



## **TRABALHO DE GRADUAÇÃO**

# **ANÁLISE DO DESEMPENHO DE UM SISTEMA DE RESFRIAMENTO EVAPORATIVO E SUA UTILIZAÇÃO INTEGRADA A UM SISTEMA DE RESFRIAMENTO CONVENCIONAL**

**Fernando Santos Ferreira  
Flávio Soares Domingues de Almeida  
Henrique Tavares Mafra**

**Brasília, março de 2006**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

**FACULDADE DE TECNOLOGIA**

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
Faculdade de Tecnologia

## TRABALHO DE GRADUAÇÃO

# **ANÁLISE DO DESEMPENHO DE UM SISTEMA DE RESFRIAMENTO EVAPORATIVO E SUA UTILIZAÇÃO INTEGRADA A UM SISTEMA DE RESFRIAMENTO CONVENCIONAL**

**Fernando Santos Ferreira  
Flávio Soares Domingues de Almeida  
Henrique Tavares Mafra**

Relatório submetido como requisito parcial para obtenção  
do grau de Engenheiro Eletricista/Mecatrônico

### **Banca Examinadora**

Prof. Marco Antônio F. do Egito Coelho, UnB/ ENE  
(Orientador)

---

Prof. João M. D. Pimenta., UnB/ ENM

---

Prof. Flavia M. Aranha de Oliveira, UnB/ ENE

---

## **Dedicatória**

*Dedico este trabalho a todos que durante estes longos anos de formação, me ajudaram a superar os obstáculos que surgiram no caminho. Em especial dedico a minha família que pode me proporcionar estes anos de estudo longe de casa.*

*Fernando Santos Ferreira*

*Dedico este trabalho a todos os que tornaram possível essa grande conquista, em especial aos meus pais, que demonstraram apoio incondicional.*

*Flávio Soares Domingues de Almeida*

*Decido este trabalho aos meus familiares, a minha namorada, Mirele, aos meus amigos, e a todos que de alguma forma contribuíram para realização desse trabalho.*

*Henrique Tavares Mafra*

## **Agradecimentos**

*Agradeço a toda minha família por me apoiar e por ter sido tão compreensiva nos momentos difíceis.*

*Agradeço a todos os professores que de alguma forma me ajudaram nesse projeto. Em especial agradeço ao professor Marco Antônio Freitas do Egito Coelho por incentivo e apoio concedido durante a realização do projeto.*

*Agradeço ao colega de laboratório Gustavo Amaral F. de Melo que nos auxiliou na solução dos problemas que surgiram durante o projeto.*

*Agradeço também aos funcionários do GAT (Grupo de Apoio Técnico) do Departamento de Engenharia Elétrica, em especial ao Cícero, que muito contribuíram e sempre foram muito prestativos para atender às necessidades que tivemos ao longo desse trabalho.*

*Por fim, agradeço aos meus companheiros de projeto, Henrique Tavares Mafra e Fernando Santos Ferreira que propiciaram um clima agradável para o desenvolvimento desse trabalho.*

*Flávio Soares Domingues de Almeida*

*Agradeço a todos os professores que transmitiram a mim os ensinamentos necessários a minha formação como engenheiro e como cidadão. Em especial agradeço ao professor Marco Antônio Freitas do Egito Coelho por todo suporte e auxílio necessário para o bom desenvolvimento do projeto.*

*Agradeço aos meus pais e aos meus irmãos por me apoiarem incondicionalmente durante todo o meu caminho nesses cinco anos de curso.*

*Agradeço a minha namorada, Mirele, por todo carinho, apoio e compreensão nos momentos difíceis.*

*Agradeço ao Gustavo Amaral F. de Melo, colega de laboratório que se mostrou bastante prestativo para auxiliar na solução dos problemas que surgiram durante o projeto.*

*Agradeço também aos funcionários do GAT (Grupo de Apoio Técnico) do Departamento de Engenharia Elétrica, Célio Matos e Algenor e em especial ao Cícero, que muito contribuíram e sempre foram muito prestativos para o sucesso do trabalho.*

*Por fim, agradeço aos meus companheiros de projeto, Flávio Soares Domingues de Almeida e Fernando Santos Ferreira que estiveram sempre ao meu lado no desenvolvimento desse trabalho.*

*Henrique Tavares Mafra*

*Agradeço aos meus pais a possibilidade de concluir esta graduação, vocês são essenciais na minha vida.*

*Agradeço ao meu irmão pelo apoio dado durante a realização deste curso.*

*Agradeço a toda minha família por me incentivar sempre.*

*Agradeço a minha namorada Andressa que muito me ajudou para a execução deste, e foi compreensiva nos momentos que foi necessário estar longe.*

*Agradeço também aos colegas de turma que fizeram os momentos nesta cidade nova mais fáceis.*

*Agradeço a Flávio Soares e Henrique Mafra pela amizade construída durante este projeto.*

*Fernando Santos Ferreira*

---

## RESUMO

O presente trabalho vem apresentar um sistema de condicionamento de ar híbrido, composto por um aparelho de ar condicionado convencional, e por um aparelho de climatização evaporativo projetado com a finalidade de se propiciar de maneira controlada o conforto térmico no interior de um ambiente construído no laboratório LAVSI, no prédio SG-11 do campus da Universidade de Brasília.

Foram feitos vários testes do sistema de climatização com diferentes montagens do sistema de climatização evaporativo, onde se buscou identificar qual seria a melhor configuração para o funcionamento mais eficiente do climatizador evaporativo.

Inúmeros conceitos de conforto ambiental, conceitos de refrigeração, conceitos de climatizadores evaporativos, conceitos de dispositivos eletro-eletrônicos compõem este trabalho de graduação.

Todas as etapas de construção do ambiente de ensaios, alterações no climatizador evaporativo, projetos eletro-eletrônicos, e lógica de controle estão presentes neste trabalho.

Após a análise do desempenho e a caracterização do climatizador construído implementou-se um sistema de controle de temperatura baseado na manutenção de uma temperatura de referência que deveria ser mantida pela iteração dos dois sistemas de climatização e também foi desenvolvida uma interface com o usuário em um display de cristal líquido, além de dois botões presentes na placa de controle para alterar-se a temperatura de referencia requerida.

Neste trabalho foi proposto um método diferente para a aquisição dos dados dos sensores utilizados no projeto, neste caso utilizou-se uma chave analógica (multiplexador) para diminuirmos o número de conversores AD utilizados no PIC.

Outra etapa muito importante deste trabalho é a modelação do ambiente de ensaios, onde se buscou fazer uma analogia do ambiente de ensaios com um circuito elétrico, e a partir desta modelação pode-se comparar o sistema real com o modelo proposto.

*Palavras-chave: resfriamento evaporativo, conforto ambiental, controle de temperatura.*

---

## ABSTRACT

This work presents a hybrid air conditioning system, composed by a conventional mechanical cooling system and an evaporative cooling device. This system was projected with the purpose of provide thermal comfort inside of an environment constructed in laboratory LAVSI, at Sg-11 building in University of Brasilia's campus.

Several tests with the evaporative system in different assemblies of the evaporative cooling device were made, so that the best configuration for the most efficient functioning of the evaporative cooling device could be identified.

Innumerable environmental comfort concepts, refrigeration concepts, evaporative cooling devices concepts and electro-electronics devices concepts compose this work of graduation.

All the stages of the construction of the tests environment of assays, alterations in the evaporative system, electro-electronics projects and control logic are described in this work.

After the performance analysis and the characterization of the constructed evaporative cooling device, a temperature control system based on the maintenance of a reference temperature provided by the iteration of the two cooling systems was developed, an interface with the user using a crystal display was developed and two buttons were positioned in the control plate so that the temperature reference required could be changed.

In this work a different method for the used sensors data acquisition was proposed, in this case an analogical multiplexer was used to reduce the numbers of the PIC AD converters used.

Another very important stage of this work is the proposition of environment tests model designed based on an analogy between the environment tests and an electric circuit so that this model could be compared to the real system.

*Keywords: evaporative cooling, environmental comfort, temperature control.*

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>14</b>
1.1	MOTIVAÇÃO.....	14
1.2	OBJETIVOS.....	14
1.3	COMPOSIÇÃO DO TRABALHO .....	15
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>17</b>
2.1	CONFORTO AMBIENTAL.....	17
2.2	CONFORTO TÉRMICO.....	17
2.3	MÉTODOS DE MEDIÇÃO DAS VARIÁVEIS DE CONFORTO AMBIENTAL.....	18
2.4	DISPOSITIVOS ELETRÔNICOS UTILIZADOS .....	29
2.4.1	MICROCONTROLADOR PIC18F252 .....	29
2.4.2	SENSOR DE TEMPERATURA LM35 .....	32
2.4.3	MULTIPLEXADOR ANALÓGICO - CD4052B .....	33
<b>3</b>	<b>SISTEMA DE CONTROLE</b> .....	<b>37</b>
3.1.1	CIRCUITO DE AQUISIÇÃO DE DADOS .....	37
3.1.2	CIRCUITO DE ACIONAMENTO DOS ATUADORES .....	43
3.1.3	CIRCUITO DE CONTROLE.....	44
<b>4</b>	<b>REFRIGERADOR CONVENCIONAL</b> .....	<b>51</b>
4.1	CARACTERÍSTICAS DE FUNCIONAMENTO DE UM REFRIGERADOR CONVENCIONAL.....	51
4.2	VANTAGENS E DESVANTAGENS DOS REFRIGERADORES CONVENCIONAIS .....	56
<b>5</b>	<b>CONDICIONADOR EVAPORATIVO</b> .....	<b>57</b>
5.1	CARACTERÍSTICAS DE FUNCIONAMENTO DO CONDICIONADOR EVAPORATIVO.....	57
5.2	APARELHO DE RESFRIAMENTO EVAPORATIVO.....	58
5.2.1	MUDANÇAS NA ESTRUTURA DO AR CONDICIONADO EVAPORATIVO. ....	61
<b>6</b>	<b>AMBIENTE DE TESTES.</b> .....	<b>65</b>
6.1	TESTES .....	67
6.1.1	CONFIGURAÇÕES DE ENSAIOS POSSÍVEIS.....	67
6.1.2	CONDIÇÕES DO AMBIENTE PARA REALIZAÇÃO DOS TESTES. ....	69
6.1.3	TESTES REALIZADOS.....	70
<b>7</b>	<b>DADOS E ANÁLISE</b> .....	<b>73</b>
7.1	TODOS OS APARELHOS DESLIGADOS .....	73
7.2	CONDICIONADOR EVAPORATIVO COM O VENTILADOR NA VELOCIDADE 1 (1000 RPM) E UTILIZANDO A MONTAGEM 1 .....	76
7.3	EVAPORATIVO COM O VENTILADOR NA VELOCIDADE 2 (1080 RPM) E UTILIZANDO A MONTAGEM 1 .....	81
7.4	EVAPORATIVO COM O VENTILADOR NA VELOCIDADE 1 (1000 RPM) E UTILIZANDO A MONTAGEM 2 .....	86
7.5	APENAS O AR CONDICIONADO CONVENCIONAL FUNCIONANDO. ....	91
7.6	TESTE DO SISTEMA DE CONTROLE IMPLEMENTADO .....	93
7.6.1	FLUXOGRAMA DO SISTEMA DE CONTROLE IMPLANTADO.....	94
7.7	CÁLCULO DA CARGA TÉRMICA .....	99
7.7.1	CÁLCULO DA POTÊNCIA DO CONDICIONADOR EVAPORATIVO.....	99
7.8	CIRCULAÇÃO DO AR DO SISTEMA. ....	101
7.9	MODELO DINÂMICO DO AMBIENTE.....	104
7.9.1	SIMULAÇÃO NO MATLAB .....	109
<b>8</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	<b>113</b>

<b>9</b>	<b>REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>114</b>
<b>10</b>	<b>ANEXOS.....</b>	<b>117</b>
10.1	ANEXO A – CÓDIGOS COMPUTACIONAIS.....	117
10.2	ANEXO B – TABELA DE DADOS DA BASENGE.....	129

## LISTA DE FIGURAS

Figura	2.1 – Foto de um higrômetro típico (JUNIOR, Luiz Carlos Martinelli, 2003).....	20
Figura	2.2 – Diagrama Psicrométrico (JUNIOR, Luiz Carlos Martinelli, 2003).....	25
Figura	2.3 – Guia de leitura de uma carta psicometrica (JUNIOR, Luiz Carlos Martinelli, 2003).....	26
Figura	2.4 – Carta de conforto ASHRAE (Camargo, J. R., 2003).....	27
Figura	2.5 – Interação entre o ar e a água na transferência de calor (CASTRO, W.P. e PIMENTA, J.M.D, 2004).....	28
Figura	2.6 – Configuração física do interior de um microcontrolador (MATIC, Nebojsa, 2003).....	30
Figura	2.7 – Esquema de um microcontrolador com os seus elementos básicos e ligações internas (MATIC, Nebojsa, 2003).....	30
Figura	2.8 – Foto de um microcontrolador PIC 18F252 [19].....	31
Figura	2.9 – Pinagem do microcontrolador PIC 18F252 [19].....	32
Figura	2.10 – Vista superior do dispositivo LM35DM, mostrando sua configuração de pinos. A sigla N.C. significa “nenhuma conexão”. [14].....	33
Figura	2.11 – Multiplexadores para 4 e 8 entradas (MUX-4 e MUX-8), respectivamente..	34
Figura	2.12 – Pinagem do multiplexador analógico CD4052 [9].....	35
Figura	2.13 – Formas de onda de ativação (à esquerda) e desativação (à direita) dos canais. Repare que os atrasos estão em torno de 20ns [9].....	36
Figura	3.1 – Fluxograma do processo de aquisição, tratamento e retorno das informações do sistema.....	37
Figura	3.2 – Circuito amplificador não-inversor.....	38
Figura	3.3 – Amplificador com filtro em sua entrada para a atenuação de ruídos.....	39
Figura	3.4 – Circuito de proteção do conversor A/D utilizado na saída do amplificador operacional.....	40
Figura	3.5 – Curva característica da tensão de entrada para o conversor A/D em função da tensão $V_{OUT}$ .....	41
Figura	3.6 – Circuito amplificador completo, com as devidas proteções contra ruídos e sinais fora da faixa de operação do conversor A/D.....	41
Figura	3.7 – Diagrama resumo do circuito de aquisição de dados.....	42
Figura	3.8 – Layout da placa de aquisição de dados feito por meio do software TraxMaker.	42
Figura	3.9 – Foto da placa de aquisição de dados.....	43
Figura	3.10 – Placa de acionamento dos atuadores aproveitada de um projeto anterior (LOPES, F.V. e MIRANDA, H.C.C, 2005).....	43
Figura	3.11 – Circuito de acionamento utilizado para cada um dos atuadores (LOPES, F.V. e MIRANDA, H.C.C, 2005).....	44
Figura	3.12 – Foto da placa de controle.....	45
Figura	3.13 – Circuito da placa de controle.....	46
Figura	3.14 – Foto do circuito integrado MAX232.....	47
Figura	3.15 – Configuração dos pinos na conexão PC-MAX232(LOPES, F.V. e MIRANDA, H.C.C, 2005).....	48
Figura	3.16 – Foto do módulo LCD utilizado.....	49
Figura	3.17 – Configuração de pinos do display LCD.....	49
Figura	4.1 – Ciclo de Refrigeração (PANESI, André Ricardo Quinteros, 2003).....	52
Figura	4.2 – Compressor (JUNIOR, Luiz Carlos Martinelli, 2003).....	53
Figura	4.3 – Tubo Capilar (JUNIOR, Luiz Carlos Martinelli, 2003).....	54

Figura	4.4 – Evaporador de Superfície estendida (JUNIOR, Luiz Carlos Martinelli, 2003).	55
Figura	4.5 – Evaporador de Placas conformadas (JUNIOR, Luiz Carlos Martinelli, 2003)..	55
Figura	5.1 – Condicionador evaporativo direto (RED) Fonte: (CAMARGO, J. R., 2003)....	57
Figura	5.2 – Estrutura do Ventilador .....	58
Figura	5.3 – Ventilador .....	59
Figura	5.4 – sistema aspersor.....	59
Figura	5.5 – Células .....	60
Figura	5.6 – Bomba d’água utilizada no projeto.....	61
Figura	5.7 – Relação vazão x altura da coluna d’água da Bomba d’água.....	61
Figura	5.8 – Configurações possíveis do ventilador e da divisória. (a) Célula posicionada a frente do ventilador. (b) Célula posicionada atrás do ventilador. ....	62
Figura	5.9 – Conexão da mangueira à torneira.....	63
Figura	5.10 – Reservatório com a bóia.....	64
Figura	6.1 – Local de instalação do evaporativo. ....	65
Figura	6.2 – Ambiente de testes. ....	67
Figura	6.3 – Equipamento evaporativo com a célula evaporativa de celulose posicionada na frente do ventilador.....	68
Figura	6.4 – Equipamento evaporativo com a célula evaporativa de celulose posicionada atrás do ventilador. ....	68
Figura	6.5 – Disposição dos sensores no ambiente (vista superior). ....	70
Figura	7.1 – Teste da variação da temperatura ao decorrer do dia sem a interferência de nenhum equipamento. Iniciado às 18h45min do dia 28/02/2006.....	75
Figura	7.2 – Teste da variação da temperatura medida ao decorrer do dia com o condicionador evaporativo ligado na velocidade 1 e montagem 1. Iniciado às 09h30min do dia 02/03/2006. ....	79
Figura	7.3 – Gráfico de variação da umidade externa calculada ao decorrer do dia com o condicionador evaporativo ligado na velocidade 1 e montagem 1. Iniciado às 09h30min do dia 02/03/2006. ....	80
Figura	7.4 – Teste da variação da temperatura medida ao decorrer do dia com o condicionador evaporativo ligado na velocidade 2 e montagem 1. Iniciado às 21h18min do dia 03/03/2006. ....	84
Figura	7.5 – Teste da variação da umidade relativa calculada do ar externo ao decorrer do dia com o condicionador evaporativo ligado na velocidade 2 e montagem 1. Iniciado às 21h18min do dia 03/03/2006.....	85
Figura	7.6 – Teste da variação da temperatura medida ao decorrer do dia com o condicionador evaporativo ligado na velocidade 1 e montagem 2. Iniciado às 19h50min do dia 10/03/2006. ....	89
Figura	7.7 – Gráfico de variação da umidade calculada ao decorrer do dia com o condicionador evaporativo ligado na velocidade 1 e montagem 2. Iniciado às 19h50min do dia 10/03/2006. ....	90
Figura	7.8 – Teste da variação da temperatura medida ao decorrer do dia com o condicionador convencional ligado em potencia máxima. Iniciado às 08h48min do dia 05/03/2006.....	92
Figura	7.9 – Fluxograma do “Estado 0” do sistema de controle.....	94
Figura	7.10 – Fluxograma dos “Estados 1, 2 e 3” do sistema de controle .....	94
Figura	7.11 – Teste da variação das temperaturas medidas no decorrer do dia com o sistema de controle atuando. ....	97
Figura	7.12 – Teste da variação das umidades interna e externa calculadas no decorrer do dia com o sistema de controle atuando.....	98
Figura	7.13 – Divisão dos setores a frente do condicionador evaporativo .....	102
Figura	7.14 - Divisão dos setores a frente do Ar condicionado Convencional .....	103
Figura	7.15 – Circuito elétrico análogo ao sistema térmico do ambiente em estudo. ....	105
Figura	7.16 – Termodinâmica de um ambiente refrigerado.....	109
Figura	7.17 – Modelo de variação diária de temperatura externa .....	110

Figura	7.18 – Modelo do ambiente interno.....	110
Figura	7.19 – Gráfico da temperatura insuflada resultante da simulação .....	111
Figura	7.20 – Gráfico da temperatura das paredes resultante da simulação.....	111
Figura	7.21 – Gráfico da temperatura do ar interno resultante da simulação.....	111

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2-1 – Dados comparativos entre a equação [2-8] e a carta psicometrica. ....	21
Tabela 2-2 – Tabela verdade do multiplexador CD4052. Onde aparece X nos possíveis valores de A e B, entende-se que pode ser aplicado qualquer nível lógico [9].....	35
Tabela 3-1 – Configuração dos pinos do PIC conectados aos diversos dispositivos controlados por ele.....	49
Tabela 7-1 – Dados dos pontos analisados no ensaio da montagem 1 e velocidade 1 do ventilador .....	77
Tabela 7-2 – Dados dos pontos analisados no ensaio da montagem 1 e velocidade 2 do ventilador .....	82
Tabela 7-3 – Dados dos pontos analisados no ensaio da montagem 2 e velocidade 1 do ventilador .....	87
Tabela 7-4 – Valores medidos nos setores .....	102
Tabela 7-5 – Valores medidos nos setores do ar condicionado.....	103
Tabela 7-6 – Características das paredes que cercam o ambiente de testes .....	108
Tabela 10-1 – Tabela de redução de temperatura por meio do sistema de resfriamento evaporativo .....	129

# LISTA DE SÍMBOLOS

## Símbolos Latinos

$P_V$	pressão parcial do vapor d'água na mistura	Pa
$P_{VS}$	pressão correspondente ao estado de saturação da mistura	Pa
$V$	tensão	V
$V$	volume	m <sup>3</sup>
$E_v$	quantidade de água evaporada em um período de tempo	l/hora
$\Delta T$	diferença de temperatura	°C
$fx$	fluxo de ar	m <sup>3</sup> /h
$K_1$	constante	l/°Cm <sup>3</sup>
$P_{EV}$	potência consumida com a evaporação da água	kW/l
$K_2$	constante	kW/l
$P_{TT}$	potência total do evaporativo	kW/hora
$P_{UTIL}$	potência útil do evaporativo	kW/hora
$K_3$	constante	kW/°C m <sup>3</sup>
$m$	massa de um corpo	kg
$Q$	calor armazenado em um corpo	kJ
$\dot{Q}$	fluxo de calor	kJ/hora
$k$	condutibilidade térmica do material	°C/kJ
$\dot{T}$	taxa de variação de temperatura	°C/s
$T$	temperatura	°C
$C$	capacitância do corpo	kJ/K
$c$	calor específico do material	kJ/kgK
$R$	resistência	$\Omega$

## Símbolos Gregos

$\phi$	Umidade relativa do ar	%
$\rho$	massa específica do material	kg/ m <sup>3</sup>

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 MOTIVAÇÃO

A preocupação com o conforto ambiental pode trazer melhorias no bem estar de pessoas em suas residências, mas principalmente propiciar melhores condições de trabalho ao indivíduo, favorecendo um melhor desempenho do organismo humano predispondo o trabalhador a melhorar sua eficiência e produtividade. Logo as más condições de temperatura, umidade, iluminação ou mesmo ruídos podem não somente prejudicar o andamento do trabalho, como pode gerar stress e fadiga, fazendo os riscos de segurança aumentar e talvez impossibilitar a execução do trabalho. Além da eficiência no trabalho a refrigeração e o ar condicionado são um avanço no século XX que contribuiu para o aumento da expectativa de vida do ser humano.

O problema energético mundial é outro fator que motiva a execução deste trabalho, pois nos sistemas de refrigeradores de ar tradicionais existem motores e compressores que consomem uma grande quantidade de energia, enquanto um refrigerador puramente evaporativo pode ser simplificado a uma bomba de água e um motor de ventilador, logo o consumo deste sistema torna-se muito mais atraente e competitivo com relação ao ar condicionado comum.

A proposta de construção de um climatizador híbrido é mostrar os benefícios do climatizador evaporativo, já que os refrigeradores mais utilizados em residências e escritórios do país são do tipo convencional, e estes por sua vez são aparelhos que além de consumirem muita energia, também por causa do gás utilizado em seu sistema de refrigeração (CFC) agridem o meio ambiente.

## 1.2 OBJETIVOS

Neste trabalho buscou-se avaliar o desempenho de um climatizador evaporativo para que fosse possível implementar um sistema de climatização híbrido, baseado em duas tecnologias conhecidas, os refrigeradores convencionais e os climatizadores evaporativos, aproveitando o que de melhor cada tecnologia pode oferecer.

A construção de um ambiente que sirva de local de ensaios para o sistema de climatização híbrido também compõe os objetivos deste trabalho.

Outro objetivo do trabalho é a tentativa de cálculo da capacidade térmica do climatizador evaporativo construído a partir de teorias de transporte de calor e massa.

Faz parte dos objetivos deste trabalho a modelação de todo o sistema de climatização construído. Neste ponto busca-se modelar o ambiente de ensaios e os climatizadores para possibilitar a simulação computacional do projeto de conforto térmico.

### **1.3 COMPOSIÇÃO DO TRABALHO**

O segundo capítulo apresenta uma revisão bibliográfica dos assuntos tratados neste trabalho. A seção 2.1 apresenta os conceitos de conforto ambiental, e os aspectos que definem um ambiente confortável. Na seção 2.2 trata-se especificamente do conforto térmico e as variáveis que o influenciam. A seção 2.3 apresenta os métodos de medição das variáveis de conforto ambiental, nesta seção apresenta-se varias definições a respeito de temperatura, umidade, velocidade do ar, carga térmica, psicometria, além de duas equações para estimativa da umidade relativa do ar.

Na seção 2.4 discorre-se a respeito dos dispositivos eletrônicos utilizados na elaboração deste projeto. O Microcontrolador PIC18F252 tem suas características descritas na seção 2.4.1. A seção 2.4.2 é dedicada ao sensor de temperatura utilizado na execução do projeto. Este sensor é o sensor de temperatura LM35. Na seção 2.4.3 descreve-se as características de funcionamento do multiplexador analógico – CD4052B, utilizado na aquisição das leituras dos sensores de temperatura.

No capítulo 3 descrevemos com detalhes o sistema de controle aplicado ao sistema de climatização desenvolvido. Mais especificamente na seção 3.1.1 trata-se do circuito de aquisição de dados. Na seção 3.1.2 discorre-se a respeito do circuito de acionamento dos atuadores (motor do ventilador, bomba d'água e ar condicionado). O circuito de controle foi detalhado na seção 3.1.3 e nesta seção trata-se ainda da comunicação serial do PIC e o microcomputador e da conversão dos sinais de temperatura.

No capítulo 4 o assunto é o refrigerador convencional utilizado na construção do sistema híbrido. A seção 4.1 é dedicada às características de funcionamento de um refrigerador convencional, discorre-se a respeito do compressor, do condensador, e outros dispositivos presentes em um refrigerador convencional. A seção 4.2 trata das vantagens e desvantagens no uso dos refrigeradores convencionais.

No capítulo 5 o climatizador evaporativo construído tem suas características apresentadas. Na seção 5.1 descreve-se o funcionamento do climatizador evaporativo. A seção 5.2 apresenta as características do climatizador evaporativo no início do projeto e as modificações efetuados no decorrer do projeto.

O capítulo 6 apresenta as características do ambiente de ensaios construído. Neste capítulo descreve-se a instalação do climatizador evaporativo na janela do laboratório, e também a instalação das divisórias utilizadas para se separar o ambiente de ensaios do restante do laboratório. A seção 6.1 descreve

os testes efetuados durante o projeto, além das configurações disponíveis para se montar o climatizador evaporativo.

O capítulo 7 apresenta os dados adquiridos durante os ensaios e as considerações feitas para cada ensaio. A seção 7.7 apresenta algumas considerações a respeito do cálculo da carga térmica do ambiente de ensaios construído. Na seção 7.7.1 é apresentado o cálculo da potência do climatizador evaporativo. A seção 7.9 apresenta o modelo dinâmico proposto para o ambiente de ensaios.

O capítulo 8 apresenta as considerações finais e a conclusão do trabalho.

Finalmente, nos anexos, encontram-se alguns códigos dos programas desenvolvidos, assim como uma tabela de dados utilizada na elaboração do sistema de controle.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 CONFORTO AMBIENTAL

O conforto ambiental envolve além de fatores físicos, também fatores pessoais, o que torna sua definição um pouco subjetiva. Se considerado o aspecto pessoal, o conforto ambiental é uma condição mental que expresse satisfação com o ambiente (Simancas Yovane, Kátia, 2003). Do ponto de vista físico, confortável é o ambiente cujas condições permitam a manutenção da temperatura sem a necessidade de serem acionados os mecanismos termo-reguladores, ou seja, é necessário que o organismo se encontre em balanço térmico com o meio ambiente.

Vários aspectos do ambiente em questão devem ser levados em consideração, e deve-se dizer qual parâmetro será utilizado para mensurar o nível de conforto a que o ser humano está exposto. A temperatura, a umidade relativa do ar, a velocidade do vento, juntamente com o tempo de exposição contribuem para a sensação de calor ou frio de cada pessoa.

A temperatura do ar é o fator mais usual quando se busca criar condições adequadas de um ambiente de trabalho, pois há temperaturas que nos dão uma sensação de conforto, enquanto outras se tornam desagradáveis e até prejudiciais à saúde.

Em se tratando de conforto ambiental, outros aspectos devem ser levados em consideração, o nível de ruído, a quantidade de luz incidente no ambiente, o nível de vibração, e também a qualidade do ar, mas tratar destes outros aspectos não é o objetivo deste trabalho.

Sendo assim, o conforto no ambiente é determinado pela combinação de vários fatores. E dentre estes fatores, os que interessam diretamente este trabalho são a temperatura do ambiente e a umidade relativa do ar. Dessa forma a discussão neste trabalho é orientada para as condições de conforto térmico mais que as condições de conforto ambiental.

### 2.2 CONFORTO TÉRMICO

O conforto térmico é o reflexo das sensações das pessoas no que diz respeito à satisfação com o ambiente térmico que as envolve. Se o balanço de todas as trocas de calor a que está submetido o corpo humano for nulo e a temperatura da pele e suor estiverem dentro de certos limites, pode-se dizer que o homem sente conforto térmico (Sá, Paulo, 1938). Conforme já fora mencionado antes, algumas das variáveis ambientais que influenciam este conforto são:

- temperatura do ar

- umidade do ar
- velocidade do ar
- temperatura média radiante

Além destas variáveis, a atividade desenvolvida pelo homem e a vestimenta que ele usa também interagem na sensação de conforto térmico (Sá, Paulo, 1938).

## **2.3 MÉTODOS DE MEDIÇÃO DAS VARIÁVEIS DE CONFORTO AMBIENTAL**

### **Termômetros**

#### **Temperatura de bulbo seco**

Este parâmetro se refere basicamente ao ar que está ao redor do corpo, e seu valor nos dá uma idéia geral do estado térmico do ar na sombra. Este é um dos fatores principais que incidem no fluxo de calor entre o corpo e o ambiente (Simancas Yovane, Kátia, 2003).

Esta temperatura é medida por termômetros comuns e comumente chamada de “temperatura de bulbo seco do ar”. Mas essa há muito tempo é uma medida muito imperfeita daquilo que pode-se chamar a sensação do frio, pois dos vários elementos que agem sobre a perda de calor gerado pelo organismo, a temperatura seca do ar não é sensível nem à umidade, nem à movimentação do ar e nem ao calor irradiado (Sá, Paulo, 1938).

Para este experimento foram utilizados sensores LM35DM [14] para efetuar esta medição. O uso e as características destes sensores será mais bem detalhado no decorrer do texto.

#### **Temperatura de bulbo úmido**

Este é um dos parâmetros fundamentais, já que, para a estimativa da sensação de calor ou frio para as pessoas, os valores da temperatura do ar e a umidade relativa permitem estabelecer a zona na qual a maior parte das pessoas se encontram confortáveis.

Esta medida é importante, pois a partir dela é possível estimar a umidade relativa do ar no ambiente em estudo com os valores da temperatura de bulbo seco e a temperatura de bulbo úmido, através de uma carta psicometrica (pág. 10).

O modo construtivo do sensor de bulbo úmido é basicamente um termômetro comum que possui uma malha permanentemente molhada ao redor de seu bulbo, e esta malha úmida faz com que a temperatura seja influenciada pela evaporação da água nela contida.

Ou seja, o termômetro de bulbo úmido é influenciado não apenas pela temperatura do ar, mas também pela umidade do ar, que dificulta ou facilita a evaporação da água contida na malha úmida do bulbo. A movimentação do ar também influencia a indicação neste termômetro, pois a movimentação do ar renova mais ou menos depressa a camada de ar junto ao bulbo.

Para uma correta leitura do sensor de bulbo úmido é necessário que haja um fluxo de ar com velocidade de 3 m/s passando por esse bulbo (Simancas Yovane, Kátia, 2003).

### **Umidade absoluta do ar**

A umidade absoluta do ar é o conteúdo de água por kg de ar seco. Pode haver 1g de água por kg de ar a 1°C ou 6g de água por kg de ar a 30°C e termos nos dois casos uma umidade relativa do ar de 25%.

Ou seja, a umidade absoluta é definida como sendo a razão entre a massa de vapor d'água ( $m_V$ ) e a massa de ar seco ( $m_A$ ) presentes em um determinado volume da mistura de ar, e é dada em kg de vapor por m<sup>3</sup> de ar.

### **Umidade relativa do ar**

O ar atmosférico possui uma capacidade de reter certa quantidade de vapor d'água sem que ocorra a chuva. Esta capacidade varia de acordo com a temperatura, podendo variar de 0% (ar seco) até 100% (ar saturado).

A umidade relativa é a quantidade de vapor de água em gramas existente em um quilograma de ar com relação à máxima quantidade de vapor que pode haver em uma determinada temperatura, ou seja, a umidade relativa, representada por  $\phi$  na equação [2-1], pode ser definida como sendo a razão entre a pressão parcial do vapor d'água na mistura ( $P_V$ ) e a pressão correspondente ao estado de saturação da mistura ( $P_{VS}$ ).

$$\phi = \frac{P_V}{P_{VS}} * 100(\%) \quad [2-1]$$

A umidade relativa do ar pode ser medida com um higrômetro (Figura 2.1) ou indiretamente determinada a partir da temperatura de bulbo seco e bulbo úmido, com uma carta psicometrica (Figura 2.2).

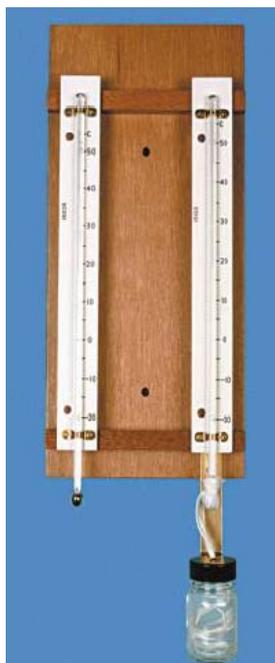


Figura 2.1 – Foto de um higrômetro típico (JUNIOR, Luiz Carlos Martinelli, 2003)

Também fazendo uso das temperaturas de bulbo úmido e bulbo seco é possível se estimar o valor de umidade relativa do ar por meio de um equacionamento proposto pela A.C.T Emergency Services Authority [1]. Este equacionamento pode ser acompanhado abaixo.

$$p = 21.4 - \left( \frac{5351}{tbs + 273.15} \right) \quad [2-2]$$

$$q = 21.4 - \left( \frac{5351}{tbu + 273.15} \right) \quad [2-3]$$

$$z = \exp(p) \quad [2-4]$$

$$y = \exp(q) \quad [2-5]$$

$$s = y - \left( \frac{\text{pressão} \times (tbs - tbu)}{1555} \right) \quad [2-6]$$

$$\text{Umidade} = 100 \times \left( \frac{s}{z} \right) \quad [2-7]$$

Nas equações acima  $t_{bs}$ , se refere à temperatura de bulbo seco do ambiente,  $t_{bu}$  se refere à temperatura de bulbo úmido do ambiente.

Logo, substituindo as equações [2-3], [2-4], [2-5] e [2-6] na equação [2-7], obtêm-se a fórmula [2-8] para o cálculo da umidade relativa interna em porcentagem:

$$Umidade = 100 \times \left( \frac{\exp\left(21.4 - \left(\frac{5351}{t_{bu} + 273.15}\right)\right) - \left(\frac{920 \times (t_{bs} - t_{bu})}{1555}\right)}{\exp\left(21.4 - \left(\frac{5351}{t_{bs} + 273.15}\right)\right)} \right) \quad [2-8]$$

A equação [2-8] possibilita então calcular-se a umidade relativa do ar do ambiente interno a partir das temperaturas de bulbo seco e úmido do ar.

Para avaliar essa equação, algumas comparações foram feitas entre os resultados obtidos com essa equação e os obtidos a partir da carta psicometrica. Nesse caso ao invés de 920mBar, foi utilizado 1000mBar que corresponde à pressão atmosférica ao nível do mar, valor para o qual foi traçada a carta psicometrica. Várias combinações de valores de temperatura de bulbo seco e de temperatura de bulbo úmido foram avaliadas e ao final concluiu-se que os resultados obtidos por ambos os métodos foram muito parecidos, a partir daí pode-se considerar que a equação [2-8] pode ser utilizada em substituição à carta psicometrica (Figura 2.2). Desse modo foi possível utilizar a umidade interna como uma das variáveis a serem avaliadas no programa de controle empregado. A Tabela [2-1] mostra os valores comparativos obtidos com a equação [2-8] e com a carta psicometrica.

Tabela 2-1 – Dados comparativos entre a equação [2-8] e a carta psicometrica.

$T_{BS}$ (°C)	$T_{BU}$ (°C)	Umidade relativa calculada pela equação [2-8] (%)	Umidade relativa dada pela carta psicometrica (%)
10	10	100	100
15	10	53,06	53
20	20	100	100
21	19	83,09	83,33
22	20	83,48	83,75
23	21	83,84	84,44
24	19	62,66	62,22
25	25	100	100
26	22	70,8	70,55
27	20	52,68	53,18
28	19	42,52	43,18
29	21	48,93	50
30	25	66,81	67

35	25	44,48	45,3
40	25	29,40	30

Há ainda uma outra forma de se determinar a umidade relativa do ar, neste caso mais adequada para medições de umidade relativa externa do ambiente, que consiste em uma equação obtida a partir da regressão quadrática dos dados constantes na Tabela [10-1] fornecida pela Basenge Indústria e Comércio Ltda [3] constante no Anexo B. A equação pode ser vista abaixo:

$$Umidade = 100 \times 3,754568297 \cdot 10^{-4} \cdot T_{ext}^2 - 0,07471962 \cdot T_{ext} + 0,063316582 \cdot T_{ins} + 0,933280036 \quad [2-9]$$

Onde  $T_{ext}$  é a temperatura do ar externo e  $T_{ins}$  é a temperatura do ar insuflado.

Observa-se que em uma temperatura maior pode haver uma maior quantidade de vapor de água, diferentemente de um ar frio que tende a ser seco com a temperatura menor, chegando a uma porcentagem de umidade relativa de 0%. A porcentagem da umidade relativa do ar pode influir de maneira negativa na sensação térmica, já que em um ambiente quente, se os valores da umidade relativa são altos, impedem que o corpo humano perca calor por evaporação, ou seja, pelo suor, por outro lado se a umidade for muito baixa, o organismo pode desidratar. Por isso estudos indicam que a umidade relativa deve estar entre 30 e 70% para temperaturas entre 15°C e 30°C (Simancas Yovane, Kátia, 2003).

## Velocidade do ar

Refere-se à velocidade com que o ar se move e pode ser medida com diversos tipos de anemômetros ou termo-anemômetros. Este parâmetro ambiental afeta a velocidade da perda de calor do corpo por convecção, perda que, varia dependendo da intensidade e da velocidade do ar (Simancas Yovane, Kátia, 2003).

A movimentação do ar é importante no conforto térmico das pessoas em um ambiente. Se o ambiente encontra-se com a umidade relativa do ar muito alta, a movimentação do ar pode fazer com que este ar seja reciclado, fazendo com que a umidade caia. Em outra situação, onde o ambiente está quente e com a umidade baixa, a circulação do ar provoca geralmente um aumento da evaporação (do suor) do corpo e por isso causa uma sensação de resfriamento.

A combinação da temperatura, umidade e ventilação são os fatores que definem nas pessoas as diferentes sensações térmicas. Por exemplo, se a umidade relativa do ar e a temperatura estão com seus valores altos, o resultado será uma sensação de calor. Por outro lado, se houver movimentação de ar, isto pode diminuir a temperatura em aproximadamente 1°C a cada 0,3 m/s. A sensação de frio ocorre se a umidade está alta e o ar que se movimenta tiver uma temperatura baixa. Agora se as temperaturas são

superiores aos 33 ou 34°C, o movimento do ar não alterará a sensação de calor (Simancas Yovane, Kátia, 2003).

### **Carga térmica**

A carga térmica é a quantidade de calor sensível e latente, geralmente expressa em TR ou kcal/h, que deve ser retirada ou colocada no recinto a fim de proporcionar as condições de conforto desejadas. A carga térmica pode ser introduzida no recinto a condicionar por condução, insolação, dutos, pessoas, equipamentos, infiltração e ventilação.

O cálculo da carga térmica é regido segundo a NBR-5410, onde especifica as trocas térmicas para cada característica do ambiente e o qual esse parâmetro é representativo para a carga do sistema, e não se trata de um cálculo simples de ser efetuado, pois envolve várias variáveis que influenciam neste cálculo, porém dependendo da aplicação desejada, a carga térmica de um ambiente pode ser calculada de maneira simplificada. Existem tabelas e planilhas eletrônicas que fornecem uma aproximação razoável da carga térmica do ambiente [11].

Uma das etapas deste projeto, diz respeito ao cálculo da carga térmica do ambiente de ensaios, pois deve-se avaliar se o sistema de refrigeração implantado é capaz de suprir toda sua demanda de refrigeração.

### **Psicometria**

A Psicometria é definida como “ramo da Física relacionado com a medida ou determinação das condições do ar atmosférico, particularmente com respeito à mistura de ar seco com vapor d’água”. (JUNIOR, Luiz Carlos Martinelli, 2003)

Em outros termos, os estudos da psicometria juntamente com os diagramas psicométricos, possibilita estimar a umidade relativa do ar a partir de informações mais fáceis de se obter, a temperatura de bulbo seco e a temperatura de bulbo úmido.

O conhecimento das condições de umidade e temperatura do ar é de grande importância.

### **Diagrama Psicométrico**

Os diagramas psicométricos ou cartas psicométricas possibilitam relacionar diversas propriedades termodinâmicas da mistura de ar seco com vapor d’água que compõem o ar atmosférico. (JUNIOR, Luiz Carlos Martinelli, 2003)

Os diagramas psicométricos são construídos de acordo com a pressão atmosférica, de forma que para determinadas pressões atmosféricas existem curvas de correção para estas pressões.

Para a análise de dados deste trabalho, foi utilizado o Diagrama Psicometrico Figura 2.2, que traz em seus dados a pressão atmosférica em 760 mmHg. Para o caso da cidade de Brasília, utilizou-se como valor da pressão atmosférica local sendo 700 mmHg.

A Figura 2.3 traz de forma esquemática as linhas que representam as propriedades termodinâmicas do ar úmido no diagrama psicométrico. Esta figura auxilia o leitor a utilizar o diagrama psicometrico, e para as aplicações deste trabalho as linhas que são utilizadas neste diagrama são a primeira (Temp. Bulbo Seco °C), a segunda (Umidade Relativa %) e a terceira (Temp. Bulbo Úmido °C). As outras linha não são utilizadas pois não fornecem informações pertinentes ao estudo realizado neste trabalho.

Nos diagramas psicometricos em geral, estima-se a umidade relativa do ar relacionando a temperatura de bulbo úmido e seco do ar. No cruzamento das linhas que indicam a temperatura de bulbo seco e bulbo úmido, passa uma curva que representa a umidade relativa do ar para os dois valores de temperatura indicados na tabela.

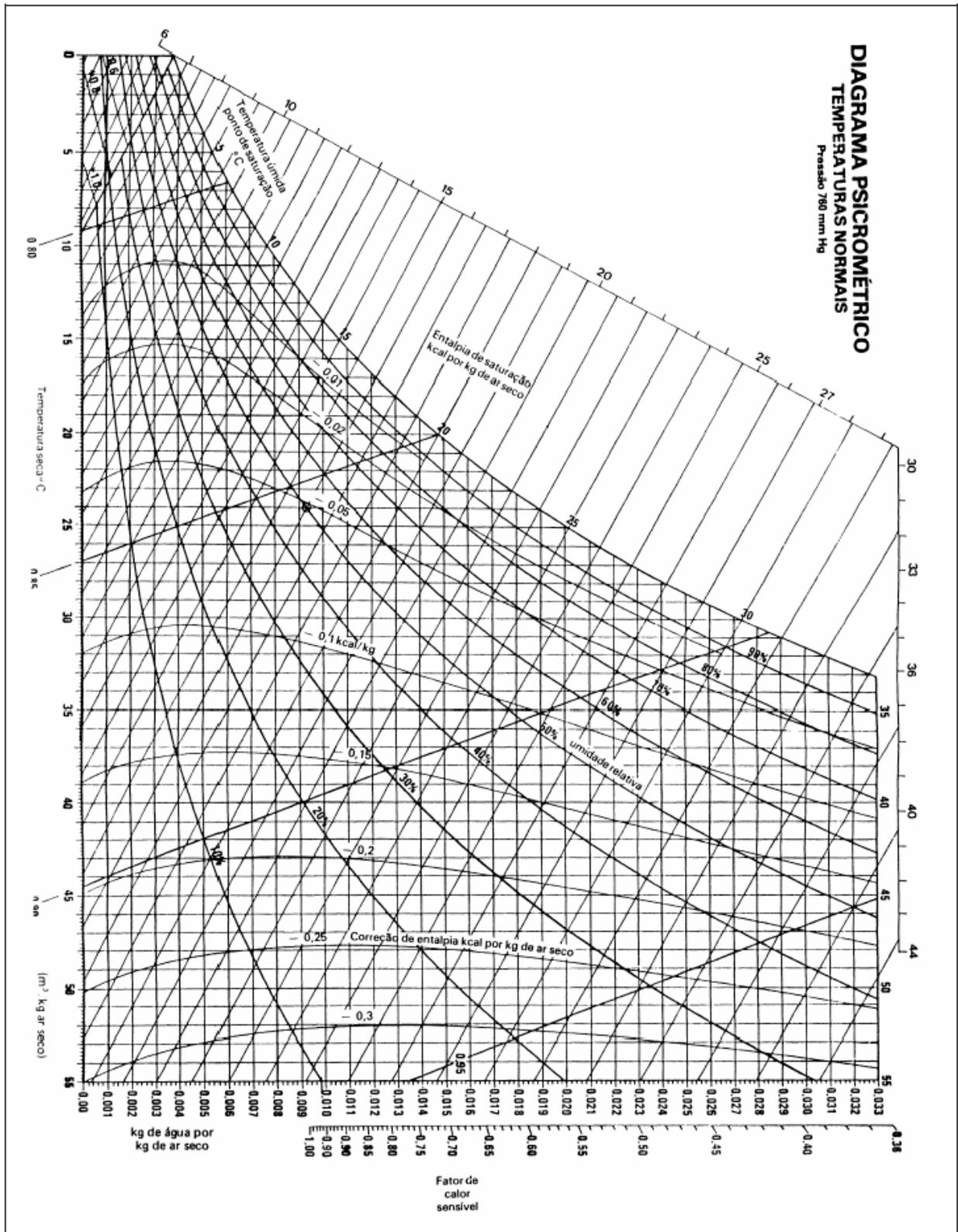


Figura 2.2 – Diagrama Psicrométrico (JUNIOR, Luiz Carlos Martinelli, 2003).

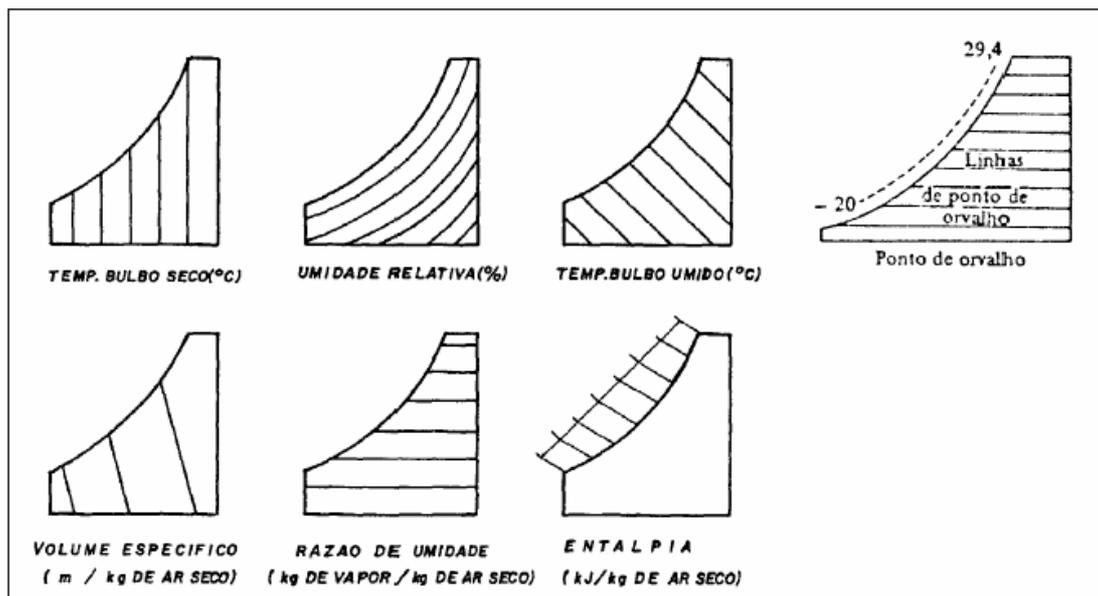


Figura 2.3 – Guia de leitura de uma carta psicometrica (JUNIOR, Luiz Carlos Martinelli, 2003).

## Temperatura efetiva

A temperatura efetiva é um índice proposto em 1923 pela então ASHVE (American Society of Heating and Ventilating) atual ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers). Este índice foi proposto para se quantificar o índice de conforto ambiental. A temperatura efetiva reúne todas as condições climáticas que atuam sobre as pessoas, e se baseia na resposta que grupos de pessoas expostas a diferentes condições de umidade, temperatura e velocidade do ar.

Conhecendo-se a temperatura de bulbo seco e a temperatura de bulbo úmido, é possível se identificar um ambiente confortável para as pessoas com o uso de um diagrama de temperatura efetiva (Figura 2.4), que leva em conta a velocidade do ar, a vestimenta das pessoas e estudos estatísticos do conforto ambiental das pessoas.

No gráfico da figura 2.4, os dois eixos à esquerda e a direita representam, respectivamente, a temperatura de bulbo seco e de bulbo úmido do ar.

Entre os eixos da temperatura aparecem as linhas que representam as velocidades do ar que variam de 0,1 m/s até 3,5 m/s. A temperatura efetiva é determinada ligando-se a temperatura de bulbo seco e bulbo úmido por uma linha reta.

Do ponto onde esta linha cruza a linha de velocidade do ar lê-se, na escala inferior a temperatura efetiva.

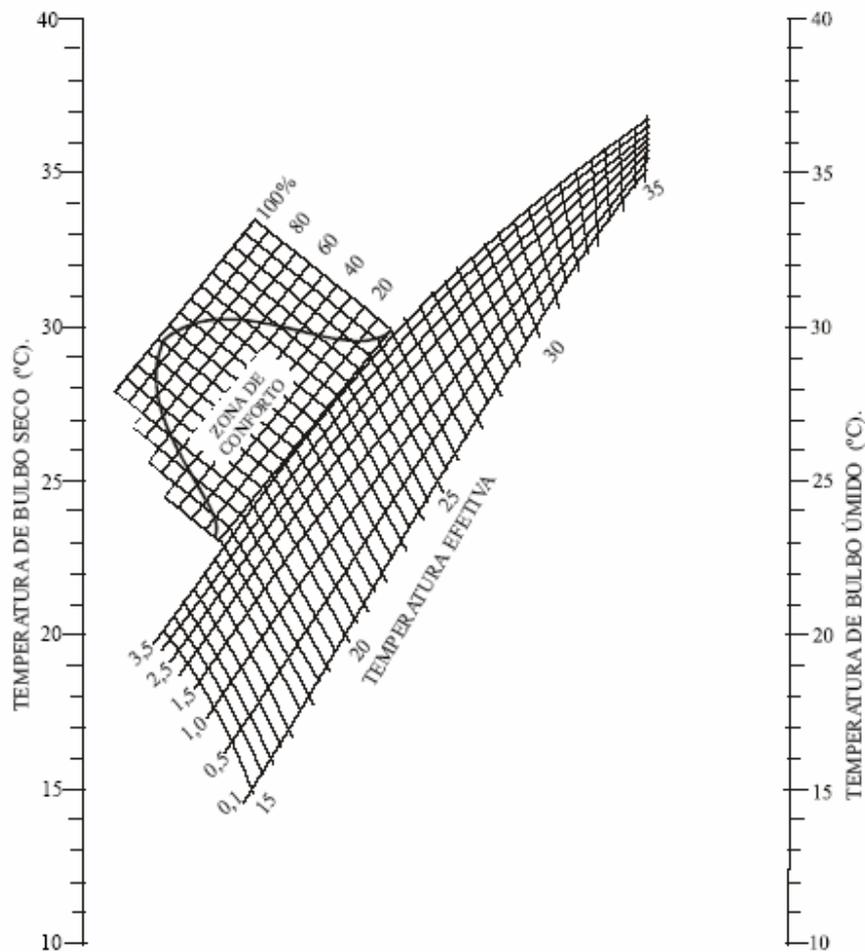


Figura 2.4 – Carta de conforto ASHRAE (Camargo, J. R., 2003)

## Resfriamento Evaporativo

O resfriamento evaporativo é um processo de resfriamento que utiliza a evaporação de água para resfriar uma corrente de ar. Assim, neste sistema, os fluidos de trabalho são o ar e a água. Esse processo possui como principal característica o fato de ser mais eficiente quando as temperaturas são mais elevadas, ou seja, quando a necessidade de resfriamento é maior para o conforto humano. Além disso, em regiões secas, o aumento da umidade é benéfico e, em outras regiões, com a umidificação do ar insuflado, este deixa de causar o desconfortável ressecamento que os sistemas convencionais proporcionam (Camargo, J. R., 2003).

## Efetividade

A efetividade de um painel evaporativo pode ser compreendida como a capacidade que o mesmo tem de reduzir a temperatura do ar externo que flui por ele para dentro do ambiente. Este é um parâmetro chave para avaliar o desempenho de um sistema de resfriamento evaporativo.

A efetividade pode ser calculada pela razão entre a queda de temperatura do ar obtida pela passagem do mesmo pelo painel evaporativo e a maior queda que é possível se obter por este processo, no qual se considera que a temperatura mínima alcançável pelo ar insuflado pelo painel evaporativo é a temperatura de bulbo úmido. A Equação [2-10] mostra esta relação.

$$\varepsilon_{ev} = \frac{T_{BS,i} - T_{BS,o}}{T_{bS,i} - T_{BU}} \quad [2-10]$$

Onde:

$T_{BS,i}$  representa a temperatura de bulbo seco na entrada do painel evaporativo;

$T_{BS,o}$  representa a temperatura de bulbo seco na saída do painel evaporativo;

$T_{BSU}$  representa a temperatura de bulbo úmido.

O gráfico da Figura 2.5 ilustra a variação da temperatura do ar ao passar pelo painel evaporativo.

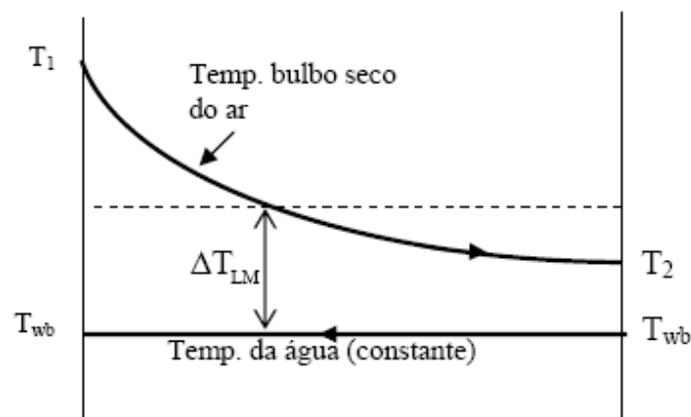


Figura 2.5 – Interação entre o ar e a água na transferência de calor (CASTRO, W.P. e PIMENTA, J.M.D, 2004).

Na Figura 2.5, a simbologia utilizada é a seguinte:

$$T_{BS,i} \leftrightarrow T_1$$

$$T_{BS,o} \leftrightarrow T_2$$

$$T_{BU} \leftrightarrow T_{wb}$$

O termo  $\Delta T_{LM}$  é a média logarítmica das diferenças de temperaturas entre o ar e a superfície úmida, em K, dada por:

$$\Delta T_{LM} = \frac{(T_2 - T_1)}{\ln \left[ \frac{(T_2 - T_{wb})}{(T_1 - T_{wb})} \right]} \quad [2-11]$$

Analisando a Equação [2-10] nota-se que uma efetividade de 100% corresponde a uma temperatura de saída do ar igual à temperatura de bulbo úmido (João M. D. Pimenta e Wagner P. de Castro, 2004).

## 2.4 DISPOSITIVOS ELETRÔNICOS UTILIZADOS

### 2.4.1 MICROCONTROLADOR PIC18F252

Um microcontrolador é um computador programável, em um chip otimizado para controlar dispositivos eletrônicos. É uma espécie de microprocessador, com memória e interfaces de entrada e saída (I/O) integrados, enfatizando a auto-suficiência, em contraste com um microprocessador de propósito geral, o mesmo tipo usado nos PCs, que requer chips adicionais para prover as funções necessárias.

Os microcontroladores são componentes utilizados em muitos tipos de equipamentos eletrônicos, sendo a grande maioria entre os chips vendidos. Cerca de 50% são controladores "simples", outros 20% são processadores de sinais digitais (DSP's) mais especializados. Os microcontroladores podem ser encontrados em máquinas de lavar, forno de microondas, telefones, etc.

Um microcontrolador difere de um microprocessador em vários aspectos. O primeiro, e mais importante, é a sua funcionalidade. Para que um microprocessador possa ser usado, outros componentes devem-lhe ser adicionados, tais como memória e componentes para receber e enviar dados.

O microcontrolador foi projetado para ter tudo em um só encapsulamento. Nenhum outro componente externo é necessário nas aplicações, uma vez que todos os periféricos necessários já estão contidos nele.

A figura 2.6 ilustra o aspecto interno de um microcontrolador.

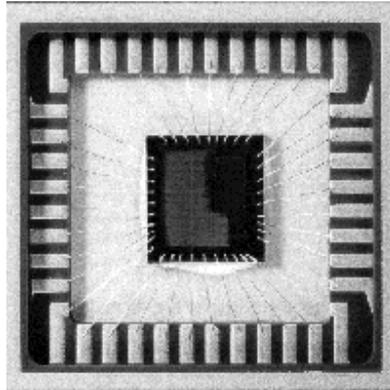


Figura 2.6 – Configuração física do interior de um microcontrolador (MATIC, Nebojsa, 2003).

As linhas mais finas que partem do centro em direção à periferia do microcontrolador correspondem aos fios que interligam os blocos interiores aos pinos do invólucro do microcontrolador. O diagrama que se segue representa as partes principais de um microcontrolador.

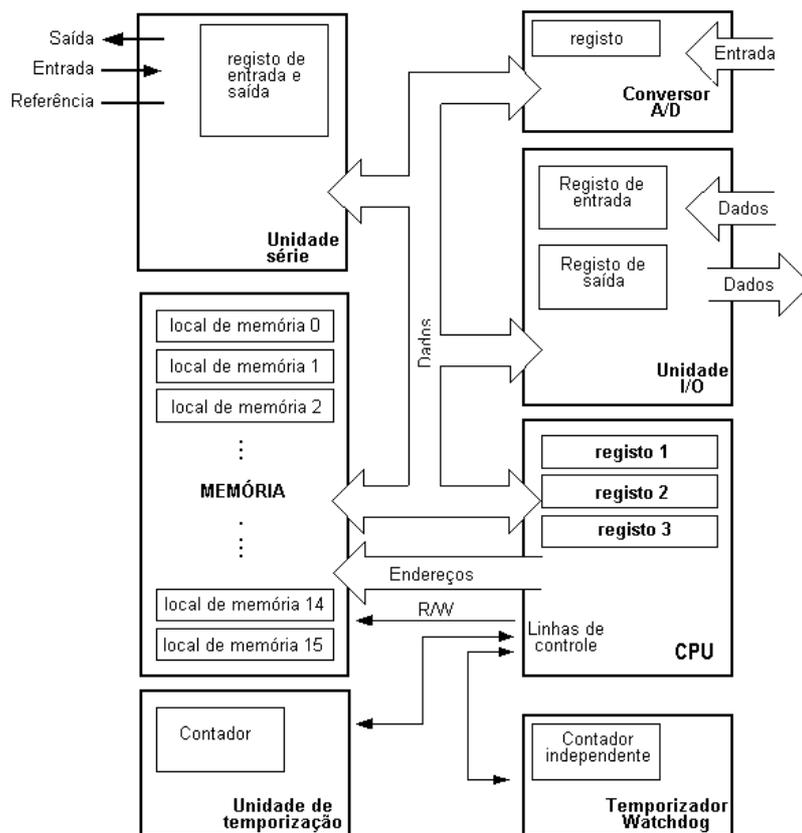


Figura 2.7 – Esquema de um microcontrolador com os seus elementos básicos e ligações internas (MATIC, Nebojsa, 2003).

O PIC 18F252 é um modelo de microcontrolador PIC da família de 16 bits de núcleo de processamento, apesar de ainda lidar com dados de 8 bits. A vantagem dessa família de PIC's é que eles possuem mais instruções em código de máquina (75 contra 35 da série 16F) que é otimizada para ser usada com compiladores de linguagem C e memória linear (ao contrário dos irmãos “menores” que possuem memória dividida em bancos de memória). A sua velocidade de processamento também é maior, na maioria até 10 MIPS (Milhões de Instruções por Segundo), a 40MHz de clock, com alimentação entre 2 e 5,5V. O seu encapsulamento DIP (Dual In-line Package) consiste em 28 pinos [25].

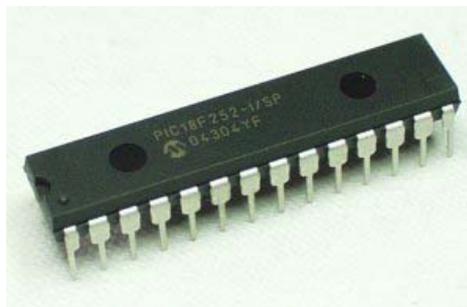


Figura 2.8 – Foto de um microcontrolador PIC 18F252 [19].

Esse modelo possui 32k bytes (16k instruções) de memória de programa flash, 1536 bytes de memória RAM e 256 bytes de memória eeprom. Os principais periféricos internos são:

- 5 canais para conversão A/D a 10 bits
- AUSART (addressable universal synchronous asynchronous receiver transmitter) com suporte para RS-485 e RS-232;
- MSSP (master synchronous serial port) para SPI e I2C;
- PSP (parallel slave port) ;
- 4 timers (3 de 16 bits e 1 de 8 bits);
- 2 módulos CCP (capture compare PWM).

O PIC 18F252 é o modelo de uso geral da família 18F de microcontroladores PIC.

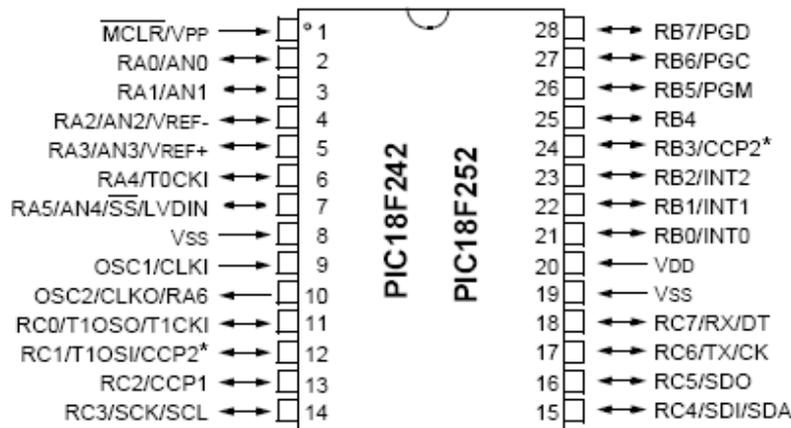


Figura 2.9 – Pinagem do microcontrolador PIC 18F252 [19].

O PIC possui inúmeras funções, mas nem todas elas serão utilizadas neste projeto. As funções aplicadas estão listadas abaixo:

- Comunicação Serial – utilizada para envio de dados entre o PIC e o computador, com o auxílio do módulo USART, presente no PIC;
- Conversores A/D – utilizados para converter os sinais de tensão fornecidos pelos sensores em formato analógico para o formato digital;
- Memória Interna – utilizada para armazenar o software a ser executado;
- Pinos de Entrada e Saída – O PIC disponibiliza vários pinos de I/O (in/out). Alguns deles foram utilizados como pinos de entrada (usados para mudança de referência), outros como pinos de saída (usados nos acionamentos dos atuadores) e ainda outros foram utilizados nas ligações do display LCD.

## 2.4.2 SENSOR DE TEMPERATURA LM35

Os sensores LM35 são dispositivos que medem a temperatura. Essa medição é baseada na influência que a temperatura exerce sobre as características semicondutoras do material do qual é feito o sensor. A sua saída, em Volts (V), é proporcional à temperatura, em graus Celcius (°C). Algumas das características desse sensor de temperatura estão relacionadas abaixo:

- Permite leituras que variam de -55°C a 150°C com resolução de 10mV/°C;
- Precisão de 0,25 °C garantida pelo fabricante [14], não sendo necessário qualquer tipo de calibração;

- Possui baixa impedância de saída -  $0,1\Omega$  para uma carga de 1mA;
- Drena menos que  $60\mu A$  de corrente da fonte.

Em outras palavras, o sensor LM35DM é um dispositivo sofisticado e de fácil manuseio.

A pinagem deste sensor pode ser vista na Figura 2.10, a seguir:

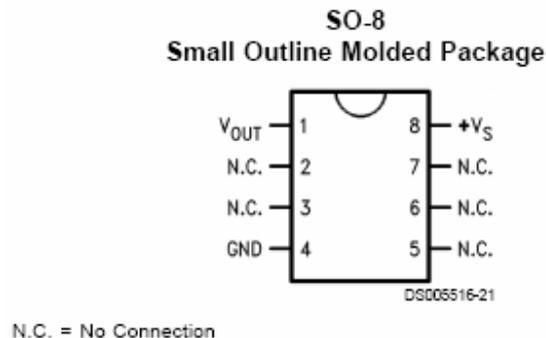


Figura 2.10 – Vista superior do dispositivo LM35DM, mostrando sua configuração de pinos. A sigla N.C. significa “nenhuma conexão”. [14]

Pela figura 2.10, pode-se ver que o LM35DM possui 3 terminais. Um de alimentação ( $V_S$ ), um ligado ao terra (GND) e um para tensão de saída ( $V_{OUT}$ ). O terminal  $V_S$  pode receber tensões que variam de 4 a 30 Volts e o terminal  $V_{OUT}$  varia linearmente de acordo com a temperatura e independentemente da alimentação  $V_S$ . A tensão  $V_S$  foi mantida em 5V ao longo dos ensaios. Este sensor possui encapsulamento SMD.

### 2.4.3 MULTIPLEXADOR ANALÓGICO – CD4052B

O multiplexador analógico CD4052B é uma chave analógica controlada digitalmente. Entre as suas características estão:

- Larga faixa de trabalho para sinais digitais: 3V a 20V;
- Larga faixa de trabalho para sinais analógicos também: até  $20V_{PP}$ ;
- Baixa impedância de entrada:  $125\Omega$  (típica);
- Potência de dissipação bastante baixa:  $0,2\mu W$  (típica).

O funcionamento desse multiplexador analógico é semelhante ao do multiplexador digital. Ou seja, ele possui dois tipos de entrada: a de seleção e a de sinal.

A entrada de sinal é composta de canais por onde chegam os sinais de entrada. São utilizados tantos canais quanto o número de sinais de entrada.

A entrada de seleção tem a função de selecionar, por meio de um código binário, um entre os diversos canais da entrada de sinal. O código binário é recebido nos  $n$  bits de seleção. De tal forma, os bits de seleção têm a capacidade de selecionar até  $2^n$  canais, sempre um por vez. O canal selecionado é enviado diretamente à única saída do multiplexador.

A seguir são dados exemplos do que seriam multiplexadores de quatro entradas (MUX-4) e de oito entradas (MUX-8).

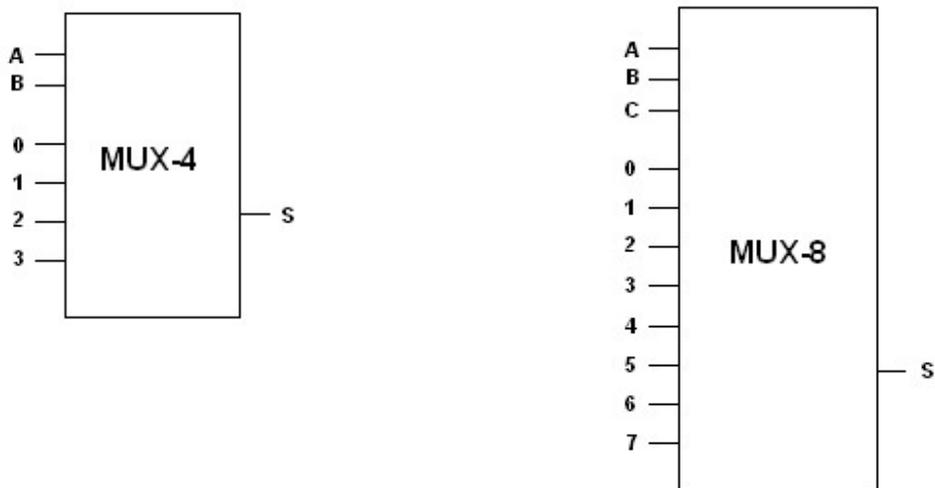


Figura 2.11 – Multiplexadores para 4 e 8 entradas (MUX-4 e MUX-8), respectivamente.

No esquema da Figura 2.11, A, B e C são os bits de seleção, que compõem a entrada seletora. As entradas de 0 a 7 (ou 0 a 3, para o MUX-4) representam os canais a serem selecionados pelo bits de seleção (A, B e C) para serem enviados à saída S. Por exemplo, se a entrada seletora do MUX-4 receber o seguinte código,  $A = 0$  e  $B = 0$ , o canal a ser selecionado será o canal 0. Da mesma forma, se o MUX-8 receber o seguinte código,  $A = 0$ ,  $B = 1$  e  $C = 1$ , o canal selecionado será o 3. Considerando que a ordem decrescente de significância dos bits de seleção é  $A > B > C$ .

A chave analógica utilizada, o CD4052B [9], é mais assemelhada a um encapsulamento de dois MUX-4, com a entrada seletora em comum. Dessa forma, o resultado que se obtém é que serão selecionadas 8 entradas (como no MUX-8), duas a duas, e enviadas às duas saídas do multiplexador simultaneamente.

O multiplexador analógico tem funcionamento similar aos digitais, com a diferença que as entradas a serem seleccionadas nos canais são analógicas. No modelo da figura 2.12 a entrada B é mais significativa que a entrada A.

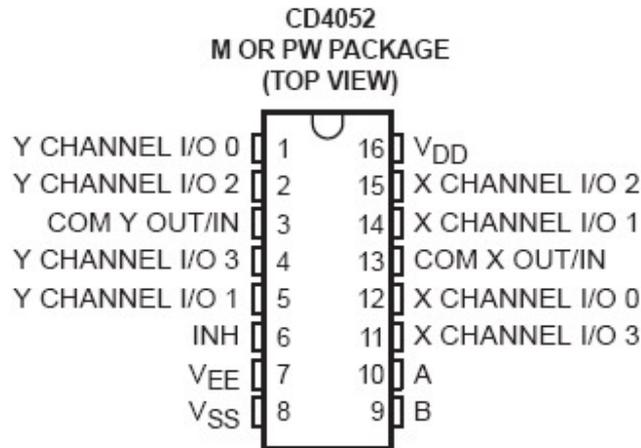


Figura 2.12 – Pinagem do multiplexador analógico CD4052 [9]

Na Figura 2.12, os canais X0, X1, X2, X3 e Y0, Y1, Y2, Y3 são as entradas dos dois MUX-4 que compõem o dispositivo. O pino chamado COM X representa a saída correspondente às entradas assinaladas por X, da mesma forma que o pino COM Y representa a saída correspondente às entradas assinaladas por Y. Os pinos V<sub>DD</sub>, V<sub>EE</sub> e V<sub>SS</sub> se referem à alimentação do dispositivo. O pino *INH* é a entrada habilitadora do circuito, que é ativa em nível lógico baixo.

Tabela 2-2 – Tabela verdade do multiplexador CD4052. Onde aparece X nos possíveis valores de A e B, entende-se que pode ser aplicado qualquer nível lógico [9].

Inhibit	B	A	
0	0	0	0x, 0y
0	0	1	1x, 1y
0	1	0	2x, 2y
0	1	1	3x, 3y
1	X	X	None

Através da tabela verdade (Tabela 2-2), apresentada fica claro que as saídas seleccionadas (sempre uma dos canais X e uma dos canais Y) correspondem ao número binário apresentado nos bits A e B, sendo B o mais significativo. Também se percebe que, se a entrada habilitadora *INH* estiver em nível lógico alto, as saídas serão desabilitadas independentemente do número apresentado na entrada seletora.

Sendo o alvo deste projeto um sistema que trabalha com medição de temperatura, que é uma grandeza que varia lentamente no processo em estudo, não há qualquer problema com relação ao tempo de resposta da chave analógica, uma vez que o atraso proporcionado pela chave é da ordem de nano segundos (ns). As formas de onda de acionamento e desligamento dos canais estão apresentadas na Figura 2.13, abaixo.

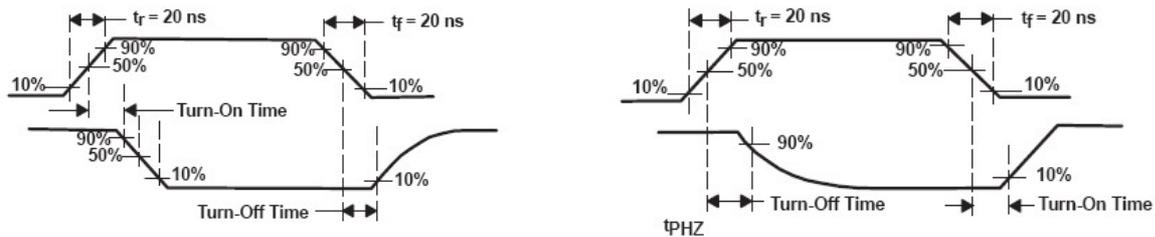


Figura 2.13 – Formas de onda de ativação (à esquerda) e desativação (à direita) dos canais. Repare que os atrasos estão em torno de 20ns [9].

A importância do uso deste multiplexador no projeto provém do fato de se possuírem muitos sensores de temperatura. Como o sensor apresenta uma saída analógica (em forma de tensão), faz-se necessária uma conversão analógico/digital do sinal de saída do sensor antes que o valor seja processado pelo microcontrolador. No entanto, o microcontrolador possui apenas 5 canais de conversão A/D e neste projeto estão sendo utilizados 6 sensores.

Utilizando-se o multiplexador analógico é possível utilizar apenas 2 das 5 entradas conversoras A/D, já que o MUX selecionaria duas das seis temperaturas apresentadas a cada leitura. Dessa forma se obtêm um menor custo com materiais, ao passo que se tal multiplexador não fosse utilizado seria necessário se fazer uso mais um microcontrolador (custo elevado), além de mais 4 circuitos amplificadores (um para cada sensor) como o citado anteriormente.

## 3 SISTEMA DE CONTROLE

### 3.1.1 CIRCUITO DE AQUISIÇÃO DE DADOS

O circuito de aquisição de dados é responsável pela conexão entre a coleta de informações do ambiente, e o processamento e o controle de tais informações é feito através do microcontrolador. O processo se baseia em um sistema realimentado, onde as informações coletadas pelo circuito de aquisição de dados são tratadas pelo microcontrolador, que controla os aparelhos de refrigeração, e as informações voltam a serem coletadas pelo circuito de aquisição. Em outros termos, a entrada atual nada mais é que a saída anterior. A Figura 3.1 ilustra melhor esse conceito de realimentação.

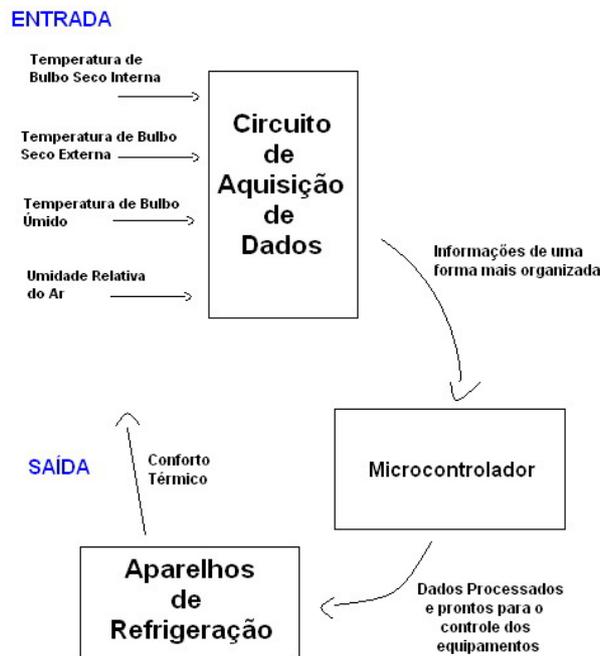


Figura 3.1 – Fluxograma do processo de aquisição, tratamento e retorno das informações do sistema.

O circuito de aquisição de dados é composto por 6 (seis) sensores de temperatura LM35DM, 1 (um) multiplexador analógico CD4052B-Q1 e 2 (dois) amplificadores operacionais. O circuito une todos esses dispositivos de uma forma a tratar da melhor forma a informação a ser processada pelo microcontrolador. Em resumo, as temperaturas obtidas pelos sensores LM35 (em forma de tensão) são amplificadas depois de passarem pela seleção do multiplexador analógico. Em seguida, o sinal de temperatura amplificado é enviado ao microcontrolador.

Os sensores LM35DM, na faixa de operação utilizada (em torno de 25°C), apresentam resposta na ordem de centenas de milivolts. Por exemplo, a uma temperatura de 26°C o sensor apresenta uma saída de

260mV. Uma vez que os valores de temperatura em questão tendem a estar seguramente na faixa de 0°C a 50°C e, conseqüentemente, as saídas dos sensores na faixa de 0 a 500mV, além de que a entrada do canal de conversão analógico/digital (A/D) do microcontrolador permite tensões de até 5V, foi utilizado um amplificador operacional para amplificar as saídas dos sensores de temperatura, com o intuito de se aumentar a resolução do sinal de 10mV/°C para algo próximo a 100mV/°C através do aumento da amplitude do sinal de saída e também para se aproveitar melhor a faixa de trabalho do conversor A/D.

Neste projeto foram utilizados dois amplificadores na configuração não-inversora com ganho de, aproximadamente, 10V/V cada um. A seguir, na Figura 3.2, é apresentado um circuito amplificador na configuração não-inversora.

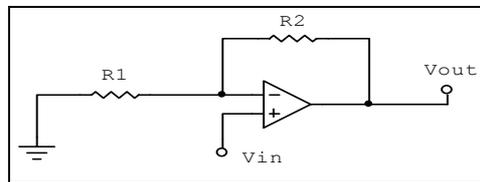


Figura 3.2 – Circuito amplificador não-inversor.

Dado que este circuito está realimentado negativamente e que o sinal de entrada está conectado à entrada não-inversora do amplificador operacional, a função de transferência do mesmo pode ser dada por:

$$\frac{V_{OUT}}{V_{in}} = 1 + \frac{R_2}{R_1} \quad [3-1]$$

Buscando se obter um ganho de tensão em torno de 10V/V, para o qual seriam necessários resistores  $R_1 = 1k\Omega$  e  $R_2 = 9k\Omega$ , escolheram-se os resistores com valores comerciais mais aproximados do ideal, que seriam:

$$R_1 = 1k\Omega \quad [3-2]$$

e

$$R_2 = 9,1k\Omega \quad [3-3]$$

No entanto, como houve certa variação dos resistores utilizados em torno dos seus valores nominais, os ganhos obtidos para os dois amplificadores foram:

$$G_1 = \frac{V_{OUT}}{V_{in}} = 10,25V/V \quad [3-4]$$

e

$$G_2 = \frac{V_{OUT}}{V_{in}} = 10,46V/V \quad [3-5]$$

Para prevenir o circuito da influência de ruídos (sinais de alta frequência), foi adicionado à entrada do amplificador um filtro do tipo passa-baixas. Essa medida de prevenção é necessária já que os sensores de temperatura são conhecidos por serem bastante sensíveis à influência de ruídos [14]. E o fato de eles estarem conectados à entrada de um amplificador torna ainda mais imprescindível a existência de um filtro, para que o ruído não seja amplificado.

Com relação ao projeto do filtro, foi adotado o modelo recomendado pelo fabricante dos sensores LM35 [14]. Este modelo pode ser obtido através do datasheet do componente e seus valores são dados por:

$$R = 75\Omega \quad [3-6]$$

e

$$C = 1\mu F \quad [3-7]$$

O circuito, já com o filtro em sua entrada, pode ser visto na Figura 3.3.

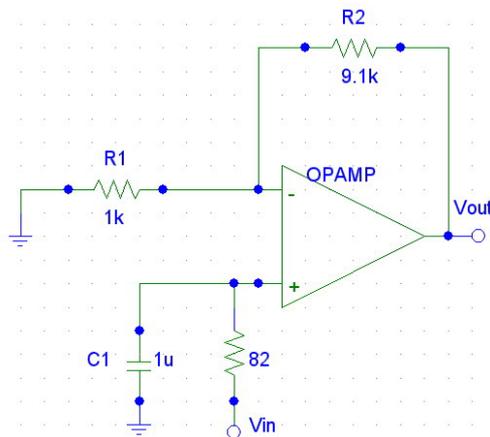


Figura 3.3 – Amplificador com filtro em sua entrada para a atenuação de ruídos.

Na prática, o resistor utilizado no filtro foi de  $82\Omega$ , que era o valor comercial mais próximo disponível. Essa diferença entre o valor sugerido pelo datasheet e o valor utilizado não traz problemas, pois a frequência de corte do filtro continua pequena ( $5,16 \times 10^{-4}$  rad/s), o que é necessário para filtrar sinais de frequência elevada como os ruídos.

Da forma que está até o momento, o circuito amplificador não está oferecendo nenhuma segurança ao conversor A/D. Isso porque qualquer oscilação no sinal de entrada faria com que a saída também sofresse variação. Se essa variação estiver fora da faixa de trabalho do conversor é provável que o mesmo fique inutilizado. Para se resolver esse problema da falta de proteção, utilizou-se um circuito limitador de tensão, também conhecido como saturador. O circuito de proteção utilizado pode ser visto na Figura 3.4.

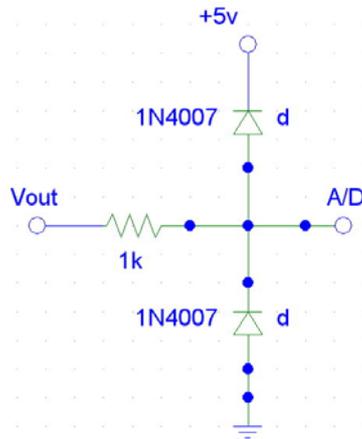


Figura 3.4 – Circuito de proteção do conversor A/D utilizado na saída do amplificador operacional.

Com a proteção utilizada, a saída ( $V_{OUT}$ ) do amplificador pode variar o quanto for que a entrada do conversor A/D ficará limitada à faixa que varia de 0 a 5V. Isso ocorre porque todas as vezes que  $V_{OUT}$  for maior que 5V pela quantia de 0,7V, ou seja, sempre que  $V_{OUT} \geq 5,7V$  o diodo da parte de cima do circuito entra em condução puxando a corrente para a fonte. Da mesma forma, todas as vezes que  $V_{OUT}$  for menor que 0V pela quantia de 0,7V, ou seja, sempre que  $V_{OUT} \leq -0,7V$  o diodo da parte inferior entra em condução, drenando a corrente para o terra do circuito. Esse funcionamento descrito pode ser visualizado na Figura 3.5.

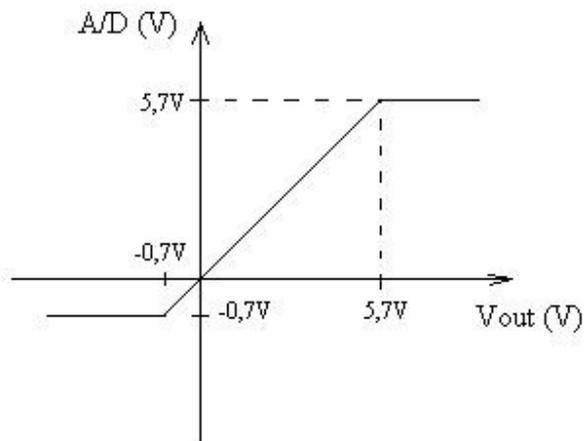


Figura 3.5 – Curva característica da tensão de entrada para o conversor A/D em função da tensão  $V_{OUT}$ .

O circuito amplificador completo que envolve suas proteções contra ruídos e sobre-sinais é mostrado na Figura 3.6.

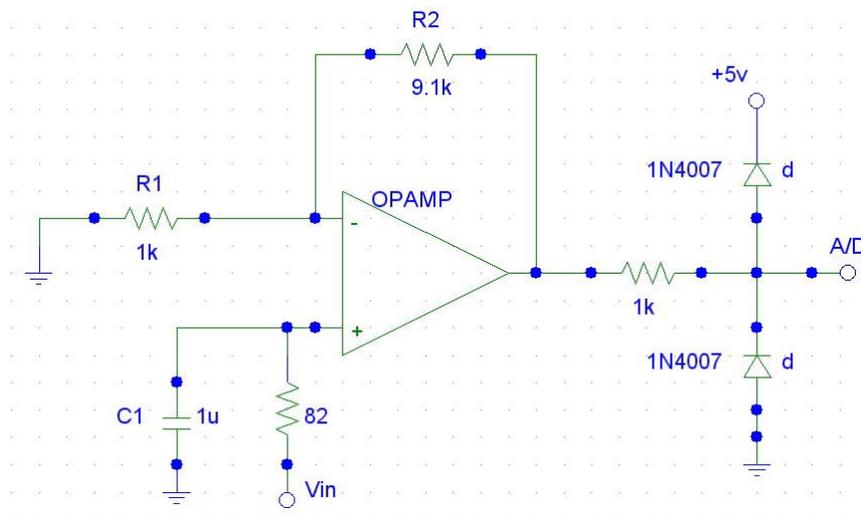


Figura 3.6 – Circuito amplificador completo, com as devidas proteções contra ruídos e sinais fora da faixa de operação do conversor A/D.

No circuito acima,  $V_{in}$  representa a saída do sensor de temperatura e  $A/D$  simboliza a entrada do conversor analógico/digital.

O circuito de aquisição de dados pode ser resumido em um único diagrama de blocos. Tal diagrama pode ser dividido em 3 partes: Captação das Temperaturas, Seleção das Entradas e Amplificação dos Sinais. A primeira parte é constituída pelos sensores LM35, a segunda pela chave analógica CD4052 e a terceira pelos circuitos amplificadores. A Figura 3.7 mostra esse diagrama.

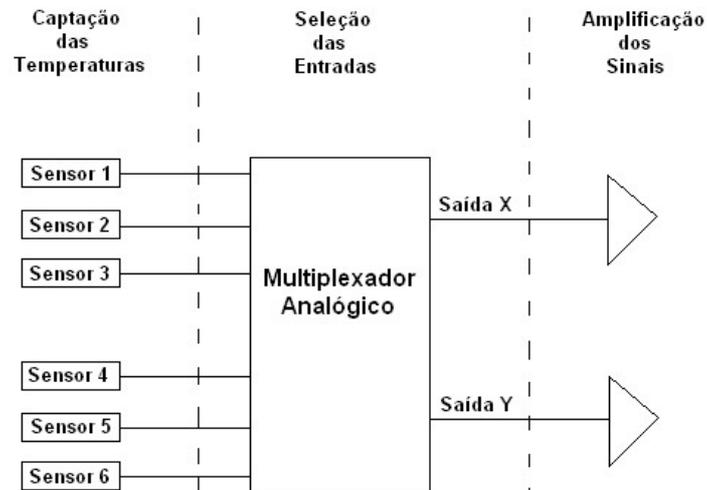


Figura 3.7 – Diagrama resumo do circuito de aquisição de dados.

A princípio o circuito foi montado em uma protoboard, para efeito de teste dos componentes. Assim que foi verificado o bom funcionamento deste circuito, foi providenciada a sua confecção em forma de circuito impresso. Tal circuito foi projetado com auxílio do software TraxMaker 3 Professional (Protel Technology, Inc.), que é um programa próprio para o design de placas de circuito impresso. O desenho do circuito feito no TraxMaker pode ser conferido na Figura 3.8, em escala real.

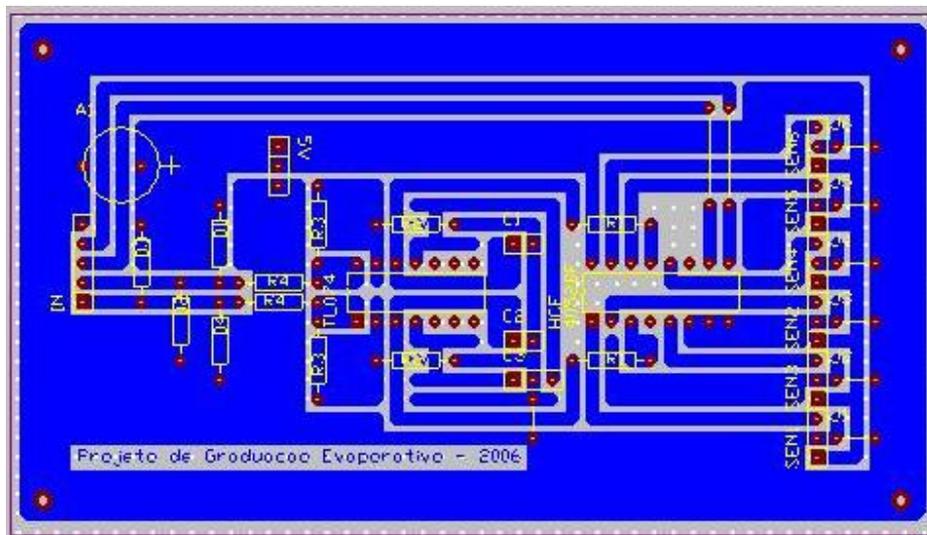


Figura 3.8 – Layout da placa de aquisição de dados feito por meio do software TraxMaker.

A placa de aquisição de dados já em forma de circuito impresso com os componentes montados pode ser vista na Figura 3.9.



Figura 3.9 – Foto da placa de aquisição de dados.

### 3.1.2 CIRCUITO DE ACIONAMENTO DOS ATUADORES

O sistema possui 4 atuadores. São eles: bomba d'água, velocidade 1 do motor do ventilador, velocidade 2 do motor do ventilador e aparelho de ar condicionado.

A placa de acionamento foi aproveitada de um projeto anterior (LOPES, F.V. e MIRANDA, H.C.C, 2005), que possuía os mesmos atuadores, no qual ela tinha a mesma finalidade. Sendo assim não foi necessário se fazer o projeto de uma nova placa. A placa e seu circuito podem ser vistos nas figuras que se seguem.



Figura 3.10 – Placa de acionamento dos atuadores aproveitada de um projeto anterior (LOPES, F.V. e MIRANDA, H.C.C, 2005).

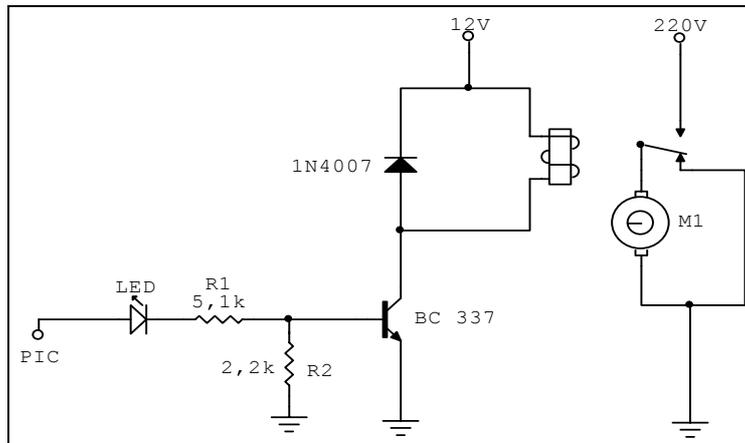


Figura 3.11 – Circuito de acionamento utilizado para cada um dos atuadores (LOPES, F.V. e MIRANDA, H.C.C, 2005).

O acionamento é todo controlado pelo PIC, que fornece 0 ou 5V em seus pinos configurados para saída. A tensão de 0V mantém o transistor em corte. Já a tensão de 5V satura o transistor, fazendo com que a bobina do relé seja alimentada por 12V. O relé, por sua vez, alimenta o atuador com 220V. O diodo, em paralelo com a bobina, é utilizado como proteção para o transistor, evitando descargas sobre o mesmo.

A utilização do LED é importante para que se possa identificar mais facilmente o acionamento de cada atuador, através do sinal de controle oriundo do PIC. Tal identificação é importante para se detectar possíveis falhas no processo de controle, já que uma simples verificação dos LEDs bastaria para saber o motivo do mau funcionamento.

Os relés utilizados foram produzidos pela SCHRACK, modelo RUD 101012. Seu acionamento acontece ao se aplicar uma tensão de 12V na bobina. Suportam 10A de corrente e uma tensão de 250V nos terminais.

### 3.1.3 CIRCUITO DE CONTROLE

A placa de controle utilizada foi aproveitada de um projeto anterior (LOPES, F.V. e MIRANDA, H.C.C, 2005). Pelo fato de este ser uma continuação de tal projeto, não houve necessidade de se projetar e confeccionar uma nova placa, visto que a existente supria todas as necessidades do projeto. No entanto, foram feitas algumas alterações na placa, que serão citadas oportunamente, para que se obtivesse uma melhor adaptação às modificações feitas no sistema.

A interface de todo o sistema eletrônico empregado nesse projeto é feita pelo circuito de controle. O coração desse circuito é o microcontrolador PIC 18F252. É ele o responsável pelas tarefas de controle de todo o sistema. São elas:

- Recepção dos dados da placa de aquisição;
- Processamento dos dados adquiridos;
- Controle da operação da placa de acionamento;
- Envio de dados de escrita para o LCD (Display de Cristal Líquido).

Para se facilitar a gravação de programas no PIC, a placa possui uma gravadora embutida (LOPES, F.V. e MIRANDA, H.C.C, 2005), tirando assim a necessidade de que o PIC fosse retirado da placa para se fazer a gravação dos programas no mesmo. A placa também é munida de dois botões conectados diretamente a dois pinos do PIC, para a implementação de qualquer processo no programa gravado no microcontrolador através de hardware.

A foto da placa de controle e o desenho de seu circuito estão apresentados nas figuras abaixo.

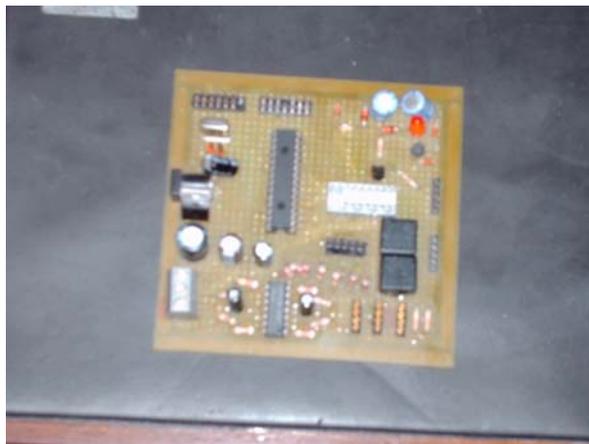


Figura 3.12 – Foto da placa de controle.

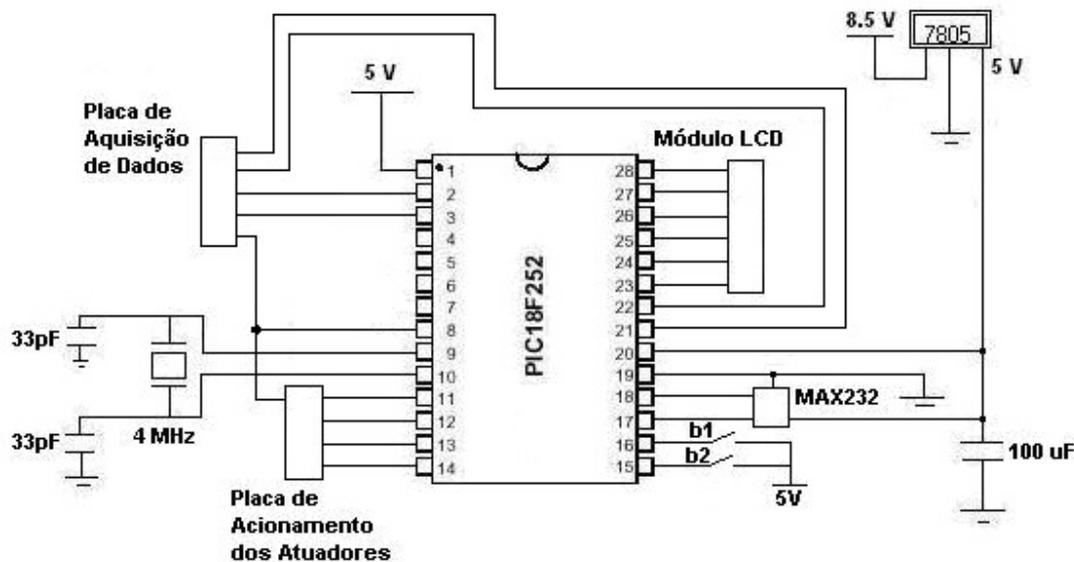


Figura 3.13 – Circuito da placa de controle.

Como pode ser visto na Figura 3.13, foi utilizado um cristal de oscilação de 4MHz no PIC. Para se evitar oscilações na alimentação foram utilizados capacitores na saída do regulador de tensão (7805) e no pino 20 do microcontrolador ( $V_{DD}$ ).

Todas as outras placas possuem conexões com a placa de controle. Isso se faz necessário para que haja o controle dos outros circuitos por parte do PIC. Cada tarefa executada por ele será detalhada a seguir.

### Recepção dos dados

A placa de controle recebe como entrada os sinais de temperatura amplificados pela placa de aquisição de dados. Cada sinal de entrada é recebido por um dos conversores A/D internos do PIC.

### Acionamento dos atuadores

A placa de controle fornece como saída sinais de controle para a placa de acionamento de atuadores e para a placa de aquisição de dados. Cada sinal de controle é fornecido por uma porta digital. Na placa de aquisição o dispositivo que recebe os sinais do PIC é o multiplexador analógico. Trata-se de dois pinos do PIC responsáveis por fazer a seleção dos canais do MUX.

### Comunicação entre o PIC e o Microcomputador

Para que fosse possível analisar os dados adquiridos, fez-se necessária uma comunicação entre o PIC e o microcomputador. A forma escolhida para se fazer essa comunicação foi a serial, por apresentar uma melhor imunidade a ruídos. O fato de a comunicação serial ser lenta não foi um ponto negativo, uma vez que o sistema não necessita de respostas rápidas e sim de uma boa precisão nos valores das temperaturas medidas. Na interface serial (também conhecida por RS-232, RS-485 e USB) os bits são transferidos em fila, ou seja, um bit de dados por vez.

O PIC 18F252 permite utilização das interfaces RS-232 e RS-485. Também possui um módulo USART (Universal Synchronous Asynchronous Receiver Transmitter), que pode ser utilizado através dos pinos RX e TX. Optou-se, neste projeto, pelo uso da interface RS-232.

Para auxiliar essa comunicação foi utilizado o circuito integrado MAX232 (Texas Instruments), responsável pela interface entre o microcontrolador e o microcomputador. A sua utilização é necessária porque o PIC 18F252 utiliza tensões de entrada e saída de 5V, enquanto o microcomputador trabalha com tensões de  $\pm 12V$  de entrada e saída na porta serial. A foto do MAX232 pode ser vista na Figura 3.14.

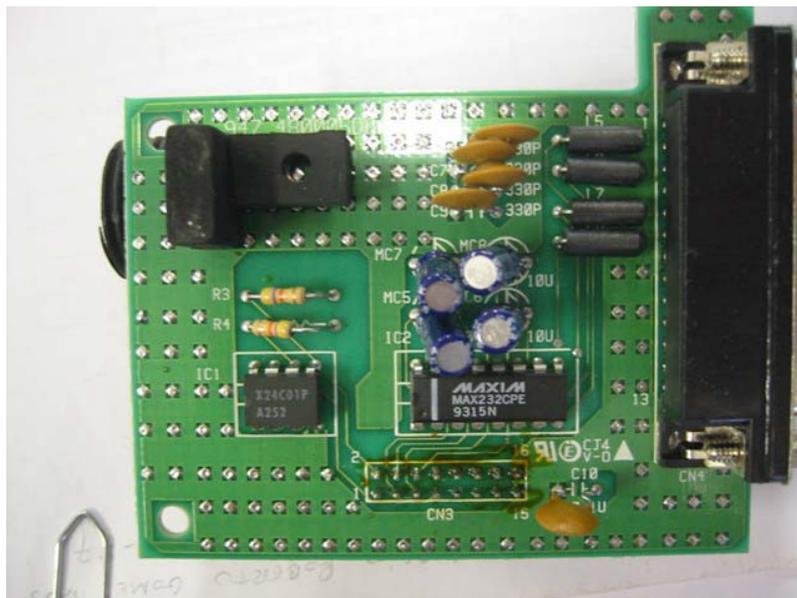


Figura 3.14 – Foto do circuito integrado MAX232.

A conexão do MAX232 com a porta serial do PC é feita se utilizando um cabo Null-Modem, cuja configuração de pinos está apresentada na figura 3.15.

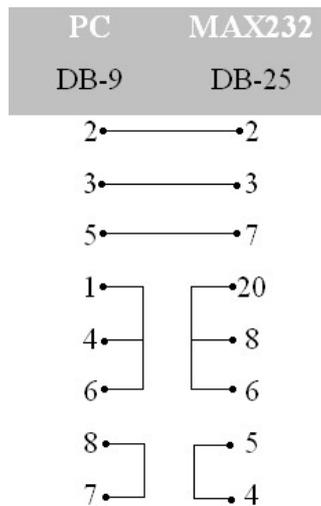


Figura 3.15 – Configuração dos pinos na conexão PC-MAX232(LOPES, F.V. e MIRANDA, H.C.C, 2005).

Dessa forma é possível salvar os valores de temperatura obtidos em arquivos de texto, a partir dos quais se podem traçar gráficos. Tudo isso possibilita uma melhor análise dos dados coletados.

### **Apresentação dos Dados**

A apresentação dos dados através do microcomputador representa uma praticidade muito grande, uma vez que os dados apresentados no computador podem ser tratados de uma forma mais refinada. No entanto, talvez não seja possível se ter sempre um microcomputador à disposição, talvez não haja espaço físico suficiente ou, ainda, é possível que o usuário não queira ter seu sistema de refrigeração conectado a um microcomputador ou, muito menos, dependente de um. Visando tornar o sistema menos dependente da presença de um PC, foi utilizado um módulo LCD para mostrar os dados coletados pelos sensores (temperaturas em diversos pontos do ambiente, tempo decorrido, tempo restante para o final de um teste, hora atual, etc.). O PIC pode perfeitamente ser programado para funcionar independentemente do PC, mostrando todas as informações necessárias para o entendimento do processo no LCD. No entanto, devido ao fato de este ser um desenvolvimento experimental, também foi utilizado o PC para a aquisição de dados. A seguir, uma foto do LCD (de 01 linha com 40 caracteres) utilizado neste projeto e, em seguida, a configuração de pinos do display LCD.



Figura 3.16 – Foto do módulo LCD utilizado.

14	DB7	DB5	<del>DB3</del>	<del>DB1</del>	E	RS	VCC	2
13	DB6	DB4	<del>DB2</del>	<del>DB0</del>	R/W	VO	GND	1

Figura 3.17 – Configuração de pinos do display LCD.

A configuração de pinos do PIC utilizados no controle de outros dispositivos pode ser vista na Tabela 3-1, a seguir.

Tabela 3-1 – Configuração dos pinos do PIC conectados aos diversos dispositivos controlados por ele.

Pinos do PIC	Dispositivo na Interface
2 (a0)	Conversor A/D – canal 0
3 (a1)	Conversor A/D – canal1
11 (c0)	Ventilador – velocidade 2
12 (c1)	Ventilador – velocidade 1
13 (c2)	Ar condicionado
14 (c3)	Bomba d'água
15 (c4)	Botão da placa de controle
16 (c5)	Botão da placa de controle
17 (TX)	MAX232 – pino 4
18 (RX)	MAX232 – pino 3
19 (Vss)	MAX232 – pino 9, LCD – pino 1 (GND)
20 (Vdd)	MAX232 – pino 8, LCD – pino 2 (Vcc)
21 (b0)	MUX – entrada A
22 (b1)	MUX – entrada B
23 (b2)	LCD – pino 2 (E)
24 (b3)	LCD – pino 4 (RS)

25 (b4)	LCD – pino 11 (DB4)
26 (b5)	LCD – pino 12 (DB5)
27 (b6)	LCD – pino 13 (DB6)
28 (b7)	LCD – pino 14 (DB7)

### Conversão dos Sinais de Entrada em Temperatura

Os sinais de temperatura medidos pelos sensores LM35 passam pelo multiplexador e são amplificados dois a dois. Esses sinais amplificados (em forma analógica) chegam então ao conversor A/D do PIC, onde são convertidos para sinais digitais de 10 bits (ou seja, em números decimais inteiros que vão de 0 a 1023). Para que tais sinais sejam mostrados na escala decimal de graus Celsius (°C) foi feito no programa do PIC um cálculo para devolver a temperatura à sua escala original. A equação utilizada é a seguinte:

$$temp = \frac{saida\_A/D}{1023} \cdot \frac{5000[mV]}{10[mV/^{\circ}C]} \cdot \frac{1}{ganho\_AmpOp} \quad [3-8]$$

Onde:

- *saida\_A/D* é o resultado da conversão do sinal analógico para digital (varia de 0 a 1023);
- $5000[mV]$  é o valor máximo de tensão aceito pelo conversor A/D em milivolts;
- $10[mV/^{\circ}C]$  é a resolução do sensor LM35;
- *ganho\_AmpOp* é o ganho do amplificador conectado ao conversor A/D;
- *temp* é o valor final da temperatura, já convertido para graus Celsius (°C).

## 4 REFRIGERADOR CONVENCIONAL

### 4.1 CARACTERÍSTICAS DE FUNCIONAMENTO DE UM REFRIGERADOR CONVENCIONAL

Por se tratar de um trabalho de conforto térmico, e por utilizarmos um aparelho de ar condicionado convencional nos nossos ensaios, é importante conhecer o princípio de funcionamento destes aparelhos.

Os sistemas de resfriamento podem ser de dois tipos, os de expansão direta e os de expansão indireta.

Os de expansão direta são aqueles em que o gás refrigerante é o responsável pelo resfriamento do ar insuflado no ambiente, como ocorre nos aparelhos de janela. Os de expansão indireta são aqueles em que o gás refrigerante resfria a água que circula pelo sistema, sendo esta a responsável pelo resfriamento do ar. Esse é o funcionamento das centrais de água gelada.

O ciclo de refrigeração pode ser acompanhado pela Figura 4.1, começando com o refrigerante que é comprimido no compressor (4) no estado de vapor, tendo sua pressão e sua temperatura aumentadas e seguindo diretamente para o condensador. Aqui, o calor retirado da câmara é rejeitado para o exterior, causando assim a mudança para a fase líquida, indo agora para o dispositivo de controle (1) (tubo capilar ou válvula de expansão). Esse dispositivo provoca uma queda de pressão e faz cair também a temperatura, temperatura essa correspondente à de evaporação do refrigerante no evaporador. Em seguida o refrigerante, entrando no evaporador (2), está evaporando na temperatura desejada do projeto, ocorrendo assim o fluxo ideal de calor da câmara para o evaporador. Esse calor é transportado pelo refrigerante que está sempre em circulação indo diretamente em seguida para o compressor (3), iniciando novamente mais um ciclo. (PANESI, André Ricardo Quinteros, 2003).

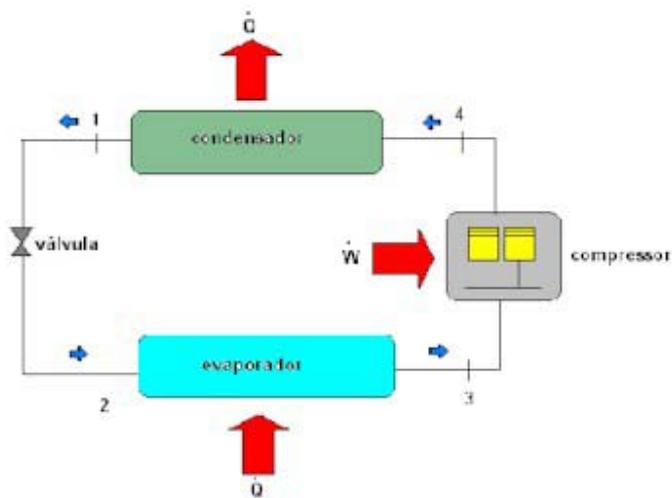


Figura 4.1 – Ciclo de Refrigeração (PANESI, André Ricardo Quinteros, 2003)

Conhecendo se então o ciclo de refrigeração, faz-se necessário conhecer os componentes de um sistema de refrigeração.

Um sistema de refrigeração convencional é composto basicamente por:

### Compressor

O compressor de um sistema de refrigeração funciona de forma análoga a um motor a combustão, mas no sentido inverso, em vez do movimento do gás movimentar o motor, é o compressor que movimenta o gás. Sua função é circular o gás no sistema, e causar uma diferença de pressão no sistema; entre o evaporador e o condensador.

O compressor é usado por uma única razão: recuperar o gás expandido para que possa ser usado varias vezes (fechando o ciclo). Se todo o conteúdo de um reservatório de fluido refrigerante fosse expandido na serpentina de resfriamento e descarregado na atmosfera, o efeito refrigerante seria o mesmo, mas seria preciso repor o reservatório cada vez que esse se esgotasse, haveria também o problema de contaminação do ar, além de elevar demasiadamente o custo de refrigeração.



Figura 4.2 – Compressor (JUNIOR, Luiz Carlos Martinelli, 2003)

### **Condensador**

O condensador é o elemento do sistema de refrigeração que tem a função de transformar o gás quente que é descarregado do compressor a alta pressão em líquido. Neste processo o calor contido no fluido refrigerante é cedido a alguma fonte de resfriamento.

O processo de condensação começa a partir da entrada fluido refrigerante no condensador, neste ponto o fluido refrigerante está no estado gasoso, e ao entrar no condensador ele continua quente e a alta pressão. Como em um sistema de refrigeração o objetivo é evaporar o refrigerante, este gás deve ser condensado antes de retornar ao evaporador.

Este processo ocorre dentro de um trocador de calor denominado condensador, e é no condensador que toda energia absorvida pelo sistema de refrigeração, mais o equivalente da energia mecânica necessária ao funcionamento do sistema devem ser rejeitados.

### **Filtro secador**

O filtro secador tem a função de desidratar o sistema para que a pequena quantidade de água que pode ficar dentro do sistema quando ele é montado, não corroa o sistema como um todo, e também para reter algumas partículas sólidas que circulam pelo sistema evitando uma possível obstrução do tubo capilar. Ele fica instalado entre o condensador e o dispositivo de expansão.

### **Dispositivos de expansão**

Os dispositivos de expansão têm duas funções dentro do processo de refrigeração, uma destas funções é reduzir a pressão do refrigerante líquido e regular a quantidade da mistura líquido/gás que entrará no evaporador.

Dentre os vários tipos de dispositivos de expansão, destacam-se o tubo capilar e a válvula de expansão.

Os tubos capilares são geralmente aplicados em sistemas de refrigeração de pequeno porte. Estes são tubos que possuem o diâmetro interno muito pequeno.

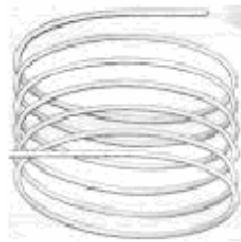


Figura 4.3 – Tubo Capilar (JUNIOR, Luiz Carlos Martinelli, 2003)

## **Evaporador**

O evaporador é a parte do sistema de refrigeração onde o fluido refrigerante passa da fase líquida para a fase gasosa.

O processo de evaporação se inicia durante a passagem pela válvula de expansão. Desta forma o refrigerante é admitido no evaporador quase totalmente na forma líquida, e como a pressão no evaporador é baixa, o fluido refrigerante se evapora com uma temperatura baixa. No lado externo do evaporador há um fluxo de fluido a ser refrigerado (neste caso o ar), como a temperatura do ar é maior que a temperatura do refrigerante, este transfere calor ao refrigerante fazendo com que este continue o processo de evaporação, o que garante que o refrigerante retorne ao compressor na forma gasosa e o ciclo de refrigeração se inicie.

O evaporador é uma parte muito importante do sistema de refrigeração, pois como um sistema de refrigeração é projetado e instalado para retirar calor de uma substância, e como este calor deve ser absorvido pelo evaporador, é esperada uma operação adequada e correta do evaporador.

Em síntese, a função do evaporador é remover calor do reservatório à baixa temperatura (ambiente a ser refrigerado), o que ocorre pela evaporação do fluido refrigerante.

Existem vários tipos de evaporadores disponíveis para os diversos tipos de aplicação, dois tipos bastante comuns são os evaporadores de superfície estendida, e os evaporadores de placas conformadas. O primeiro muito utilizado em refrigeradores de ar, e o outro utilizado em geladeiras.



Figura 4.4 – Evaporador de Superfície estendida (JUNIOR, Luiz Carlos Martinelli, 2003).



Figura 4.5 – Evaporador de Placas conformadas (JUNIOR, Luiz Carlos Martinelli, 2003)

## Fluido Refrigerante

É o fluido que absorve calor de uma substância do ambiente a ser resfriado. Sua função é transportar o calor do reservatório à baixa temperatura para o reservatório à alta temperatura.

## **4.2 VANTAGENS E DESVANTAGENS DOS REFRIGERADORES CONVENCIONAIS**

A grande vantagem do uso de refrigeradores de ar convencionais é a grande capacidade remover calor do reservatório à baixa temperatura, pois mesmo em dias muito quentes em que a simples circulação de ar não é capaz de propiciar conforto térmico, o refrigerador convencional se bem dimensionado é capaz de manter o ambiente com a temperatura desejada para o conforto térmico.

Porém, os refrigeradores convencionais em sua maioria não efetuam a renovação do ar no interior do ambiente, além de deixar o ambiente seco.

Desta maneira, se o ambiente estiver contaminado de alguma forma, seja com poeira, bactérias, fungos, fumaça ou outro contaminante, e o sistema de refrigeração não possuir sistema de renovação de ar, as chances dos ocupantes deste local se contaminar por algum destes agentes aumentará.

Em regiões onde a umidade do ar é relativamente baixa durante a maior parte do ano, o sistema de refrigeração convencional agrava ainda mais esta situação, causando problemas de pele, e também respiratórios, pois ressecam as vias aéreas desprotegendo assim o sistema respiratório.

## 5 CONDICIONADOR EVAPORATIVO

### 5.1 CARACTERÍSTICAS DE FUNCIONAMENTO DO CONDICIONADOR EVAPORATIVO

A evaporação da água é um processo bastante endotérmico, isto é, retira muito calor do que quer que esteja em contato com ela. A partir disso viu-se a oportunidade de estudar um sistema de refrigeração diferenciado onde o ar que entra no ambiente a ser tratado é que cede calor sensível para a água evaporar, tendo assim a sua temperatura reduzida.

O processo de resfriamento evaporativo é bastante conhecido do dia a dia das pessoas. Por exemplo, quando molhamos as mãos e as balançamos em seguida, sentimos o resfriamento das mesmas, isto ocorre por causa da evaporação da água que estava na superfície das mãos e que para evaporar teve que trocar calor, ou seja, retirar calor de nossas mãos. Outro exemplo de resfriamento evaporativo muito usado, nesse caso para esfriar água, é a moringa de barro para guardar água potável. A evaporação da água pela parede porosa mantém a água da moringa fresca o dia todo.

A redução de temperatura (diferença entre a temperatura de entrada e saída do ar no condicionador evaporativo), obtida com o processo de resfriamento evaporativo, depende fundamentalmente da umidade relativa do ar. Quanto mais baixa a umidade relativa maior a redução de temperatura obtida.

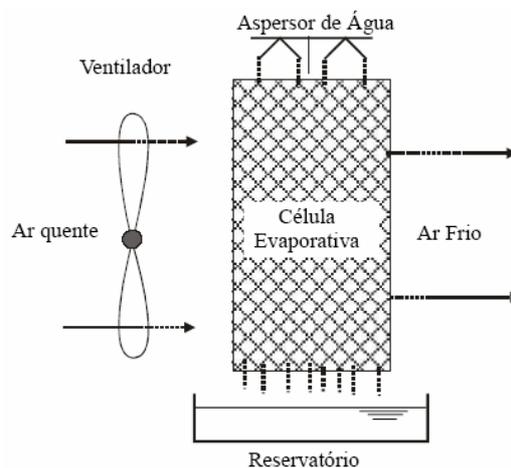


Figura 5.1 – Condicionador evaporativo direto (RED) Fonte: (CAMARGO, J. R., 2003)

O condicionador evaporativo é composto basicamente por um ventilador, uma célula evaporativa, um aspersor de água, uma bomba d'água e um reservatório.

## 5.2 APARELHO DE RESFRIAMENTO EVAPORATIVO.

Neste projeto teve-se como base um ar condicionado evaporativo que se encontrava montado no LAVSI (Laboratório de Automação, Visão e Sistemas Inteligentes) instalado sobre uma mesa dentro do próprio laboratório.

### Estrutura

A estrutura desse aparelho era composta pelos seguintes elementos:

- Uma base metálica retangular feita de aço carbono;
- Uma base para o ventilador também de aço carbono soldada à base metálica;
- Um reservatório de plástico com capacidade para armazenar 17 litros de água;



Figura 5.2 – Estrutura do Ventilador

- Um ventilador monofásico cujas principais especificações são:
- Alimentação: 220V AC;
- Frequência: 60Hz;
- Potência: 0,5cv;
- Duas velocidades nominais de rotação (1000/1080 rpm);
- Corrente nominal: 2,5A.



Figura 5.3 – Ventilador

### Sistema Aspersor de água

- Uma cobertura de alumínio para dispersão da água sobre a célula evaporativa;
- Mangueira plástica de ½ polegada que leva a água bombeada do reservatório até a cobertura para dispersão.
- Um funil de alumínio galvanizado para o escoamento da água de volta ao reservatório e para sustentação da célula evaporativa;

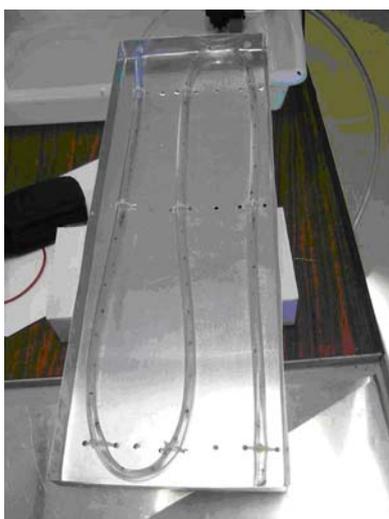


Figura 5.4 – sistema aspersor

## **Células Evaporativas**

- Duas células evaporativas de celulose de dimensões individuais (31 cm x 36 cm x 20 cm), (Munters, 2005);



Figura 5.5 – Células

## **Bomba d'água**

Uma bomba d'água fabricada pela Sarlo Better Equipamentos Ltda, cujas principais especificações são:

- Alimentação: 220V AC;
- Frequência: 60Hz;
- Potência: 11W;
- Vazão nominal: 650 l/h.



Figura 5.6 – Bomba d’água utilizada no projeto.

O gráfico da figura 5.7 apresenta a vazão da bomba em função da altura da coluna d’água. A variação da vazão é linear.

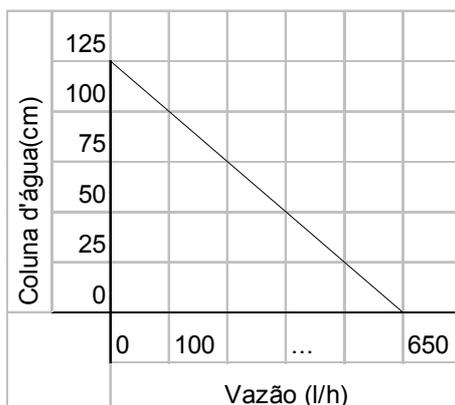


Figura 5.7 – Relação vazão x altura da coluna d’água da Bomba d’água.

### 5.2.1 MUDANÇAS NA ESTRUTURA DO AR CONDICIONADO EVAPORATIVO.

No início do semestre foi definido o caminho a ser seguido no decorrer do desenvolvimento do projeto. Para isso era necessária a realização de diversos testes para analisar o desempenho do sistema de resfriamento híbrido. Primeiramente, notou-se que, para que fosse possível realizar todos os testes desejados, era necessário que algumas modificações fossem feitas na estrutura do aparelho evaporativo.

## Base

A primeira mudança foi transformar a base fixa do ventilador em uma base móvel. Para isso foram desfeitas as soldas que fixavam a base do ventilador à base do aparelho e em seguida foram soldadas pequenas novas chapas de metal perpendicularmente à base do ventilador para dar sustentação a ela. Em seguida foram feitos dois furos em cada uma dessas novas chapas e mais oito furos na base do aparelho para que se pudesse fixá-la à base do ventilador.

Com esse arranjo de furos foi possível posicionar o ventilador em duas posições diferentes: em uma delas o ventilador fica atrás da célula evaporativa conforme já vinha sendo utilizado e na outra o ventilador fica na frente da célula conforme foi constatado nos aparelhos evaporativos comercializados hoje em dia aqui em Brasília.

## Chapa divisória

Para que o ventilador fosse utilizado das duas maneiras descritas anteriormente foi necessário modificar a divisória que separa o ventilador das células evaporativas. O processo foi semelhante ao da base do ventilador: primeiro desfez-se a solda antiga e depois foram soldadas pequenas chapas de metal para fixar a divisória à base do ar condicionado com parafusos também. Com isso a divisória pode ser posicionada de duas maneiras diferentes de acordo com a posição do ventilador. As figuras 5.8 mostram as configurações possíveis para o ventilador e para a chapa divisória.

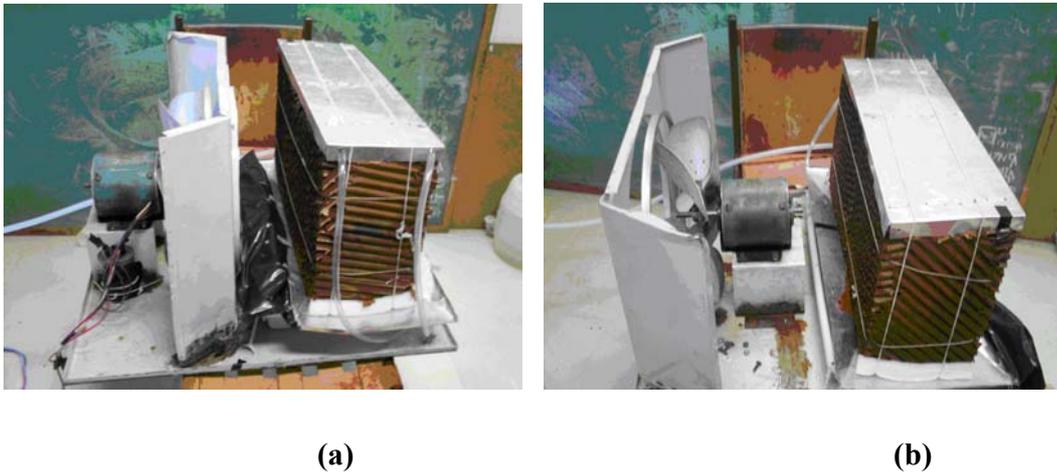


Figura 5.8 – Configurações possíveis do ventilador e da divisória. (a) Célula posicionada a frente do ventilador. (b) Célula posicionada atrás do ventilador.

## Suprimento hídrico.

Para que se pudesse avaliar o desempenho do evaporativo durante um dia inteiro era necessário que se tivesse uma fonte de água constante para que o volume de água evaporado fosse compensado visto que o reservatório utilizado não tem capacidade suficiente para armazenar o volume de água necessário para um dia inteiro de funcionamento.

Com isso buscou-se um ponto de água que fosse o mais próximo possível e também o de mais fácil acesso para levarmos a água até o painel evaporativo e por fim, foi escolhida uma torneira localizada no Laboratório de Linhas e Fitas localizado no Bloco SG11 do Campus da Universidade de Brasília. Foi feita uma pequena adaptação na torneira para conectá-la à mangueira que levaria a água desse laboratório até o laboratório onde o painel evaporativo se encontrava. A adaptação foi feita com um pedaço de mangueira de 2 polegadas que teve uma de suas extremidades encaixada na torneira e a outra ponta dessa mangueira foi encaixada em um pequeno tubo de PVC de  $\frac{1}{2}$  polegada e a outra ponta desse tubo foi conectada a uma mangueira de meia polegada e com 35 (trinta e cinco) metros de comprimento. Cabe ressaltar aqui que em todas as conexões feitas foram utilizadas abraçadeiras para fixá-las e evitar vazamentos. A figura abaixo mostra a ligação feita.



Figura 5.9 – Conexão da mangueira à torneira.

A solução utilizada para o suprimento constante de água foi um sistema com uma bóia frequentemente utilizada em instalações hidráulicas residenciais. Foi feito um furo no reservatório para fixar a bóia e em seguida essa bóia foi fixada à mangueira por meio de um adaptador. A figura 5.10 mostra essa outra montagem:



Figura 5.10 – Reservatório com a bóia.

O funcionamento do sistema é bastante simples: enquanto o nível d'água está baixo a bóia permite a entrada de água para o reservatório e a medida que o nível aumenta a bóia vai restringindo a entrada de água até um ponto em que a passagem de água é interrompida. Com o condicionador evaporativo em funcionamento certo volume de água se evapora e com isso a bóia permite novamente a entrada de água no reservatório, mantendo assim o reservatório sempre cheio.

## 6 AMBIENTE DE TESTES.

### Instalação do Evaporativo

Decidiu-se que os testes seriam realizados no próprio LAVSI, laboratório do Departamento de Engenharia Elétrica, no Bloco SG-11 no Campus da Universidade de Brasília, onde o sistema foi desenvolvido. Para tal, o condicionador evaporativo foi instalado no lugar de uma das janelas do laboratório sustentado por uma estrutura metálica como um ar condicionado do tipo janela ao lado e a mesma altura do ar condicionado convencional. A figura 6.1 mostra como foi feita a instalação do aparelho.



Figura 6.1 – Local de instalação do evaporativo.

Para diminuir a vibração produzida pelo motor do condicionador evaporativo em funcionamento foram utilizados pequenos calços de borracha sob a base e sob a estrutura externa do aparelho conseguindo assim, um nível de ruído bastante razoável.

### Montagem do Ambiente de Ensaios

Como já foi dito, o condicionador evaporativo foi instalado no LAVSI e para realização dos testes foi delimitada uma área do laboratório com as seguintes características:

- Dimensões:
  - Comprimento: 4,90 metros;
  - Largura: 3,00 metros;

- Pé direito: 2,75 metros.

O ambiente possui algumas áreas abertas para permitir a renovação do ar, formando um total de aproximadamente 1,7 m<sup>2</sup>.

O laboratório está localizado no primeiro andar do bloco SG 11, Localizado no Campus da Universidade de Brasília;

A incidência direta de raios solares é muito baixa sendo a incidência indireta maior durante o período da manhã;

O lado do ambiente de teste que é voltado para o ambiente externo tem uma parte composta por janelas de vidro que têm as seguintes dimensões:

- Três janelas de (88 cm x 73 cm);
- Quatro janelas de (85 cm x 55 cm).

O forro do laboratório é feito de PVC e acima desse forro há uma laje de concreto;

No interior do ambiente de testes temos duas estantes, três computadores, duas mesas e três cadeiras;

A iluminação é feita por seis lâmpadas fluorescente de 32w cada.

As dimensões do ambiente podem ser consideradas como as dimensões de um quarto, onde os espaços abertos no ambiente utilizado correspondem a janelas abertas ou até mesmo portas abertas, visto que é necessário que haja a renovação do ar no ambiente para o melhor funcionamento do sistema evaporativo.

Para essa delimitação foram utilizadas algumas estantes presentes no laboratório e algumas placas de PVC como as utilizadas para fazer o forro do próprio laboratório. A Figura 6.2 ilustra o ambiente de teste utilizado.



Figura 6.2 – Ambiente de testes.

## 6.1 TESTES

Diversos testes foram realizados a fim de se obter a maior quantidade possível de informações sobre o funcionamento do sistema evaporativo para que fosse possível então avaliar o seu desempenho durante todo o dia. De posse dessas informações, buscou-se uma melhor alternativa de integração desse sistema de resfriamento de ar ao sistema convencional com o objetivo de garantir conforto térmico durante um dia inteiro.

### 6.1.1 CONFIGURAÇÕES DE ENSAIOS POSSÍVEIS

#### **Montagens realizadas.**

Montagem 1.



Figura 6.3 – Equipamento evaporativo com a célula evaporativa de celulose posicionada na frente do ventilador.

Como pode ser visto na figura acima, nessa configuração o funcionamento do sistema evaporativo é o seguinte: o ventilador força o ar externo a passar pela célula evaporativa, resfriando-o, antes de ir para o ambiente.

#### Montagem 2.



Figura 6.4 – Equipamento evaporativo com a célula evaporativa de celulose posicionada atrás do ventilador.

Nessa montagem o sistema apresenta o seguinte funcionamento: o ar externo é forçado a passar pela célula evaporativa devido à queda de pressão ocasionada pelo funcionamento do ventilador que insufla o ar já resfriado, após passar pela célula, para o ambiente.

## **6.1.2 CONDIÇÕES DO AMBIENTE PARA REALIZAÇÃO DOS TESTES.**

Todos os testes foram realizados durante um período de 24 horas procurando manter ao máximo o ambiente de testes fechado com a menor circulação possível de pessoas em seu interior onde estavam ligados apenas os equipamentos necessários à realização dos testes (um computador, uma fonte de alimentação e os circuitos).

### **Disposição dos sensores e temperaturas medidas.**

Para a realização das medidas foram utilizados seis sensores de temperatura LM35DM distribuídos no ambiente de testes. A disposição dos sensores utilizada foi a seguinte:

-Um sensor colocado no lado externo do laboratório, preso à estrutura do aparelho, medindo a temperatura de bulbo seco externo;

-Um sensor colocado exatamente após a célula evaporativa, medindo a temperatura do ar insuflado para se saber a queda de temperatura sofrida pelo ar após passar pela célula;

-Um sensor posicionado sobre o funil que dá suporte à célula. Este sensor ficou envolto em uma flanela constantemente úmida para fazer a medição da temperatura de bulbo úmido;

-Um sensor localizado sobre a mesa que fica próxima às janelas, a uma altura de aproximadamente 1 metro. Esse sensor faz uma das medidas de temperatura de bulbo seco interna e permite avaliar a influência da incidência de raios solares na temperatura dentro do ambiente de testes.

-Outros dois sensores localizados em dois pontos do ambiente para verificar como a temperatura de bulbo seco se comporta no interior do ambiente. Um dos sensores está localizado sobre a mesa central a uma altura de aproximadamente 1 metro e o outro está localizado em cima do monitor de computador próximo a estante.

A Figura 6.5 ilustra a disposição dos sensores utilizados no interior do ambiente.

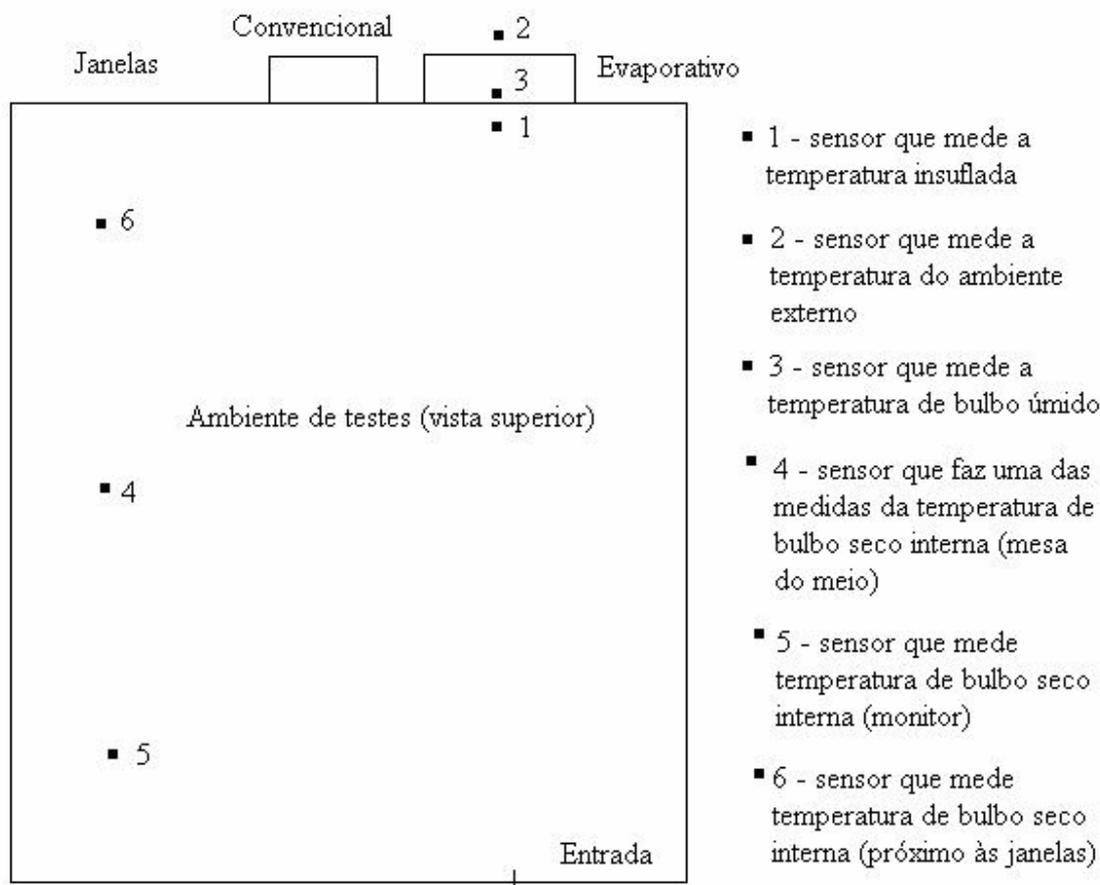


Figura 6.5 – Disposição dos sensores no ambiente (vista superior).

### 6.1.3 TESTES REALIZADOS.

#### Teste 1 – Todos os aparelhos desligados.

Nesse teste todos os aparelhos permaneceram desligados para que se pudesse avaliar o comportamento da temperatura dentro do ambiente de testes durante um dia inteiro.

Como os aparelhos estavam desligados, utilizou-se o sensor que mediria a temperatura de bulbo úmido para fazer mais uma medição da temperatura ambiente. Para isso se posicionou esse sensor a uma altura de 1,5m e em frente ao condicionador evaporativo com uma distância de 1m entre eles.

#### Teste 2 – Condicionador evaporativo com o ventilador na velocidade 1 (1000 rpm) e utilizando a montagem 1.

Nesse teste foi avaliado o comportamento da temperatura no ambiente apenas com o condicionador evaporativo ligado na velocidade 1 e a bomba d'água ligada ininterruptamente. A temperatura de bulbo úmido foi medida com o sensor posicionado sobre um recipiente plástico com água, sendo que o sensor estava envolto por uma flanela que se estendia para dentro do recipiente mantendo o sensor constantemente úmido.

### **Teste 3 – Condicionador evaporativo com o ventilador na velocidade 2 (1080 rpm) e utilizando a montagem 1.**

Nesse teste se avaliou o comportamento da temperatura no ambiente apenas com o condicionador evaporativo ligado na velocidade 2 e a bomba d'água ligada ininterruptamente. Nesse caso a temperatura de bulbo úmido foi medida por um sensor envolto em uma flanela posicionado bem próximo a célula sobre o funil que da sustentação a célula. A flanela estava em contato direto com a água mantendo o sensor sempre úmido. Utilizou-se também um pedaço de isopor entre o funil e o sensor para que a leitura da temperatura de bulbo úmido não sofresse influência da temperatura do funil.

### **Teste 4 – Condicionador evaporativo com o ventilador na velocidade 1 (1000 rpm) e utilizando a montagem 2.**

Nesse teste foi avaliado o comportamento da temperatura no ambiente apenas com o condicionador evaporativo ligado na velocidade 1 e a bomba d'água ligada ininterruptamente. Nesse caso a temperatura de bulbo úmido foi medida da mesma forma que no teste anterior.

### **Teste 6 – Apenas o ar condicionado convencional funcionando.**

Nesse teste foi deixado apenas o ar condicionado convencional funcionando para que pudéssemos avaliar a sua influência no comportamento da temperatura dentro do ambiente de testes durante um dia inteiro.

Nesse caso o sensor que mediu a temperatura de bulbo úmido foi posicionado sobre um recipiente plástico com água, sendo que o sensor estava envolto por uma flanela que se estendia para dentro do recipiente mantendo o sensor constantemente úmido.

O sensor destinado à medição da temperatura insuflada pelo condicionador evaporativo foi desta vez, posicionado em frente à saída de ar do aparelho de ar condicionado convencional.

### **Teste 7 – Medição da velocidade do ar.**

Nesse teste se utilizou um anemômetro digital para realizar as medições da velocidade do ar que era insuflado para o ambiente por todos os aparelhos. Para isso, posicionou-se o anemômetro próximo ao local da saída do ar insuflado em diversas posições que serão detalhadas mais a frente e fizemos a leitura. Essa medição foi feita para os seguintes casos:

- Montagem 1, com velocidade 1;
- Montagem 2, com velocidade 2;
- Apenas aparelho de ar condicionado convencional.

## 7 DADOS E ANÁLISE

Nesse capítulo será apresentado o resultado e a análise de cada um dos testes realizados conforme o que foi dito no capítulo anterior.

### 7.1 TODOS OS APARELHOS DESLIGADOS

A partir dos dados fornecidos após a realização do teste, observou-se o comportamento típico da temperatura dentro do ambiente de ensaios ao longo de 24hs.

Este teste foi iniciado no dia 28/02/2006 às 18:45 horas, neste momento a temperatura externa encontrava-se por volta de 22°C, enquanto a temperatura interna medida pelos vários sensores estava em 25,5°C.

É importante salientar que todos os gráficos retratam o comportamento da temperatura do ambiente de ensaios ao longo de 24hs, por isso as grandes oscilações evidentes em todos os gráficos não representam nenhum tipo de interferência ou ruído, mas sim vários valores de temperatura representados em intervalos de tempo muito curtos.

Nesta etapa o sensor destinado à medição de bulbo úmido foi utilizado para se fazer mais uma medida da temperatura de bulbo seco interna. Este sensor foi posicionado em frente ao condicionador evaporativo, a uma distância de 1,5 metros, a uma altura de 1,5 metro. Com isso, no gráfico da Figura 7.1, a curva denominada de “bulbo úmido” corresponde a mais uma leitura de temperatura de bulbo seco interna, pois para isso é necessário que haja um fluxo de ar com velocidade de 3m/s (Simancas Yovane, Kátia, 2003) passando pelo sensor, e como nossa fonte de circulação de ar (ventilador do refrigerador evaporativo) ficou desligada neste teste, não foi possível mensurar essa variável. Desta forma não é possível estimar a umidade relativa do ar no interior do ambiente.

O gráfico da Figura 7.1 foi obtido a partir dos dados captados pelos sensores e armazenados no computador. Neste gráfico, observou-se que a temperatura interna ao ambiente de ensaios é maior que a temperatura externa durante toda a noite. Isso se deve ao fato de que os processos de troca de calor entre o ambiente de testes e o ambiente externo são lentos, sendo que o principal deles é a convecção. Como este processo de troca de calor é lento, observou-se no gráfico que não foi possível que ocorresse o equilíbrio térmico entre os ambientes. Este fato demonstra a necessidade de um mínimo de comunicação direta entre os ambientes para que o equilíbrio ocorresse.

Durante toda a noite, a temperatura externa apresentou uma queda leve em sua medida, (cerca de 1°C), e isto se refletiu nas medidas dos sensores colocados no interior do ambiente (queda em média de 0,5°C).

Após o amanhecer (7:00AM-01/03/2006) a temperatura externa começou a aumentar. A partir deste momento sucederam-se diversos momentos de ventania, que se estenderam ao longo de todo dia. Esta situação é retratada nas bruscas variações do gráfico de temperatura externa e percebida também no gráfico azul, pois este sensor se encontra na frente da célula evaporativa, e quando os ventos externos ocorrem, uma porcentagem deste fluxo de ar entra pelo aparelho evaporativo e atinge este sensor.

Este fator só é significativo nesta ocasião, pois quando o sistema está em funcionamento a quantidade de ar que é insuflada para o interior do ambiente de ensaios é muito maior, fazendo com que o ar que entra devido à força do vento externo seja insignificante.

No período da tarde do dia 01/03/2006 ocorreu uma forte chuva acompanhada de muito vento, o que justifica as grandes oscilações nos gráficos de temperatura externa (cor laranja) e no sensor localizado em frente à célula (cor azul).

Esta etapa do trabalho se mostra importante na medida em que se visualizou que caso não haja nenhum meio de interação entre o ambiente externo e o ambiente interno, a temperatura interna sempre será maior que a temperatura externa, salvo em situações atípicas como chuvas em um momento muito quente do dia, onde os gases quentes da evaporação da água aquecem o ambiente externo rapidamente, não havendo tempo suficiente para que a temperatura interna aumente na mesma velocidade.

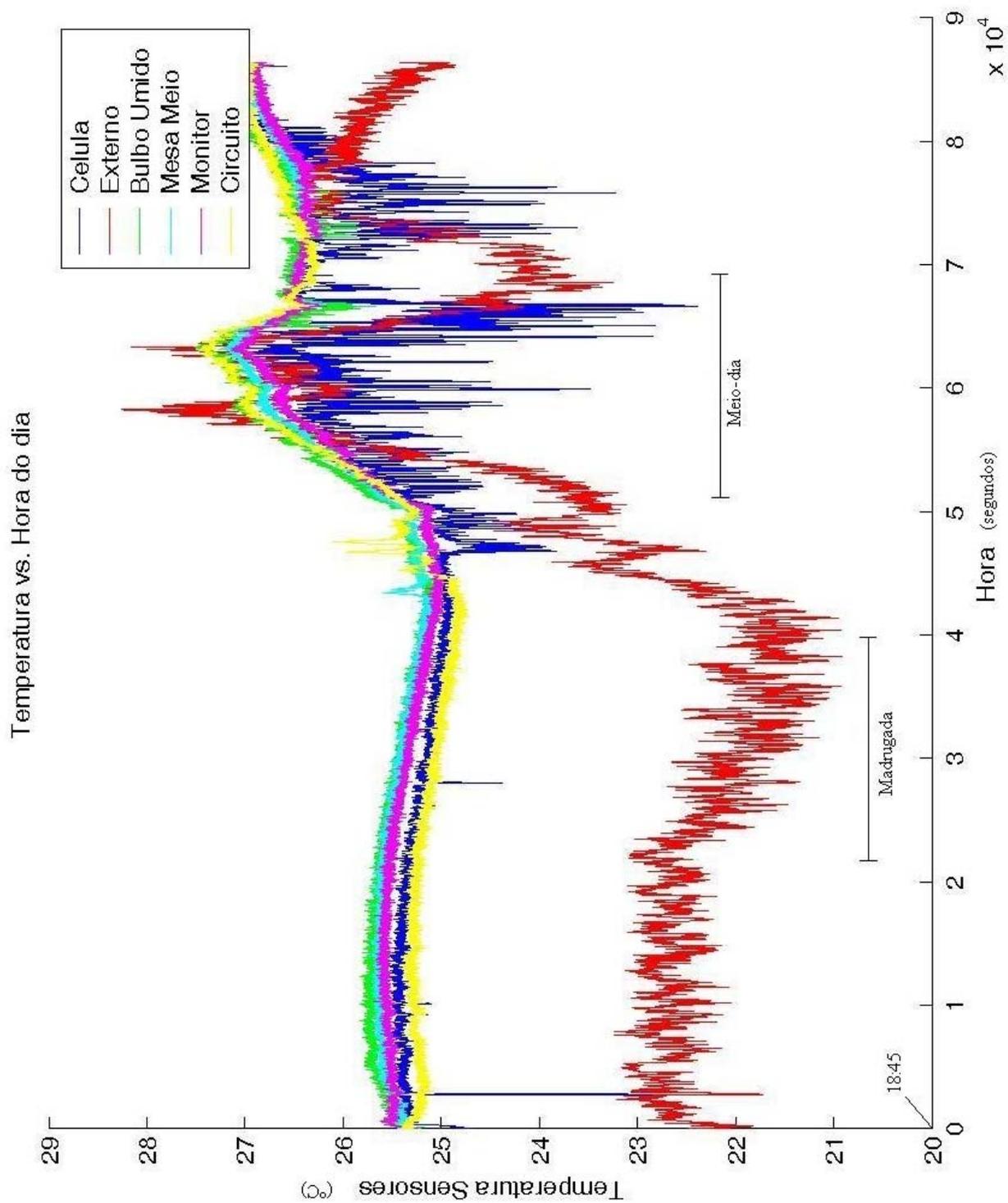


Figura 7.1 – Teste da variação da temperatura ao decorrer do dia sem a interferência de nenhum equipamento. Iniciado às 18h45min do dia 28/02/2006.

## 7.2 CONDICIONADOR EVAPORATIVO COM O VENTILADOR NA VELOCIDADE 1 (1000 RPM) E UTILIZANDO A MONTAGEM 1

A partir dos dados fornecidos após a realização do teste, observou-se a influência do aparelho de resfriamento evaporativo no comportamento da temperatura dentro do ambiente de ensaios ao longo de 24hs. O gráfico da figura 7.2 foi obtido a partir dos dados captados pelos sensores e armazenados no computador.

Este teste foi iniciado no dia 02/03/2006 às 09:30 horas e neste momento a temperatura externa encontrava-se por volta de 25°C, enquanto a temperatura interna medida pelos vários sensores estava em na media por volta de 23,5°C.

Nesta etapa se mediu a temperatura de bulbo úmido, porém essa medição foi feita de forma inadequada, visto que o sensor que mediria essa temperatura foi posicionado em um local onde a influência do vento era mínima, menos de 3m/s que seriam necessários para a correta medição (Simancas Yovane, Kátia, 2003). Essa inadequação na realização da medida é claramente perceptível na figura 7.2. Analisando o gráfico da figura 7.2 notou-se que a curva que representa a temperatura de bulbo úmido (em verde) permaneceu constantemente acima da temperatura do ar insuflado (em azul), o que não poderia acontecer, pois caso o evaporativo tivesse 100% de rendimento o menor valor que a temperatura insuflada poderia atingir seria igual à temperatura de bulbo úmido e nunca abaixo.

Com base na temperatura de bulbo úmido e bulbo seco medidas após uma hora do início do teste se pode estimar a umidade relativa no interior do ambiente com o auxílio da carta psicometrica ou por meio da equação [2-9]. Conforme fora dito anteriormente, a temperatura de bulbo úmido não foi medida adequadamente, por isso, com base no comportamento dessa nos outros testes se utilizou um valor de 1°C abaixo do medido no sensor de bulbo úmido. O valor medido nesse caso foi de 22.1°C. Portanto o valor considerado para a estimativa da umidade relativa do ar no interior do ambiente foi 21°C. Já para a temperatura de bulbo seco se considerou a média aritmética dos três valores medidos pelos sensores de bulbo seco (23,7°C 23,5°C 24,2°C), o que resulta no valor de 23,8°C. Logo para esse ponto, a umidade relativa interna calculada é de aproximadamente 78%, de acordo com a carta psicometrica. Já a umidade relativa externa ao ambiente pode ser calculada a partir da equação [2-10], sendo necessário para tanto se saber a temperatura do ambiente externo e a temperatura insuflada. Para o mesmo instante, a temperatura externa medida foi de 26,2°C e a temperatura insuflada foi de 22.1 °C, logo de acordo com a equação [2-10], a umidade relativa externa calculada no instante é de 70%.

Considerando agora o instante em que ocorreu o pico de temperatura externa, por volta das 12:46PM, a umidade relativa interna calculada é de aproximadamente 70%, considerando a temperatura

de bulbo úmido e de bulbo seco respectivamente, iguais a 21°C e 24,9 °C e fazendo-se uso da carta psicometrica. Enquanto que para a umidade relativa externa o valor calculado foi de 50%.

Já no período noturno por volta das 12:00AM, calculo-se a umidade relativa externa obtendo-se como resultado 75%. Sendo a temperatura de bulbo úmido 20°C e a de bulbo seco 23,5°C, estimou-se a umidade interna em torno de 74%.

Comparando esses três pontos podemos perceber a enorme influência que umidade relativa do ar do ambiente externo tem sobre o rendimento do sistema evaporativo. A meia noite, quando a umidade relativa do ar externo encontrava-se acima de 75% a queda de temperatura resultante da passagem do ar pela célula evaporativa é de aproximadamente 2°C, enquanto que às 12:46PM com umidade relativa entre 40 e 45% a queda de temperatura foi de aproximadamente 7,9°C. Com base nos dados da Tabela 7.1, verifica-se que conforme a umidade relativa externa decresce maior é a redução de temperatura do ar externo ao passar pelo painel evaporativo. Devido ao fato de a temperatura de bulbo úmido não ter sido medida de forma adequada, não foi feito o calculo da efetividade do processo de resfriamento evaporativo para esse caso.

Tabela 7-1 – Dados dos pontos analisados no ensaio da montagem 1 e velocidade 1 do ventilador

Horário	Umidade Externa (%)	Umidade Interna (%)	Redução de Temperatura (°C)
10:30AM	62,75	78	4,2
12:46PM	42,25	70	7,9
12:00AM	74,60	74	1,9

Neste teste se observou que a temperatura registrada no interior do ambiente de ensaios foi menor que a temperatura externa desde o início do teste até por volta das 7:00PM, instante a partir do qual a temperatura externa cai bruscamente ficando abaixo da temperatura interna. Diferentemente do teste anterior, no período noturno a temperatura interna do ambiente permaneceu em torno de 1°C acima da temperatura externa enquanto que no teste anterior essa diferença permaneceu em torno de 3°C, o que mostra a atuação do sistema evaporativo na redução de temperatura do ambiente.

Por fim, nota-se que a temperatura do ar insuflado para o ambiente variou entre 20°C e 23°C(curva azul), enquanto que a maior temperatura interna medida (curva amarela) variou entre 22,5°C e 25,5°C. Conforme afirmativa do artigo técnico da empresa Basenge Indústria e Comércio Ltda [4], que afirma que a temperatura do ar insuflado deve ser de 3 a 5°C menor do que a temperatura requerida para que o sistema de refrigeração esteja bem dimensionado. Logo, de acordo com os dados obtidos com o ensaio, verificou-se que a temperatura limite inferior para a requerida no ambiente deve ser de 23°C, porém isso

não significa que o evaporativo é capaz de atender a essa solicitação durante todo o dia, pois em determinados períodos do dia a temperatura insuflada era de 23°C. Ou seja, de acordo com a afirmação anterior a temperatura do ambiente nesta situação ficaria de 3 a 5°C maior que a temperatura do ar insuflado.

Nota-se então, que para o caso em que a diferença entre a temperatura requerida e a temperatura insuflada for menor do que 3°C torna-se necessária a utilização do sistema convencional de refrigeração do ar para atender a temperatura requerida.

Utilizando-se a Equação [2-9] para cálculo da umidade externa, foi possível se traçar o Gráfico (Figura 7.3) correspondente à sua variação ao longo do período de realização do teste.

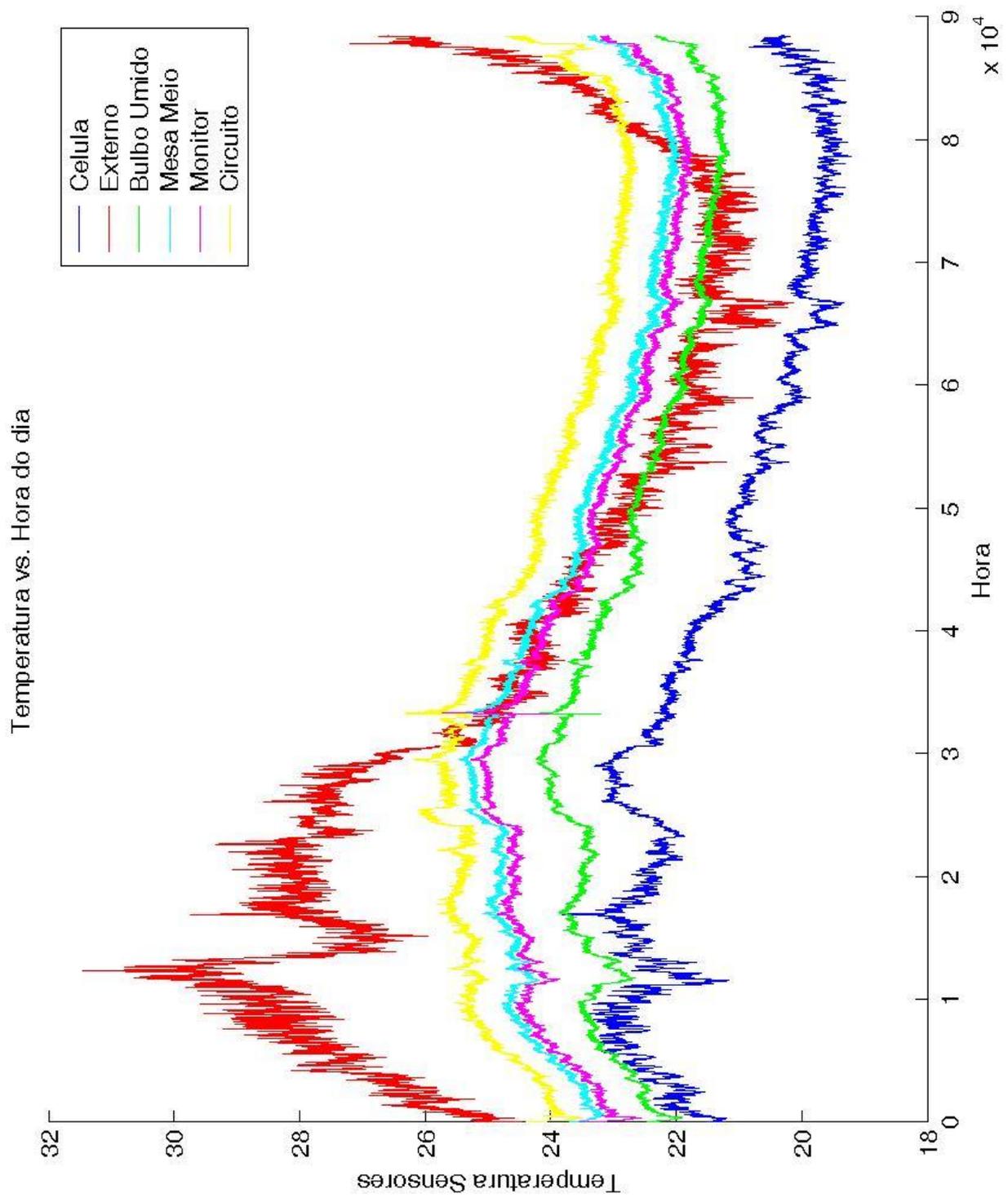


Figura 7.2 – Teste da variação da temperatura medida ao decorrer do dia com o condicionador evaporativo ligado na velocidade 1 e montagem 1. Iniciado às 09h30min do dia 02/03/2006.

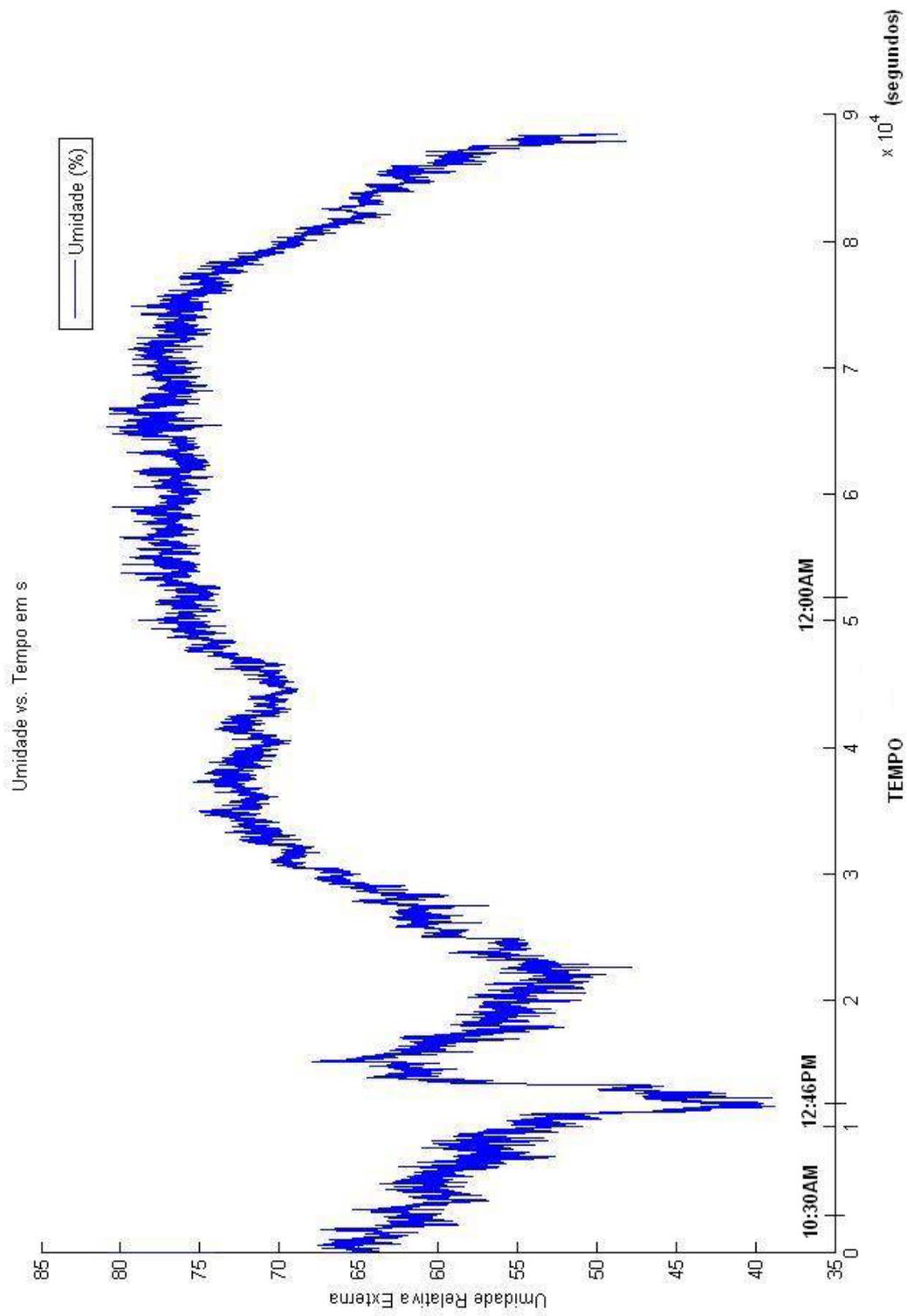


Figura 7.3 – Gráfico de variação da umidade externa calculada ao decorrer do dia com o condicionador evaporativo ligado na velocidade 1 e montagem 1. Iniciado às 09h30min do dia 02/03/2006.

### **7.3 EVAPORATIVO COM O VENTILADOR NA VELOCIDADE 2 (1080 RPM) E UTILIZANDO A MONTAGEM 1**

Por meio deste teste foi possível se observar a influência do aparelho de resfriamento evaporativo na situação térmica do ambiente de ensaios no decorrer de 24 horas. Os dados deste experimento foram captados pelos sensores de temperatura e armazenados no computador. Para uma melhor análise das variações de temperatura do ambiente foi feito o Gráfico (Figura 7.4), a partir dos dados coletados.

Este teste foi iniciado no dia 03/03/2006 às 21:18 horas e neste momento tanto a temperatura externa como a interna se encontrava por volta de 24,5°C.

Nesta etapa a temperatura de bulbo úmido foi medida de forma mais adequada. A temperatura média de bulbo úmido nas primeiras horas foi de 21°C, valor em torno do qual essa temperatura oscilou até às 1:45AM. A partir desse ponto foi cortado o fornecimento de água para o sistema (o reservatório secou e não houve reabastecimento do mesmo em virtude da falta de acesso ao local onde fica o registro), com isso, nota-se pelo gráfico da Figura 7.4 que houve um acentuado aumento da temperatura insuflada (cerca de 3°C). Isso se deve ao fato de a célula não estar mais resfriando o ar, visto que está já não se apresentava mais úmida. Como resultado disso, nota-se também uma elevação da temperatura interna do ambiente em 0,5°C. Esta situação permaneceu até por volta de 8:25AM, a partir da qual o fornecimento de água foi retomado, verificando assim uma redução da temperatura insuflada e das temperaturas internas em geral. A partir desse instante, as temperaturas pouco variaram, acompanhando o comportamento da temperatura externa.

Um fato importante a ser salientado a respeito das condições de realização do teste é que choveu ao longo de todo o dia, o que não propicia uma boa condição de operação do evaporativo, pois neste caso a umidade relativa do ar externo se encontrava bastante elevada ao longo de todo o dia (em torno de 80%), como pode ser visto no Gráfico (Figura 7.5). Comparando-se este resultado com o resultado do teste anterior, verifica-se uma grande discrepância de valores para a umidade relativa externa nos momentos em que costuma ocorrer os maiores valores de temperatura do dia. Outro fato que veio a influenciar nos resultados do teste foi o motor, operando a 1080 rpm, aquecer excessivamente. Isto acarretou um aumento da temperatura insuflada para o ambiente, mostrando que esta velocidade de operação do motor não se mostrava adequada para períodos longos de funcionamento. Por este motivo, optou-se pela não realização do teste com o condicionador evaporativo na montagem 2 e operando à velocidade 2.

Com base na temperatura de bulbo úmido e bulbo seco medidas após 3 horas de teste se pode estimar a umidade relativa no interior do ambiente com o auxílio da carta psicometrica ou por meio da equação [2-8]. O valor medido para bulbo úmido nesse caso foi de 21,0°C. Já para a temperatura de bulbo seco se considerou a média aritmética dos três valores medidos pelos sensores de bulbo seco (23,5°C

23,3°C 24,0°C), o que resulta no valor de 23,6°C. Logo para esse ponto, a umidade relativa interna estimada é de aproximadamente 80%, de acordo com a carta psicometrica. Já a umidade relativa externa ao ambiente, calculada a partir da equação [2-9], sendo necessário para tanto se saber a temperatura do ambiente externo e a temperatura insuflada. Para o mesmo instante, a temperatura externa medida foi de 23,0°C e a temperatura insuflada foi de 21,1 °C, logo de acordo com a equação [2-9], a umidade relativa externa calculada no instante é de 74,6%.

Considerando o período no qual não houve fornecimento de água, verifica-se que os valores de umidade externa, de acordo com o Gráfico (Figura 7.5), apresentou-se de forma incorreta, devido ao fato da temperatura insuflada, variável utilizada no cálculo da umidade, também se mostrou inadequada neste período. Devendo este intervalo do gráfico ser desconsiderado para análise. Considerando agora um instante após o restabelecimento do fornecimento de água, às 5:18PM, a umidade relativa externa era de 82,1%. Com relação à medição de umidade relativa interna, o valor medido para bulbo úmido nesse caso foi de 20,9°C. Já para a temperatura de bulbo seco se considerou a média aritmética dos três valores medidos pelos sensores de bulbo seco (22,8°C 22,7°C 23,4°C), o que resulta no valor de 22,9°C. Logo para esse ponto, a umidade relativa interna estimada é de aproximadamente 83%, de acordo com a carta psicometrica.

Comparando esses dois pontos se pode perceber a enorme influência que umidade relativa do ar do ambiente externo tem sobre o rendimento do sistema evaporativo. Às 12:18AM, quando a umidade relativa do ar externo encontrava-se acima de 70% a queda de temperatura resultante da passagem do ar pela célula evaporativa foi de 1,9°C, enquanto que às 5:18PM com umidade relativa entre 80 e 85% a queda de temperatura foi de aproximadamente 0,7°C. Com base nos dados da Tabela 7.2, verifica-se que conforme a umidade relativa externa decresce maior é a redução de temperatura do ar externo ao passar pelo painel evaporativo. Para esses mesmos instantes, pode-se se calcular a efetividade do resfriamento evaporativo a partir da equação [2-10].

Tabela 7-2 – Dados dos pontos analisados no ensaio da montagem 1 e velocidade 2 do ventilador

Horário	Umidade Externa (%)	Umidade Interna (%)	Redução de Temperatura (°C)	Efetividade (%)
12:18AM	74,6	80	1,9	95,00
5:18PM	82,1	83	0,7	77,77

Considerando os valores de efetividade calculados, nota-se que quanto maior a umidade relativa do ar externo menor a efetividade do processo de resfriamento evaporativo. Tal fato era esperado, visto que

devido à alta umidade do ar externo a queda de temperatura do ar externo ocasionada por sua passagem pela célula evaporativa é menor e conseqüentemente, a efetividade do processo também é menor. No entanto, mesmo a efetividade sendo menor no segundo instante considerado, ambos os valores calculados são elevados, o que mostra um bom desempenho do condicionador evaporativo. Porém, deve-se salientar que esses valores calculados são apenas uma estimativa da efetividade do processo de resfriamento, visto que devido à dificuldade em se obter um valor mais adequado para a temperatura de bulbo úmido, esses cálculos podem apresentar erros.

Por fim, conclui-se que, devido ao fato de o teste ter sido realizado em um dia bastante úmido e, também devido ao fato de o motor ter se aquecido mais que o normal, o condicionador evaporativo não se mostrou adequado. Sendo recomendado, neste caso, o uso do aparelho de ar condicionado convencional, que não tem seu funcionamento prejudicado pela alta umidade externa.

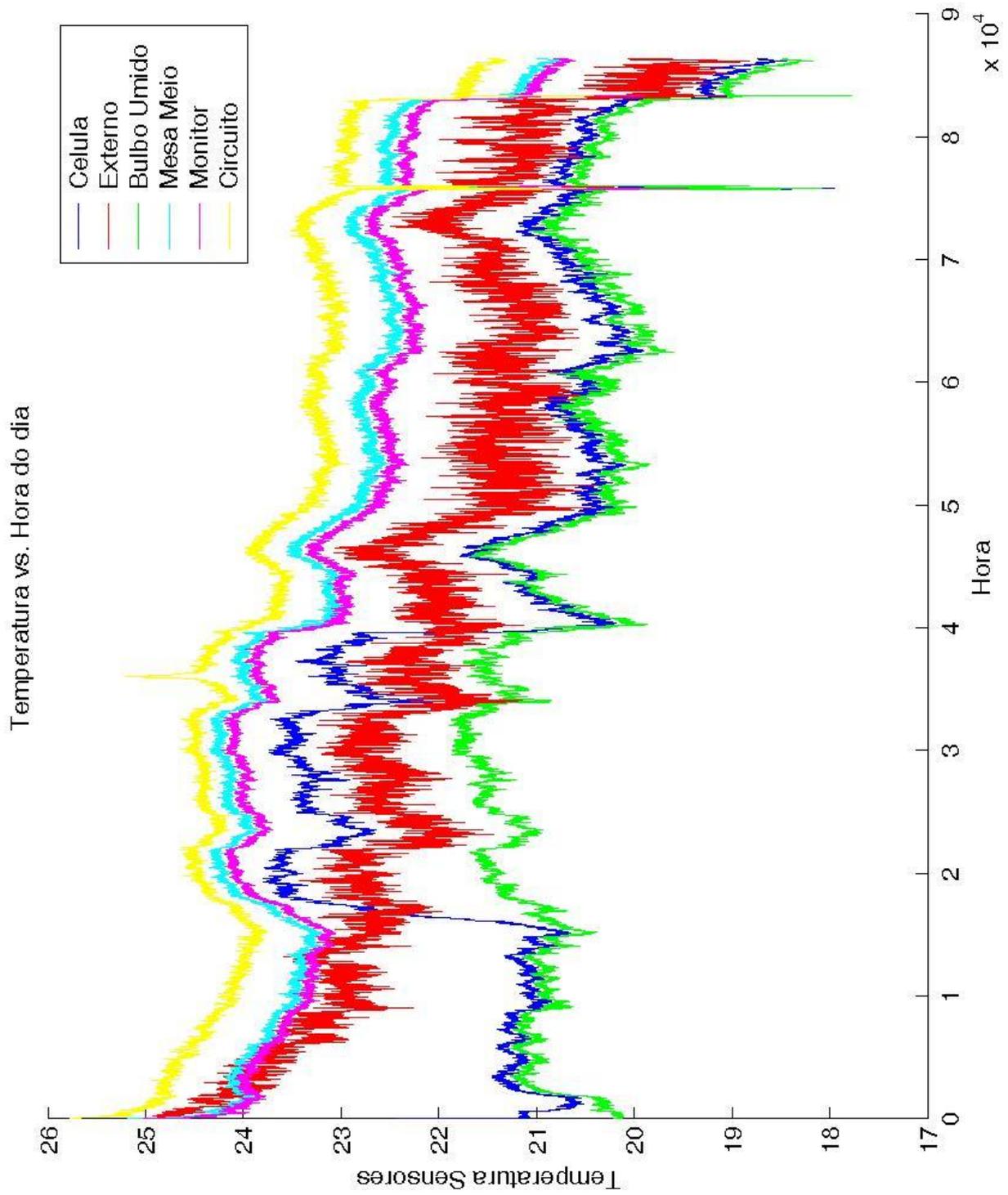


Figura 7.4 – Teste da variação da temperatura medida ao decorrer do dia com o condicionador evaporativo ligado na velocidade 2 e montagem 1. Iniciado às 21h18min do dia 03/03/2006.

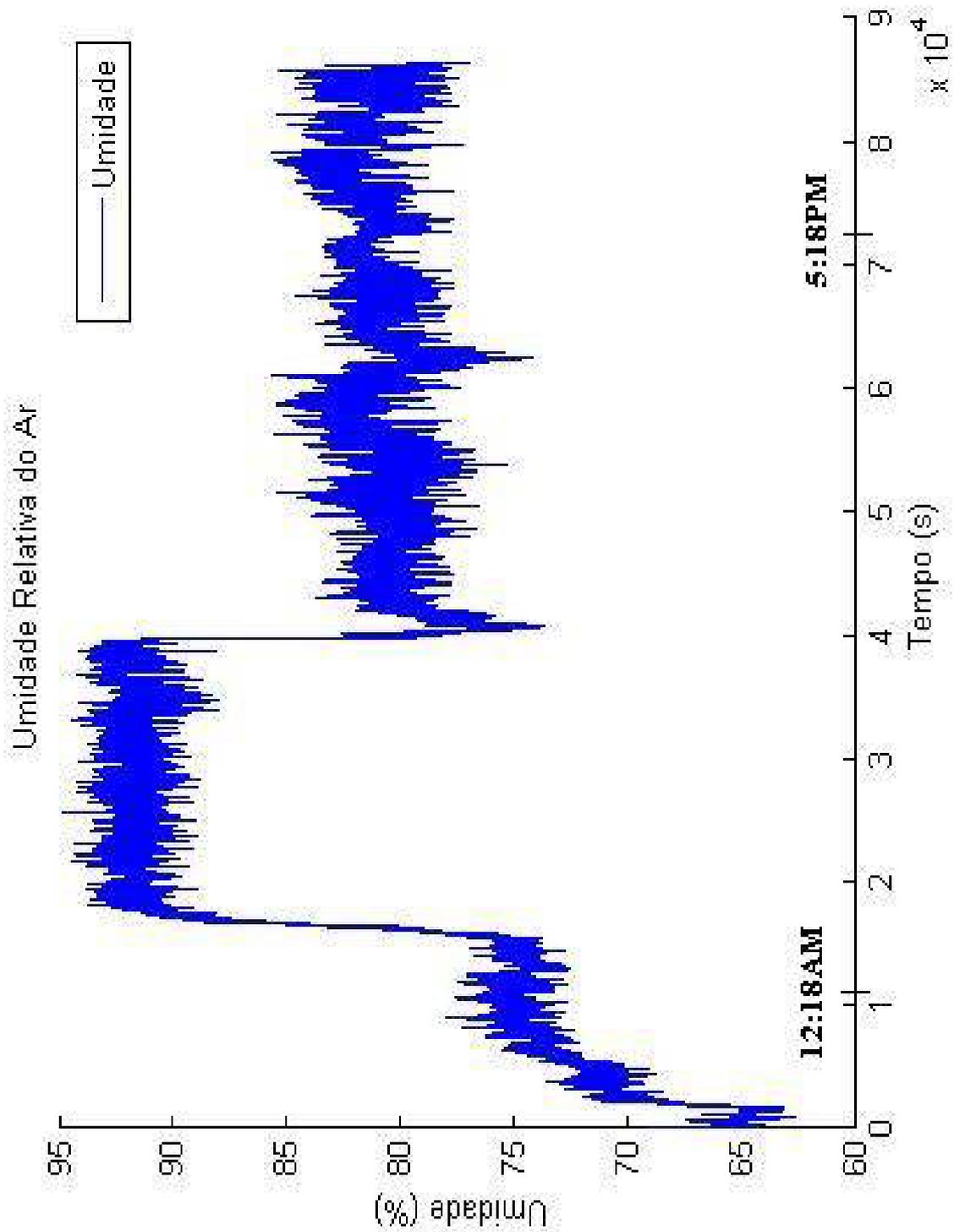


Figura 7.5 – Teste da variação da umidade relativa calculada do ar externo ao decorrer do dia com o condicionador evaporativo ligado na velocidade 2 e montagem 1. Iniciado às 21h18min do dia 03/03/2006.

## 7.4 EVAPORATIVO COM O VENTILADOR NA VELOCIDADE 1 (1000 RPM) E UTILIZANDO A MONTAGEM 2

Por meio deste teste foi possível se observar a influência do aparelho de resfriamento evaporativo na situação térmica do ambiente de ensaios no decorrer de 24 horas. Os dados deste experimento foram captados pelos sensores de temperatura e armazenados no computador. Para uma melhor análise das variações de temperatura do ambiente foi feito o Gráfico (Figura 7.6), a partir dos dados coletados.

Este teste foi iniciado no dia 10/03/2006 às 19:50 horas e neste momento a temperatura externa encontrava-se por volta de 23°C, enquanto a temperatura interna média medida pelos sensores estava por volta de 24,5°C.

Nesta etapa a temperatura de bulbo úmido foi medida de forma mais adequada. A temperatura média de bulbo úmido nos primeiros minutos foi de 20,2°C, valor em torno do qual essa temperatura oscilou ao longo de todo o teste, não assumindo valores abaixo de 19°C nem acima de 22°C. Considerando-se que essa foi a menor das temperaturas medidas pelo sistema em todos os momentos e que ela corresponde a uma estimativa da temperatura mínima alcançável no ambiente em questão, conclui-se que ela foi medida de forma adequada nesta configuração. As medidas feitas pelo sensor de bulbo úmido podem ser acompanhadas pela curva verde no Gráfico (Figura 7.6).

Com base na temperatura de bulbo úmido e bulbo seco medidas após 5 horas do início do teste se pode estimar a umidade relativa no interior do ambiente com o auxílio da carta psicometrica ou por meio da equação [2-8]. O valor medido para bulbo úmido nesse caso foi de 19,9°C. Já para a temperatura de bulbo seco se considerou a média aritmética dos três valores medidos pelos sensores de bulbo seco (22,3°C 22,3°C 22,8°C), o que resulta no valor de 22,5°C. Logo para esse ponto, a umidade relativa interna estimada é de acordo com a equação [2-8] igual a 79,5%. Já a umidade relativa externa ao ambiente, calculada a partir da equação [2-9], sendo necessário para tanto se saber a temperatura do ambiente externo e a temperatura insuflada. Para o mesmo instante, a temperatura externa medida foi de 21,4°C e a temperatura insuflada foi de 21,5 °C, logo de acordo com a equação [2-9], a umidade relativa externa calculada no instante é de 86,5%.

Considerando agora o instante em que ocorreu o pico de temperatura externa, por volta das 15:50PM, a umidade relativa interna calculada é igual a 71,8%, considerando a temperatura de bulbo úmido e de bulbo seco respectivamente, iguais a 20,9°C e 24,7 °C. Enquanto que para a umidade relativa externa o valor calculado foi de 66,4%.

Comparando esses dois pontos se pode perceber a enorme influência que umidade relativa do ar do ambiente externo tem sobre o rendimento do sistema evaporativo. Às 12:58AM, quando a umidade relativa do ar externo encontrava-se acima de 85% a queda de temperatura resultante da passagem do ar

pela célula evaporativa foi nula, enquanto que às 15:50 com umidade relativa entre 65 e 70% a queda de temperatura foi de aproximadamente 3,8°C.

Para esses mesmos instantes, pode-se se calcular a efetividade do resfriamento evaporativo a partir da equação [2-10].

Tabela 7-3 – Dados dos pontos analisados no ensaio da montagem 2 e velocidade 1 do ventilador

Horário	Umidade Externa (%)	Umidade Interna (%)	Redução de Temperatura (°C)	Efetividade (%)
12:58AM	86,5	79,5	0	0
3:50PM	66,4	71,8	3,8	55,1

Considerando os valores de efetividade calculados, nota-se que quanto maior a umidade relativa do ar externo menor a efetividade do processo de resfriamento evaporativo.

A efetividade calculada no primeiro instante considerado foi nula, visto que a queda de temperatura obtida nesse instante foi praticamente nula, o que acarreta em um baixo desempenho do condicionador evaporativo. Já para o segundo instante, onde a umidade relativa do ar externo encontrava-se em torno de 66,4%, a efetividade do processo calculada foi de 55,1%, que também é um valor de efetividade bem abaixo dos valores calculados para o teste anterior. Porém, é importante salientar que esses valores calculados são apenas uma estimativa da efetividade do processo de resfriamento.

Neste teste se observou que a temperatura registrada no interior do ambiente de ensaios durante a noite, pode-se observar que houve uma diminuição gradual das temperaturas internas, que acompanharam de certa forma a queda da temperatura externa. Percebe-se também que neste intervalo de tempo a temperatura externa permaneceu bastante próxima da temperatura do ar insuflado. No entanto, a partir das 7:30AM até por volta das 6:00PM, a temperatura externa aumentou consideravelmente, atingindo picos em torno de 29°C, enquanto a temperatura interna aumentou em menor escala, atingindo máximos em torno de 25°C.

Por fim, nota-se que a temperatura do ar insuflado para o ambiente variou entre 21°C e 24°C (curva azul), enquanto que a maior temperatura interna medida (curva amarela) variou entre 22°C e 25°C. Conforme afirmativa do artigo técnico da empresa Basenge Indústria e Comércio Ltda., que afirma que a temperatura do ar insuflado deve ser de 3 a 5°C menor do que a temperatura requerida para que o sistema de refrigeração esteja bem dimensionado. Logo, de acordo com os dados obtidos com o ensaio, verificou-se que a temperatura limite inferior para a requerida no ambiente deve ser de 24°C, porém isso não significa que o evaporativo é capaz de atender a essa solicitação durante todo o dia, pois em determinados

períodos do dia a temperatura insuflada era de 24°C. Ou seja, a temperatura do ambiente nesta situação ficaria acima da requerida.

Nota-se então, que para o caso em que a diferença entre a temperatura requerida e a temperatura insuflada for menor do que 3°C torna-se necessária a utilização do sistema convencional de refrigeração do ar para atender a temperatura requerida.

Utilizando-se a Equação [2-10], para o cálculo da umidade externa, foi possível traçar o Gráfico (figura 7.7) correspondente à sua variação ao longo do período de realização do teste.

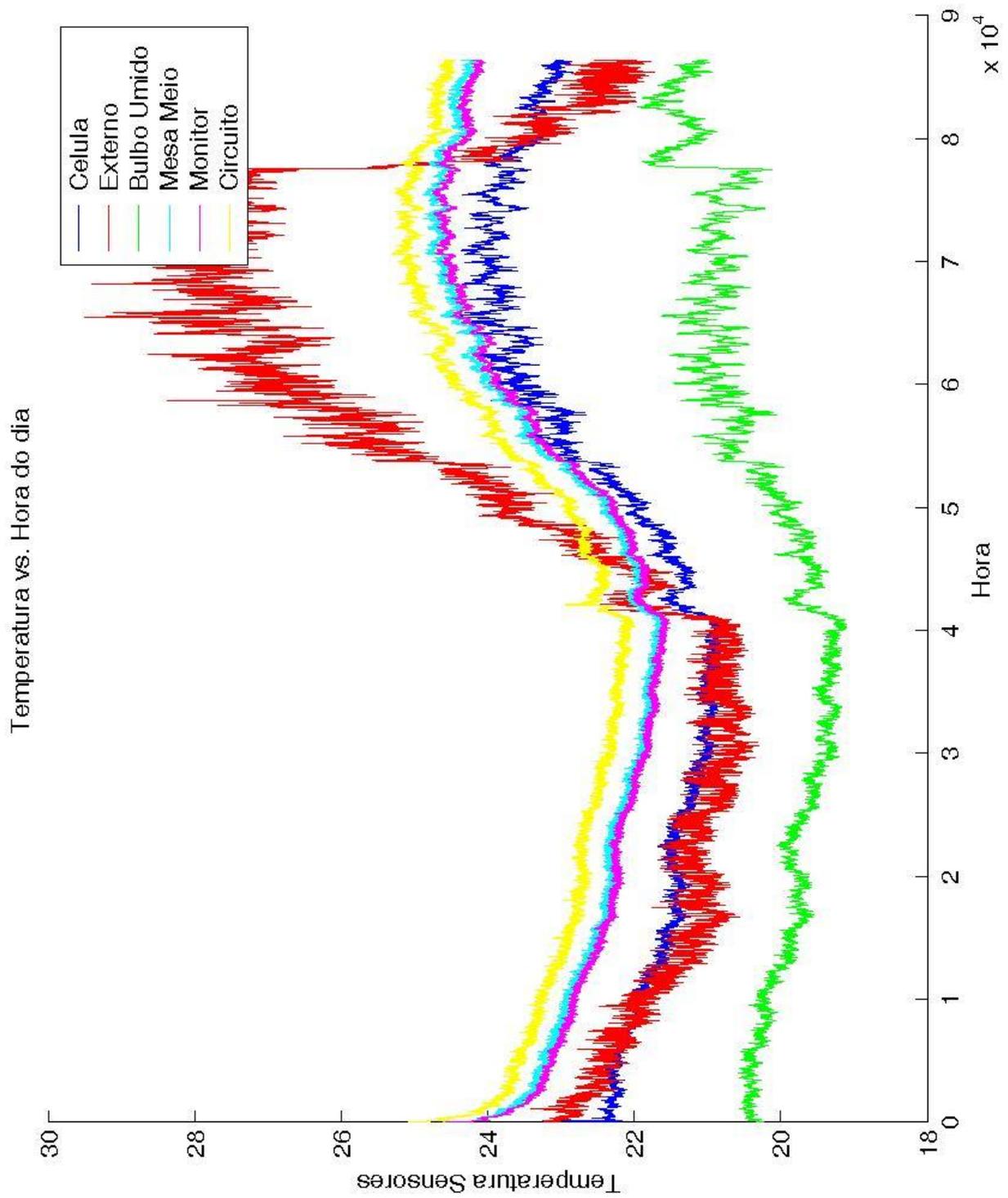


Figura 7.6 – Teste da variação da temperatura medida ao decorrer do dia com o condicionador evaporativo ligado na velocidade 1 e montagem 2. Iniciado às 19h50min do dia 10/03/2006.

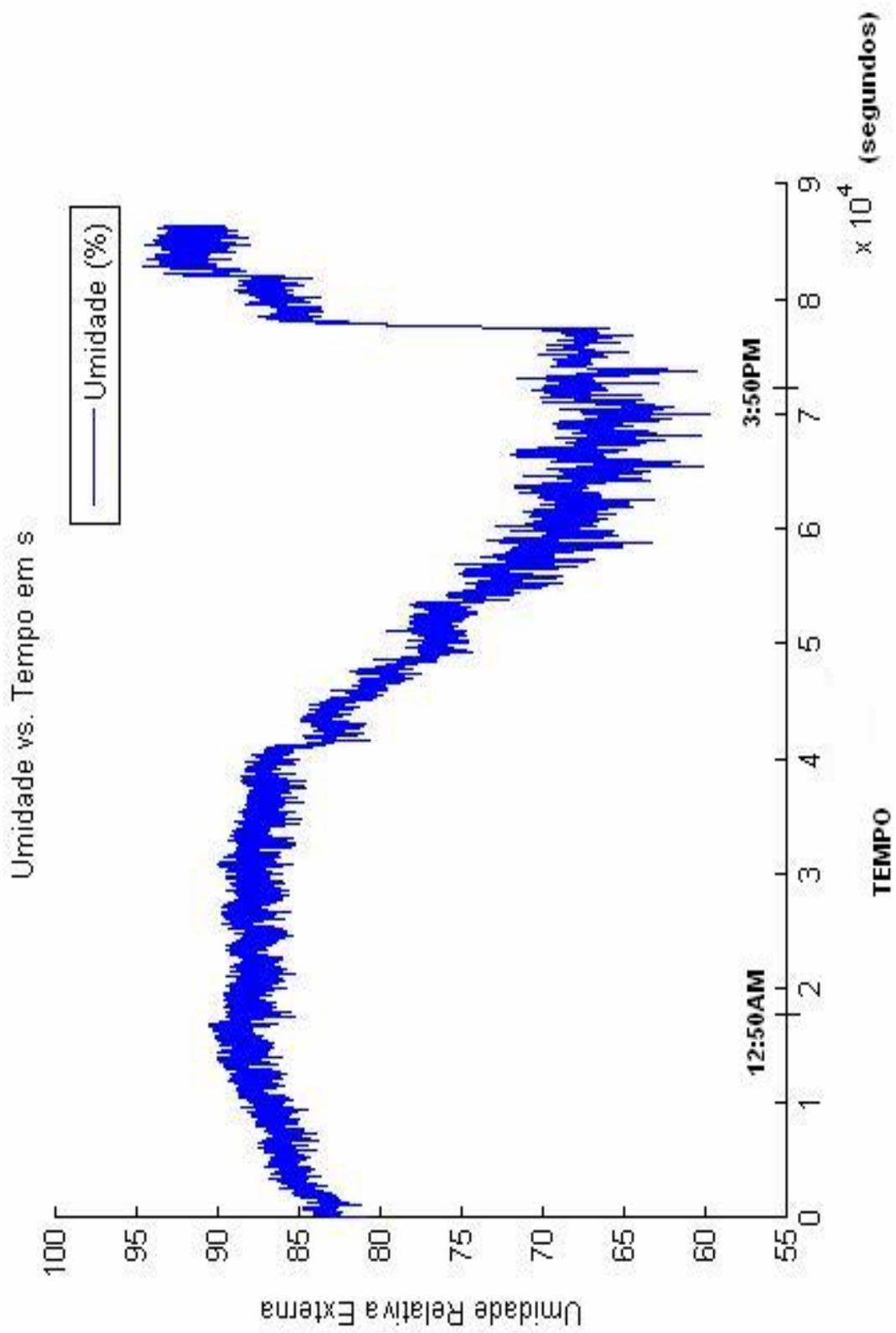


Figura 7.7 – Gráfico de variação da umidade calculada ao decorrer do dia com o condicionador evaporativo ligado na velocidade 1 e montagem 2. Iniciado às 19h50min do dia 10/03/2006.

## **7.5 APENAS O AR CONDICIONADO CONVENCIONAL FUNCIONANDO.**

Por meio deste teste foi possível se observar a influência do aparelho de ar condicionado convencional no comportamento da temperatura do ambiente de ensaios no decorrer de 24 horas. E com os dados obtidos foi feito o Gráfico da figura 7.8.

Este teste foi iniciado no dia 05/03/2006 às 08:48AM horas e neste momento a temperatura externa encontrava-se por volta de 23,5°C, enquanto a temperatura interna média medida pelos sensores estava por volta de 24,5°C.

Nesta etapa a temperatura de bulbo úmido foi medida apenas mantendo-se o sensor de bulbo úmido constantemente molhado, pois nesse teste o condicionador evaporativo encontrava-se desligado. Da mesma forma, o sensor destinado a medição da temperatura do ar insuflado foi posicionado em frente ao local de saída do ar do aparelho convencional. Nota-se no Gráfico da figura 7.8 que a curva que representa o que se chama de temperatura de bulbo úmido fica sempre acima da temperatura do ar insuflado pelo aparelho de ar condicionado, o que no caso do condicionador evaporativo estaria equivocada, porém nesse caso devido à alta capacidade de refrigeração do sistema convencional era esperado que a temperatura insuflada fosse realmente menor que a temperatura de bulbo úmido medida.

Como a temperatura de bulbo úmido não pôde ser medida adequadamente, não foi possível estimar com precisão a umidade relativa interna, pois, de acordo com a Equação [2.8], o cálculo da umidade relativa interna é diretamente dependente da temperatura de bulbo úmido, que não foi medida adequadamente nesta etapa do projeto.

Neste teste se observou que a temperatura registrada no interior do ambiente de ensaios durante as 24 horas não foi influenciada pela temperatura externa, o que pode ser comprovado pela análise do gráfico da Figura 7.8, onde se percebe que mesmo nos instantes em que a temperatura externa fica perto dos 30°C a temperatura interna se mantém praticamente inalterada.. No gráfico verifica-se que a variação das temperaturas internas depende unicamente da temperatura do ar insuflado. Por este motivo as variações ocorridas na temperatura do ar insuflado são refletidas nas temperaturas internas, mantendo-se assim a diferença de temperatura superior a 10°C entre elas, praticamente constante ao longo de todo o teste.

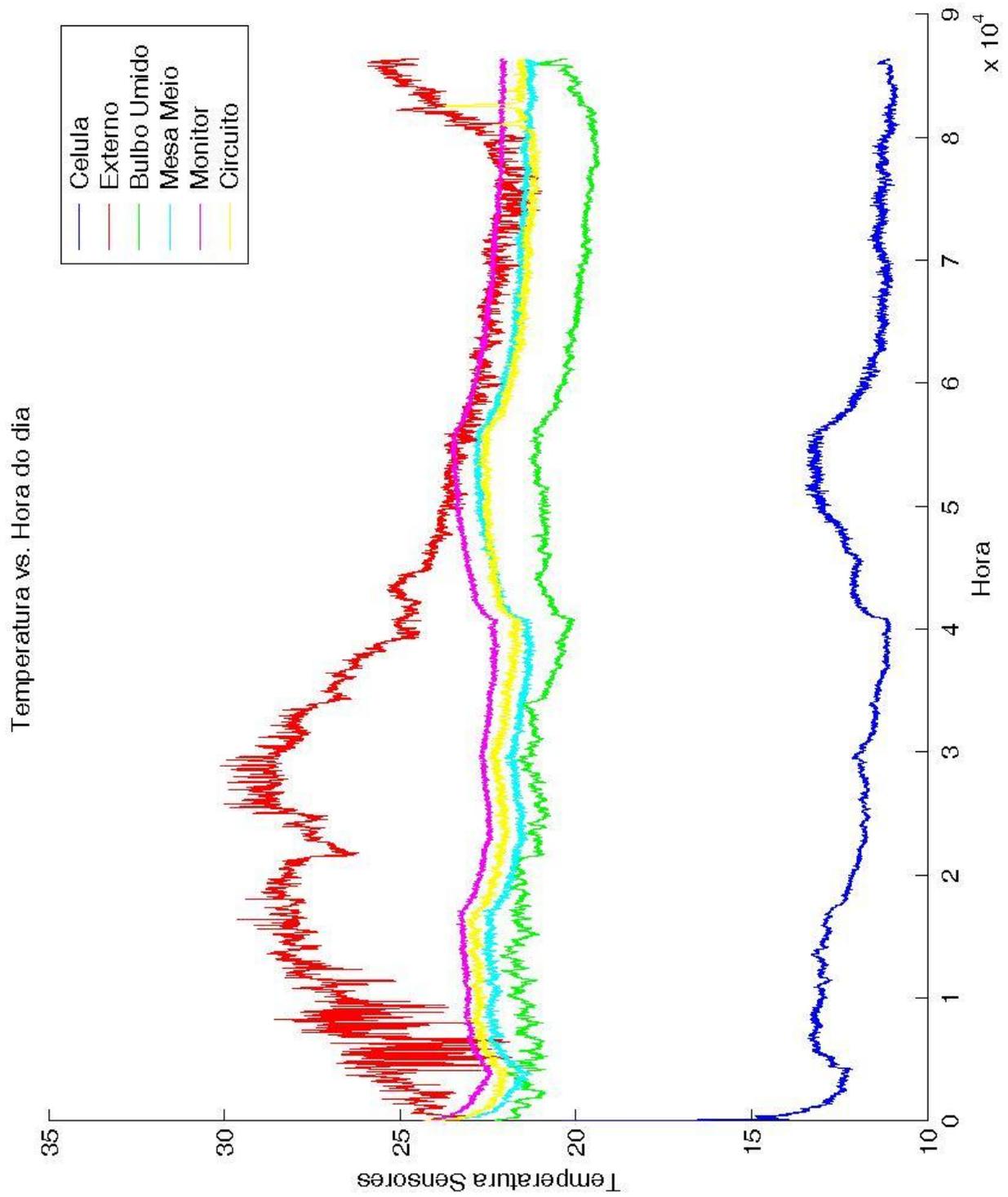


Figura 7.8 – Teste da variação da temperatura medida ao decorrer do dia com o condicionador convencional ligado em potencia máxima. Iniciado às 08h48min do dia 05/03/2006.

## 7.6 TESTE DO SISTEMA DE CONTROLE IMPLEMENTADO

Este teste teve início às 6:00PM do dia 19/03/06 e teve duração de aproximadamente cinco horas. O valor de referência de temperatura a ser mantido no interior do ambiente foi de 24°C e umidade interna 75%. Estes valores foram escolhidos com o único intuito de se avaliar a capacidade do sistema de manter os valores de referência determinados, não se levando em conta os padrões de conforto térmico.

O sistema de controle utilizado conciliou as vantagens de cada um dos aparelhos e com isso buscou-se, além das condições de temperatura e umidade requeridas, o menor consumo de energia possível por meio de um controle que estabeleceu qual dos aparelhos deveria funcionar e se era realmente necessário o funcionamento de algum dos aparelhos. O código utilizado para este controle foi desenvolvido em linguagem de programação C com o auxílio de um código feito em Matlab utilizado para entradas de referências e armazenamento de dados. Ambos os códigos podem ser vistos no Anexo A, onde se encontram devidamente comentados.

Analisando a Figura 7.11 verifica-se que o sistema híbrido manteve a temperatura interna do ambiente em torno de 0,5°C abaixo da referência durante praticamente todo o período de teste apesar da alta umidade relativa externa apresentada.

Para a umidade relativa interna os valores obtidos encontram-se por volta dos 75% conforme requerido (Figura 7.12). Tal resultado foi alcançado por meio de um controle do funcionamento da bomba d'água do evaporativo.

### 7.6.1 FLUXOGRAMA DO SISTEMA DE CONTROLE IMPLANTADO

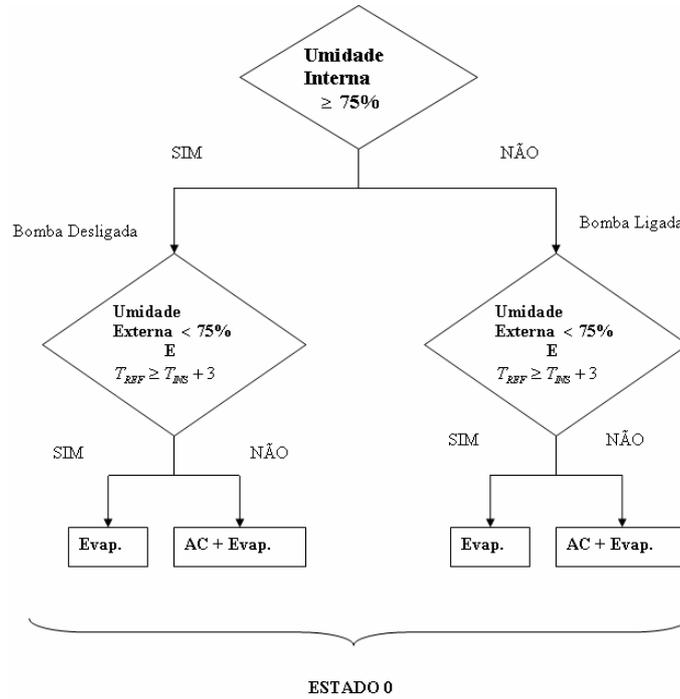


Figura 7.9 – Fluxograma do “Estado 0” do sistema de controle

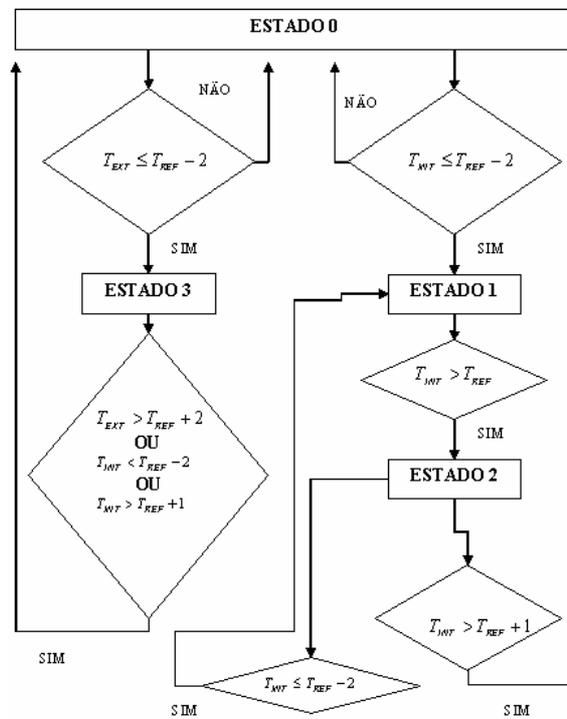


Figura 7.10 – Fluxograma dos “Estados 1, 2 e 3” do sistema de controle

O programa de controle é baseado em estados lógicos, sendo que cada estado representa uma situação térmica do ambiente. No entanto, existem inúmeras situações de temperatura e umidade relativa do ar, de forma que se torna inviável a tentativa de reproduzir cada um deles por meio de um estado. Dessa forma, foram escolhidos 4 estados considerados mais representativos. São eles:

- Estado 0 → É o estado principal. Dentro dele é tomada a decisão de qual estado deve ser selecionado pelo programa;
- Estado 1 → Estado de repouso. É selecionado somente em situações nas quais o programa julga não ser necessário o funcionamento de nenhum dos aparelhos;
- Estado 2 → Estado de transição. É chamado durante a transição entre Estado 1 e Estado 0;
- Estado 3 → Apenas ventilação. É selecionado quando a temperatura externa é inferior à temperatura requerida.

Como já foi dito, o Estado 0 é o estado principal. Ele possui uma lógica interna mais rebuscada, o que propicia que o sistema opere apenas nele por um longo período de tempo.

Acompanhando o fluxograma da Figura 7.9, pode-se ver que a primeira verificação dentro deste estado é a de umidade relativa interna. Se a umidade relativa interna estiver abaixo do valor especificado (75% neste caso), a bomba d'água do condicionador evaporativo é ligada imediatamente. Caso contrário, o programa julga que o ambiente já se apresenta mais úmido que o suficiente e envia o comando de desligamento da bomba d'água. A partir deste ponto, o programa já começa a sua segunda e última verificação dentro do Estado 0. Esta segunda verificação consiste em checar se o condicionador evaporativo é capaz de atender sozinho aos requisitos do usuário do sistema. Para isso o programa verifica se a umidade relativa externa está abaixo de 75% e se a temperatura de referência (determinada pelo usuário) é maior que a temperatura do ar insuflado por 3°C. Essa verificação está baseada nos fatos de que o condicionador evaporativo não apresenta um bom desempenho quando a umidade relativa do ar externo é superior a 75% nem consegue abaixar a temperatura de bulbo seco interna ao ponto de ela permanecer menor que a temperatura do ar insuflado acrescida de 3°C. Essas características foram percebidas por meio da análise dos resultados dos ensaios realizados. Caso as duas condições sejam satisfeitas, o programa ordena que apenas o condicionador evaporativo seja ligado (com ou sem a bomba d'água, dependendo da verificação anterior). Caso ao menos uma das condições não seja satisfeita, o programa ordena que o aparelho de ar condicionado convencional seja ligado, juntamente com o condicionador evaporativo. O funcionamento do condicionador evaporativo neste último caso está relacionado apenas com os cálculos das umidades relativas, uma vez que elas dependem diretamente das medidas de temperatura de bulbo úmido e temperatura do ar insuflado, medidas essas que só podem ser feitas corretamente quando o climatizador evaporativo está ligado.

O sistema só deixa o Estado 0 em dois casos: quando a temperatura interna fica abaixo da especificada (Estado 1) ou quando a temperatura externa fica abaixo da requerida (Estado 3).

Para que haja a mudança para o Estado 1 é necessário que a temperatura de bulbo seco interna fique pelo menos 2°C abaixo da temperatura de referência. Neste caso, o programa julga que não é mais necessário qualquer resfriamento do ar e desliga todos os aparelhos. Caso a temperatura interna aumente ao ponto de ficar igual à temperatura de referência, o programa faz a transição para o Estado 2, o qual tenta manter a temperatura. Se, dentro do Estado 2, a temperatura interna voltar a baixar ao ponto de ficar 2°C abaixo da temperatura de referência, o sistema retorna ao Estado 1. Caso, dentro do Estado 2, a temperatura interna continue subindo ao ponto de ultrapassar a temperatura de referência por 1°C, o sistema retorna ao Estado 0 e lá é selecionado o estado a ser utilizado.

A mudança do Estado 0 para o Estado 3 (apenas o ventilador ligado) ocorre apenas quando a temperatura do ar externo se apresenta menor que a temperatura de referência por pelo menos 2°C. Neste caso, o programa considera que para se resfriar o ar interno é necessário apenas insuflar para dentro do ambiente o ar externo frio.

Uma vez no Estado 3, para se sair dele é necessário que pelo menos uma de três condições sejam satisfeitas, fazendo com que o sistema retorne ao Estado 0. A primeira condição é que a temperatura do ar externo suba ao ponto de ficar superior à temperatura de referência por 2°C. A segunda é que o ambiente fique muito frio ao ponto de a temperatura interna ser inferior à temperatura de referência por 2 °C. A terceira condição é que a temperatura do ar interno fique superior à referência por 1°C.

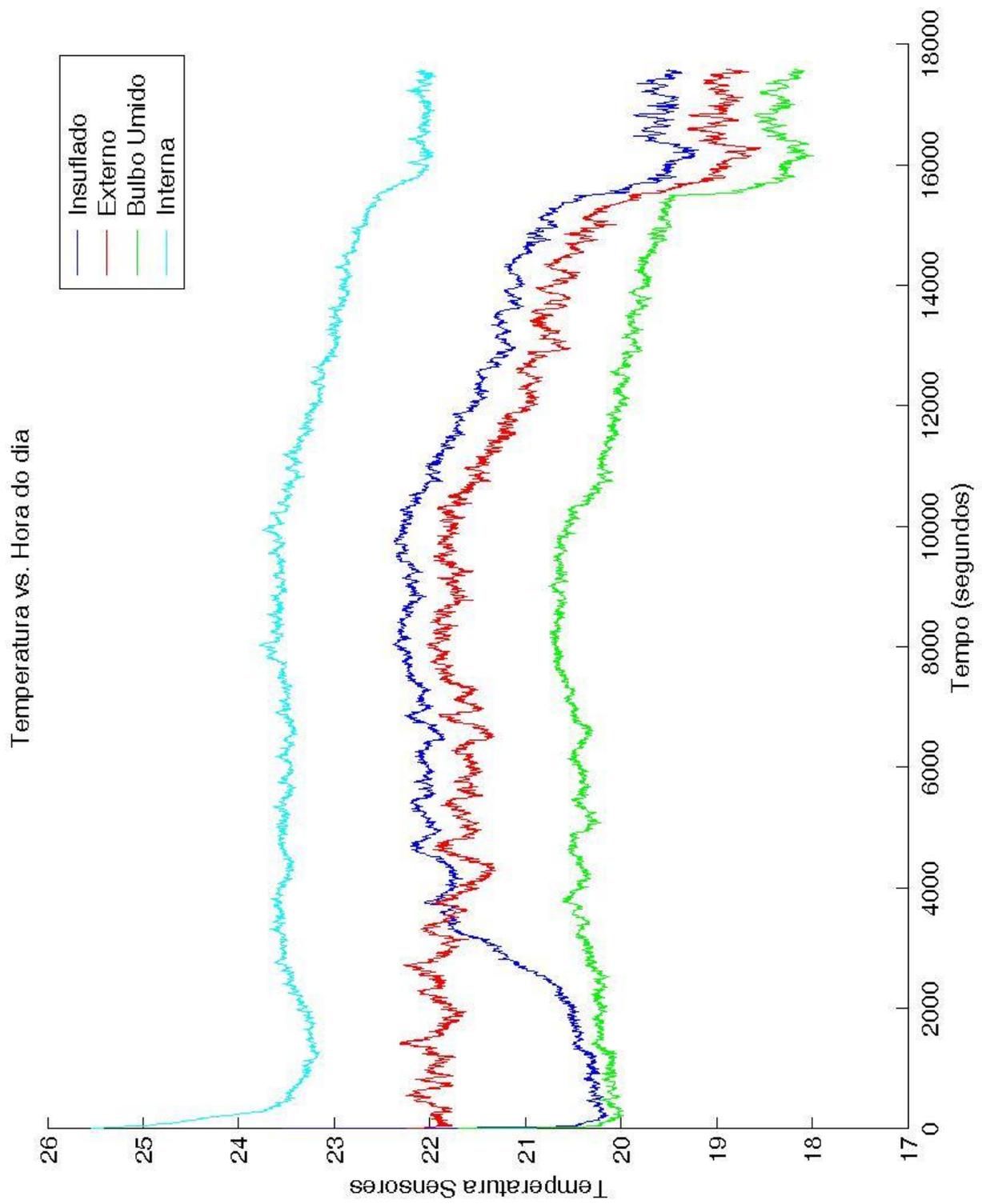


Figura 7.11 – Teste da variação das temperaturas medidas no decorrer do dia com o sistema de controle atuando.

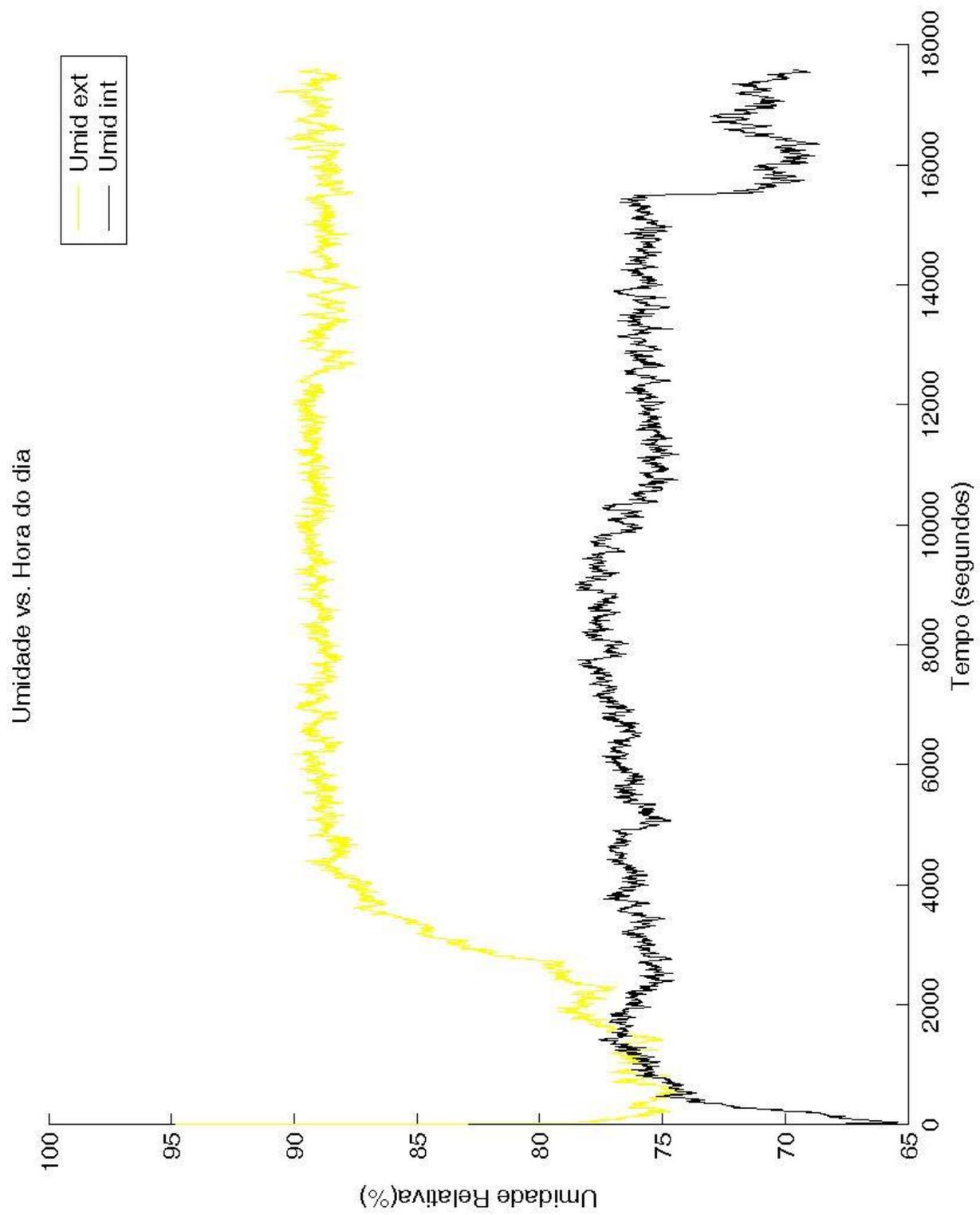


Figura 7.12 – Teste da variação das umidades interna e externa calculadas no decorrer do dia com o sistema de controle atuando.

## 7.7 CÁLCULO DA CARGA TÉRMICA

Para determinar a carga térmica do sistema utilizou-se uma planilha eletrônica disponível no site da Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul. (JUNIOR, Luiz Carlos Martinelli, 2004).

De acordo com os valores solicitados nesta planilha, é possível determinar de forma simplificada a carga térmica do ambiente de ensaios construído.

- Janelas Insolação localização nordeste: Área:  $3,8\text{m}^2$  x prot. Externa: 70 = 0,31 kW/h
- Paredes externas localização (não sul): Área:  $4\text{m}^2$  x const. Pesada: 12 = 0,06 kW/h
- Paredes internas:  $22\text{m}^2$  x fator: 13 = 0,33 kW/h
- Teto em lage com isolação: Área:  $15\text{m}^2$  x fator: 30 = 0,52 kW/h
- Numero de pessoas em atividade normal: 4 x fator: 150 = 0,70 kW/h
- Outras fontes de calor (computadores): 4 x 200 x fator: 0,86 = 0,60 kW/h
- Iluminação (Lamp. Fluorescentes 32W): 6 x 32 x fator: 0,5 = 0,11 kW/h
- Portas ou vãos continuamente abertos: 1,7 x fator: 150 = 0,30 kW/h
- Fator Geográfico = 1
- Total em kW/h 2,93 kW/h
- Total em TR  $2,93 \times 0,284 = 0,8324$  TR

Desta forma podemos considerar que a carga térmica do ambiente de ensaios é de 2,93 kW/h. Logo para que se consiga manter o conforto ambiental neste recinto é necessário que o sistema construído tenha a capacidade de suprir esta carga.

### 7.7.1 CÁLCULO DA POTÊNCIA DO CONDICIONADOR EVAPORATIVO

Nessa parte foi feito o cálculo da potência do resfriador evaporativo que foi utilizado nos testes para se ter uma estimativa da adequação do equipamento utilizado ao ambiente onde foi instalado.

No processo de resfriamento evaporativo um certo volume de água passa do estado líquido para o gasoso (vapor d'água). Essa passagem é um processo endotérmico, ou seja, demanda calor para se realizar.

Assim quando um litro de água evapora, consome aproximadamente 0,67kW. É a mesma quantidade de energia necessária para resfriar 60 litros de água de  $30^\circ\text{C}$  até  $20^\circ\text{C}$ , ou para resfriar  $208\text{m}^3$  de ar dos mesmos  $30^\circ\text{C}$  até  $20^\circ\text{C}$  (Lee e Sears, 1976).

Então, para um resfriador evaporativo, o volume de água evaporado em litros por hora é dado pela Equação [7-1]:

$$E_v \left[ \frac{l}{h} \right] = K_1 \Delta T [^{\circ}C] f_{lx} \left[ \frac{m^3}{h} \right] \quad [7-1]$$

Considerando o caso da evaporação de 1 litro d'água, obtêm-se a seguinte constante:

$$1 = K_1 \times 10 \times 208 \quad [7-2]$$

$$K_1 = \frac{1}{2080} \left[ \frac{l}{^{\circ}C m^3} \right] \quad [7-3]$$

Aplicando ao nosso caso, temos os seguintes valores:

-velocidade do ar: 0,408m/s;

-queda de temperatura: 5°C.

$$E_v = \frac{1}{2080} \times 0,408 \times 5 = 0,98 \left[ \frac{m^3}{s} \right] = 3,53 \left[ \frac{l}{h} \right] \quad [7-4]$$

Pode-se calcular a potência de evaporação do aparelho da seguinte forma:

$$P_{EV} \left[ \frac{BTU}{h} \right] = K_2 E_v \left[ \frac{l}{h} \right] \quad [7-5]$$

Logo, sabendo que para a evaporação de 1 litro de água é necessário o fornecimento de 0,67 kW, pode-se calcular a potência necessária para evaporar essa quantidade de água.

$$0,67 = K_2 \times 1 \quad [7-6]$$

$$K_2 = 0,67 \left[ \frac{kW}{l} \right] \quad [7-7]$$

$$P_{EV} = 2,37 \left[ \frac{kW}{h} \right] \quad [7-8]$$

Dessa forma, comparando-se os valores calculados de carga térmica requerida pelo ambiente de testes e de potência oferecida pelo condicionador evaporativo, conclui-se que o refrigerador evaporativo em estudo se mostra incapaz de suprir as necessidades de climatização do ambiente, logo faz-se necessário a utilização de mais aparelho de climatização, ou mesmo de melhorias no condicionador evaporativo.

É importante ressaltar que este cálculo é uma tentativa de se estimar a potência de resfriamento do condicionador evaporativo. Este cálculo não leva em consideração todas as variáveis pertinentes a esta formulação.

## **7.8 CIRCULAÇÃO DO AR DO SISTEMA.**

### **Aberturas**

Como num processo de ventilação comum, a renovação total do ar implica em exaustão ou aberturas compatíveis com a vazão de ar admitida. Assim sendo, portas, janelas, frestas ou exaustores são vias de regra bem vindas. Há apenas a necessidade de se verificar a disposição das mesmas para se otimizar a circulação do ar por todo o ambiente.

No ambiente construído temos algumas aberturas: são as frestas e vãos formados pelas placas utilizadas na formação do ambiente de ensaios.

Estas aberturas foram estimadas em cerca de  $1,7\text{m}^2$ , e este valor é útil para avaliar se esta quantidade de aberturas é suficiente para renovar todo o ar insuflado pelo sistema de refrigeração. Além disso, essas aberturas entram no cálculo da carga térmica para o ambiente.

### **Quantidade de ar insuflada**

Para determinar qual é a quantidade de ar insuflado no ambiente pelo condicionador evaporativo, utilizou-se um anemômetro para medir a velocidade do ar que entra no ambiente.

#### **Montagem 1**

Para medir a velocidade do ar na saída do condicionador evaporativo, dividiu-se o local da saída de ar do refrigerador em setores.

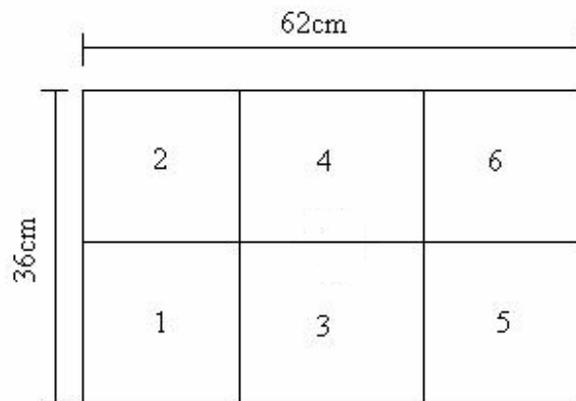


Figura 7.13 – Divisão dos setores a frente do condicionador evaporativo

Os valores medidos para a montagem 1 foram os seguintes:

Tabela 7-4 – Valores medidos nos setores

Setor	Velocidade nos setores [m/s]	
	Montagem 1	
	Velocidade 1	Velocidade 2
1	1,7	2,1
2	2,7	3,3
3	1,3	1,9
4	1,6	1,9
5	1,7	2,0
6	2,0	2,4

O valor utilizado para o cálculo da quantidade de ar que entra no ambiente foi a média aritmética dos valores medidos em cada setor.

- velocidade 1: 1,83 m/s;
- velocidade 2: 2,26 m/s;

A quantidade de ar foi calculada então a partir das dimensões construtivas do refrigerador, e com a velocidade do ar medida no procedimento acima descrito.

A relação da vazão de ar com a velocidade e área é:

$$Vazão_{veloc1} = (0,2232) \times (1,83) = 0,408 [m^3 / s] \quad [7-9]$$

$$Vazão_{veloc2} = (0,2232) \times (2,26) = 0,504 [m^3 / s] \quad [7-10]$$

Como o teste realizado com o motor operando na velocidade 2 mostrou-se ineficiente devido ao aquecimento excessivo do motor, consideramos a vazão obtida com o motor operando na velocidade 1. Logo a quantidade de ar insuflada para o ambiente é 1468,8 m<sup>3</sup>/h .

Segundo o fabricante de condicionadores evaporativos [4], para que o sistema de resfriamento evaporativo seja adequado, a renovação de todo o volume de ar do ambiente deve ocorrer no mínimo 15 vezes por hora. Então levando-se em consideração que o volume da sala de ensaios é de 40m<sup>3</sup>, temos que insuflar neste ambiente cerca de 600m<sup>3</sup> de ar por hora. Logo o volume de 1469 m<sup>3</sup> por hora supera com folga este valor.

Então nota-se que o volume de ar insuflado no ambiente pode ser diminuído e mesmo assim o sistema se manterá adequado ao ambiente, além de diminuir o consumo de energia do ventilador. Porém o ventilador utilizado neste projeto não possibilita que se diminua a velocidade de rotação de suas hélices, para isso seria necessário utilizar um inversor de frequência para controlar esta velocidade de rotação.

### Ar Condicionado convencional

Para medir a velocidade do ar na saída do aparelho de ar condicionado convencional, dividimos a área de saída do ar insuflado em setores:

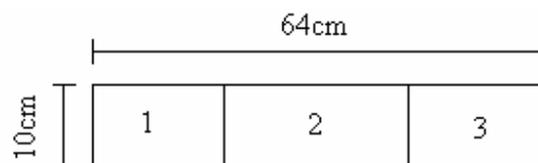


Figura 7.14 - Divisão dos setores a frente do Ar condicionado Convencional

Tabela 7-5 – Valores medidos nos setores do ar condicionado

Setor	Vel. nos setores [m/s]
1	1,7
2	2,7
3	1,3

Para o cálculo da vazão de ar proporcionada pelo aparelho, foi calculada a média aritmética dos valores medidos em cada setor.

Velocidade média 1: 1,90 m/s;

A quantidade de ar foi calculada então a partir das dimensões construtivas do refrigerador, e com a velocidade do ar medida no procedimento acima descrito.

A vazão de ar pode ser obtida pelos valores de velocidade e área. O valor obtido é:

$$Vazão_{veloc1} = (0,064) \times (1,90) = 0,122 [m^3 / s] \quad [7-11]$$

Logo a quantidade de ar insuflada para o ambiente é de 439,2m<sup>3</sup>/h.

## 7.9 MODELO DINÂMICO DO AMBIENTE.

Nessa etapa foi feito um modelo termodinâmico do sistema para que se pudesse fazer uma simulação do sistema em estudo, levando-se em conta o acúmulo de calor nas paredes, no teto, no chão e na massa de ar contida no interior do ambiente.

Partindo da equação da termodinâmica que relaciona variação da quantidade de energia interna em um corpo ( $\Delta Q$ ) com sua variação de temperatura ( $\Delta T$ ), dada por:

$$\Delta Q = mc\Delta T \quad [7-12]$$

Onde:

$m$  representa a massa do corpo e  $c$  o seu calor específico.

Derivando-se a Equação [7-23] com relação ao tempo, chega-se à Equação [7-24].

$$\dot{Q} = mc\dot{T} \quad [7-13]$$

Onde:

$\dot{Q}$  representa a taxa de transferência de calor que passa pelo corpo e  $\dot{T}$  representa a taxa de variação da temperatura.

Fazendo-se uma analogia com um circuito elétrico, pode-se relacionar as grandezas térmicas com as elétricas da seguinte forma:

- $Potência = \dot{Q} = mc\dot{T}$ ; [7-14]

- $\dot{T} \sim$  variação de tensão  $\left(\frac{dV}{dt}\right)$ ; [7-15]

- $\dot{Q} \sim$  corrente ( $i$ ) [7-16]

- $mc \sim$  capacitância ( $C$ ) [7-17]

O massa de ar no interior do ambiente e a massa das paredes que delimitam o mesmo armazenam calor em sua composição da mesma forma que os capacitores armazenam cargas elétricas, logo temos uma capacitância para as paredes ( $C_{PAR}$ ) e outra para o volume de ar ( $C_{AR}$ ).

Da mesma forma que a diferença de potencial elétrico ( $\Delta V$ ) entre os terminais de um capacitor indica a quantidade de carga nele armazenada, a diferença de temperatura ( $\Delta T$ ) entre dois corpos indica que há uma diferença na quantidade de calor armazenada em cada corpo.

Assim como a diferença de potencial elétrico gera uma corrente elétrica ( $i$ ) entre dois pontos por meio de um condutor elétrico, a diferença de temperatura origina uma taxa de transferência de calor ( $\dot{Q}$ ) entre dois corpos por meio de condução.

Do mesmo modo que a estrutura de um condutor elétrico cria uma resistência ( $R$ ) à passagem de corrente elétrica de um ponto para o outro através dele, a condutibilidade térmica ( $k$ ) de cada material indica a facilidade com que cada corpo conduz calor.

O circuito da Figura 7.15, representa a analogia feita do ambiente em estudo com um circuito elétrico.

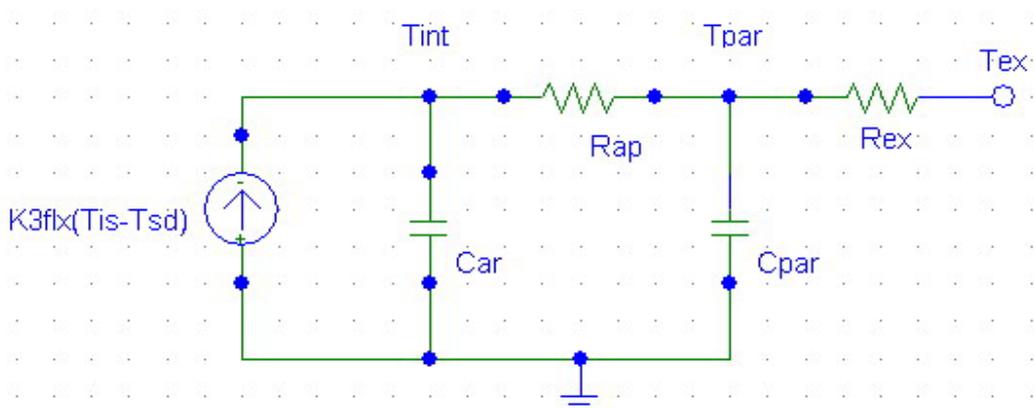


Figura 7.15 – Circuito elétrico análogo ao sistema térmico do ambiente em estudo.

O circuito é constituído por:

- uma fonte de corrente  $K_3 flx(T_{is} - T_{sd})$  representando a taxa de transferência de calor proporcionado pelo condicionador evaporativo;

- uma capacitância  $C_{AR}$  que representa o acúmulo de calor na massa de ar presente no interior do ambiente. Tal acúmulo de calor estabelece a temperatura no interior do ambiente ( $T_{int}$ );
- uma capacitância  $C_{PAR}$  que representa o acúmulo de calor na massa das paredes que delimitam o ambiente. Tal acúmulo de calor estabelece a temperatura das paredes ( $T_{PAR}$ );
- um potencial elétrico ( $T_{EX}$ ) que representa a temperatura do ambiente externo, gerado por uma capacitância relacionada ao acúmulo de calor no ar do ambiente externo;
- duas resistências ( $R_{AP}$  e  $R_{EX}$ ) que representam respectivamente, a resistência térmica existente entre o ar interno e as paredes e a resistência térmica existente entre as paredes e o ar do ambiente externo.

As equações abaixo foram obtidas pela resolução das equações de malha do circuito.

$$K_3 flx T_{is} - K_3 flx T_{sd} + \frac{(T_{ex} - T_{int})}{R_{ex}} = C_{amb} \dot{T}_{int} \quad [7-18]$$

$$K_3 flx (T_{is} - T_{sd}) + \frac{(T_{ex} - T_{int})}{R_{ex}} = C_{amb} \dot{T}_{int} \quad [7-19]$$

$$C_{ar} \dot{T}_{int} = K_3 flx (T_{is} - T_{sd}) + \frac{(T_{par} - T_{int})}{R_{par}} \quad [7-20]$$

$$C_{par} \dot{T}_{par} = \frac{(T_{int} - T_{par})}{R_{par}} + \frac{(T_{ext} - T_{par})}{R_{ex}} \quad [7-21]$$

$$T_{sd} = A_1 T_{int} + A_2 T_{par} + A_3 T_{is} \quad [7-22]$$

$$A_1 + A_2 + A_3 = 1 \quad [7-23]$$

$$K_3 = \frac{2428}{2080} \frac{kJ}{m^3 \cdot ^\circ C} \quad [7-24]$$

A partir dessas equações, foram calculados os parâmetros do circuito referente ao ambiente de testes.

### **Cálculo da Capacitância do Ar ( $C_{AR}$ )**

Primeiramente se calcula o volume total do ambiente, por onde fica distribuída a massa de ar.

$$V_{sala} = 4,9 \cdot 3,0 \cdot 2,75 = 40,42m^3 \quad [7-25]$$

Sabendo-se que a massa específica do ar seco a 20°C é 1,205 kg/m<sup>3</sup>, e que o calor específico é 1,006 kJ/kg.K, a partir desta informações pode-se calcular a capacitância do volume de ar contido no local da simulação.

$$C_{ar} = V_{ar} \times \rho_{ar} \times c_{ar}$$

onde:

- $C_{ar}$  é a capacitância do ar a ser calculada;
- $V_{ar}$  é o volume do ar em questão;
- $\rho_{ar}$  é a massa específica do ar;
- $c_{ar}$  é o calor específico do ar.

Desta forma substituindo os valores das constantes na equação [7-37] obtem-se:

$$C_{ar} = 40,42 \times 1,205 \times 1,006 \quad [7-26]$$

$$\underline{C_{ar} = 49,00 \text{ kJ} / K} \quad [7-27]$$

### **Cálculo da Capacitância das Paredes ( $C_{PAR}$ )**

Para se fazer o cálculo da capacitância das paredes é necessário considerar que as paredes que delimitam o ambiente são constituídas de materiais diferentes, cada um com sua capacitância. Serão calculadas então as capacitâncias de três tipos de parede (compensado, PVC e vidro), do chão e do teto (os dois de tijolos). Para isso será utilizada a equação a seguir.

$$C = V \cdot \rho \cdot c \quad [7-28]$$

onde:

- $C$  é a capacitância da parede a ser calculada;
- $V$  é o volume da parede em questão;

- $\rho$  é a massa específica do material do qual a parede é feita;
- $c$  é o calor específico do material.

As capacitâncias das paredes podem então ser calculadas com o auxílio dos dados disponibilizados na Tabela 7-6 e aplicação direta dos mesmos na Equação [7-39].

Tabela 7-6 – Características das paredes que cercam o ambiente de testes

	Dimensões da Parede (m)	Massa Específica ( $kg / m^3$ )	Calor Específico ( $kJ / kg.K$ )
Compensado	4,90 x 2,75 x 0,07 e 3,00 x 2,75 x 0,07	590	2,50
PVC	4,90 x 2,75 x 0,008	1380	0,96
Janelas de Vidro	3,00 x 2,75 x 0,005	2800	0,80
Tijolo	2x(3,00 x 4,90 x 0,10)	1800	0,84

Para as duas paredes de compensado, a capacitância é:

$$C_{comp} = V_{comp} \cdot \rho_{comp} \cdot c_{comp} = 2242kJ / K \quad [7-29]$$

Para a parede de PVC:

$$C_{PVC} = 142,81kJ / K \quad [7-30]$$

Para a parede com janelas de vidro:

$$C_{vidro} = 92,41kJ / K \quad [7-31]$$

Para o teto e o chão, ambos feitos de tijolos, a capacitância é:

$$C_{teto-chao} = 4445,28kJ / K \quad [7-32]$$

Finalmente, a capacitância total das paredes é dada pela soma da capacitância de cada uma das paredes com as capacitâncias do chão e do teto.

$$C_{par} = C_{comp} + C_{PVC} + C_{vidro} + C_{teto-chao} \quad [7-33]$$

$$C_{par} = 6922,49kJ / K \quad [7-34]$$

### Cálculo das Resistências Térmicas ( $R_{ap}$ e $R_{ext}$ )

As resistências térmicas do modelo representam a diferença de temperatura entre o ar interno e as paredes com o refrigerador evaporativo desligado.

Supondo  $T_{int} = T_{par}$ , tem-se:

$$C_{par} \cdot R_{ext} \cdot \dot{T}_{par} = T_{ext} - T_{par} \quad [7-35]$$

$$6922,49 \cdot R_{ext} \cdot \frac{1}{3600} = 4 \quad [7-36]$$

$$R_{ext} = 2,08K / kJ \quad [7-37]$$

Como as áreas de contato são semelhantes, é razoável supor:

$$R_{ap} \approx R_{ext} = 2,08K / kJ \quad [7-38]$$

### 7.9.1 SIMULAÇÃO NO MATLAB

De posse do circuito e dos parâmetros do ambiente calculados, desenvolveu-se um modelo do ambiente de testes com o auxílio do software Matlab 7.0.

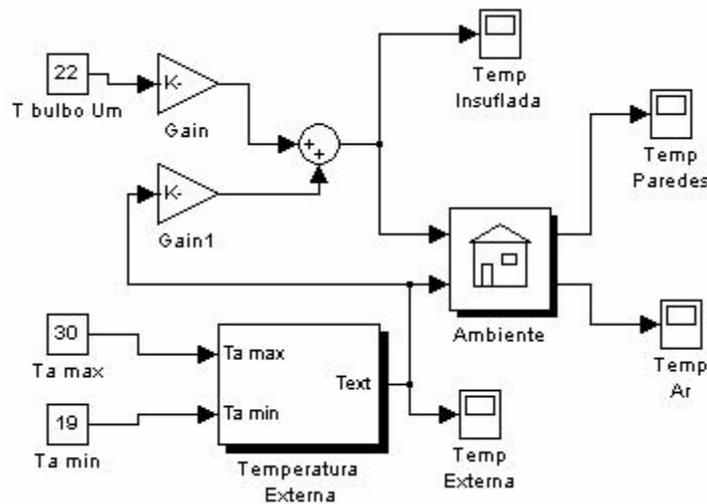


Figura 7.16 – Termodinâmica de um ambiente refrigerado

O modelo da Figura 7.16, desenvolvido por meio da ferramenta Simulink, tem como entrada dois parâmetros: temperatura externa e temperatura de bulbo úmido. A temperatura externa é obtida através de um modelo da variação diária dessa temperatura, no qual se estabelecem as temperaturas máxima e mínima registradas em um dia.

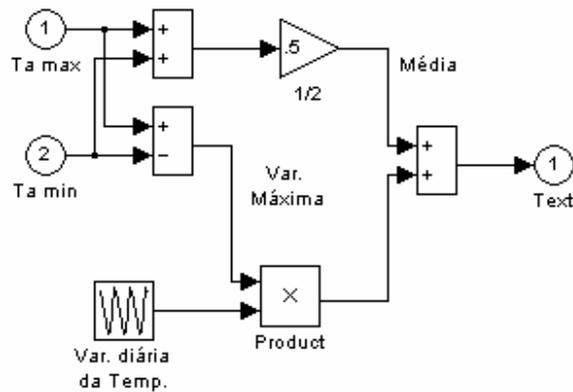


Figura 7.17 – Modelo de variação diária de temperatura externa

Utilizando-se das equações de malha do circuito da Figura 7.15, desenvolveu-se o modelo do ambiente da seguinte forma:

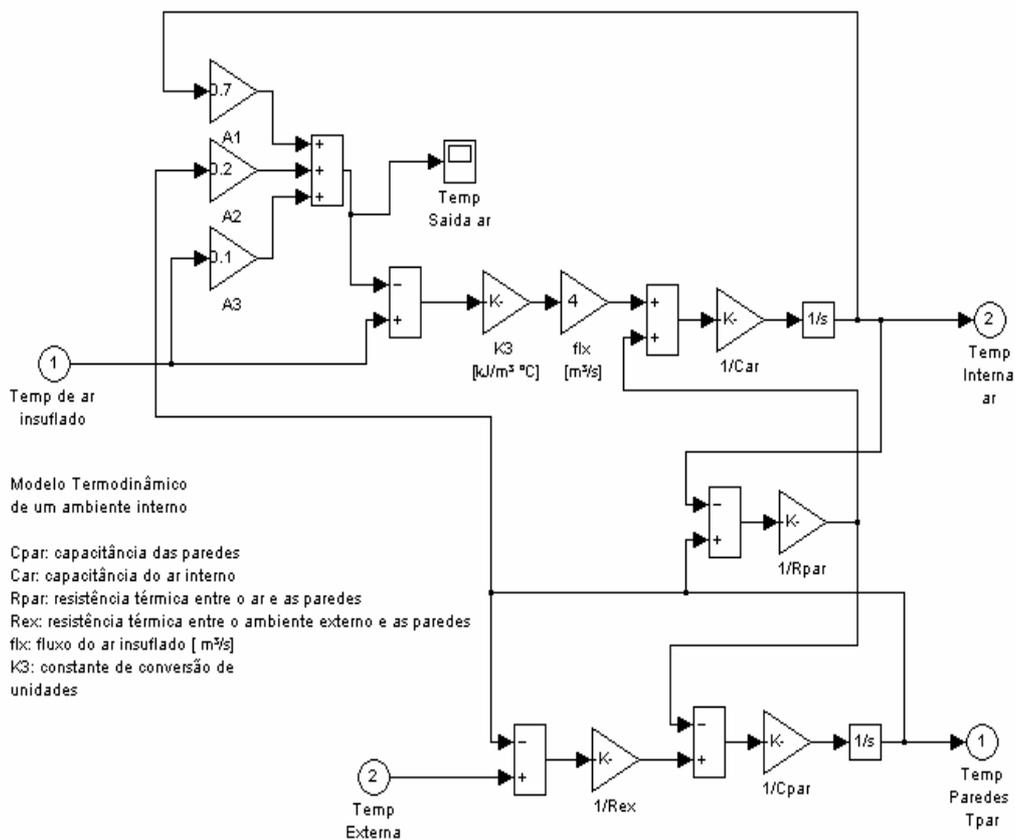


Figura 7.18 – Modelo do ambiente interno

A partir desse modelo desenvolvido, foi feita uma simulação utilizando-se dos valores de temperatura externa e de bulbo úmido adquiridos no teste realizado com o condicionador evaporativo na montagem 1 e com o ventilador funcionando a 1000 rpm. Definiu-se os seguintes valores a serem utilizados na simulação:

- temperatura externa entre 20°C e 31°C;
- temperatura de bulbo úmido igual a 21°C.

Como resultado da simulação, obteve-se os seguintes resultados:

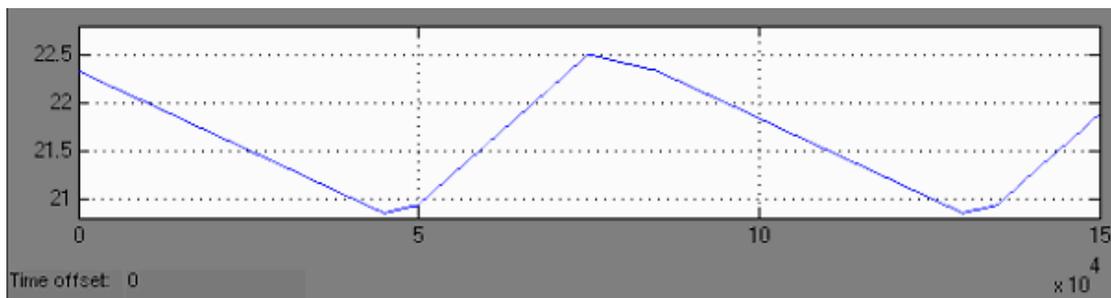


Figura 7.19 – Gráfico da temperatura insuflada resultante da simulação

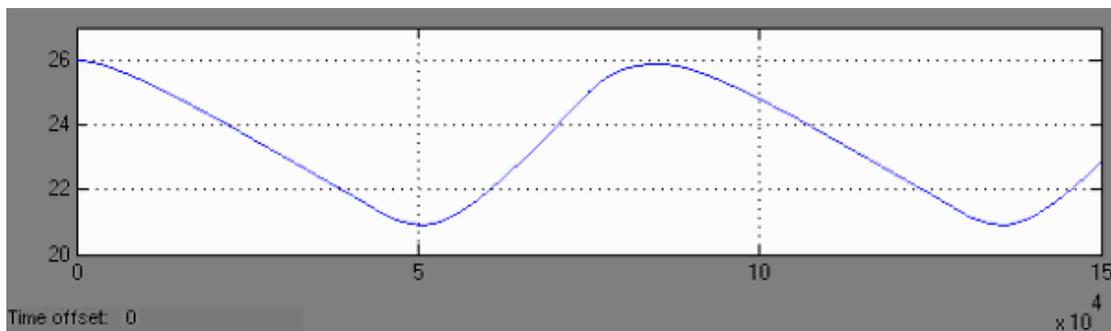


Figura 7.20 – Gráfico da temperatura das paredes resultante da simulação

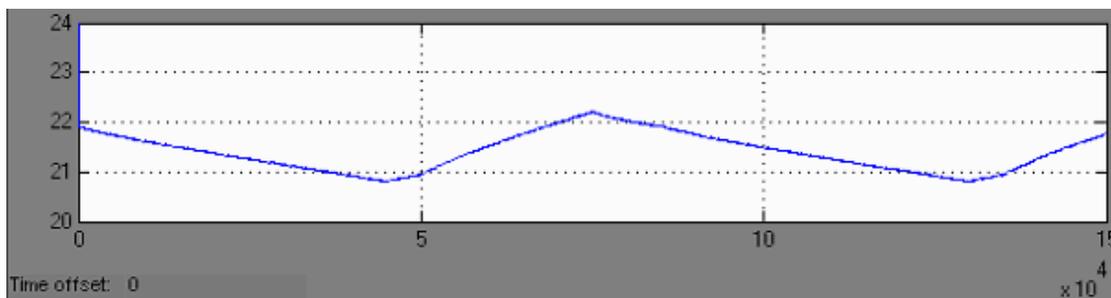


Figura 7.21 – Gráfico da temperatura do ar interno resultante da simulação

Comparando-se os resultados obtidos com essa simulação aos resultados obtidos no teste, pode-se considerar que o modelo mostrou-se satisfatório, pois os resultados obtidos foram relativamente semelhantes.

De acordo com os gráficos das figuras 7.19 e 7.20, observa-se que a temperatura do ar insuflado permaneceu entre 21°C e 22,5°C e que a temperatura das paredes permaneceu entre 21°C e 26°C. Logo, era esperado que a temperatura do ambiente assumisse um valor intermediário entre essas duas faixas de temperatura, porém, de acordo com a Figura 7.21, observa-se que a temperatura do ar interno permaneceu entre 21°C e 22°C. Tal resultado é incoerente, pois a temperatura interna não deveria assumir valores menores que os valores da temperatura do ar insuflado.

Cabe ressaltar que o ambiente de testes apresenta características que o tornam de difícil modelação, obtendo-se assim um modelo aproximado para esse ambiente.

## 8 CONCLUSÃO

Mesmo diante das dificuldades encontradas na realização dos testes devido às condições ambientais serem muitas vezes desfavoráveis à sua realização, refletindo em uma dificuldade de se avaliar o desempenho do refrigerador evaporativo a partir dos resultados obtidos, verificou-se que este aparelho apresentou um bom desempenho, principalmente nos períodos em que o ambiente externo se apresentava em condições de baixa umidade relativa e elevada temperatura.

No entanto, o sistema evaporativo por si só não é capaz de garantir o conforto térmico em todas as situações do dia. O seu rendimento mostrou-se bastante dependente da umidade relativa do ar externo. Já o aparelho de ar condicionado convencional, mostrou-se eficiente na redução da temperatura interna independentemente das condições ambientais externas, visto que mesmo para condições desfavoráveis ao bom desempenho do condicionador evaporativo, esse aparelho conseguiu atender às expectativas.

Os resultados dos testes propiciaram o desenvolvimento de um sistema de controle da temperatura interna do ambiente por meio de um sistema de climatização híbrido. Esse sistema de controle mostrou-se eficiente, à medida que foi capaz de manter as condições desejadas de temperatura e umidade no interior do ambiente de testes.

Levando-se em consideração os objetivos estabelecidos para este trabalho, conclui-se que eles foram alcançados, visto que o desempenho do condicionador evaporativo pôde ser avaliado em diversas situações (condições ambientais, configurações do aparelho, etc.), proporcionando o desenvolvimento de um sistema de climatização híbrido que concilia as melhores características de cada um dos aparelhos e que se mostrou eficiente para o controle das condições de temperatura e umidade dentro do ambiente de testes construído.

Nos trabalhos seguintes pode-se dar mais atenção aos estados de controle propostos neste trabalho, pois esta etapa exige um refinamento da lógica de controle do sistema. Sugere-se também uma avaliação a respeito do uso do motor atualmente utilizado no projeto, pois este não se mostra adequado para a realização dos ensaios por motivo do aquecimento excessivo e também por falta de um sistema de controle de velocidade do mesmo. Outro aspecto que traria melhoras aos estudos desenvolvidos na área é a instalação do protótipo (climatizador evaporativo) em um ambiente próprio e dedicado aos ensaios. Por fim sugere-se a utilização de um sensor que meça a temperatura de bulbo úmido de maneira mais correta e adequada.

## 9 REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

- [1] A.C.T. EMERGENCY SERVICES AUTHORITY. Austrália. Disponível em <<http://www.esb.act.gov.au/firebreak/humidity.html>> Acesso em: 26/02/2006.
- [2] ALVES, Maria Bernardete Martins; ARRUDA, Susana Margareth. *Como fazer referências: bibliográficas, eletrônicas e demais formas de documentos*. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis – SC. 2003. Disponível em <<http://www.bu.ufsc.br/REFBIBCAPA.html>>. Acesso em: 10/02/2006.
- [3] BASENGE INDUSTRIA E COMERCIO LTDA (Brasil). *Tabela de redução de temperatura por meio do resfriamento evaporativo*. São Paulo - SP. Artigos Técnicos. Disponível em: <<http://www.basenge.com.br>>. Acesso em 20/01/2006.
- [4] BASENGE INDUSTRIA E COMERCIO LTDA (Brasil). *Selecionamentos de resfriadores de ar*. São Paulo - SP. Artigos Técnicos. Disponível em: <<http://www.basenge.com.br>>. Acesso em 20/01/2006.
- [5] BEJAN, Adrian. *Transferência de Calor*. Editora Edgard Blücher Ltda, São Paulo, 1996.
- [6] CAMARGO, J. R., 2003. *Sistemas de Resfriamento Evaporativo e Evaporativo-Adsorativo Aplicados ao Condicionamento de Ar*. Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, SP, 2003.
- [7] CASTRO, W.P. e PIMENTA, J.M.D, *Modelagem e Simulação de Painéis Evaporativos Diretos*, Proceedings of the 10o Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering, Rio de Janeiro, RJ. 2004.
- [8] ECOBRISA. *Resfriamento evaporativo*, Disponível em: <<http://www.ecobrisa.com.br>>, Acesso em: 16/10/2005.
- [9] HCF4052B – Different 4 – Channel Analog Multiplexer/Demultiplexer. Data Sheet. STMicroelectronics. 2002.
- [10] JUNIOR, Luiz Carlos Martinelli. *Refrigeração e Ar-Condicionado*. Departamento de Engenharia Mecânica. Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul. Panambi - RS. 2003.
- [11] JUNIOR, Luiz Carlos Martinelli, *Planilha eletrônica para calculo simplificado de carga térmica*. 2004. Disponível em <[http://www.unijui.tche.br/~martinelli/rac/carga\\_simplificada.pdf](http://www.unijui.tche.br/~martinelli/rac/carga_simplificada.pdf)> Acesso em: 10/09/2005.

- [12] LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F.R. Eficiência energética na arquitetura. São Paulo: PW, 1997.
- [13] LEE, J.F.; SEARS, F.W. Termodinâmica, 3ª edição, Rio de Janeiro: Editora McGrae Hill, 1976, 302p.
- [14] LM35 - Precision Centigrade Temperature Sensors. Data Sheet. National Semiconductor. 2000.
- [15] LOPES, F.V. e MIRANDA, H.C.C, 2005, *Projeto e Construção de um Sistema Híbrido de Resfriamento de Ar*, Trabalho de Graduação, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2005.
- [16] MATIC, Nebojsa. *The PIC Microcontroller*. Tradução de Alberto Jerónimo. Disponível em <<http://www.mikroelektronika.co.yu/portuguese/product/books/picbook/00.htm>>. Acesso em 23/01/2006.
- [17] PANESI, André Ricardo Quinteros, *O ciclo de refrigeração por compressão*. Revista SINERGIA: publicação semestral do Centro Federal de Educação Tecnológica de São Paulo. Volume 4. 2003. Disponível em <<http://www.cefetsp.br/sinergia/6p8c.html>>. Acesso em: 28/03/2006.
- [18] PEREIRA, Fábio. *Microcontroladores PIC: Programção em C*. 1ª Edição. São Paulo. Editora Érica. 2003.
- [19] PIC18FXX2 - High Performance, Enhanced FLASH Microcontrollers with 10-Bit A/D. Data Sheet. Microchip Technology Inc. 2002
- [20] REVISTA DO FRIO. *Resfriamento evaporativo de ar*, Disponível em: <<http://www.revistadofrio.com.br/>> Artigos Técnicos. Acesso em: 12/01/2006.
- [21] SA, Paulo. Conforto térmico. Rio de Janeiro: Minist Trab, 1938. 59 p.
- [22] SANTOS, Neri dos, *Condições ambientais de trabalho*. Universidade Federal de Santa Catarina. Departamento de Engenharia de Produção e Sistemas. Notas de Aula. Aula 06 Disponível em: <<http://www.eps.ufsc.br/ergon/disciplinas/EPS5225/>>, 2005. Acesso em 15 mai 2005.
- [23] SIMANCAS Yovane, Kátia. *Reacondicionamiento Bioclimático de Viviendas de Segunda Residencia en Clima Mediterráneo*. Tese de Doutorado, Departament Construccions Arquitectòniques, Universitat Politècnica de Catalunya, Catalunya, Espanha, 2003.
- [24] SOUZA, R.V.G, *Ergonomia e ambiente construído: Uma análise de parâmetros de conforto ambiental*. Curso de Pós Graduação em Engenharia Civil - CTC, Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, Florianópolis, SC, 2001.

[25] Wikipédia, Microcontroladores. Última atualização: 14 Março 2006. Disponível em <<http://pt.wikipedia.org/wiki/Microcontrolador>>. Acesso em 23/01/2006.

## 10 ANEXOS

### 10.1 ANEXO A – CÓDIGOS COMPUTACIONAIS

#### MatLab

```
% Universidade de Brasília - UnB
% Faculdade de Tecnologia - FT
% Departamento de Engenharia Elétrica - ENE
% Projeto Final de Graduação

ANÁLISE DO DESEMPENHO DE UM SISTEMA DE RESFRIAMENTO EVAPORATIVO E
SUA UTILIZAÇÃO INTEGRADA A UM SISTEMA DE RESFRIAMENTO
CONVENCIONAL

% Alunos: Flavio Soares Domingues de Almeida - 01/75439
%         Henrique Tavares Mafra - 01/31865
%         Fernando Santos Ferreira – 00/11550
%-----

clear all;
close all;

porta = serial('COM2', 'Baudrate', 19200);
set(porta,'Terminator','CR');
fopen(porta);
porta  %fornece informações da porta serial

arquivo = fopen('dados.txt','w');

referencia = input('Digite a Referencia: ');
fprintf(porta,'%e\r',referencia);

fgets(porta)

k = input('Tempo de Funcionamento (em minutos): ');
k=k*240;
fprintf(porta,'%e\r',k);

string = fgets(porta);

%Escrever as constantes no arquivo .
```

```

%fprintf(arquivo,)

while (string(1) ~= 'X')
    fprintf(arquivo,string);
    fprintf(arquivo,'\n');
    string = fgets(porta);
end

fclose(porta)
delete(porta)
clear porta

fclose(arquivo);

load dados.txt;
hold on;

xlabel('Tempo');
ylabel('Temperatura Sensores');
title('Temperatura vs. Hora do dia');

plot(dados(:,1),dados(:,2),'b');
plot(dados(:,1),dados(:,3),'r');
plot(dados(:,1),dados(:,4),'g');
plot(dados(:,1),dados(:,5),'c');
plot(dados(:,1),dados(:,6),'y');
plot(dados(:,1),dados(:,7),'k');
legend('Insuflado','Externo','Bulbo Umido','Interna','Umid Ext','Umid Int');

```

## Código de Controle em linguagem C.

```
/*
* Universidade de Brasília
*
* LAVSI - Laboratório de Automação, Visão e Sistemas Inteligentes
*
* Trabalho de Graduação 2 - 2º/2005
*
* Orientador:
* Prof. Marco Antonio do Egito Coeho
*
* Alunos:
* Fernando Santos Ferreira - 00/11550
* Flávio Soares Domingues de Almeida - 01/75439
* Henrique Tavares Mafra - 01/31865
*/
#include <18f252.h>

#define adc=10 // Configura o compilador para conversor A/D de 10 bits
#define delay(clock=4000000)
#define fuses XT,NOWDT,PUT,NOBROWNOUT,NOLVP
#include <mod_lcd.c>
#include <math.h>
#include <stdlib.h>
#include <usart18f252.c> // Biblioteca de comunicação assíncrona.
#include <regs_18fxx2.h>
#define rs232 (baud =19200, xmit = pin_c6 ,rcv = pin_c7)

// Pinos dos Atuadores

#define bomba pin_c3
#define AC pin_c2
#define vel1 pin_c1
#define vel2 pin_c0
#define B pin_b1
#define A pin_b0

// ----- variáveis globais -----

float temp1, temp2, temp3, temp4, temp5, temp6, saida1, saida2, tempo_real;
int t0_conta;
int estado, transicao;
int32 I2, J2, I1, J1, D, k, k1, tempo_reg, bomba_on, muda_LCD, tempo_m, tempo_h, tempo_s;
float
```

```

referencia, // Temperatura de referencia
tbs1 [9], // Temperatura do ar insuflado
tbs2 [9], // Temperatura externa
tbs3 [9], // Temperatura de bulbo úmido
tbs4 [9], // Temperatura na mesa
tbs5 [9], // Temperatura no monitor
tbs6 [9], // Temperatura próxima à janela
H,
L,
F,
temp_media, // Temperatura interna media
umidade, // Umidade relativa do ar externo
umidadeint, // Umidade relativa do ar interno
pp, // Parâmetros da equação que calcula
qq, // a umidade interna do ambiente a partir da
zz, // temperatura de bulbo seco e bulbo umido
yy,
ss;
// ----- Funções Auxiliares -----
// Função que transforma string em notação científica para float
float atoe(char *str) {
float f;
char *st;
st = str;
f = atof(st);
while (*st++ != 'e');
f = f*pow(10.0,atof(st));
return(f);
}
// Função que lê um float da serial.
float usart_recebe_float() {
int i = 0; // Contador de caracteres.
char tecla = 0; // Caracter lido.
char str[15];
do {
tecla = usart_recebe();
str[i++] = tecla;
}while(i <= 15 && tecla != '\r');
return (atoe(str));
}
// Função que envia um float para a serial.
void usart_transmite_float(float f) {
signed int i;
char str[15];
sprintf(str, "%2.3f\r", f);
for(i = 0; ((i <= 14) && (str[i] != '\r')); i++) usart_transmite(str[i]);
}
//----- Transmissão -----

```

```

void transmite() //Função que transmite os dados dos sensores e
{ //parametros calculados para o computador

    usart_transmite_float((float)tempo_real); //Transmite o tempo decorrido
    usart_transmite(' '); //Transmite o caracter espaço
    usart_transmite_float(tbs1[D]); //Transmite a temperatura do ar insuflado
    usart_transmite(' '); //Transmite o caracter espaço
    usart_transmite_float(tbs2[D]); //Transmite a temperatura externa
    usart_transmite(' '); //Transmite o caracter espaço
    usart_transmite_float(tbs3[D]); //Transmite a temperatura de bulbo umido
    usart_transmite(' '); //Transmite o caracter espaço
    usart_transmite_float(temp_media); //Transmite a media das temperaturas internas
    usart_transmite(' '); //Transmite o caracter espaço
    usart_transmite_float(umidadeint); //Transmite o valor da umidade interna
    usart_transmite(' '); //Transmite o caracter espaço
    usart_transmite_float(umidade); //Transmite o valor da umidade externa
    usart_transmite(' '); //Transmite o caracter espaço
    usart_transmite("\r"); //Transmite o caracter "r" que muda a linha
}
//----- Função que Calcula Média das 8 Leituras de um Sensor -----

void media() //Calcula e armazena a média dos 8 ultimos valores lidos por cada sensor
{ //Calcula a media das temperaturas dos sensores internos, utilizada como
//a temperatura de bulbo seco

    tbs1[8]=((tbs1[0]+tbs1[1]+tbs1[2]+tbs1[3]+tbs1[4]+tbs1[5]+tbs1[6]+tbs1[7])/8);
    tbs2[8]=((tbs2[0]+tbs2[1]+tbs2[2]+tbs2[3]+tbs2[4]+tbs2[5]+tbs2[6]+tbs2[7])/8);
    tbs3[8]=((tbs3[0]+tbs3[1]+tbs3[2]+tbs3[3]+tbs3[4]+tbs3[5]+tbs3[6]+tbs3[7])/8);
    tbs4[8]=((tbs4[0]+tbs4[1]+tbs4[2]+tbs4[3]+tbs4[4]+tbs4[5]+tbs4[6]+tbs4[7])/8);
    tbs5[8]=((tbs5[0]+tbs5[1]+tbs5[2]+tbs5[3]+tbs5[4]+tbs5[5]+tbs5[6]+tbs5[7])/8);
    tbs6[8]=((tbs6[0]+tbs6[1]+tbs6[2]+tbs6[3]+tbs6[4]+tbs6[5]+tbs6[6]+tbs6[7])/8);
    temp_media= ((tbs4[8]+tbs5[8]+tbs6[8])/3);
}
//----- Função que Calcula a Umidade Relativa do Ar -----

void humidity() //Função que tem como parametros a temperatura do ar insuflado e
//a temperatura do ambiente externo
{
    umidade = ((0.000375456*tbs2[8]*tbs2[8])-
(0.07471962*tbs2[8])+(0.063316582*tbs1[8])+(0.933280036))*100;
}
// ----- Interrupção -----

#int_timer0
void trata_t0 ()
{
    static int aux;
    static int32 tempo, tempo1;

```

```

//----- Rotina de Sincronização do Relógio -----

t0_conta -= 256;
if (t0_conta<=0)
{
    t0_conta += 3906;
}
//-----

set_timer0(61630-get_timer0());

tempo++;
tempo1++;
tempo_real = tempo1/4;
//-----Rotina de Ajuste do tempo-----
tempo_s = tempo_real;
if (tempo_real==60)
{
    tempo_m++;
}
if (tempo_m>=60)
{
    tempo_h++;
    tempo_m = 0;
}
if (tempo1==240)
{
    tempo1 = 0;
}
//----- Contagem Regressiva -----

F = (tempo%240);
if (F==0)
{
    tempo_reg = tempo_reg - 1;
}
//----- Controle da Bomba -----
if (tempo%1200) //A bomba d'água deve permanecer ligada por
{ //5 minutos e desligada por 5 minutos
    bomba_on++;
}
//----- Controle do LCD -----
if ((tempo%20)==0) //Variável que controla o tempo das duas
{ //páginas visíveis no visor de LCD
    muda_LCD = muda_LCD+1;
}
//-----

H = (tempo%2); //Rotina que controla as portas do multiplexador

```

```

if (H==0)           //os pinos do multiplexador são A e B, que tem
{                  //seus estados lógicos alterados de acordo com
    I1 = I1+1;      //a chave que se deseja habilitar
    I2 = (I1%2);
    if (I2==0)
    {
        output_low (A);      //Pino A em 0 volts
        output_low (B);      //Pino B em 0 volts
        delay_us(100000);    //Retardo para estabilizar as leituras nas
                               //habilitadas

        set_adc_channel(0);   //Canal 0 recebe dados do sensor 1
        delay_us(1000);       //retardo
        temp1 = read_adc();    //Variavel temp1 armazena valor do canal 0 do
        delay_us(1000);       //conversor AD
        tbs1 [D] = temp1*0.047210335; //Conversão do sinal lido do conversor AD
        delay_us(25000);      //para valor unidade de °C
                               //D é incrementado até D=8 para fazer a
                               //média e transmitir após o calculo da
                               //média destes valores

        set_adc_channel(1);   //Ainda com os pinos A e B do multiplexador
        delay_us(1000);       //em 0 volts o canal 1 do conversor AD recebe
        temp4 = read_adc();    //o valor do sensor 4, a variavel temp4 armazena
        delay_us(1000);       //o valor do canal 1 do conversor AD.
        tbs4 [D] = temp4*0.044556573; //Os valores de conversão para o canal
        delay_us(25000);      //0 e 1 do conversor AD diferem pelas
                               //devido aos ganhos diferentes dos circui_
        D++;                  //tos dos amplificadores

// Transmissão dos dados
    if (D==8)              //A cada 8 contagens da variável D, calcula-se
    {                      //a media das temperaturas dos 6 sensores, cal_
        media();           //cula-se a umidade externa pela função
        humidity();        //humidity(), e pela função transmite(), os da_
        transmite();       //dos são enviados para o computador.
        D = 0;             //Reseta-se o contador D para iniciar um novo
    }                      //ciclo de leituras.
    }
else
{
    output_low (A);        //Na sequência Pino A em volts
    output_high (B);       //Pino B em volts
    delay_us(100000);      //Habilita-se as portas dos sensores 3 e 6
                               //no multiplexador.

    set_adc_channel(0);    //Habilita o canal 0 do conversor AD para o ler
    delay_us(1000);       //o sensor 3
    temp3 = read_adc();
    delay_us(1000);
}

```

```

tbs3 [D] = temp3*0.047774602;
delay_us(25000);

set_adc_channel(1); //Leitura do valor do sensor 6
delay_us(1000);
temp6 = read_adc();
delay_us(1000);
tbs6 [D] = temp6*0.046289503;
delay_us(25000);
}
}
else
{
J1 = J1+1;
J2 = (J1%2);
if (J2 != 0)
{
output_high (A); //Pino A em 5 volts
output_low (B); //Pino B em 0 volts
delay_us(100000);

set_adc_channel(0); //Leitura do sensor 2
delay_us(1000);
temp2 = read_adc();
delay_us(1000);
tbs2 [D] = temp2*0.047690805;
delay_us(25000);

set_adc_channel(1); //Leitura do sensor 5
delay_us(1000);
temp5 = read_adc();
delay_us(1000);
tbs5 [D] = temp5*0.047370866;
delay_us(25000);
}
else //Equação para calculo da umidade relativa do ar baseada na
{ //temp. de bulbo seco (temp_media) e temp. de bulbo umido tbs3[8]
pp=21.4-(5351/(temp_media+273.15));
qq=21.4-(5351/(tbs3[8]+273.15));
zz=exp(pp);
yy=exp(qq);
ss=yy-(0.591639871*(temp_media-tbs3[8]));

umidadeint = 100*(ss/zz); //Umidade relativa do ar interno ao
} //ambiente
}
}
//-----// Mudança de Referência //-----
-

```

```

if (input(pin_c5)) referencia+=1;      //pinos para aumentar ouy diminuir a
if (input(pin_c4)) referencia-=1;      //temperatura de referencia (set point)

//-----// Etapa de Controle //-----
//No primeiro minuto a bomba d'água e a velocidade 2 do ventilador são aciona_
//dos para que as temperaturas de bulbo umido e ar insuflado se equilibrem para
//que se possa iniciar um controle adequado da umidade interna.
//Após 1 minuto de funcionamento inicia-se o controle automatico.
//O estado inicial é o estado 0 (zero).

if (estado==0)
{
if (tempo_m>=1)
{
if (temp_media>(referencia-2))
{
if (umidadeint<=75)
{

if (referencia-tbs1[8]>=3)      //Se a temperatura do ar insuflado for menor
{                               //que 3°C da temperatura de referencia, sig_
output_high (bomba);          //nifica que o evaporativo é capaz de res_
output_low (AC);              //friar o ambiente até a referencia.
output_high (vel1);           //Evaporativo na velocidade 1 com a bomba
output_low (vel2);            //ligada.

if (tbs2[8]<=referencia-2)
{                               //Se a temperatura externa for menor que a
estado = 3;                   //temperatura de referencia por 2°C, ativa -
}                               //se o estado 3. (Somente insufla-se o ar
}                               //externo para dentro do ambiente - vel1 -on)

else
{                               //Se a temperatura do ar insuflado não for
//Liga o AC.                   //menor que 3°C da temperatura de referencia
output_high (bomba);          //significa que o evaporativo não é capaz de
output_high (AC);             //atingir a referencia.(liga-se o ar condi_
output_high (vel1);           //cionado e o evaporativo pois a umidade in_
output_low (vel2);            //terna está abaixo de 75%

if (tbs2[8]<=referencia-2)
{                               //Se a temperatura externa for menor que a
estado = 3;                   //temperatura de referencia por 2°C, ativa -
}                               //se o estado 3. (Somente insufla-se o ar
}                               //externo para dentro do ambiente - vel1 -on)
}
}
else
{                               //Se a umidade interna for maior que 75%

```

```

if (referencia-tbs1[8]>=3)      //desliga-se a bomba d'água e mantem-se a
{                                //velocidade 1 do ventilador ligada.
output_low (bomba);
output_low (AC);
output_high (vel1);
output_low (vel2);

        if (tbs2[8]<=referencia-2)
        {
                estado = 3;      //Se a temperatura externa for menor que a
        }                        //temperatura de referencia por 2°C, ativa -
                                //se o estado 3. (Somente insufla-se o ar
                                //externo para dentro do ambiente - vel1 -on)
    }
else
{
//Liga o AC.                    //Se a temperatura do ar insuflado não for
output_low (bomba);             //menor que 3°C da temperatura de referencia
output_high (AC);               //significa que o evaporativo não é capaz de
output_high (vel1);             //atingir a referencia.(liga-se o ar condi_
output_low (vel2);              //cionado e o evaporativo sem a bomba pois a umi_
                                //dade interna está acima de 75%.

        if (tbs2[8]<=referencia-2)
        {
                estado = 3;      //Se a temperatura externa for menor que a
        }                        //temperatura de referencia por 2°C, ativa -
                                //se o estado 3. (Somente insufla-se o ar
                                //externo para dentro do ambiente - vel1 -on)
    }
}
else
{                                //Se a referencia for maior que a temperatura interna
        estado=1;                //por mais de 2°C, entre-se no estado 1 e desliga-se
    }                            //tudo.
}
else
{
//Evaporativo na velocidade 2 com a bomba, para fazer medição da umidade.
output_high (bomba);            //Estagio inicial que ocorre no primeiro minuto de
output_low (AC);                //funcionamento. Ventilador e bomba ligados para
output_low (vel1);              //efetuar o calculos das umidades interna e externa.
output_high (vel2);
}
}
}
if (estado==1)                  //Neste estado a temperatura interna é menor que a referencia.
{
        output_low (bomba);
        output_low (AC);
        output_low (vel1);
        output_low (vel2);
}

```

```

if (temp_media>=referencia)          //Vai para estado 2 se a temperatura interna
{                                     //for maior que a referencia
    estado=2;
}
if (tbs2[8]<=referencia-2)           //Vai para estado 3 se a temperatura externa
{                                     //for menor que a referencia por 2°C.
    estado = 3;
}
}
if (estado==2)                       //Neste estado o evaporativo é capaz de suprir a //referencia
solicitada
{
    output_high (bomba);
    output_low (AC);
    output_high (vel1);
    output_low (vel2);

    if (temp_media-referencia>1)      //Se a temperatura interna passar em 1°C a re_
    {                                  //ferencia, sai do estado 2 e vai para o es_
        estado=0;                    //tado 0.
    }
}
if (estado==3)                       //Neste estado a temperatura externa é menor que a //referencia por 2°C,
desta forma apenas insulflamos o
{                                     //ar externo para dentro do ambiente
    output_low (bomba);
    output_low (AC);
    output_high (vel1);
    output_low (vel2);

    if ((tbs2[8]>referencia+2)||((temp_media<(referencia-2)))
    {                                  //Se a temperatura externa passar 2°C acima da
        estado = 0;                  //referencia ou a temperatura interna ficar 2°C
    }                                  //abaixo da temperatura de referencia, passa-se
}                                       //para o estado 0.
//-----// interromper teste //-----
if (((input(pin_c4))&&(input(pin_c5)))||(tempo==k)
{
    usart_transmite("X\r");          //Ao se pressionar os botoes de refe_
    lcd_ini();                       //rencia simultaneamente, ou quando o
    printf(lcd_escreve,"Grafico OK"); //tempo de execução atinge o valor k
    while (tempo!=0)                 //(solicitado no inicio da execução),
    {                                  //interrompe -se a transmissão dos da_
        output_low (bomba);          //dos e plota-se o gráfico.
        output_low (AC);
        output_low (vel1);
        //Desliga-se todos os atuadores após
        //finalizado o ensaio.
    }
}

```

```

        output_low (vel2);
    }
}
    if ((muda_LCD%2)==1) //Escreve-se no LCD uma inha a cada 5 segundos
    {
        //Na primeira temos as temperaturas Insuflada, //Externa, Bulbo
Umido, Temp. Interna, e tempo //regressivo.
printf(lcd_escreve, "\f%2.1f %2.1f %2.1f Media=%2.1f T=%4lim", tbs1[8], tbs2[8], tbs3[8],
temp_media, tempo_reg+1);
    }
    else
    {
        //Na segunda, a referencia, umidade ext., umidade int. //e o estado atual.
printf(lcd_escreve, "\fRef=%2.1fC Ue=%2.1f Ui=%2.1f E=%1i", referencia, umidade,
umidadeint, estado);
    }
}
// ----- Programa Principal -----
void main()
{
    long int hora, minuto;
    lcd_ini();
    setup_ADC_ports (ALL_ANALOG);
    setup_adc(ADC_CLOCK_INTERNAL );
    usart_inicializa (12,1); // ajuste de velocidade de comunicação - 19200 bps
    usart_transmite("\r");
    k=usart_recebe_float(); //Recebe o tempo de execucao do teste
    I1 = 0;
    J1 = 0;
    D = 0;
    k1 = (k/240);
    tempo_m = 0;
    tempo_h = 0;
    tempo_reg = k1;
    t0_conta = 3906;
    bomba_on = 0;
    muda_LCD = 0;
    estado = 0;
    referencia = 24; //Temperatura de referencia inicial
    tbs1[8] = 0; //Temperatura insuflada inicial
    umidadeint=70; //Valor de umidade inicial

    setup_timer_0 ( RTCC_INTERNAL | RTCC_DIV_64 ); // 15625 Hz
    set_timer0(61630); // inicia o timer0 em 60328 -> 65536 - 3906 = 61630 (1 interrupção a
cada 1 segundo)
    enable_interrupts (global | int_timer0); // habilita interrupções
    while (true);
}

```

## 10.2 ANEXO B – TABELA DE DADOS DA BASENGE

Tabela 10-1 – Tabela de redução de temperatura por meio do sistema de resfriamento evaporativo															
TE	UR	TR	RT	TE	UR	TR	RT	TE	UR	TR	RT	TE	UR	TR	RT
22°C	20%	12,5	9,5	28°C	20%	17	11	34°C	20%	21	13	40°C	20%	25	15
	25%	13	9		25%	17,5	10,5		25%	22	12		25%	26,5	13,5
	30%	14	8		30%	18,5	9,5		30%	23	11		30%	28	12
	35%	14,5	7,5		35%	19	9		35%	24	10		35%	29	11
	40%	15	7		40%	20	8		40%	25	9		40%	30	10
	45%	15,5	6,5		45%	21	7		45%	26	8		45%	31	9
	50%	16,5	5,5		50%	21,5	6,5		50%	27	7		50%	32	8
	55%	17	5		55%	22,5	5,5		55%	28	6		55%	33	7
	60%	18	4		60%	23	5		60%	28,5	5,5		60%	34	6
	65%	18,5	3,5		65%	24	4		65%	29	5		65%	35	5
	70%	19	3		70%	24,5	3,5		70%	30	4		70%	35,5	4,5
75%	19,5	2,5	75%	25	3	75%	31	3	75%	-	-				
23°C	20%	13	10	29°C	20%	17,5	11,5	35°C	20%	21,5	13,5	41°C	20%	26	15
	25%	14	9		25%	18,5	10,5		25%	22,5	12,5		25%	27,5	13,5
	30%	15	8		30%	19,5	9,5		30%	24	11		30%	28,5	12,5
	35%	15,5	7,5		35%	20	9		35%	25	10		35%	30	11
	40%	16	7		40%	21	8		40%	25,5	9,5		40%	31	10
	45%	16,5	6,5		45%	22	7		45%	27	8		45%	32	9
	50%	17,5	5,5		50%	22,5	6,5		50%	28	7		50%	33	8
	55%	18	5		55%	23,5	5,5		55%	28,5	6,5		55%	34	7
	60%	18,5	4,5		60%	24	5		60%	29,5	5,5		60%	35	6
	65%	19	4		65%	24,5	4,5		65%	30	5		65%	36	5
	70%	20	3		70%	25,5	3,5		70%	31	4		70%	-	-
75%	20,5	2,5	75%	26	3	75%	31,5	3,5	75%	-	-				
24°C	20%	13,5	10,5	30°C	20%	18	12	36°C	20%	22,5	13,5	42°C	20%	26,5	15,5
	25%	14,5	9,5		25%	19	11		25%	23,5	12,5		25%	28	14

	30%	15,5	8,5		30%	20	10		30%	24,5	11,5		30%	29	13
	35%	16	8		35%	21	9		35%	25,5	10,5		35%	30,5	11,5
	40%	17	7		40%	22	8		40%	26,5	9,5		40%	31,5	10,5
	45%	17,5	6,5		45%	22,5	7,5		45%	27,5	8,5		45%	33	9
	50%	18	6		50%	23,5	6,5		50%	28,5	7,5		50%	34	8
	55%	19	5		55%	24	6		55%	29,5	6,5		55%	35	7
	60%	19,5	4,5		60%	25	5		60%	30,5	5,5		60%	36	6
	65%	20	4		65%	25,5	4,5		65%	31	5		65%	-	-
	70%	20,5	3,5		70%	26,5	3,5		70%	32	4		70%	-	-
	75%	21	3		75%	27	3		75%	32,5	3,5		75%	-	-
25°C	20%	14,5	10,5	31°C	20%	19	12	37°C	20%	23	14	43°C	20%	27,5	15,5
	25%	15,5	9,5		25%	20	11		25%	24	13		25%	29	14
	30%	16	9		30%	21	10		30%	25,5	11,5		30%	30	13
	35%	17	8		35%	21,5	9,5		35%	26,5	10,5		35%	31	12
	40%	18	7		40%	22,5	8,5		40%	27,5	9,5		40%	32,5	10,5
	45%	18,5	6,5		45%	23,5	7,5		45%	28,5	8,5		45%	33,5	9,5
	50%	19	6		50%	24,5	6,5		50%	29,5	7,5		50%	34,5	8,5
	55%	20	5		55%	25	6		55%	30	7		55%	35,5	7,5
	60%	20,5	4,5		60%	26	5		60%	31	6		60%	36,5	6,5
	65%	21	4		65%	26,5	4,5		65%	32	5		65%	-	-
	70%	21,5	3,5		70%	27	4		70%	33	4		70%	-	-
75%	22	3	75%	28	3	75%	33,5	3,5	75%	-	-				
26°C	20%	15,5	10,5	32°C	20%	19,5	12,5	38°C	20%	24	14	44°C	20%	28	16
	25%	16	10		25%	20,5	11,5		25%	25	13		25%	29,5	14,5
	30%	17	9		30%	21,5	10,5		30%	26	12		30%	31	13
	35%	18	8		35%	22,5	9,5		35%	27	11		35%	32	12
	40%	19	7		40%	23,5	8,5		40%	28,5	9,5		40%	33,5	10,5
	45%	19,5	6,5		45%	24	8		45%	29,5	8,5		45%	34,5	9,5
	50%	20	6		50%	25	7		50%	30,5	7,5		50%	35,5	8,5
	55%	21	5		55%	26	6		55%	31	7		55%	36,5	7,5
	60%	21,5	4,5		60%	27	5		60%	32	6		60%	-	-

	65%	22	4		65%	27,5	4,5		65%	33	5		65%	-	-
	70%	22,5	3,5		70%	28	4		70%	34	4		70%	-	-
	75%	23	3		75%	29	3		75%	34,5	3,5		75%	-	-
27°C	20%	16	11	33°C	20%	20,5	12,5	39°C	20%	24,5	14,5	45°C	20%	29	16
	25%	17	10		25%	21,5	11,5		25%	26	13		25%	30	15
	30%	17,5	9,5		30%	22,5	10,5		30%	27	12		30%	31,5	13,5
	35%	18,5	8,5		35%	23	10		35%	28	11		35%	33	12
	40%	19	8		40%	24	9		40%	29	10		40%	34	11
	45%	20	7		45%	25	8		45%	30	9		45%	35,5	9,5
	50%	21	6		50%	26	7		50%	31	8		50%	36,5	8,5
	55%	22	5		55%	27	6		55%	32	7		55%	-	-
	60%	22,5	4,5		60%	28	5		60%	33	6		60%	-	-
	65%	23	4		65%	28,5	4,5		65%	34	5		65%	-	-
	70%	23,5	3,5		70%	29	4		70%	35	4		70%	-	-
	75%	24	3		75%	30	3		75%	35,5	3,5		75%	-	-

#### LEGENDA

■ TE = Temperatura Externa

■ UR = Umidade Relativa Externa

■ TR = Temperatura Resultante

■ RT = Redução de Temperatura