculo da umidade, foram realizadas as considerações e cálculos relativos a incerteza de medição relativa ao método utilizado. Os valores foram tabelados (tabela 4).

**Tabela 4 - Incertezas de medição - 2ª faixa (com ventilação)**

Cálculo da Incerteza do Método [%]					
$c_{ta}$ (T amb)	-0,03619	-0,03642	-0,03594	-0,03594	-0,03642
$u_{ta}$ (T amb)	0,099499	0,099499	0,099499	0,099499	0,099499
$c_{tp}$ (T placa)	0,038572	0,038779	0,038337	0,038337	0,038779
$u_{tp}$ (T placa)	0,106771	0,106771	0,106771	0,106771	0,106771
$U_u$ (k=2)	1,094146	1,100393	1,08713	1,08713	1,100393

Um gráfico foi montado para comparar os valores encontrados em cada uma das cinco medidas realizadas e os respectivos valores encontrados nos padrões. As barras de erros representam as incertezas do método e dos padrões. Pode ser observado que os valores estão dentro da “zona de incerteza” (gráfico 4), porém observa-se ainda uma proximidade grande dos valores medidos com os encontrados nos padrões.

**Gráfico 4 - Representação das medições - 2ª faixa (com ventilação)**

O próximo ponto ensaiado (3º ponto), também utilizando a técnica da ventilação forçada, correspondia a uma faixa de medição que variava de 63,1 à 64,3 % de umidade relativa. Os valores foram tabelados para que fossem feitas as análises dos resultados (tabela 5). Pode ser observado na tabela, que os valores de tensão encontrados nos terminais do fotodetector durante a transição, foram da ordem de 0,38 V (aproximadamente).

**Tabela 5 - Ensaio com ventilação - 3ª faixa**

Comparação de Medição de Umidade entre Valores do Método e Padrões							
Faixa de Medição:		63,1 à 64,3%		Tipo:		Com Ventilação	
Medidas		1	2	3	4	5	Unid
Valores de Leitura	Padrão A	64,1	63,3	63,1	63,2	63,1	%
	Padrão B	64,3	63,5	63,2	63,2	63,3	%
	Temp. amb	23,8	24,1	24,2	24,3	24,3	°C
	V min(off)	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	V
	V max(off)	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	V
	V leitura	0,35	0,35	0,36	0,38	0,38	V
	Temp. placa	17,8	17,7	17,7	17,9	17,9	°C
Valores de Erro	Padrão A	-1,0	-0,9	-0,9	-0,9	-0,9	%
	Padrão B	-0,9	-0,9	-0,9	-0,9	-0,9	%
	T Amb	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	°C
	T placa	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	°C
Valores Corrigidos	Padrão A	65,1	64,2	64,0	64,1	64,0	%
	Padrão B	65,2	64,4	64,1	64,1	64,2	%
	T amb	23,8	24,1	24,2	24,3	24,3	°C
	T placa	17,7	17,6	17,6	17,8	17,8	°C
Cálculo UR	ea (T placa)	2020,638	2007,949	2007,949	2033,397	2033,397	Pa
	es (T amb)	2941,035	2994,505	3012,517	3030,623	3030,623	Pa
	UR (%)	68,705	67,05443	66,65352	67,09501	67,09501	%
Incerteza dos Padrões		1,91	1,91	1,91	1,91	1,91	%
Erro (comp. padrão A)		3,604996	2,854432	2,653517	2,995014	3,095014	%
Erro (comp. padrão B)		3,504996	2,654432	2,553517	2,995014	2,895014	%
Média - Erro (p. A)		3,040594	Média Geral			Desvio	
Média - Erro (p. B)		2,920594	2,980594418			0,349186255	

É observado que o erro médio de medição, ficou em 2,98 %, (considerando os dois padrões) com desvio-padrão de 0,35 %. Os valores de erro, para essa faixa de medição ensaiada, foram piores que os valores anteriores (0,47 %), estando mais próximo ao erro médio do 1º ponto ensaiado, porém com melhor precisão, já que o desvio-padrão apresentou-se menor.

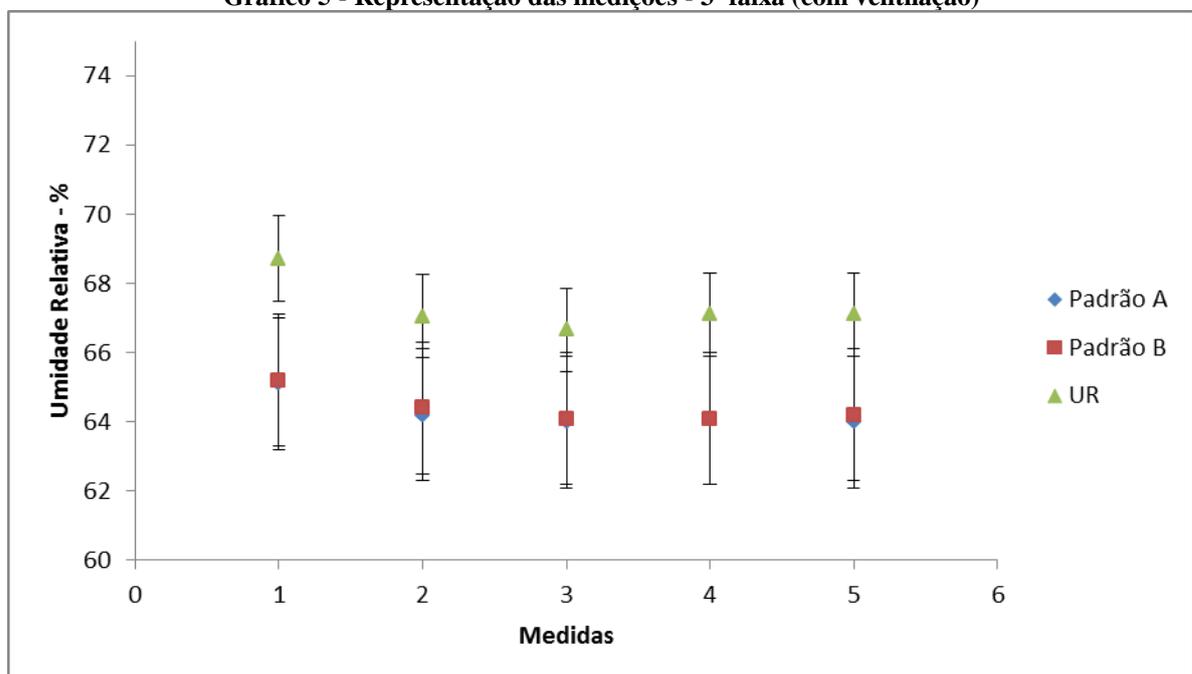
Com os valores de leitura e cálculo da umidade, foram realizados os cálculos relativos a incerteza de medição relativa ao método utilizado. Os valores foram tabelados (tabela 6).

**Tabela 6 - Incertezas de medição - 3ª faixa (com ventilação)**

Cálculo da Incerteza do Método [%]					
$c_{ta}$ (T amb)	-0,04131	-0,04023	-0,03996	-0,04019	-0,04019
$u_{ta}$ (T amb)	0,099499	0,099499	0,099499	0,099499	0,099499
$c_{tp}$ (T placa)	0,043265	0,042258	0,042005	0,042218	0,042218
$u_{tp}$ (T placa)	0,106771	0,106771	0,106771	0,106771	0,106771
$U_u$ (k=2)	1,236658	1,20627	1,198663	1,20517	1,20517

O gráfico a seguir compara os valores encontrados em cada uma das cinco medidas realizadas e os respectivos valores encontrados nos padrões (gráfico 5). As barras de erros representam as incertezas do método e dos padrões.

**Gráfico 5 - Representação das medições - 3ª faixa (com ventilação)**



O quarto ponto ensaiado, corresponde a uma faixa de medição que variava de 71,3 a 71,7 % de umidade relativa. Os valores são exibidos a seguir (tabela 7):

**Tabela 7 - Ensaio com ventilação - 4ª faixa**

Comparação de Medição de Umidade entre Valores do Método e Padrões							
Faixa de Medição:		71,3 a 71,7%		Tipo:		Com Ventilação	
Medidas		1	2	3	4	5	Unid
Valores de Leitura	Padrão A	71,7	71,5	71,5	71,3	71,5	%
	Padrão B	71,7	71,5	71,4	71,3	71,4	%
	Temp. amb	21,7	21,7	21,8	21,8	21,8	°C
	V min(off)	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	V
	V max(off)	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	V
	V leitura	0,3	0,3	0,3	0,32	0,31	V
	Temp. placa	16,9	16,9	17,0	16,9	16,9	°C
Valores de Erro	Padrão A	-1,1	-1,1	-1,1	-1,1	-1,1	%
	Padrão B	-1,0	-1,0	-1,0	-1,0	-1,0	%
	T Amb	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	°C
	T placa	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	°C
Valores Corrigidos	Padrão A	72,8	72,6	72,6	72,4	72,6	%
	Padrão B	72,7	72,5	72,4	72,3	72,4	%
	T amb	21,7	21,7	21,8	21,8	21,8	°C
	T placa	16,7	16,7	16,8	16,7	16,7	°C
Cálculo UR	ea (T placa)	1896,859	1896,859	1908,929	1896,859	1896,859	Pa
	es (T amb)	2589,578	2589,578	2605,439	2605,439	2605,439	Pa
	UR (%)	73,24972	73,24972	73,2671	72,80381	72,80381	%
Incerteza dos Padrões		1,91	1,91	1,91	1,91	1,91	%
Erro (comp. padrão A)		0,449718	0,649718	0,667097	0,403814	0,203814	%
Erro (comp. padrão B)		0,549718	0,749718	0,867097	0,503814	0,403814	%
Média - Erro (p. A)		0,474832	Média Geral			Desvio	
Média - Erro (p. B)		0,614832	0,544832444			0,193964965	

O erro médio de medição ficou em 0,54 % (considerando os dois padrões), com desvio-padrão de 0,19 %. Os valores de erro para essa faixa de medição ficaram próximos aos valores do segundo ponto (0,47 %), e o desvio-padrão apresentou-se o menor das medições vistas até este ponto. Pode ser verificado na tabela que os valores de tensão de leitura, apresentados no fotodetector, foram menores neste ponto ensaiado (em torno de 0,3 V). Isso se deve a pequenas variações de posicionamento do conjunto emissor-detector de luz.

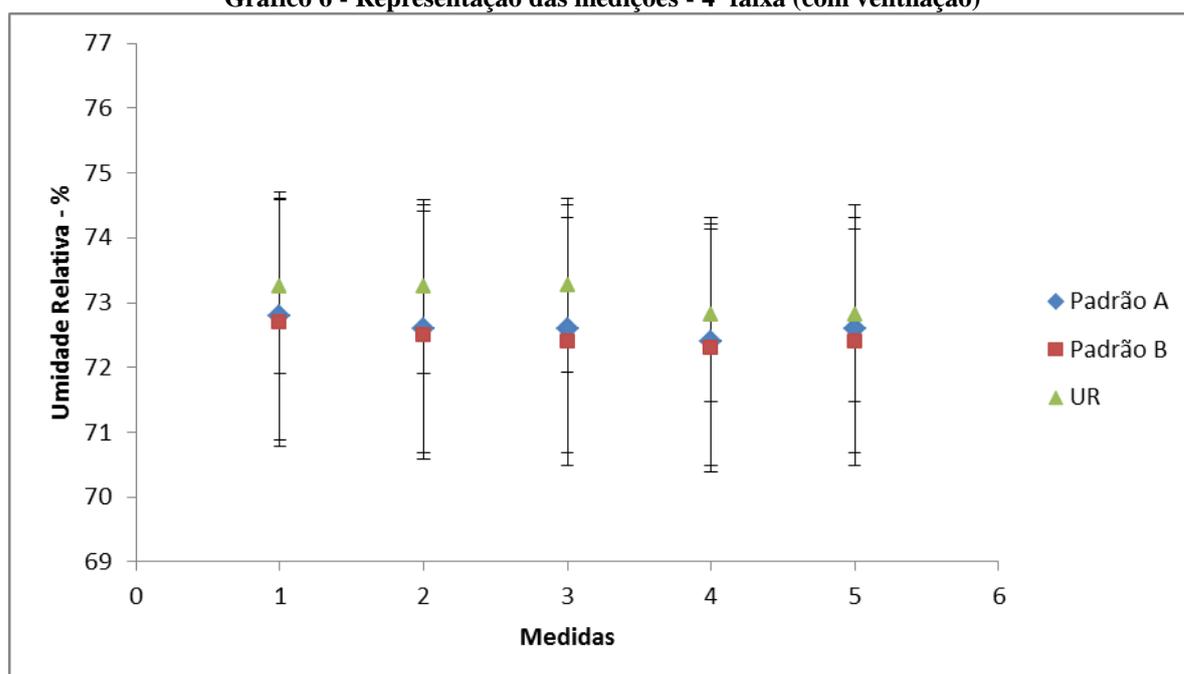
Com os valores vistos, foram realizados os cálculos relativos a incerteza de medição relativa ao método utilizado. Os valores foram tabelados (tabela 8).

**Tabela 8 - Incertezas de medição - 4ª faixa (com ventilação)**

Cálculo da Incerteza do Método [%]					
$c_{ta}$ (T amb)	-0,04474	-0,04474	-0,04472	-0,04444	-0,04444
$u_{ta}$ (T amb)	0,099499	0,099499	0,099499	0,099499	0,099499
$c_{tp}$ (T placa)	0,046482	0,046482	0,046457	0,046199	0,046199
$u_{tp}$ (T placa)	0,106771	0,106771	0,106771	0,106771	0,106771
$U_u$ (k=2)	1,333424	1,333424	1,332723	1,324861	1,324861

Foi montado um gráfico para comparar os valores encontrados em cada uma das cinco medidas realizadas e os respectivos valores encontrados nos padrões (gráfico 6).

Gráfico 6 - Representação das medições - 4ª faixa (com ventilação)



As barras de erros representam as incertezas do método e dos padrões. Pode ser observado que os valores encontrados pelo método de medição encontram-se dentro da “zona de incerteza”, apresentando ainda uma proximidade grande com os valores encontrados nos padrões.

Prosseguindo os ensaios com uso de ventilação forçada, passou-se ao ensaio do quinto ponto, que correspondia a uma faixa de medição que variava de 71,8 a 73,9 % de umidade relativa. Os valores encontrados pela utilização da metodologia foram tabelados e são exibidos a seguir (tabela 9):

**Tabela 9 - Ensaio com ventilação - 5ª faixa**

Comparação de Medição de Umidade entre Valores do Método e Padrões							
Faixa de Medição:		71,8 a 73,9%		Tipo:		Com Ventilação	
Medidas		1	2	3	4	5	Unid
Valores de Leitura	Padrão A	73,5	72,4	73,2	73,7	73,7	%
	Padrão B	73,6	72,6	73,5	73,9	73,9	%
	Temp. amb	23,8	23,9	23,9	23,9	23,9	°C
	V min(off)	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	V
	V max(off)	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	V
	V leitura	0,33	0,33	0,32	0,32	0,33	V
	Temp. placa	19,3	19,3	19,4	19,4	19,3	°C
Valores de Erro	Padrão A	-1,2	-1,1	-1,2	-1,2	-1,2	%
	Padrão B	-1,1	-1,0	-1,1	-1,1	-1,1	%
	T Amb	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	°C
	T placa	0,0	0,0	-0,1	-0,1	0,0	°C
Valores Corrigidos	Padrão A	74,7	73,5	74,4	74,9	74,9	%
	Padrão B	74,7	73,6	74,6	75,0	75,0	%
	T amb	23,8	23,9	23,9	23,9	23,9	°C
	T placa	19,3	19,3	19,5	19,5	19,3	°C
Cálculo UR	ea (T placa)	2233,463	2233,463	2261,402	2261,402	2233,463	Pa
	es (T amb)	2941,035	2958,765	2958,765	2958,765	2958,765	Pa
	UR (%)	75,94141	75,48635	76,43063	76,43063	75,48635	%
Incerteza dos Padrões		1,91	1,91	1,91	1,91	1,91	%
Erro (comp. padrão A)		1,241415	1,986347	2,030631	1,530631	0,586347	%
Erro (comp. padrão B)		1,241415	1,886347	1,830631	1,430631	0,486347	%
Média - Erro (p. A)		1,475074	Média Geral			Desvio	
Média - Erro (p. B)		1,375074	1,425074208			0,549977957	

O erro médio de medição (considerando os dois padrões), e desvio-padrão, ficaram aproximadamente, em 1,43 %, e 0,55 %, respectivamente. Os valores apresentados pelo fotodetector, para leitura (na transição), apresentou o valor aproximado de 0,33 V. As mudanças das tensões de transição se devem, possivelmente, a pequenas variações de

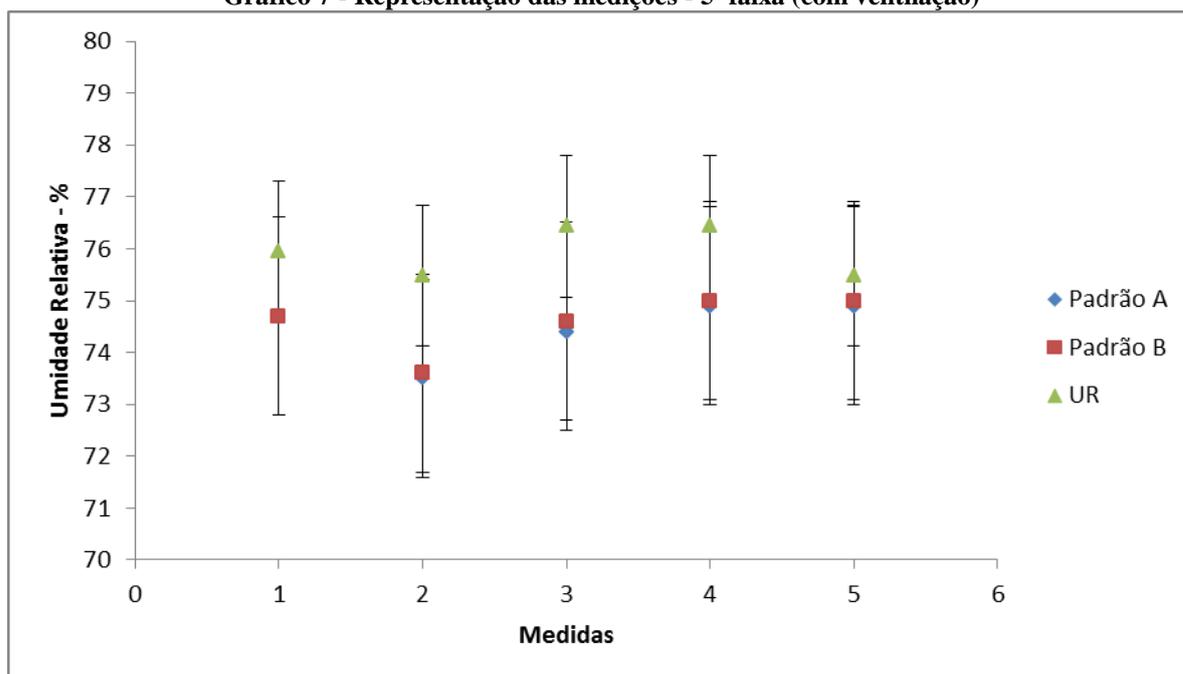
posicionamento no conjunto emissor-detector de luz, porém não causam problemas na detecção da rápida transição de aumento de tensão causada pelo ponto de orvalho.

Com os valores de leitura e cálculo da umidade, foram realizados os cálculos relativos a incerteza de medição relativa ao método utilizado. Os valores foram tabelados (tabela 10).

**Tabela 10 - Incertezas de medição - 5ª faixa (com ventilação)**

	Cálculo da Incerteza do Método [%]				
$c_{ta}$ (T amb)	-0,04566	-0,04535	-0,04592	-0,04592	-0,04535
$u_{ta}$ (T amb)	0,099499	0,099499	0,099499	0,099499	0,099499
$c_{tp}$ (T placa)	0,04724	0,046957	0,047472	0,047472	0,046957
$u_{tp}$ (T placa)	0,106771	0,106771	0,106771	0,106771	0,106771
$U_u$ (k=2)	1,357661	1,349073	1,3648	1,3648	1,349073

Com os valores encontrados em cada uma das cinco medidas realizadas e os respectivos valores encontrados nos padrões foi montado um gráfico. Pode ser observado que os valores estão dentro da “zona de incerteza” (gráfico 7).

**Gráfico 7 - Representação das medições - 5ª faixa (com ventilação)**

### 4.3 ENSAIO SEM VENTILAÇÃO

Após a realização das medições com a utilização de ventilação forçada, proporcionada por um cooler (comumente usado para arrefecimento de microprocessadores), disposto à frente da placa sensora, seguiu-se a realização dos mesmos ensaios, porém, sem a ativação desse cooler, não havendo insuflação de ar proposital para a placa sensora. Os ensaios de medições foram divididos em faixas de umidade relativa do ambiente controlado, como na metodologia anterior, com a realização de cinco medidas para cada faixa de umidade. A primeira faixa ensaiada correspondia a valores compreendidos entre 52,3 e 53,8 %. Os resultados foram tabelados (tabela 11).

**Tabela 11 - Ensaio sem ventilação - 1ª faixa**

Comparação de Medição de Umidade entre Valores do Método e Padrões							
Faixa de Medição:		52,3 a 53,8%		Tipo:		Sem Ventilação	
Medidas		1	2	3	4	5	Unid
Valores de Leitura	Padrão A	53,4	53,0	52,6	52,6	52,3	%
	Padrão B	53,8	53,4	53,2	53,3	53,0	%
	Temp. amb	25,8	25,9	25,8	25,8	25,8	°C
	V min(off)	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	V
	V max(off)	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	V
	V leitura	0,37	0,39	0,36	0,40	0,39	V
	Temp. placa	16,0	16,3	16,0	16,1	16,1	°C
Valores de Erro	Padrão A	-0,7	-0,7	-0,7	-0,7	-0,7	%
	Padrão B	-0,7	-0,7	-0,7	-0,7	-0,7	%
	T Amb	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	°C
	T placa	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	°C
Valores Corrigidos	Padrão A	54,1	53,7	53,3	53,3	53,0	%
	Padrão B	54,5	54,1	53,9	54,0	53,7	%
	T amb	25,8	25,9	25,8	25,8	25,8	°C
	T placa	15,8	16,1	15,8	15,9	15,9	°C
Cálculo UR	ea (T placa)	1791,206	1825,834	1791,206	1802,684	1802,684	Pa
	es (T amb)	3313,88	3333,561	3313,88	3313,88	3313,88	Pa
	UR (%)	54,05163	54,77128	54,05163	54,39798	54,39798	%
Incerteza dos Padrões		1,91	1,91	1,91	1,91	1,91	%
Erro (comp. padrão A)		-0,04837	1,071276	0,751627	1,097984	1,397984	%
Erro (comp. padrão B)		-0,44837	0,671276	0,151627	0,397984	0,697984	%
Média - Erro (p. A)		0,854099	Média Geral			Desvio	
Média - Erro (p. B)		0,294099	0,574099335			0,56756339	

Pode ser observado na tabela, que os valores de tensão encontrados nos terminais do fotodetector no momento de transição, variavam de 0,36 a 0,40 volts. Tais pontos de transição caracterizavam o início do ponto de orvalho, podendo ser encontrado na tabela o registro das respectivas temperaturas de orvalho, na condição de temperatura da placa durante a rápida mudança apontada pelo fotodetector. Os valores de tensão nos terminais do fotodetector na

condição de refletância normal, ou seja, fora da temperatura de ponto de orvalho, com valores mínimos -  $V_{\min}(\text{off})$ , e máximos -  $V_{\max}(\text{off})$ , ficaram compreendidos entre 0,25 e 0,27 V.

As pressões parciais nas condições como se encontravam o ar naquele instante –  $e_a$  (Pa), e as pressões parciais de saturação –  $e_s$  (Pa), foram calculadas com os valores corrigidos das medidas da temperatura da placa ( $T_{\text{placa}}$ , em °C), e da temperatura do ar ( $T_{\text{amb}}$ , em °C). Com esses valores foram calculadas os respectivos valores de umidade relativa para cada ponto ensaiado.

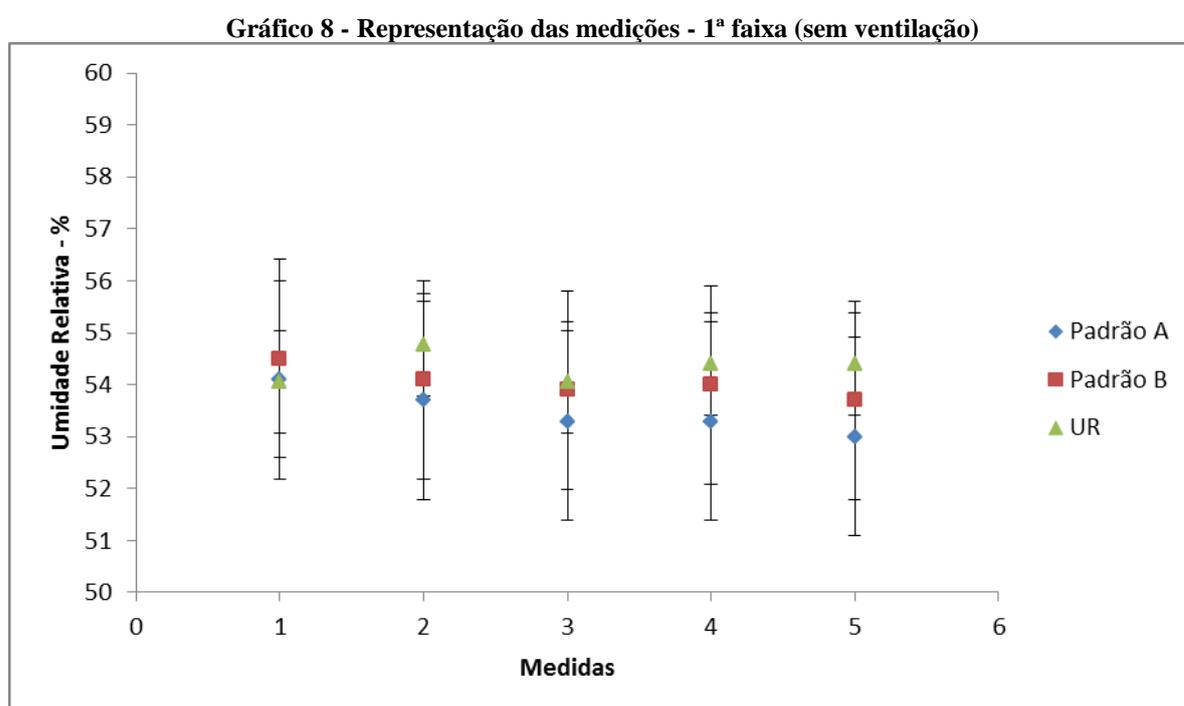
O valor médio do erro do uso do método de medição (considerando os dois padrões), foi de 0,57 %, com desvio-padrão de 0,57 %. Ambos os valores são apresentados na unidade de umidade relativa (%).

Com os valores de leitura e cálculo da umidade, foram realizadas as considerações e cálculos relativos a incerteza de medição relativa ao método utilizado para medição de umidade. Os valores foram tabelados (tabela 12).

**Tabela 12 - Incertezas de medição - 1ª faixa (sem ventilação)**

Cálculo da Incerteza do Método [%]					
$c_{ta}$ (T amb)	-0,03202	-0,03242	-0,03202	-0,03222	-0,03222
$u_{ta}$ (T amb)	0,099499	0,099499	0,099499	0,099499	0,099499
$c_{tp}$ (T placa)	0,034539	0,034917	0,034539	0,034733	0,034733
$u_{tp}$ (T placa)	0,106771	0,106771	0,106771	0,106771	0,106771
$U_u$ (k=2)	0,974637	0,985991	0,974637	0,980449	0,980449

Utilizando os valores calculados de umidade relativa e suas respectivas incertezas de medição, que ficaram em torno de 1% (tabela 12), foi feito um gráfico para comparação desses valores aos valores lidos nos padrões para cada uma das cinco medidas realizadas. As incertezas dos padrões foram calculadas, chegando-se ao valor de 1,91 %. As barras de erros representam as incertezas do método e dos padrões, podendo ser observado que os valores das medidas encontram-se dentro da “zona de incerteza”, e próximos aos valores exibidos pelos padrões (gráfico 8).



Prosseguindo os ensaios sem o uso de ventilação, foi feito o ensaio do segundo ponto, que correspondia a uma faixa de medição que variava de 58,6 à 59,5 % de umidade relativa. Os valores são exibidos a seguir (tabela 13):

**Tabela 13 - Ensaio sem ventilação - 2ª faixa**

Comparação de Medição de Umidade entre Valores do Método e Padrões							
Faixa de Medição:		58,6 a 59,5%		Tipo:		Sem Ventilação	
Medidas		1	2	3	4	5	Unid
Valores de Leitura	Padrão A	58,6	58,9	59,3	59,5	59,5	%
	Padrão B	58,6	59,1	59,3	59,5	59,4	%
	Temp. amb	21,6	21,4	21,4	21,3	21,3	°C
	V min(off)	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	V
	V max(off)	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	V
	V leitura	0,36	0,36	0,33	0,40	0,36	V
	Temp. placa	13,7	13,7	13,8	13,8	13,7	°C
Valores de Erro	Padrão A	-0,8	-0,8	-0,8	-0,8	-0,8	%
	Padrão B	-0,8	-0,8	-0,8	-0,8	-0,8	%
	T Amb	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	°C
	T placa	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	°C
Valores Corrigidos	Padrão A	59,4	59,7	60,1	60,3	60,3	%
	Padrão B	59,4	59,9	60,1	60,3	60,2	%
	T amb	21,6	21,4	21,4	21,3	21,3	°C
	T placa	13,4	13,4	13,5	13,5	13,4	°C
Cálculo UR	ea (T placa)	1534,334	1534,334	1544,351	1544,351	1534,334	Pa
	es (T amb)	2573,802	2542,503	2542,503	2526,979	2526,979	Pa
	UR (%)	59,6135	60,34737	60,74136	61,11451	60,7181	%
Incerteza dos Padrões		1,91	1,91	1,91	1,91	1,91	%
Erro (comp. padrão A)		0,213504	0,647368	0,641359	0,814514	0,418102	%
Erro (comp. padrão B)		0,213504	0,447368	0,641359	0,814514	0,518102	%
Média - Erro (p. A)		0,546969	Média Geral			Desvio	
Média - Erro (p. B)		0,526969	0,536969308			0,215977949	

Pode ser observado na tabela, que os valores de tensão encontrados nos terminais do fotodetector no momento de transição, variavam de 0,33 a 0,40 volts. Os valores de tensão nos terminais do fotodetector na condição de refletância normal, ou seja, fora da temperatura de ponto de orvalho, ficaram compreendidos entre 0,26 e 0,28 V. As pequenas variações dos

valores de  $V_{\text{off}}$ , são devidas às pequenas alterações de posição do conjunto emissor-detector de luz, como foi observado também nos ensaios anteriores com o uso de ventilação.

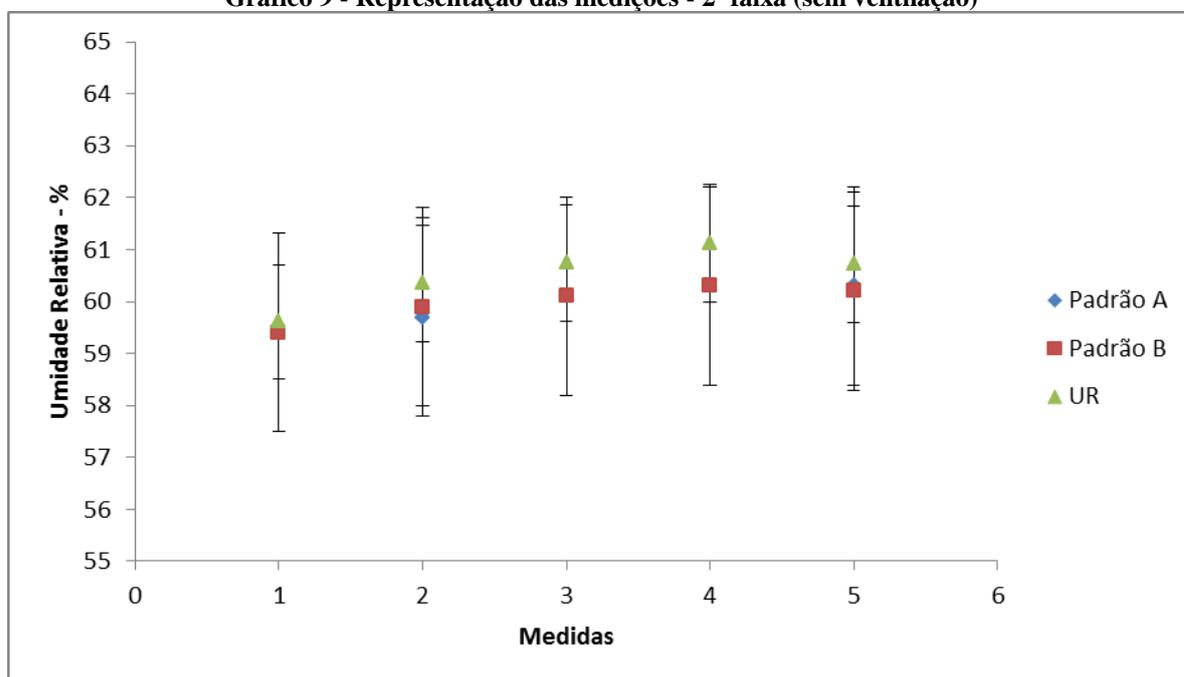
O valor médio do erro (considerando os dois padrões), foi de 0,53 %, próximo ao valor encontrado no ponto ensaiado anteriormente e, assim como este, podendo ser considerado baixo frente à resolução do instrumento. O desvio-padrão calculado foi de 0,21 %, sendo este valor e o do erro, apresentados na unidade de umidade relativa (%).

Com os valores vistos anteriormente, foram realizados os cálculos relativos a incerteza de medição relativa ao método utilizado. Os valores foram tabelados (tabela 14).

**Tabela 14 - Incertezas de medição - 2ª faixa (sem ventilação)**

Cálculo da Incerteza do Método [%]					
$c_{ta}$ (T amb)	-0,03644	-0,03695	-0,03719	-0,03744	-0,0372
$u_{ta}$ (T amb)	0,099499	0,099499	0,099499	0,099499	0,099499
$c_{tp}$ (T placa)	0,038809	0,039286	0,039512	0,039755	0,039528
$u_{tp}$ (T placa)	0,106771	0,106771	0,106771	0,106771	0,106771
$U_u$ (k=2)	1,101213	1,115501	1,122289	1,129555	1,122723

Foi montado um gráfico de comparação dos valores encontrados em cada uma das cinco medidas realizadas e os respectivos valores encontrados nos padrões. As barras de erros representam as incertezas do método e dos padrões. Pode ser observado que os valores estão dentro da “zona de incerteza” (gráfico 9), observando-se ainda uma proximidade grande dos valores medidos com os encontrados nos padrões.

**Gráfico 9 - Representação das medições - 2ª faixa (sem ventilação)**

O próximo ponto à ser ensaiado, o terceiro ponto, correspondia a uma faixa de medição que variava de 62,8 a 63,2 % de umidade relativa, com medições sem o uso de ventilação para a placa sensora. Os valores são exibidos à seguir (tabela 15):

Tabela 15 - Ensaio sem ventilação - 3ª faixa

Comparação de Medição de Umidade entre Valores do Método e Padrões							
Faixa de Medição:		62,8 a 63,2%		Tipo:		Sem Ventilação	
Medidas		1	2	3	4	5	Unid
Valores de Leitura	Padrão A	62,9	62,8	62,8	62,8	62,8	%
	Padrão B	63,2	63,2	63,2	63,1	63,1	%
	Temp. amb	24,3	24,3	24,3	24,4	24,4	°C
	V min(off)	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	V
	V max(off)	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	V
	V leitura	0,37	0,41	0,39	0,39	0,41	V
	Temp. placa	17,1	17,1	17,2	17,2	17,2	°C
Valores de Erro	Padrão A	-0,9	-0,9	-0,9	-0,9	-0,9	%
	Padrão B	-0,9	-0,9	-0,9	-0,9	-0,9	%
	T Amb	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	°C
	T placa	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	°C
Valores Corrigidos	Padrão A	63,8	63,7	63,7	63,7	63,7	%
	Padrão B	64,1	64,1	64,1	64,0	64,0	%
	T amb	24,3	24,3	24,3	24,4	24,4	°C
	T placa	17,0	17,0	17,1	17,1	17,1	°C
Cálculo UR	ea (T placa)	1933,273	1933,273	1945,547	1945,547	1945,547	Pa
	es (T amb)	3030,623	3030,623	3030,623	3048,825	3048,825	Pa
	UR (%)	63,79126	63,79126	64,19626	63,813	63,813	%
Incerteza dos Padrões		1,91	1,91	1,91	1,91	1,91	%
Erro (comp. padrão A)		-0,00874	0,091263	0,496256	0,113003	0,113003	%
Erro (comp. padrão B)		-0,30874	-0,30874	0,096256	-0,187	-0,187	%
Média - Erro (p. A)		0,160957	Média Geral			Desvio	
Média - Erro (p. B)		-0,17904	-0,009042602			0,247034861	

Na tabela é mostrado que os valores de tensão encontrados nos terminais do fotodetector no momento de transição, variavam de 0,37 a 0,41 volts. Os valores de tensão nos terminais do fotodetector na condição de refletância normal, ou seja, fora da temperatura de ponto de orvalho, ficaram compreendidos entre 0,27 e 0,29 V, mantendo-se as pequenas

variações de valores de  $V_{\text{off}}$  devidas às pequenas alterações de posição do conjunto emissor-detector de luz, como já discutido anteriormente.

O valor médio do erro (considerando os dois padrões), foi próximo de -0,01 %, podendo ser considerado o valor de erro mais baixo encontrado nos ensaios deste trabalho. O desvio-padrão calculado foi de aproximadamente 0,25 %. Os valores são apresentados na unidade de umidade relativa (%).

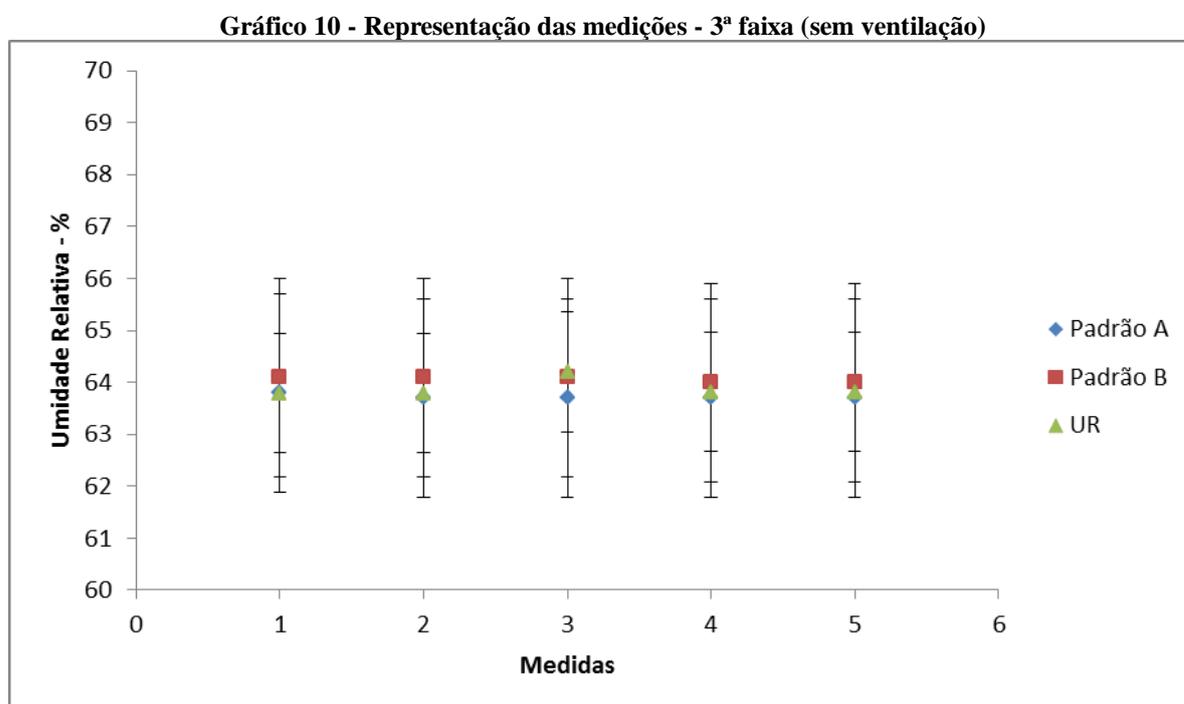
Com os valores vistos, foram realizados os cálculos relativos a incerteza de medição relativa ao método utilizado. Os valores foram tabelados (tabela 16).

**Tabela 16 - Incertezas de medição - 3ª faixa (sem ventilação)**

Cálculo da Incerteza do Método [%]					
$c_{ta}$ (T amb)	-0,03821	-0,03821	-0,03845	-0,0382	-0,0382
$u_{ta}$ (T amb)	0,099499	0,099499	0,099499	0,099499	0,099499
$c_{tp}$ (T placa)	0,040387	0,040387	0,040612	0,04037	0,04037
$u_{tp}$ (T placa)	0,106771	0,106771	0,106771	0,106771	0,106771
$U_u$ (k=2)	1,149783	1,149783	1,156583	1,149302	1,149302

Um gráfico de comparação dos valores de cada uma das cinco medidas realizadas pelo método e os respectivos valores encontrados nos padrões, foi montado. Aparecem barras de erros que representam as incertezas do método e dos padrões. Pode ser observada a

proximidade entre os valores medidos e os valores exibidos pelos padrões. Observa-se também, que os valores estão dentro da “zona de incerteza” (gráfico 10).



Prosseguindo os ensaios, passou-se ao ensaio do quarto ponto, que correspondia a uma faixa de medição que variava de 71,4 a 71,5 % de umidade relativa. Os valores são exibidos a seguir (tabela 17):

Tabela 17 - Ensaio sem ventilação - 4ª faixa

Comparação de Medição de Umidade entre Valores do Método e Padrões							
Faixa de Medição:		71,4 a 71,5%		Tipo:		Sem Ventilação	
Medidas		1	2	3	4	5	Unid
Valores de Leitura	Padrão A	71,4	71,4	71,5	71,4	71,4	%
	Padrão B	71,4	71,4	71,4	71,4	71,4	%
	Temp. amb	21,8	21,8	21,8	21,8	21,8	°C
	V min(off)	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	V
	V max(off)	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	V
	V leitura	0,30	0,31	0,32	0,32	0,32	V
	Temp. placa	16,6	16,5	16,5	16,5	16,5	°C
Valores de Erro	Padrão A	-1,1	-1,1	-1,1	-1,1	-1,1	%
	Padrão B	-1,0	-1,0	-1,0	-1,0	-1,0	%
	T Amb	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	°C
	T placa	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	°C
Valores Corrigidos	Padrão A	72,5	72,5	72,6	72,5	72,5	%
	Padrão B	72,4	72,4	72,4	72,4	72,4	%
	T amb	21,8	21,8	21,8	21,8	21,8	°C
	T placa	16,4	16,3	16,3	16,3	16,3	°C
Cálculo UR	ea (T placa)	1861,048	1849,244	1849,244	1849,244	1849,244	Pa
	es (T amb)	2605,439	2605,439	2605,439	2605,439	2605,439	Pa
	UR (%)	71,42937	70,97632	70,97632	70,97632	70,97632	%
Incerteza dos Padrões		1,91	1,91	1,91	1,91	1,91	%
Erro (comp. padrão A)		-1,07063	-1,52368	-1,62368	-1,52368	-1,52368	%
Erro (comp. padrão B)		-0,97063	-1,42368	-1,42368	-1,42368	-1,42368	%
Média - Erro (p. A)		-1,45307	Média Geral			Desvio	
Média - Erro (p. B)		-1,33307	-1,393069918			0,208308553	

Pode ser observado que os valores de tensão encontrados nos terminais do fotodetector no momento de transição, variavam de 0,30 a 0,32 volts. Os valores de tensão nos terminais do fotodetector na condição de refletância normal, ou seja, fora da temperatura de ponto de orvalho, ficaram compreendidos entre 0,25 e 0,27 V.

Pode ser verificado na tabela o valor de -1,39 %, relativo ao erro médio (considerando os dois padrões), e o valor do desvio-padrão foi de aproximadamente 0,21 %.

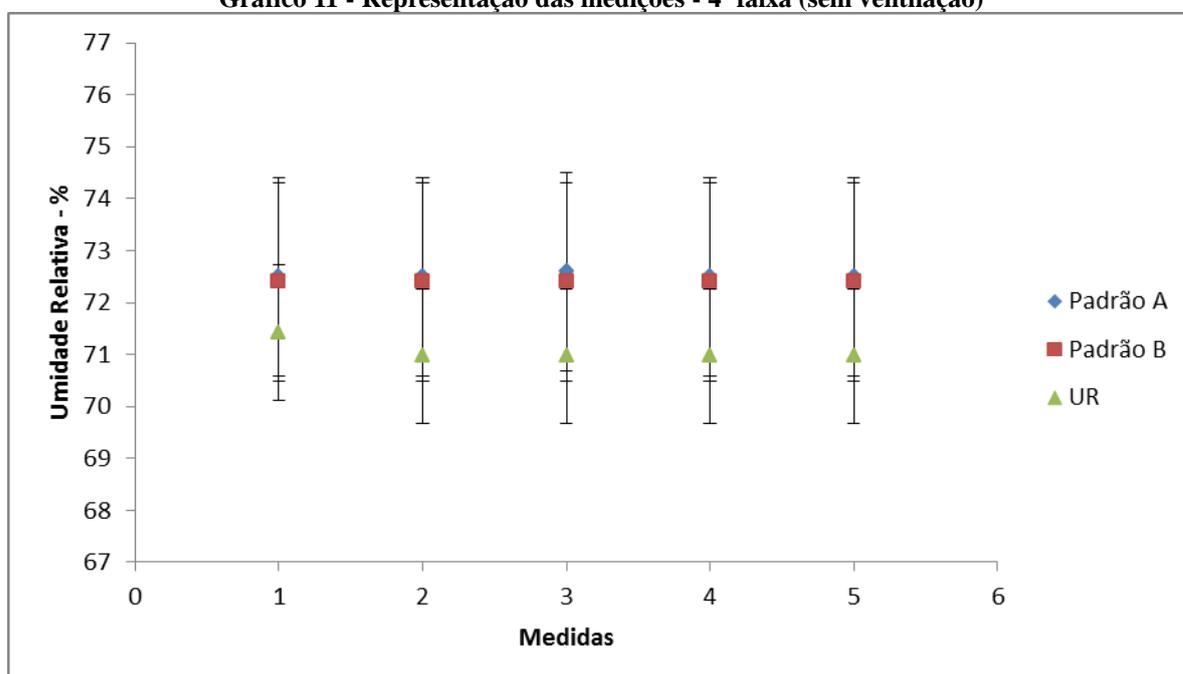
Utilizando-se os valores obtidos, foi realizado os cálculos relativos a incerteza de medição relativa ao método utilizado. Os valores foram tabelados (tabela 18).

**Tabela 18 - Incertezas de medição - 4ª faixa (sem ventilação)**

Cálculo da Incerteza do Método [%]					
$c_{ta}$ (T amb)	-0,0436	-0,04332	-0,04332	-0,04332	-0,04332
$u_{ta}$ (T amb)	0,099499	0,099499	0,099499	0,099499	0,099499
$c_{tp}$ (T placa)	0,045432	0,045179	0,045179	0,045179	0,045179
$u_{tp}$ (T placa)	0,106771	0,106771	0,106771	0,106771	0,106771
$U_u$ (k=2)	1,301517	1,293816	1,293816	1,293816	1,293816

O gráfico a seguir, (gráfico 11), foi montado para comparação dos valores encontrados em cada uma das cinco medidas realizadas e os respectivos valores encontrados nos padrões. As barras de erros representam as incertezas do método e dos padrões.

**Gráfico 11 - Representação das medições - 4ª faixa (sem ventilação)**



No próximo ponto ensaiado, o quinto ponto, foram realizadas medidas em valores compreendidos em uma faixa de medição entre 71,7 e 72,9 % de umidade relativa. Os valores são exibidos à seguir (tabela 19):

**Tabela 19 - Ensaio sem ventilação - 5ª faixa**

Comparação de Medição de Umidade entre Valores do Método e Padrões							
Faixa de Medição:		71,7 a 72,9%		Tipo:		Sem Ventilação	
		1	2	3	4	5	Unid
Valores de Leitura	Medidas						
	Padrão A	72,5	72,4	72,6	72,6	71,7	%
	Padrão B	72,6	72,5	72,8	72,9	72,0	%
	Temp. amb	23,8	23,8	23,8	23,8	23,8	°C
	V min(off)	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	V
	V max(off)	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	V
	V leitura	0,35	0,35	0,35	0,36	0,35	V
Temp. placa	18,7	18,7	18,9	19,0	18,8	°C	
Valores de Erro	Padrão A	-1,2	-1,2	-1,2	-1,2	-1,1	%
	Padrão B	-1,0	-1,0	-1,1	-1,1	-1,0	%
	T Amb	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	°C
	T placa	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	°C
Valores Corrigidos	Padrão A	73,7	73,6	73,8	73,8	72,8	%
	Padrão B	73,6	73,5	73,9	74,0	73,0	%
	T amb	23,8	23,8	23,8	23,8	23,8	°C
	T placa	18,7	18,7	18,9	19,0	18,8	°C
Cálculo UR	ea (T placa)	2151,455	2151,455	2178,492	2192,122	2164,936	Pa
	es (T amb)	2941,035	2941,035	2941,035	2941,035	2941,035	Pa
	UR (%)	73,15299	73,15299	74,07231	74,53576	73,61139	%
Incerteza dos Padrões		1,91	1,91	1,91	1,91	1,91	%
Erro (comp. padrão A)		-0,54701	-0,44701	0,27231	0,73576	0,811391	%
Erro (comp. padrão B)		-0,44701	-0,34701	0,17231	0,53576	0,611391	%
Média - Erro (p. A)		0,165088	Média Geral			Desvio	
Média - Erro (p. B)		0,105088	0,135088262			0,537603461	

Observa-se que os valores de tensão nos terminais do fotodetector na condição de refletância normal, ou seja, fora da temperatura de ponto de orvalho, ficaram compreendidos entre 0,27 e 0,29 V. Já os valores de tensão encontrados nos terminais do fotodetector no momento de transição, variavam entre 0,35 e 0,36 volts, podendo ser observada uma notável repetitividade de valor de tensão do ponto de transição.

O valor médio do erro (considerando os dois padrões), foi próximo de 0,14 %, podendo ser considerado um baixo valor de erro. O desvio-padrão calculado foi de aproximadamente 0,54%. Os valores são apresentados na unidade de umidade relativa (%).

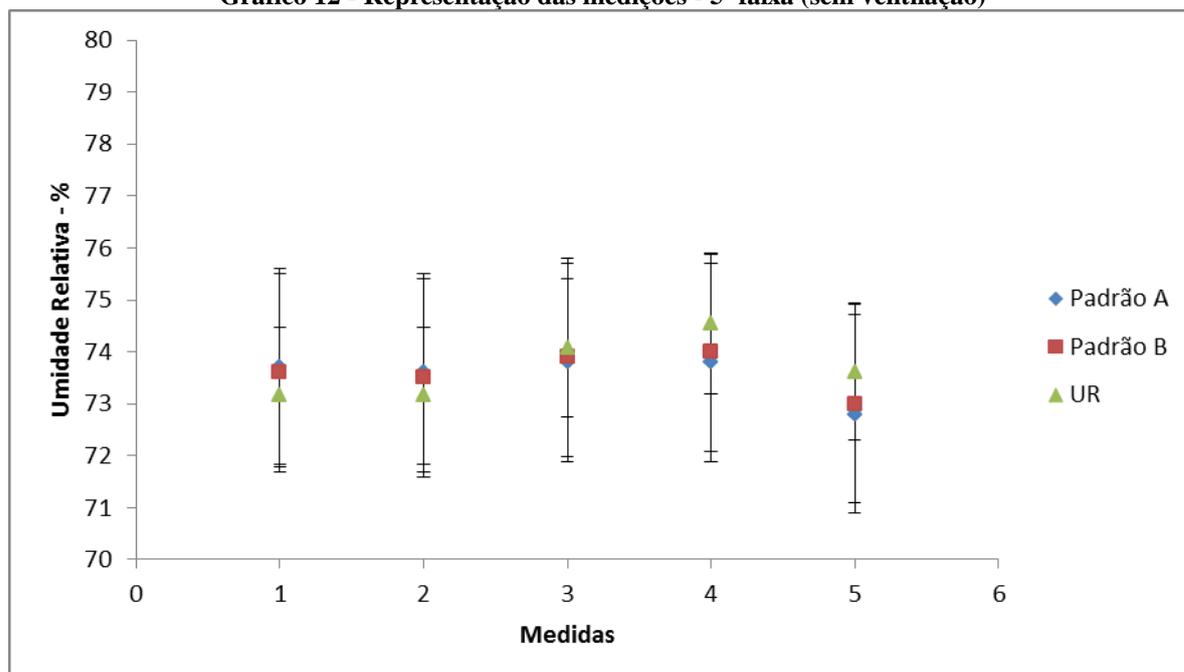
Com os valores vistos, foram realizados os cálculos relativos a incerteza de medição relativa ao método utilizado. Os valores foram tabelados (tabela 20).

**Tabela 20 - Incertezas de medição - 5ª faixa (sem ventilação)**

Cálculo da Incerteza do Método [%]					
$c_{ta}$ (T amb)	-0,04398	-0,04398	-0,04454	-0,04482	-0,04426
$u_{ta}$ (T amb)	0,099499	0,099499	0,099499	0,099499	0,099499
$c_{tp}$ (T placa)	0,045714	0,045714	0,046218	0,046472	0,045966
$u_{tp}$ (T placa)	0,106771	0,106771	0,106771	0,106771	0,106771
$U_u$ (k=2)	1,311127	1,311127	1,326481	1,334217	1,318784

Pode ser observado no gráfico, montado para comparação dos valores encontrados em cada uma das medidas realizadas e os respectivos valores encontrados nos padrões (gráfico 12), que os valores encontram-se dentro da “zona de incerteza”, e ainda uma notável proximidade dos valores medidos e os encontrados nos padrões. As barras de erros representam as incertezas do método e dos padrões.

Gráfico 12 - Representação das medições - 5ª faixa (sem ventilação)



#### 4.4 COMPARAÇÃO DOS ERROS ENTRE OS MÉTODOS

Após a realização dos ensaios das diversas faixas, usando a metodologia de usar ventilação forçada em direção à placa sensora (insuflação de ar), e posteriormente, a realização dos mesmos ensaios sem a utilização dessa ventilação (conforme descrito nos itens 4.2 e 4.3), é possível uma comparação dos valores de erro resultantes de cada uma das medidas realizadas.

Foi montada uma tabela para comparar os valores de erros das duas metodologias ensaiadas, a metodologia com uso de ventilação e a metodologia sem uso ventilação (tabela 21). Os valores de erros tabelados consistiam nos valores calculados de erro médio, o qual

considerava para cada faixa de umidade ensaiada (ponto ensaiado), os valores médios dos erros calculados pela comparação do método aos dois padrões que confrontavam os valores calculados de umidade.

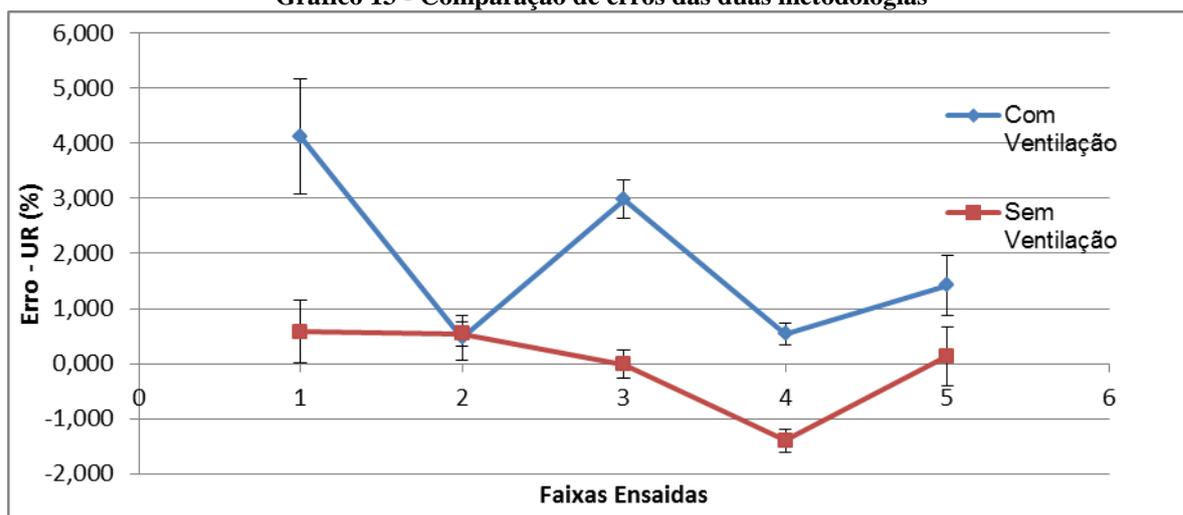
Junto aos erros, foram tabelados os desvios-padrões (tabela 21), que foi calculado considerando as variações dos erros calculados para as medições de cada faixa, com os erros de cada uma das cinco medidas quando comparadas aos valores dos padrões para cada medida, e a respectiva média geral de erro para cada faixa ensaiada (ponto).

**Tabela 21 - Comparação dos valores de erros das duas metodologias**

Tipo de Ensaio		Faixas Ensiadas (Pontos)					
		1	2	3	4	5	
Ventilação:							
	Com	Erro	4,122	0,470	2,981	0,545	1,425
	Desv. P.	1,051	0,413	0,349	0,194	0,550	% (UR)
Sem	Erro	0,574	0,537	-0,009	-1,393	0,135	% (UR)
	Desv. P.	0,568	0,216	0,247	0,208	0,538	% (UR)

Com os dados tabelados, foi montado um gráfico para proporcionar uma comparação visual da magnitude dos erros e do comportamento dos métodos ensaiados nas respectivas faixas de medição (gráfico 13). Para cada valor de erro exibido, pelo respectivo ponto ensaiado, acompanha uma barra horizontal, que corresponde à apresentação do desvio-padrão calculado para aquele valor.

Gráfico 13 - Comparação de erros das duas metodologias



Pode ser verificado pelos valores exibidos, junto às indicações do gráfico, que apesar de apresentar valores de erros pequenos na segunda e quarta faixas ensaiadas, o ensaio com ventilação forçada (insuflação de ar à placa), foi a metodologia que apresentou os maiores erros e também os maiores valores de desvio-padrão. Foi calculada a média de erro, em valores absolutos, sendo de aproximadamente 1,91 % (valor de umidade relativa), para esta metodologia. A média do desvio-padrão para essa metodologia foi calculada, aproximadamente, em 0,51 % (valor de umidade relativa).

A metodologia ensaiada sem ventilação forçada (sem insuflação de ar à placa), apresentou na maioria dos pontos erros menores, o que proporcionou uma média de erro geral menor, para essa metodologia, ficando em aproximadamente 0,53 % (valor de umidade relativa). Essa metodologia não só apresentou menores erros, como também menores valores de desvio-padrão, para a maioria dos pontos, deixando a média geral, em aproximadamente 0,36 % (valor de umidade relativa).

Deixa-se registrado a verificação de que a metodologia que utilizava ventilação forçada apresentou erros absolutos menores na segunda faixa e na quarta faixa, em comparação aos valores do mesmo ponto que não utilizaram ventilação forçada, porém em relação aos valores de desvio-padrão, somente o quarto ponto da metodologia que usava ventilação forçada, mostrou-se ligeiramente melhor que o mesmo ponto ensaiado sem ventilação forçada.

As variações de erros podem ser motivadas por possíveis contaminações pelas sucessivas condensações na superfície da placa, mesmo sendo adotada a metodologia de limpeza dela com álcool etílico com concentração de 99,5% (mínima), antes do ensaio de cada faixa.

#### **4.5 ANÁLISE DE MEDIÇÃO UTILIZANDO IMAGENS**

Após a realização dos ensaios com os detectores óticos de condensação na superfície da placa, foram realizados ensaios nos quais eram registradas as imagens da placa sensora do dispositivo de medição, na fase inicial do ensaio (sem qualquer alteração e com máxima refletância), e no momento do início da condensação de sua superfície, e por consequência, do ponto de orvalho. A finalidade desses ensaios é a de analisar a mudança visual que ocorre na placa espelhada quando ocorre o fenômeno do ponto de orvalho, utilizando-se para isso, o conhecimento adquirido nos ensaios anteriores relativos ao comportamento do sistema.

Para a captura das imagens foi utilizado uma câmera digital utilizada em microcomputadores para videoconferência, do tipo “webcam”, posicionada de forma a ter foco na imagem da placa polida onde ocorre a condensação (figura 38).

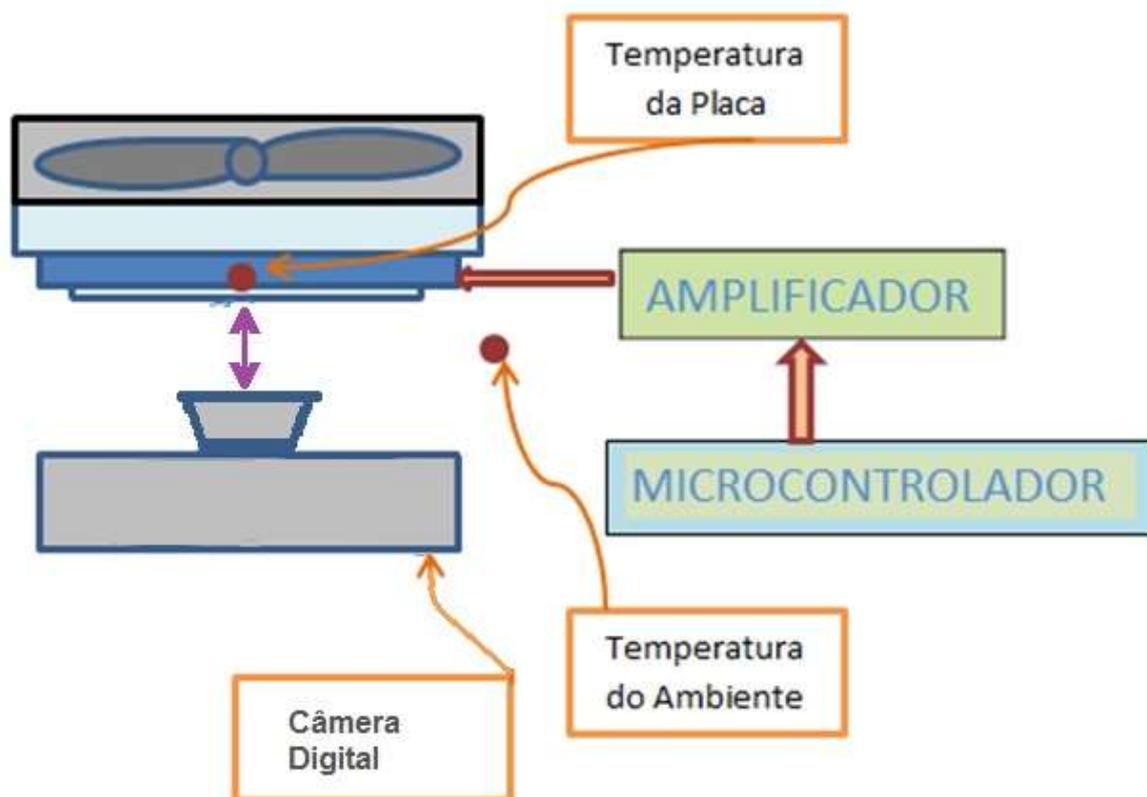


Figura 38 - Esquema de montagem do dispositivo de medição com captura de imagem

Os ensaios foram realizados sem ventilação forçada, sendo registrada a imagem da placa antes da ocorrência da condensação (figura 39), e após o início da condensação, ou seja, no ponto de orvalho (figura 40).



**Figura 39 - Imagem da placa em condição plena de refletância.**



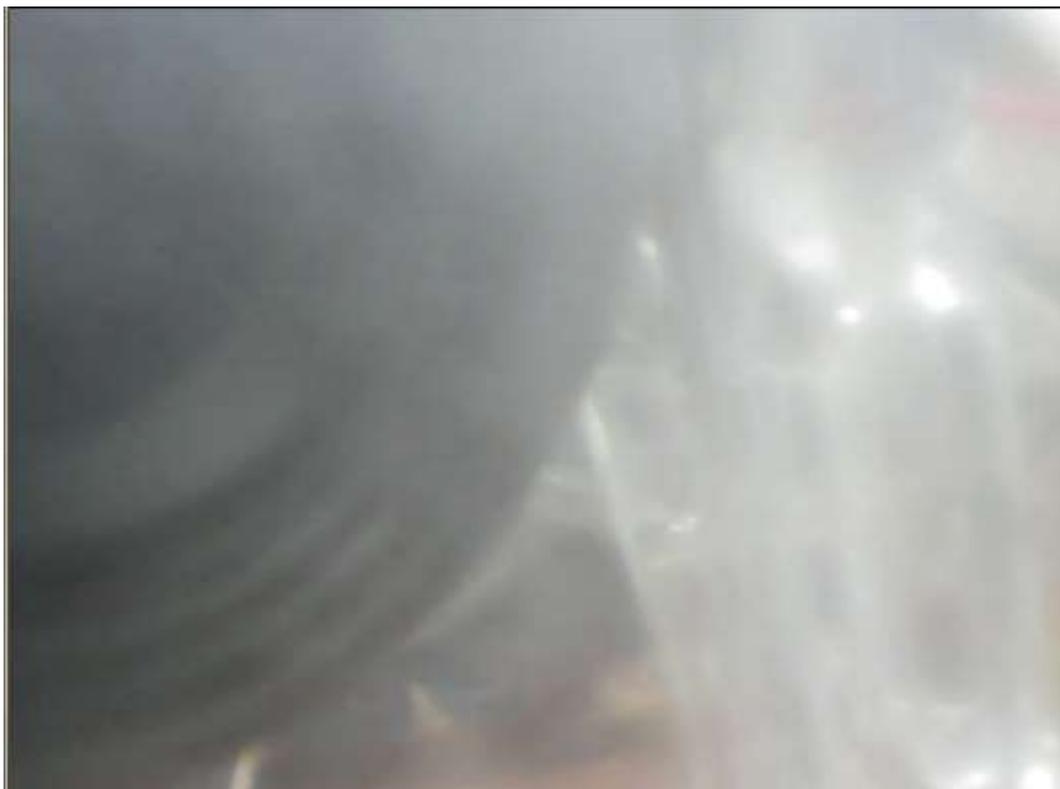
**Figura 40 - Imagem da placa no início da condensação da umidade.**

Foi realizado um ensaio de captura de imagem com a webcam posicionada com grande proximidade à placa sensora, de forma que ela refletisse uma parte da imagem da lente de captura dela mesma (figura 41).



**Figura 41 - Detalhe da câmera refletido pela placa sem resfriamento.**

Após o início da condensação na superfície da placa (ponto de orvalho), a imagem refletida da lente da câmera fica muito difícil de ser distinguida (figura 42).

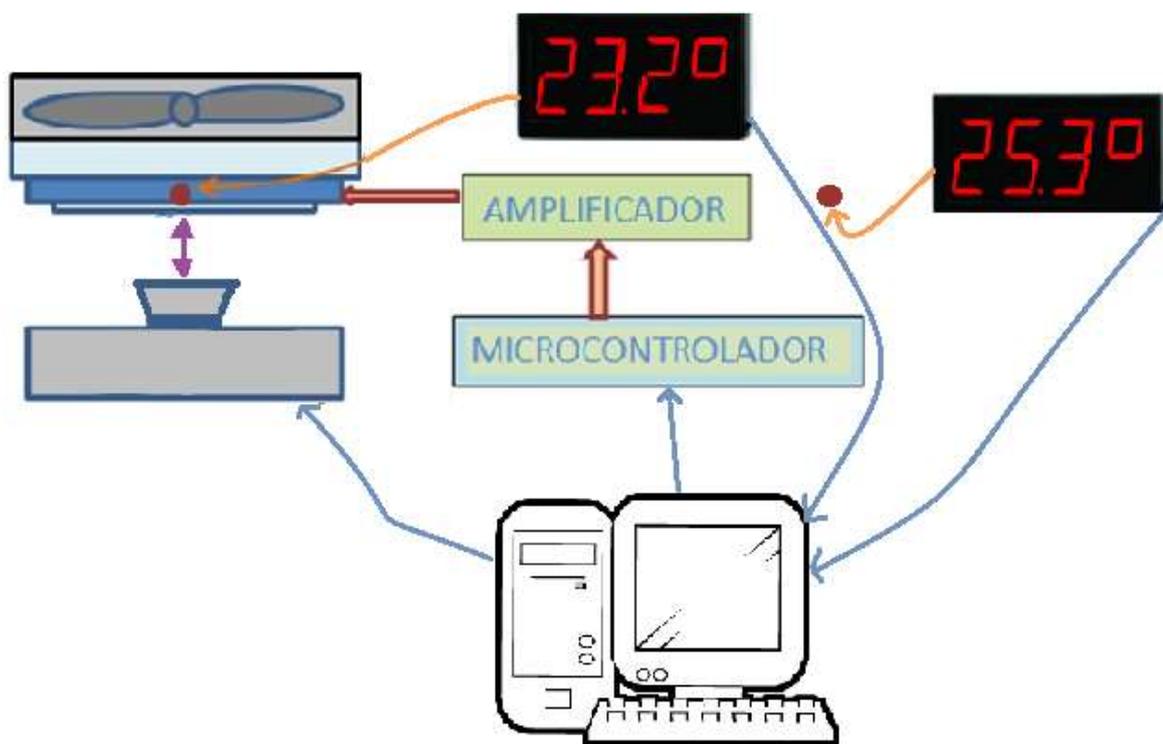


**Figura 42 - Detalhe da câmera refletido pela placa no início de condensação.**

Em ambos os ensaios, com a câmera capturando a imagem da placa e com a captura da própria imagem refletida pela placa, pode ser observada a diferença da nitidez das imagens, refletidas pela placa, quando há a comparação entre o início do ensaio e quando ocorre o ponto de orvalho. Outro ponto que pode ser observado é a mudança de tonalidade da imagem da placa em si, pois quando ocorre o ponto de orvalho, o embaçamento devido a essa condensação de água em sua superfície promove a mudança da imagem placa inicial para uma forma mais “esbranquiçada”, pois as pequenas gotículas de água irão realizar a difusão (ou espalhamento) da luminosidade que antes era refletida.

Com o conhecimento da alteração da imagem da superfície onde ocorre a condensação, é possível a utilização de uma nova configuração para realização de medidas de

umidade do dispositivo, utilizando a webcam em lugar dos detectores óticos de condensação (LED e fototransistor). As imagens poderiam ser observadas, ou até processadas, com a utilização de um microcomputador (figura 43).



**Figura 43 - Possibilidade de medição com uso de computador integrado ao processo**

O sistema poderia também, receber as informações dos termômetros digitais envolvidos no processo, ou seja, o de monitoramento de temperatura da placa e o de monitoramento de temperatura do ar do ambiente, através de comunicação serial ou via porta USB (dependendo da tecnologia dos termômetros utilizados), utilizando esses dados para o cálculo da umidade, tornando a medição mais rápida.

## 5. CONCLUSÕES

Foi verificado que a metodologia estudada, pode ser empregada na medição de umidade relativa do ar, onde haja fluxo de circulação direta do ar, como foi comprovado nos ensaios onde havia circulação forçada, com insuflação de ar diretamente à placa, quanto onde não haja circulação de ar. A utilização de poucos componentes comuns, juntamente com o projeto simplificado do dispositivo, torna a metodologia plenamente possível de ser reproduzida pelos laboratórios de medições, para o conhecimento do valor de umidade relativa do ambiente.

A comparação entre o ensaio que utilizava circulação forçada de ar e o ensaio sem circulação forçada apontou um erro médio de medição menor para o ensaio sem circulação forçada de ar, bem como, um menor valor médio do desvio-padrão das medidas, podendo serem comparados a valores de higrômetros capacitivos utilizados como padrões. Dessa forma a medição sem circulações consideráveis de ar, apresenta-se como uma metodologia mais confiável a ser explorada, pela boa estabilidade de medição do sistema.

A metodologia de análise do ponto de orvalho, através da captura de imagens por uma câmera digital, mostrou-se possível (conforme verificada nos ensaios), podendo utilizar-se um microcomputador integrado ao dispositivo a fim de melhorar o processo, deixando uma oportunidade para ser mais bem explorada em trabalhos futuros, bem como, a avaliação de possíveis gradientes de temperatura na placa de condensação.

## REFERÊNCIAS

ALVES, Edvaldo O. **Artigo: Propriedades Físicas do Semicondutor Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>**. Natal: UFRN, 2007, 132p.

ANDRADE, Marcelino. **Dispositivos e Circuitos Eletrônicos**. Disponível em: <http://digitalsignal.files.wordpress.com/2008/09/aula04.pdf>, acessado em 22/08/2013.

BRAGA, Newton C. **Fontes de alimentação**. 1. ed. São Paulo: Editora Saber, 2005, 240 p.

BRIONIZIO, Júlio D.; MAINIER, Fernando B. **Artigo: Avaliação de temperatura e umidade em uma câmara climática**. ENQUALAB-2006 – Congresso e Feira da Qualidade em Metrologia, REMESP – Rede Metrológica do Estado de São Paulo, 30 de maio a 01 de junho, 2006, São Paulo, Brasil.

\_\_\_\_\_; \_\_\_\_\_, Saulo G. de. **Artigo: Comparação intralaboratorial em higrometria**. ENQUALAB-2005 – Encontro para a Qualidade de Laboratórios, REMESP – Rede Metrológica do Estado de São Paulo, 07 a 09 de junho, 2005, São Paulo, Brasil.

COSTA JUNIOR, Juvenil Severino da. **Sensor de umidade microeletrônico fabricado em substrato de alumina e baseado na detecção do ponto de orvalho**. Campinas -SP, 2011, 98 p. Dissertação (Mestrado). Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP.

FELÍCIO, Luiz Carlos. **Modelagem da dinâmica de sistemas e estudo da resposta**. 2. ed. São Carlos: RiMa, 2010, 551 p.

FRADEN, Jacob. **Handbook of Modern Sensors - Physics, Designs and Applications**. 3. ed. New York: Springer, 2004, 589p.

**Avaliação de dados de medição: guia para a expressão de incerteza de medição – GUM** 2008. Duque de Caxias, RJ: INMETRO/CICMA/SEPIN, 2012, 141 p.

GÜTHS, Saulo; PAULO, Vicente de. **Instrumentação em Ciências Térmicas** - Universidade Federal de Santa Catarina, 1998. Disponível em: <http://emc.ufsc.br/labtermo/publica/apostInstrum.pdf>, acessado em 15/05/2013.

LINK, Walter. **Metrologia Mecânica – Expressão da Incerteza de Medição**. 1. ed. IPT, MITUTOYO, 1997.

LIRA, Francisco Adval de. **Metrologia na indústria**. 7. ed. São Paulo: Érica, 2009, 248 p.

LUFFT **Medição de Umidade: Conceitos Básicos**. Apostila disponível em: <http://www.lufft.com.br/tecnologia/Medi%C3%A7%C3%A3o%20de%20Umidade%20-%20Conceitos%20B%C3%A1sicos.pdf>, acessado em 03/06/2011

MALVINO, Albert P. **Eletrônica**. 3. ed.[s.l.]: McGrawHill, [198\_], 1 v.

\_\_\_\_\_. **Eletrônica**. 4. ed.[s.l.]: Makron Books, [200\_], 2 v.

MARIN, Fábio Ricardo et al. **Construção e avaliação de psicrômetro aspirado de**

**termopar.** Revista Scientia Agricola, [s.l.], v.58, n.4, p.839-844, out./dez. 2001

MORAN, Michael J; SHAPIRO, Howard N. **Princípios de termodinâmica para engenharia.** 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008, 681 p.

\_\_\_\_\_; \_\_\_\_\_.; MUNSON, Bruce R; DEWITT, David P. **Introdução à engenharia de sistemas térmicos: termodinâmica, mecânica dos fluidos e transferência de calor.** Rio de Janeiro: LTC, 2005, 604 p.

NPL – National Physical Laboratory; Michell Instruments. **A guide to the measurement of humidity.** Londres: The Institute of Measurement and Control, 1996, 68 p.

OGATA, Katsuhiko. **Ingeniería de Control Moderna.** 3. ed. [Naucalpan de Juárez]: PRENTICE-HALL, 1998, 997 p.

PAZ, Sidrak José da. **Inferência do ponto de orvalho em amostra de gás natural processado.** Natal, 2011, 93 p. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Disponível em: [http://bdtd.bczm.ufrn.br/tde\\_arquivos/12/TDE-2012-08-24T001942Z-4319/Publico/SidrakJP\\_DISSERT.pdf](http://bdtd.bczm.ufrn.br/tde_arquivos/12/TDE-2012-08-24T001942Z-4319/Publico/SidrakJP_DISSERT.pdf), acessado em 12/07/13.

POTTER, Merle C; SCOTT, Elaine P. **Ciências térmicas: termodinâmica, mecânica dos fluidos e transmissão de calor.** São Paulo: Thomson Learning, 2007, 772 p.

**Quadro geral de unidades de medida : resolução CONMETRO nº 12/1998.** 3. ed. Rio de Janeiro: INMETRO, 2007.

RIBEIRO, A. Silva; MARTINS, L. Lages. **Artigo: Análise comparativa de modelos matemáticos aplicados na medição da temperatura de ponto de orvalho em condições de referência.** Metrologia e Inovação – 2ª conferência nacional, SPMet – Sociedade Portuguesa de Metrologia, 3 a 4 de outubro, 2007, Funchal – Madeira

**Sensor technology handbook.** NEWNES [USA], 2005, 691p.

SOUZA, Uilian Lucas de; PEREIRA, Thiago Ramos. **Fotodiodos e Fototransistores.** Disponível em: <http://www.eletrica.ufpr.br/piazza/materiais/Uilian&Thiago.pdf>, acessado em 20/04/2013.

SPANHOLI, Ciro; FOLLMER, Daniel **Caixa térmica para bebidas.** Artigo disponível em: <http://www.sabereletronica.com.br/secoes/leitura/739>, acessado em 10/07/2011.

SWART, Jacobus W. **Conceitos Básicos para Semicondutores.** Disponível em: <http://pt.scribd.com/collections/2634044/Jacobus-W-Swart-Eletronica>, acessado em 10/07/2011.

TIPLER, Paul A; MOSCA, Gene. **Física para cientistas e engenheiros.** 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009, 1 v.

**Vocabulário internacional de metrologia – VIM 2008.** 1. ed. INMETRO, Edição Brasileira, 2008.

Sítios pesquisados:

[http://www.infopedia.pt/\\$higrometro](http://www.infopedia.pt/$higrometro), acessado em 03/06/2011.

<http://www.mspc.eng.br/termo/termod0410.shtml>, acessado em 03/06/2011.

<http://www.dec.ufcg.edu.br/biografias/JohnFreD.html>, acessado em 26/06/11.

<http://www.leb.esalq.usp.br/aulas/lce200/Cap6.pdf>, acessado em 12/11/2011.

<http://www.vaisala.com/Vaisala%20Documents/Application%20notes/CEN-TIA-G-Param-How-to-Choose-Application-note-B211203EN-A.pdf>, acessado em 17/07/2013.

<http://www.sobiologia.com.br/conteudos/Ar/Ar2.php>, acessado em 19/09/2013.

<http://dc151.4shared.com/doc/oTsSpuRc/preview.html>, acessado em 19/09/2013.

<http://www.sensormag.com/sensors/humidity-moisture/the-chilled-mirror-hygrometer-how-it-works-where-it-works-an-577>, acessado em 27/09/2013.

<http://www.wolframalpha.com/input/>, acessado em 10/11/2013.

<http://www.dei.isep.ipp.pt/~nsilva/ensino/ti/ti1998-1999/processador/processador.htm>, acessado em 12/12/2013.

<http://www.newtonbraga.com.br/index.php/almanaque-tecnologico/205-p/7627-pwm-alm442>, acessado em 14/12/2013.

## APÊNDICE A – CÁLCULO DOS COEFICIENTES DE SENSIBILIDADE

A fórmula do coeficiente de sensibilidade  $c_{ta}$  é calculada à partir da equação geral:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t_a} \left( \frac{611,2 \exp\left(\frac{17,62t_p}{243,12+t_p}\right)}{611,2 \exp\left(\frac{17,62t_a}{243,12+t_a}\right)} \right) \Leftrightarrow \frac{\partial}{\partial t_a} \left( \exp\left(\frac{17,62t_p}{243,12+t_p} - \frac{17,62t_a}{243,12+t_a}\right) \right) \Leftrightarrow \\ & \Leftrightarrow \exp\left(\frac{17,62t_p}{243,12+t_p} - \frac{17,62t_a}{243,12+t_a}\right) \times \frac{\partial}{\partial t_a} \left( \frac{17,62t_p}{243,12+t_p} - \frac{17,62t_a}{243,12+t_a} \right) \Leftrightarrow \\ & \exp\left(\frac{17,62t_p}{243,12+t_p} - \frac{17,62t_a}{243,12+t_a}\right) \times \left( -\frac{(243,12+t_a) \times (17,62t_a)' - (17,62t_a) \times (243,12+t_a)'}{(243,12+t_a)^2} \right) \Leftrightarrow \\ & \Leftrightarrow \left( -\frac{4283,77 \times \exp\left(\frac{17,62t_p}{243,12+t_p} - \frac{17,62t_a}{243,12+t_a}\right)}{(243,12+t_a)^2} \right) \end{aligned}$$

Da mesma forma,  $c_{tp}$  fica:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t_p} \left( \frac{611,2 \exp\left(\frac{17,62t_p}{243,12+t_p}\right)}{611,2 \exp\left(\frac{17,62t_a}{243,12+t_a}\right)} \right) \Leftrightarrow \frac{\partial}{\partial t_p} \left( \exp\left(\frac{17,62t_p}{243,12+t_p} - \frac{17,62t_a}{243,12+t_a}\right) \right) \Leftrightarrow \\ & \exp\left(\frac{17,62t_p}{243,12+t_p} - \frac{17,62t_a}{243,12+t_a}\right) \times \left( \frac{(243,12+t_p) \times (17,62t_p)' - (17,62t_p) \times (243,12+t_p)'}{(243,12+t_p)^2} \right) \Leftrightarrow \\ & \Leftrightarrow \left( \frac{4283,77 \times \exp\left(\frac{17,62t_p}{243,12+t_p} - \frac{17,62t_a}{243,12+t_a}\right)}{(243,12+t_p)^2} \right) \end{aligned}$$

**APÊNDICE B – PROGRAMA USADO NO MICROCONTROLADOR**

```
int Pin = 9;    // Atribui o nome "Pin" à variável de saída ao
pino digital 9

void setup() {
  // inicializa o pino digital para saída
  pinMode(Pin, OUTPUT);
}

void loop() {

  for(int Value = 0 ; Value <= 100; Value +=20) {
    digitalWrite(Pin, HIGH);
    delay(100);
    digitalWrite(Pin, LOW);
    delay(4900);
  }

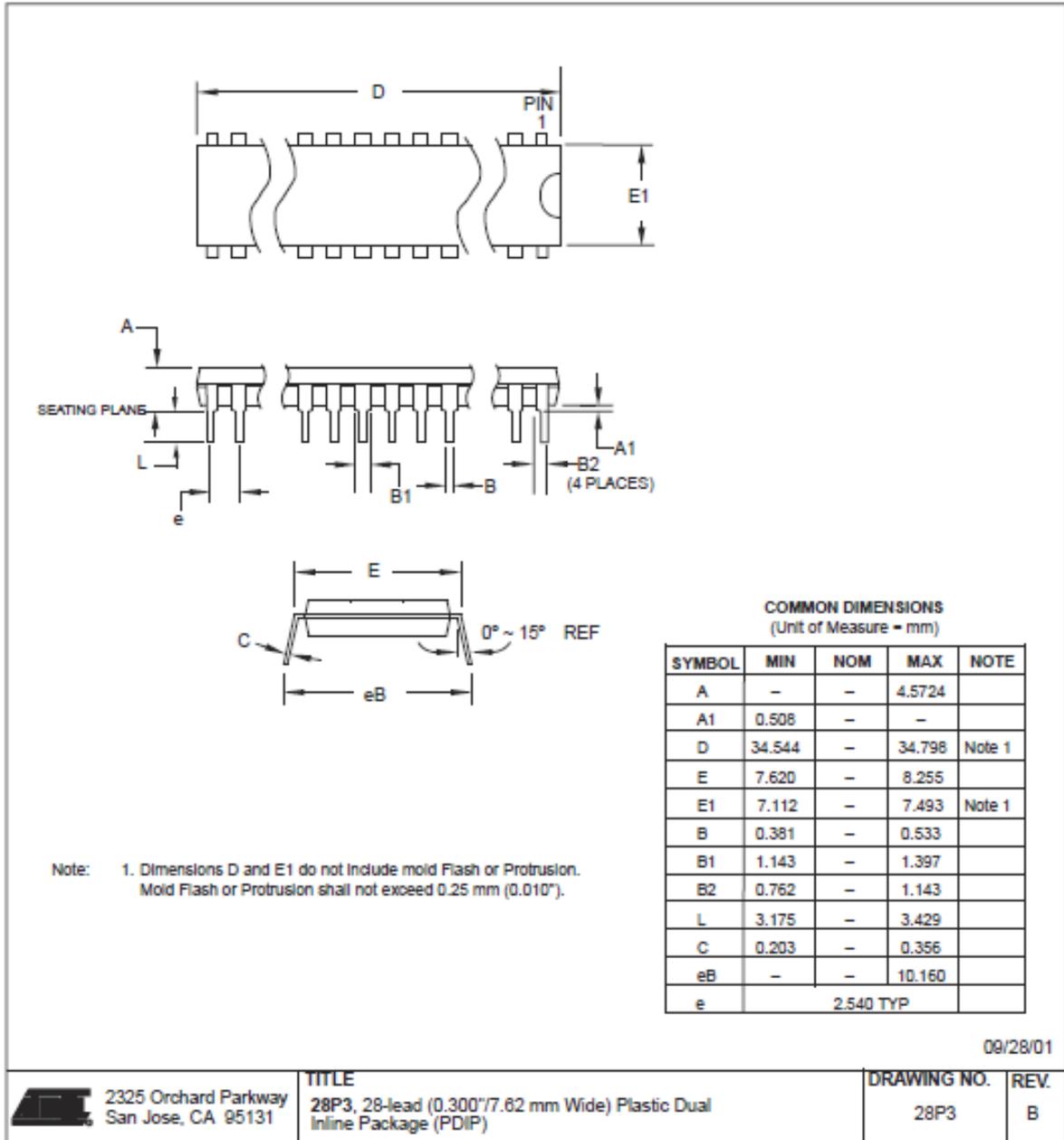
  for(int Value = 100 ; Value <= 900; Value +=50) {
    digitalWrite(Pin, HIGH);
    delay(Value);
    digitalWrite(Pin, LOW);
    delay(1000 - Value);
  }

  for(int fadeValue = 900 ; fadeValue >= 100; fadeValue -=0)
  {
    digitalWrite(Pin, HIGH);
    delay(1000);
  }
}
```

ANEXO A – ESPECIFICAÇÕES DO MICROCONTROLADOR

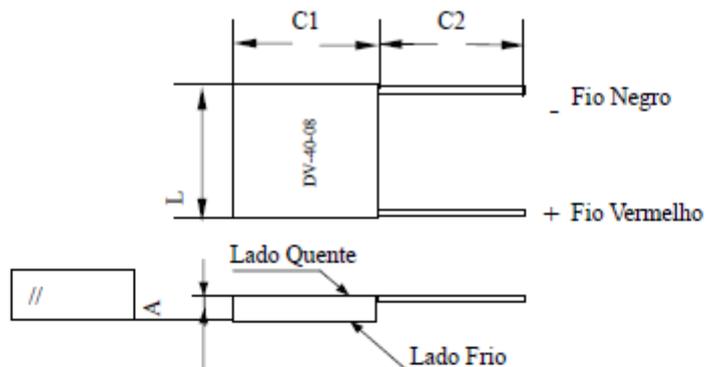
**ATmega48PA/88PA/168PA/328P**

33.4 28P3



## ANEXO B – ESPECIFICAÇÕES DA PLACA DE PELTIER

### 1.1 Diagrama



### 1.2 Dimensões e Especificações

C1 (mm)	L (mm)	A (mm)	C2 (mm)	Paralelismo
39.5±0.2	39.5±0.2	3.60±0.1	150±3	≤0.05

Pares	I <sub>max</sub> (A)	V <sub>max</sub> (V)	Q <sub>max(w)</sub> dT = 0	dT <sub>max</sub> (C) Q=0	R(Ω)
127	8	15.4	72.0	68	1.60±0.1

