

TRABALHO DE GRADUAÇÃO

IMPLEMENTAÇÃO DE UM CONTROLADOR FUZZY EM UM SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO HÍBRIDO ATRAVÉS DE UMA REDE DE SENSORES ZIGBEE

Por,
Rodrigo Nascimento Such

Brasília, Dezembro de 2009



**ENGENHARIA
MECATRÔNICA**
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
Faculdade de Tecnologia
Curso de Graduação em Engenharia de Controle e Automação

TRABALHO DE GRADUAÇÃO

IMPLEMENTAÇÃO DE UM CONTROLADOR FUZZY EM UM SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO HÍBRIDO ATRAVÉS DE UMA REDE DE SENSORES ZIGBEE

POR,

Rodrigo Nascimento Such

Relatório submetido como requisito parcial para obtenção
do grau de Engenheiro de Controle e Automação.

Banca Examinadora

Prof. Adolfo Bauchpiess, UnB/ ENE (Orientador) _____

Prof. Lélío Ribeiro Soares Junior, UnB/ENE _____

Prof. Marco A. do Egito Coelho, UnB/ENE _____

Brasília, Dezembro de 2009

FICHA CATALOGRÁFICA

SUCH, RODRIGO

Implementação de um controlador Fuzzy em um sistema de refrigeração híbrido através de uma rede de sensores ZigBee ,
Distrito Federal, 2009.

xiii, 84p., 297 mm (FT/UnB, Engenheiro, Controle e Automação, Ano). Trabalho de Graduação – Universidade de Brasília.Faculdade de Tecnologia.

1.Ar Condicionado Evaporativo
3.Redes ZigBee

2.Sistema Híbrido
4.Controlador Fuzzy

I. Mecatrônica/FT/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

SUCH, R. M., (2009). Implementação de um controlador Fuzzy em um sistema de refrigeração híbrido através de uma rede de sensores ZigBee, Publicação FT.TG-nº23 , Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 84p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Rodrigo Nascimento Such

TÍTULO DO TRABALHO DE GRADUAÇÃO: Implementação de um controlador Fuzzy em um sistema de refrigeração híbrido através de uma rede de sensores ZigBee.

GRAU: Engenheiro

ANO: 2009

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias deste Trabalho de Graduação e para emprestar tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desse Trabalho de Graduação pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Rodrigo Nascimento Such
SQN 411 Bloco G apt 306 – Asa Norte.
80766-070 Brasília – DF – Brasil.

AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar ao meu pai e à minha mãe, que sempre fizeram de tudo para me dar uma educação de qualidade. Aprendi com eles a dar valor a tudo que tenho e me esforçar para superar qualquer desafio, sem eles não estaria superando mais este.

À minha família e amigos verdadeiros, suportes fundamentais em todos os momentos da minha vida.

Aos grandes professores e mestres que passaram por minha história. É a partir deles que será construído um mundo melhor.

Às dificuldades encontradas pela vida, pois me tornaram mais forte e me ensinaram a não temer nenhum desafio.

Rodrigo Nascimento Such

RESUMO

O seguinte trabalho utilizou-se de um sistema de refrigeração híbrido, desenvolvido na Universidade de Brasília, para implementar um controlador Fuzzy com o intuito de melhorar a eficiência do processo de resfriamento, reduzindo, assim, o consumo de energia.

O sistema de refrigeração híbrido conta com um compressor, o mesmo utilizado em ar condicionados convencionais, integrado com um modelo evaporativo de resfriamento. A integração de ambos os sistemas, visando a manutenção do conforto térmico e a economia de energia, foram as principais motivação para o desenvolvimento deste trabalho.

Optou-se por utilizar um controlador Fuzzy por diversos motivos que serão explicados no trabalho. Dessa forma, o controlador foi desenvolvido no software MatLab através do Simulink que dispõe de uma série de ferramentas gráficas, muitas delas utilizadas neste trabalho.

Por fim, o sistema de sensores presentes no ambiente e utilizados para enviar informações para o controlador, foi desenvolvido de maneira sem fio e através do padrão ZigBee de comunicação, utilizando-se para isso módulos ZigBit desenvolvidos pela MeshNetics, muito comum em sistemas prediais.

O sistema final funcionou de maneira completamente híbrida, e obteve bons resultados com relação à economia de energia.

Palavras Chave: Ar condicionado evaporativo, sistema híbrido, rede *ZigBee*, Controlador Fuzzy.

ABSTRACT

The following work made use of a hybrid cooling system, developed at Universidade de Brasília, to implement a Fuzzy controller in order to improve the efficiency of the cooling process, therefore reducing power consumption.

The hybrid cooling system includes a compressor, the same used in conventional air conditioners, integrated with a model of evaporative cooling. The integration of both systems, in order to maintain the thermal comfort and energy savings, were the main motivation for the development of this work.

The option of using a Fuzzy controller was made for various reasons which will be explained during this work. Thus, the controller was developed at the software MatLab through the Simulink which has a series of graphical tools, many of them used in this work.

Finally, the sensor system in the environment, used to send information to the controller, was developed in a wireless gear and through the Zigbee standard of communication, using for this ZigBit modules developed by MeshNetics, very common in building systems.

The final system worked in a completely hybrid way and obtained good results in respect to energy saving.

Keywords: Evaporative air-conditioning, hybrid system, ZigBee network, Fuzzy controller.

Sumário

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	MOTIVAÇÃO.....	1
1.2	CONFORTO TÉRMICO.....	3
1.2.1	VANTAGENS DA ANÁLISE DE CONFORTO TÉRMICO.....	5
1.3	PMV.....	6
2	SISTEMAS DE CONTROLE.....	8
2.1	Lógica Fuzzy.....	9
2.2-	O CONTROLADOR FUZZY.....	9
2.2.1-	FUZZYFICAÇÃO.....	11
2.2.2-	INFERÊNCIA.....	11
2.2.3-	DEFUZIFICAÇÃO.....	13
3	CARACTERIZAÇÃO DO AMBIENTE.....	15
4	AS REDES SEM FIO.....	21
4.1-	MOTIVAÇÃO.....	21
4.2-	PADRÃO ZIGBEE.....	21
4.2.1-	BITCLOUD.....	24
4.2.2-	FORMAÇÃO DA REDE.....	25
4.2.2.1-	CONFIGURAÇÃO.....	25
4.2.2.2-	REQUISICÃO DE FORMAÇÃO DA REDE.....	27
4.2.2.3-	CONFIRMAÇÃO DE CRIAÇÃO, ENTRADA E SAÍDA NA REDE.....	28
5	ESTRATÉGIAS DE CONTROLE.....	30
5.1-	OPÇÃO 1 – CONTROLE LIGA E DESLIGA.....	30
5.2-	OPÇÃO 2 – CONTROLE PID.....	30
5.3-	OPÇÃO 3 – CONTROLE FUZZY.....	31
6	PROJETO DOS CONTROLADORES.....	32
6.1-	CONTROLADOR PID.....	32
6.2 -	CONTROLADOR FUZZY.....	37
7	TESTES.....	58
7.1-	CONTROLADOR PID.....	58
7.1.1-	TEMPERATURA DE REFERÊNCIA FIXA (22°C).....	58
7.1.2-	TEMPERATURA DE REFERÊNCIA VARIANDO (22°C E 23°C).....	62
7.2-	CONTROLADOR FUZZY.....	65

7.2.1-	TEMPERATURA DE REFERÊNCIA FIXA (22°C)	65
7.2.2-	TEMPERATURA DE REFERÊNCIA VARIANDO (22°C E 23°C).....	68
8	ANÁLISE DOS RESULTADOS	71
8.1-	CONTROLADOR PID	71
8.2-	CONTROLADOR FUZZY	72
8.3 -	ANÁLISE DE CONSUMO	73
9	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	76
10	REFERÊNCIAS	79
11 –	ANEXO I.....	81

LISTA DE FIGURAS

1.1	Sistema Multi-Split de ar condicionado.....	3
1.2	PMV Vs PPD.....	7
2.1	Passos seguidos pelo controlador <i>fuzzy</i>	10
2.2	Principais funções de pertinência disponíveis pelo MatLab.....	12
3.1	Foto do sistema híbrido de climatização instalado na sala do GRAV na Universidade de Brasília.....	17
3.2	Planta baixa do ambiente em questão (GRAV).....	18
3.3	Foto do <i>dumper</i> do sistema de refrigeração. À esquerda com a entrada semi-aberta e a direita fechada.....	19
4.1	Modelo de Rede ZigBee. (<i>Fonte: ZigBee Training - Technical Learning Center</i>).....	22
4.2	Pilha Bitcloud (Bitcloud Stack).....	24
6.1	Comportamento da temperatura utilizando um controlador liga-desliga às 16:00 horas no mês de outubro de 2009.....	33
6.2	Implementação do controlador PID no Simulink.....	34
6.3	Comportamento do sistema com temperatura externa do sistema abaixo da real.....	39
6.4	Funcionamento do controlador <i>fuzzy</i> utilizando a referência correta de temperatura externa.....	40
6.5	Comportamento do controlador <i>fuzzy</i> "superestimado" com 4 pessoas no ambiente.....	41
6.6	Controlador <i>fuzzy</i> - Modelo implementado em MatLab.....	42
6.7	Controlador <i>fuzzy</i> - Modelo implementado em MatLab.....	42
6.8	Controlador <i>fuzzy</i> - Modelo implementado em MatLab.....	43
6.9	Controlador <i>fuzzy</i> - Modelo implementado em MatLab.....	43
6.10	Controlador <i>fuzzy</i> - Modelo implementado em MatLab.....	44
6.11	Relação entre temperatura do ar externo na entrada do sistema evaporativo e queda de temperatura possível (<i>apud</i> Ferreira, 2009.....	46
6.12	Umidade externa versus Queda de temperatura (40°C).....	48
6.13	Bloco "on/off sistema evaporativo".....	49

6.14	Estratégia de funcionamento do sistema evaporativo.....	51
6.15	Funcionamento do módulo sensor.....	52
6.16	Funcionamento do módulo atuador.....	53
6.17	Funcionamento do módulo coordenador.....	53
6.18	Sistema completo implementado para o controlador <i>fuzzy</i>	55
6.19	Bloco On/Off Sistema híbrido em detalhes.....	57
7.1	Comportamento da temperatura ambiente utilizando um controlador PID e temperatura de referência fixa.....	59
7.2	Comportamento da temperatura ambiente utilizando um controlador PID e temperatura de referência fixa (zoom em um período de 1 hora).....	59
7.3	Comportamento da temperatura externa durante o teste do controlador PID com temperatura de referência fixa.....	60
7.4	Comportamento da umidade relativa do ar externa durante o teste do controlador PID com temperatura de referência fixa.....	61
7.5	Comportamento da umidade relativa do ar interna durante o teste do controlador PID com temperatura de referência fixa.....	61
7.6	Comportamento da temperatura ambiente utilizando um controlador PID e temperatura de referência variando entre 22°C e 23°C.....	62
7.7	Comportamento da temperatura ambiente utilizando um controlador PID e temperatura de referência variando entre 22°C e 23°C (zoom em um período de 1 hora no momento da transição de 23°C para 22°C).....	63
7.8	Comportamento da temperatura externa durante o teste do controlador PID com temperatura de referência variando entre 22°C e 23°C.....	63
7.9	Comportamento da umidade relativa do ar externa durante o teste do controlador PID com temperatura de referência variando entre 22°C e 23°C.....	64
7.10	Comportamento da umidade relativa do ar interna durante o teste do controlador PID com temperatura de referência variando entre 22°C e 23°C.....	64
7.11	Comportamento da temperatura ambiente utilizando um controlador <i>fuzzy</i> e temperatura de referência fixa em 22°C.....	65

7.12	Comportamento da temperatura ambiente utilizando um controlador <i>fuzzy</i> e temperatura de referência fixa em 22°C (zoom em um período de uma hora).....	66
7.13	Comportamento da temperatura externa utilizando um controlador <i>fuzzy</i> e temperatura de referência fixa em 22°C.....	66
7.14	Comportamento da umidade relativa externa utilizando um controlador <i>fuzzy</i> e temperatura de referência fixa em 22°C.....	67
7.15	Comportamento da umidade relativa interna utilizando um controlador <i>fuzzy</i> e temperatura de referência fixa em 22°C.....	67
7.16	Queda de temperatura possível (estimada) e desejada.....	68
7.17	Comportamento da temperatura ambiente utilizando um controlador <i>fuzzy</i> e temperatura de referência variando entre 22°C e 23°C.....	68
7.18	Comportamento da temperatura ambiente utilizando um controlador <i>fuzzy</i> e temperatura de referência variando entre 22°C e 23°C (zoom de uma hora).....	69
7.19	Comportamento da temperatura externa utilizando um controlador <i>fuzzy</i> e temperatura de referência variando entre 22°C e 23°C.....	69
7.20	Comportamento da umidade externa utilizando um controlador <i>fuzzy</i> e temperatura de referência variando entre 22°C e 23°C.....	70
7.21	Comportamento da umidade relativa interna utilizando um controlador <i>fuzzy</i> e temperatura de referência variando entre 22°C e 23°C (zoom de uma hora).....	70

LISTA DE TABELAS

1.1	Consumo de energia não residencial em Brasília, 2001 (MetroQuatro®, <i>apud</i> Urzêda,2006).....	34
6.1	Valores de c_1 , c_2 e c_3 para SHT V4.....	37
6.2	Valores de c_1 , c_{2b} e c_3 para SHT V3.....	37
6.3	Controlador <i>fuzzy</i> - Modelo implementado em MatLab.....	44
8.1	Consumo e temperatura média das simulações com controlador PID <i>fuzzy</i>	73

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolos Latinos

G	Giga
M	Mega
K	<i>Kilo</i>
m	mili
<i>h</i>	coeficiente de convecção [(m/s) ^{1/2}]
h	hora
s	segundo

Siglas

ASHARE	American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers
°C	Graus Celsius
AD	Analog to Digital
API	Application Programming Interface
BTU	British Thermal Unit
dB	Decibel
EEPROM	Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory
GHz	Giga Hertz
HVAC	Heating Ventilating and Air Conditioning
I2C	Inter-Integrated Circuit
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
ISO	International Organization for Standardization
JTAG	Join Test Action Group
kB	Kilo Bytes
Kbps	Kilo bits por segundo
LAVSI	Laboratório de Visão e Sistemas Inteligentes
mA	Mili Amperes
MCU	Microcontroller Unit
MHz	Mega Hertz
min	Minuto
PMV	Predicted Mean Vote
PPD	Predicted Percentage of Dissatisfied
RF	Radio Frequência
UART	Universal Asynchronous Receiver Transmitter
USB	Universal Serial Bus
V	Volts
VAC	Corrente Alternada
VDC	Corrente Continua
Wi-Fi	Wireless Fidelity
WSN	Wireless Sensor Network

1 INTRODUÇÃO

Este capítulo apresenta considerações gerais preliminares relacionadas aos conceitos básicos para o entendimento do trabalho bem como a sua motivação.

1.1 MOTIVAÇÃO

A crescente preocupação com os danos gerados pelo homem à natureza e a procura de tecnologias que ofereçam menor impacto ambiental são assuntos cada dia mais presentes na nossa sociedade. Neste contexto, de busca do ser humano em diminuir a exploração do meio ambiente de forma não sustentável, surge caminho para o desenvolvimento de tecnologias ecologicamente mais eficientes.

Seja pela redução de poluentes jogados na atmosfera, pela diminuição do desmatamento e todas as suas causas, ou pela preocupação com o consumo energético, as tecnologias que reduzam o impacto na natureza estão atualmente muito valorizadas.

A estreita relação entre a produção de energia elétrica e os impactos ambientais por ela causados é alvo de uma série de estudos nas mais diversas áreas. Tanto para mover um carro quanto para acender uma lâmpada o custo ambiental associado a estes gastos deve ser sempre analisado e levado em consideração na escolha do processo.

No Brasil, tanto na produção de combustíveis alternativos como o álcool ou biodiesel, quanto na área de produção de eletricidade, o aumento na demanda por energia sempre foi assunto de preocupação.

Dentre as diversas fontes, a eletricidade responde por grande parte do percentual da matriz energética brasileira. Segundo dados do Ministério de Minas e Energia, no ano de 2008 a energia hidráulica e eletricidade corresponderam a 13,9% sendo, portanto, a principal fonte consumida no país.

Além da busca por novas tecnologias de produção que gerem menor impacto ambiental e meios de transmissão mais eficientes, o uso eficiente de energia elétrica também é alvo de constantes estudos. Dentre os principais consumidores deste tipo de energia, estão os edifícios comerciais e residenciais, principalmente devido aos seus sistemas de aquecimento,

ventilação e ar-condicionado que respondem por cerca de 60% desse consumo nos Estados Unidos (MULL, 1997) e 50% na comunidade europeia (Hughes, 1998).

Em Brasília a descrição do consumo de energia elétrica de pequenas, médias e grandes edificações não residenciais, baseadas nos principais tipos de equipamentos, está descrita na tabela 1.1.

Tabela 1.1 – Consumo de energia não residencial em Brasília, 2001 (MetroQuatro®, *apud* Urzêda,2006).

Uso Final	Consumo Médio de Energia Elétrica		
	Pequenas	Médias	Grandes
Ar condicionado	62,9%	56,0%	48,6%
Iluminação	28,8%	32,0%	18,5%
Elevadores	-	3,5%	10,4%
Bombas	-	0,3%	2,5%
CPD's	7,0%	8,0%	16,0%
Outros	1,3%	0,2%	4,0%
Total	100,0%	100,0%	100,0%

Vê-se que o consumo de energia por sistemas de ar condicionado correspondem a 62,9%, 56,0% e 48,6%, respectivamente às pequenas, médias e grandes edificações, tornando estes aparelhos os grandes “vilões” do consumo de energia.

Dessa forma, nota-se a grande importância do desenvolvimento de novas tecnologias que tornem mais eficientes os sistemas de refrigeração atual. Dentre as tecnologias mais comuns em edifícios estão: ar condicionado Split, mult-split e convencional (janela).

Os sistemas split são compostos por uma unidade interna (ventilador) e uma unidade externa (bomba d'água). Elas são interconectadas através de uma tubulação de cobre na qual existe um fluido refrigerante. Este tipo de sistema vem sendo largamente utilizado por proporcionar maior conforto ao usuário já que mantêm a unidade responsável pela maior produção de ruído na parte externa do ambiente, reduzindo de forma significativa a poluição sonora quando comparado ao ar condicionado convencional de janela.

Uma variação desse sistema é o sistema chamado Multi-split. Trata-se de equipamentos muito semelhantes ao anterior com a diferença de que a uma única central externa (condensador) podem ser ligadas várias unidades internas e em diferentes pontos.



Figura 1.1 - Sistema Multi-Split de ar condicionado.

Os dois sistemas citados acima além de maior conforto proporcionam maior eficiência e melhor aparência no edifício no qual está instalado, uma vez que o aparelho não fica visível na parte externa do mesmo. Por estes motivos, observa-se no mundo uma tendência a migração para os sistemas split e multi-split em contraposição aos aparelhos de janela convencional. O Brasil segue essa tendência e passou de uma base de 6% há 10 anos atrás para uma base de 60% de ar condicionados split instalados em 2007.

Associadas a essa tendência surgem tecnologias para aumentar a eficiência desses aparelhos através do uso de técnicas que vão além do sistema liga-desliga convencional, e que buscam principalmente a economia de energia elétrica.

1.2 CONFORTO TÉRMICO

A necessidade do uso de sistemas de refrigeração dá-se devido à falta de conforto gerada em ambientes fechados ou com grande concentração de pessoas. Essa sensação é reduzida utilizando sistemas que resfriem o ambiente, tornando-os mais agradáveis.

A sensação de conforto térmico é definida pela norma ISO 7730 como sendo:

“Um estado de espírito que expressa satisfação com o ambiente que envolve uma pessoa (nem quente nem frio).”

De acordo com esta norma, conforto térmico é função da percepção humana de sensações que dependem de inúmeros fatores ambientais e pessoais. Além desta, uma série de outras diversas normas definem e caracterizam grandezas relacionadas ao conforto térmico.

Dentre as principais, pode-se citar:

- ASHRAE 55 (Condições térmicas do ambiente para ocupação humana).
- ISO 7726 (Ergonomia do ambiente térmico – instrumentos de medida de grandezas físicas).
- ISO 7730 (Ambientes térmicos moderados – determinação dos índices PMV e PPD e especificação das condições de conforto térmico).
- ISO 7993 (Ambientes quentes – determinação analítica e interpretação do *stress* térmico utilizando cálculo da taxa de suor desejado).

Existem ainda diversas outras normas que dizem respeito às características térmicas de ambientes, não as relacionando necessariamente à sensação de conforto. Neste trabalho foi utilizada, principalmente, a norma ISO 7730, que define os índices PMV e PMD, os quais serão base para este estudo.

As variáveis que definem conforto térmico podem ser divididas em dois grupos. São eles:

De natureza ambiental:

- Temperatura do ar (t_a);
- Temperatura radiante média (t_{rm});
- Velocidade relativa do ar (v_r);
- Umidade relativa do ar ambiente (UR).

De natureza pessoal:

- Tipo de vestimenta (representada pelo seu isolamento térmico);
- Tipo de atividade física executada (representada pelo metabolismo).

1.2.1 VANTAGENS DA ANÁLISE DE CONFORTO TÉRMICO

Quando se fala no conceito de conforto, pensa-se geralmente em algo que vem à acrescentar ao ambiente, porém não de primeira necessidade, ou seja, uma variável na qual não haverão significativas perdas com a sua ausência.

Entretanto, existem alguns casos em que o conforto é de extrema importância para o bem-estar dos usuários de um produto. Como, por exemplo, duas poltronas : uma de madeira, ou seja, mais simples e outra de couro, mais sofisticada e luxuosa. Ambas possuem a mesma finalidade e desempenham o mesmo papel, porém a diferença entre as duas está no conforto. Este interfere diretamente na produtividade e bem estar do indivíduo que se senta numa poltrona confortável ao invés de uma poltrona desconfortável.

O conceito de conforto térmico é semelhante ao citado acima. Apesar de tratar-se de um artigo de segunda necessidade é algo que apresenta forte influência no desempenho das pessoas inseridas no ambiente. Em uma empresa, por exemplo, o índice de conforto térmico possui forte ligação com a produtividade de seus funcionários.

Diversos estudos vêm sendo feitos a respeito desse assunto. Niemelä et al. (2001) verificou em um conjunto de trabalhadores de *call center* uma queda de 1.8% em produtividade por grau Celsius quando a temperatura estava abaixo de 25°C, e 2.2% de queda por grau Celsius em temperaturas superiores a 25°C. Ainda sobre o mesmo tema, porém utilizando uma abordagem um pouco diferente, Federspiel et al. (2002) verificou queda de 15% na velocidade de trabalho de funcionários de outro *call center* nos Estados Unidos quando a temperatura variou de 24.8°C para 26°C.

Link e Pepler (1970) encontraram uma redução de 8% na produtividade em trabalho de costura de uma fábrica quando a temperatura variou de 23.9°C para 32.2°C.

Inúmeros outros estudos podem ser citados como pesquisas entre a relação produtividade e temperatura, alguns ainda relacionando a produtividade com índices de conforto térmico como PMV ou PPD, que serão explicados mais adiante.

De fato o conceito de conforto térmico deve ser levado em conta quando se deseja desempenho ótimo de produtividade em um ambiente, e não apenas tratar esse assunto como um gasto supérfluo para a empresa, onde a importância não seja fundamental. Todos os estudos acima citados provam que a importância de um correto e eficiente controle de

temperatura está não apenas em garantir um ambiente seguro e agradável, mas também gerar um aumento significativo na produtividade dos trabalhadores.

1.3 *PMV*

O índice PMV define através de valores numéricos um grau de conforto térmico o qual pode ser medido através de um número que varia entre +3 e -3 que significam “muito quente” e “muito frio”, respectivamente.

O índice foi proposto por Fanger, que sugeriu a seguinte tabela para definir o nível de conforto:

PMV	Conforto
+3	Muito quente
+2	Quente
+1	Morno
0	Confortável
-1	Levemente frio
-2	Frio
-3	Muito frio

Com o objetivo de obter uma formulação matemática para conforto térmico, e devido ao fato deste índice ser um valor inexato ou dependente de variáveis humanas, Fanger desenvolveu experimentos com o intuito de obter uma relação entre carga térmica e conforto térmico.

Seus experimentos foram realizados com mais de 1300 pessoas, as quais foram submetidas a diversas combinações das variáveis ambientais e pessoais de conforto térmico. O experimento manteve as variáveis constantes por 3 horas, e a cada 30 minutos cada pessoa era solicitada a expressar por meio de voto escrito a sua sensação térmica de acordo com a tabela proposta. A partir desses dados Fanger formulou uma equação que relacionava todas essas variáveis com a sensação de conforto. Essa equação, pelo fato de ter sido obtida por meio do voto, foi denominada Predicted Mean Vote (Voto Médio Estimado).

Devido ao alto grau de complexidade da fórmula e a difícil aplicação, Fanger desenvolveu uma série de tabelas, nas quais a relação entre conforto térmico e suas variáveis era obtida por simples consulta.

Outro índice de extrema importância proposto por Fanger é o PPD, “Predicted Percentage Dissatisfied”.

Fanger notou que quando se trata de um grande número de pessoas dentro de um mesmo ambiente, porém em localizações diferentes, é praticamente impossível que todos os indivíduos estejam completamente satisfeitos. Por isso então ele propôs um índice para estimar a porcentagem de pessoas insatisfeitas em um ambiente de acordo com o valor de PMV. Utilizando dados obtidos por seus experimentos e também dos pesquisadores Rohles e Nevins, Fanger procurou determinar a relação entre PMV e a porcentagem de pessoas insatisfeitas (PPD). O resultado obtido foi uma curva desenhada sobre um plano PMV *versus* PPD, relacionando portanto os dois índices.

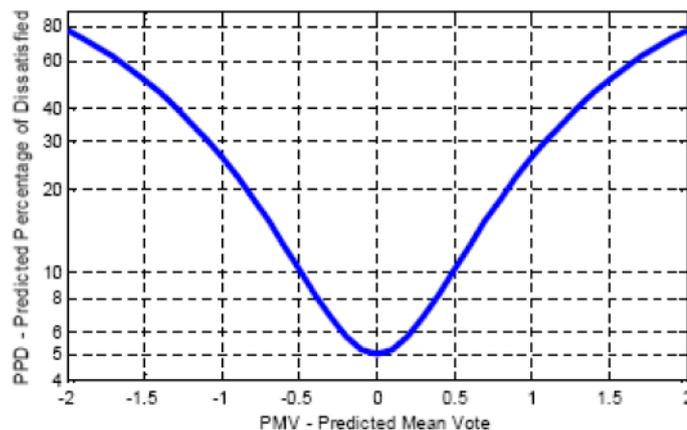


Figura 1.2 - PMV Vs PPD

Nota-se que o gráfico é simétrico com relação à origem do eixo do PMV e é exatamente neste ponto onde se tem a menor porcentagem de pessoas insatisfeitas como era de se esperar, já que o valor zero de PMV pressupõe um sistema com as melhores condições possíveis.

2 SISTEMAS DE CONTROLE

Este capítulo tem por objetivo introduzir algumas idéias básicas, exemplos e conceitos de sistemas de controle dando ênfase ao controlador fuzzy.

Atualmente a tecnologia e os sistemas automatizados têm se tornando cada vez mais comuns nos mais diversos tipos de aplicação. Desde sistemas digitais, onde a automação depende apenas de um conjunto lógico de estados, transições e eventos, até sistemas de controle dinâmico, onde é necessário o conhecimento e conseqüente modelo matemático do sistema do qual se deseja automatizar.

Entretanto, mesmo com os avanços tecnológicos e a capacidade computacional cada dia melhores existem ainda aplicações onde a complexidade do sistema torna o modelamento matemático inviável. Um exemplo disso trata-se do assunto apresentado neste trabalho: um sistema de controle de temperatura em salas através do uso de ar condicionados.

Utilizando-se uma abordagem de controle convencional seria necessário um modelamento matemático do ambiente, levando em conta, portanto, todas as trocas de calor (radiação, condução e convecção), geometria das salas e objetos em seu interior, produção de calor por equipamentos nele instalados, perturbações externas (alguém abrindo uma janela, por exemplo), além de diversos outros fatores. A partir deste modelo extremamente complexo, seria gerado um sistema de controle tão ou mais complexo quanto o ambiente.

Nesses tipos de aplicação, o que torna inviável o controle comum não é a impossibilidade de aplicação, mas a extrema complexidade da mesma e, portanto, a inviabilidade em larga escala.

Por isso faz-se necessário, uma forma de controle mais simples que não leve em conta tantas variáveis e que possua eficiência aceitável.

A partir dessa idéia surgiram inúmeras técnicas alternativas de controle que, a partir de um modelo complexo, seja capaz de gerar um sistema que possua uma confiabilidade tolerável e reduza-o a um nível de simplicidade que torne o projeto viável. Dentre as diversas alternativas surgiu a Lógica *fuzzy*.

2.1 Lógica Fuzzy

A forma humana de raciocinar a partir de grandezas inexatas é o que torna o raciocínio humano diferenciado das máquinas. A capacidade de atribuir e interpretar um conjunto de variáveis não exatas e gerar uma resposta aceitável é o que nos capacita a solucionar quase que intuitivamente problemas extremamente complexos e de difícil modelagem. É baseando-se neste conceito de lógica inexata que se insere a lógica *fuzzy*.

Depois de uma série de tentativas frustradas em desenvolver um sistema de controle para uma máquina a vapor utilizando técnicas convencionais, incluindo PID, o Professor Mamdani, do Queen Mary College da Universidade de Londres, obteve êxito utilizando para isso um sistema *fuzzy*. Alavancada por este sucesso a tecnologia foi difundida e surgiram, assim, uma série de aplicações utilizando controladores deste tipo.

Um sistema *fuzzy* pode ser interpretado como um modelo que utiliza variáveis lingüísticas ao invés de numéricas e, por isso, trata-se de uma lógica muito mais parecida com a forma humana de pensar e agir. Utilizando um conjunto de regras lingüísticas imprecisas, um sistema é capaz de traduzi-las e controlar um processo.

Em um modelo desse tipo não é possível provar que se chegou a um controle ótimo do sistema e, aliás, não é esse o objetivo deste tipo de controle. O objetivo maior, e a grande vantagem da lógica *fuzzy*, é a redução significativa na complexidade do projeto visto que não é necessário o modelamento do sistema e nem grandes deduções matemáticas.

Dessa forma, as principais vantagens de uma modelagem *fuzzy* são a simplicidade e a possibilidade do programador humano aplicar os seus conhecimentos quase que intuitivamente em um sistema de controle.

2.2- O CONTROLADOR FUZZY

O controlador *fuzzy*, pelo fato de utilizar-se de um conjunto de regras lingüísticas, busca imitar um especialista humano. Dessa forma, não é necessária uma formulação matemática do sistema através de uma ou mais equações. O banco de regras que será utilizado durante o seu funcionamento terá a finalidade de imitar as atitudes tomadas por um suposto controlador humano e, com isso, analisar o sistema através das entradas produzindo as devidas ações de controle.

Utilizando-se de um conjunto de regras e ações de controle do tipo “se/então”, o programador humano gera um sistema cuja eficiência depende diretamente de sua análise e da relevância deste conjunto de regras por ele criado.

Cada regra lingüística utilizada pelo controlador *fuzzy*, diferentemente de uma equação matemática convencional, não define uma relação exata entre entrada e saída, e sim um conjunto de valores. Assim, as variáveis utilizadas pelo controlador caracterizam um conjunto nebuloso por não expressarem valores numéricos exatos, mas variáveis lingüísticas.

Para que seja possível relacionar os valores numéricos obtidos de sensores do sistema com o conjunto de regras lingüísticas no qual trabalha o controlador, será necessária uma conversão denominada fuzzificação que transforma as variáveis convencionais em variáveis ditas nebulosas para permitir a interpretação das mesmas pelo controlador.

A seqüência de operações realizadas por um controlador *fuzzy* visa “converter” os sinais convencionais obtidos pelo controlador para o chamado conjunto nebuloso (fuzzificação), com o intuito de que estas possam ser entendidas pelo controlador. Em seguida, as entradas são avaliadas pelo conjunto de regras e são tomadas as devidas decisões (inferência). Este conjunto nebuloso de tarefas a serem tomadas é novamente convertido para que seja interpretado como sinais de controle (defuzzificação).

Essa sucessão de eventos na qual se baseia a estrutura típica de um controlador *fuzzy* é mostrada a seguir.

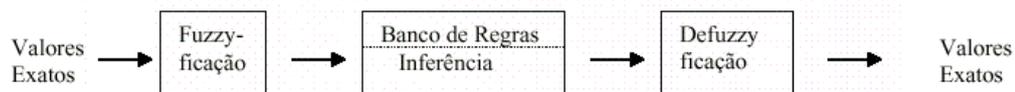


Figura 2.1 – Passos seguidos pelo controlador *fuzzy*.

A precisão e a eficiência do controlador dependerão, portanto, do banco de regras desenvolvido pelo projetista. Apesar de não serem necessários modelos sofisticados do processo em questão é de extrema importância o pré-conhecimento do sistema para obtermos assim um conjunto de regras que funcione adequadamente e com eficiência aceitável.

2.2.1- FUZZYFICAÇÃO

A primeira etapa no processo de controle pode ser entendido com uma conversão. Trata-se de transformar variáveis reais obtidas do ambiente externo para um conjunto de valores compatíveis com o que pode ser interpretado pelo controlador *fuzzy*. Basicamente, converte-se valores puramente numéricos em variáveis lingüísticas, ou seja, mapea-se o mundo real em um conjunto de variáveis difusas.

A fuzzificação faz a interface entre o mundo real e o “mundo” *fuzzy*. Não fosse por este processo, as variáveis seriam enviadas diretamente para o controlador e estas seriam impossíveis de serem tratadas, conseqüentemente, o controlador estaria incapaz de atuar.

2.2.2- INFERÊNCIA

Fazendo analogia ao controle clássico, o processo de inferência pode ser entendido como o processamento dos dados pelo controlador. A diferença é que ao invés de um conjunto de instruções binárias, a lógica *fuzzy* utilizar-se-á do Banco de regras.

O Banco de regras consiste no conjunto de premissas criadas pelo programador humano com o objetivo de definir as ações de controle. Esse conjunto de regras possui a seguinte estrutura:

se <condição> **então** <ação>

Tanto a condição quanto a ação são estruturas lingüísticas que expressam um grau de verdade. Um exemplo possível de regra *fuzzy* seria:

se sensor_sala1 = muito quente **então** potência = muito alta

Nota-se que as variáveis “muito quente” e “alta” não são valores numéricos convencionais, mas sim variáveis lingüísticas. Na lógica *fuzzy* essas variáveis são vistas como funções que variam entre 0 e 1, expressando o grau de verdade. Elas são denominadas funções de pertinência.

A função de pertinência é, portanto, a curva que define o grau de pertinência de uma variável de entrada sob uma condição, ou seja, o quão verdadeira é aquela condição para

determinado valor de entrada. As funções mais comuns, e definidas pelo MatLab© são mostradas abaixo:

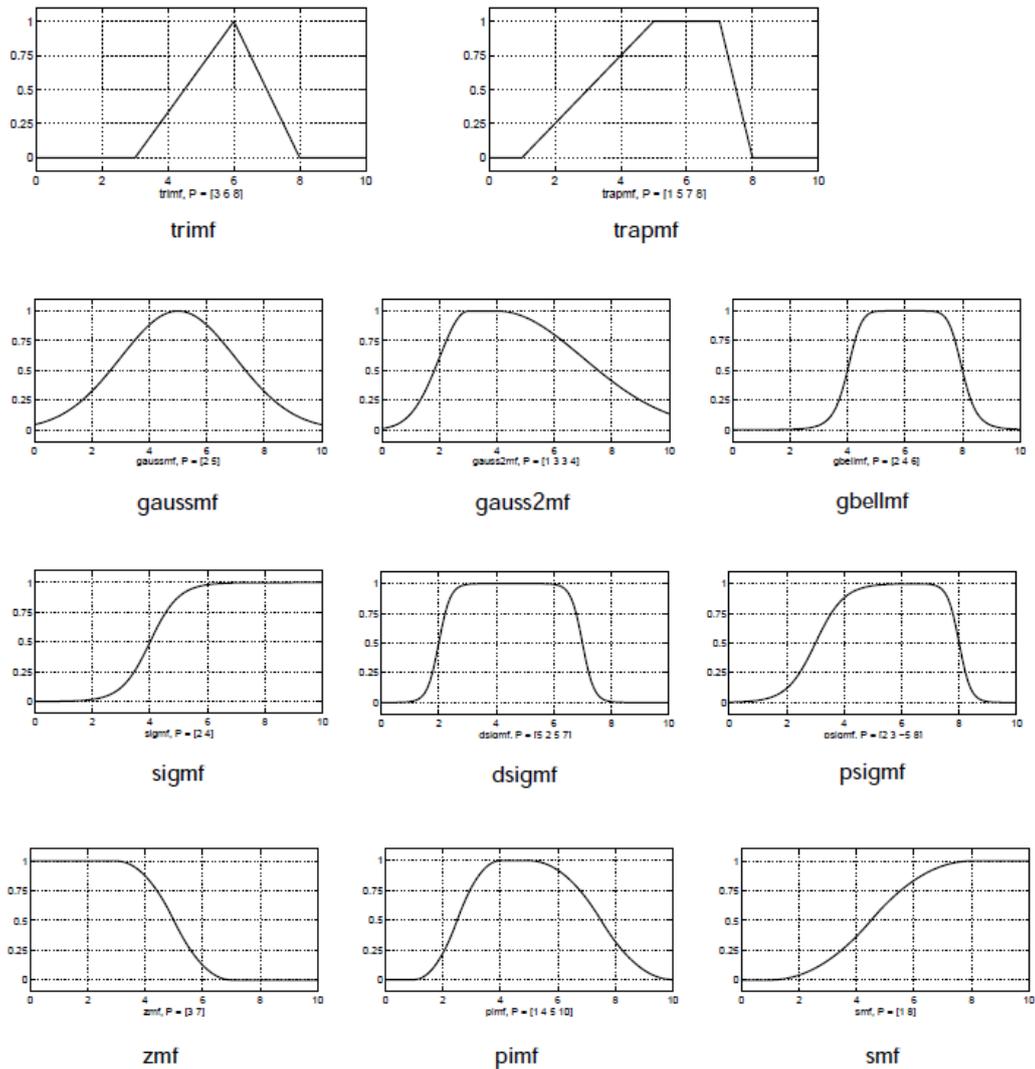


Figura 2.2 – Principais funções de pertinência disponíveis pelo MatLab.

É importante ressaltar que a faixa de valores correspondente ao eixo X das funções de pertinência serão ajustadas de acordo com cada tipo de entrada tratada, podendo, portanto variar de acordo com a aplicação. Já eixo Y, por se tratar do grau de verdade ou pertinência da

variável, possui uma faixa de valores fixa (entre 0 e 1), independentemente do tipo de dado de entrada.

A escolha de qual tipo de função utilizar deve ser feita a critério do projetista, e baseando-se principalmente no comportamento desejado do sistema com relação a cada tipo de dado de entrada. Deve ficar claro que podem ser usadas diferentes tipos de função de pertinência para diferentes dados de entrada em um mesmo conjunto de regras, dependendo do efeito desejado para cada uma.

Deve-se ainda ter em mente que as funções mostradas são apenas modelos que exemplificam cada uma delas, sendo assim esse formato pode variar convenientemente, ajustando-se apenas alguns parâmetros de cada função tais como inclinação, posição do pico, etc.

2.2.3- DEFUZIFICAÇÃO

O processo de defuzzificação consiste em gerar as saídas numéricas a partir dos valores obtidos durante o processo de inferência. Essa etapa é essencial para o correto funcionamento do sistema já que as variáveis nebulosas não são entendidas pelo sistema convencional e, portanto, não podem ser enviadas sem que antes ocorra uma “tradução” das mesmas.

Dessa forma, pode-se entender o processo de defuzzificação como uma interface entre a lógica fuzzy e o sistema real. Um procedimento no qual sem ele todos os anteriores não fariam nenhum efeito.

Existe uma série de métodos que podem ser utilizados. Os mais comuns são:

- Máximo
- Média dos máximos
- Centróide
- Altura
- Altura Modificada

A forma com que cada um desses processos é aplicado não será objeto de estudo neste trabalho e, portanto, não será explicada em detalhes. O importante é saber, que assim como as

funções de pertinência, o método de defuzificação também deve ser uma escolha do projetista, e que essa escolha influirá de forma decisiva na saída do sistema e, portanto, deve ser feita de maneira a obter relação mais fiel possível entre a saída desejada e a obtida.

3 CARACTERIZAÇÃO DO AMBIENTE

Este capítulo tem por objetivo introduzir algumas idéias básicas, exemplos e conceitos de sistemas de controle dando ênfase ao controlador fuzzy.

Quando se trata de controle de temperatura, o modelamento do ambiente de trabalho é de fundamental importância. Seja um modelo matemático complexo ou uma simples descrição das dimensões do ambiente, essa etapa é fundamental e uma das primeiras no projeto do sistema.

As dimensões do ambiente, bem como o número de salas nele presente definirão, por exemplo, a quantidade de aparelhos de refrigeração necessários. Informações como o número de pessoas que o freqüentam por dia, e o tipo de atividade desenvolvida nos ajudam a estimar a carga térmica do local e por conseqüência a potência do sistema de refrigeração necessária para atender à demanda. Uma cozinha e um escritório de advocacia, por exemplo, ambos com as mesmas dimensões exigirão características diferentes do sistema de ar condicionado obviamente devido à atividade desempenhada no ambiente.

Algumas destas características devem ser previamente conhecidas para que se dimensione corretamente o sistema a ser instalado no ambiente.

Outras características como temperatura externa e interna, nível de irradiação solar, umidade relativa média, etc, precisam ser monitoradas não apenas para o projeto do sistema de refrigeração, mas também para o sistema de controle implementado, dessa forma, torna-se necessária uma rede de sensoriamento para obtê-las continuamente. Esses sensores fazem parte da malha de realimentação do sistema, e são eles que determinarão o comportamento do mesmo.

A proposta deste trabalho é, por meio de uma rede Zigbee (que será descrita no capítulo 4), ler dados de um conjunto de sensores espalhados pela sala e enviá-los para um computador central. Este, através do Software Matlab, irá processar os dados recebidos e, por meio da estratégia de controle escolhida enviar a um módulo atuador os seguintes possíveis comandos:

- “0” – Acionar apenas o sistema de ventilação e desativar todos os sistemas de resfriamento do ar.
- “1” – Acionar apenas o sistema evaporativo de resfriamento (bomba d’água + ventilador).
- “2” – Acionar apenas o sistema convencional de resfriamento (compressor + ventilador).
- “3” – Acionar sistema duplo (compressor + bomba d’água + ventilador).
- “4” – Desligar todos os sistemas.

A disposição dos módulos sensores no ambiente está mostrado na figura 3.2 de acordo com a numeração correspondente (“1” a “4”).

A função e os sensores colocados em cada módulo são:

1. Módulo Coordenador: Responsável pela recepção dos dados de todos os sensores e envio dos mesmos via porta serial para o Software Matlab. O coordenador também recebe da mesma forma os comandos do Matlab e os envia através da rede ZigBee para o módulo atuador.
2. Módulo Interno: Responsável por 5 medidas; Temperatura e umidade dentro do ar condicionado entre a manta do sistema evaporativo e as serpentinas do sistema convencional (vide anexo 1); Temperatura e umidade na saída do ar condicionado; Irradiação térmica na sala através de um sensor TY7321A1009.
3. Módulo externo: Responsável pelas medidas de temperatura, umidade e irradiação solar no ambiente externo.
4. Módulo móvel: Responsável pelas medidas de temperatura, umidade e velocidade do vento no interior da sala. Este é o único módulo do sistema com mobilidade total, ou seja, pode ser instalado em qualquer posição da sala. Por questão de convenção todos os testes foram realizados com este módulo sobre a mesa de reunião como mostrado na figura.
5. Módulo atuador: Responsável por ligar ou desligar os sistemas de acordo com os comandos recebidos pelo módulo coordenador.

A implementação da rede ZigBee, bem como a aquisição de dados dos sensores e comunicação com módulo atuador foi feito baseando-se no trabalho de Ávila e Saloio, (2009), portanto, a caracterização dos sensores utilizados pode ser visto no trabalho dos mesmos.

O projeto desenvolvido neste trabalho foi posto em prática na sala de reuniões do GRAV da Universidade de Brasília. A sala conta com um sistema de refrigeração híbrido podendo ser operado em três modos básicos de resfriamento: I) ar condicionado convencional, através de um compressor que resfria um gás dentro de serpentinas; II) ar condicionado evaporativo, no qual uma bomba de água umidifica um conjunto de “mantas” de papel que preenchem um duto por onde o ar deverá percorrer e perder energia para as moléculas de água; III) ar condicionado híbrido, onde os sistemas convencional e evaporativo são habilitados visando, não apenas a economia de energia, mas também a possibilidade de controle da temperatura e umidade do ambiente. A figura 3.1, a seguir, retirada do trabalho de Ávila e Saloio (2009) mostra o sistema completo instalado na sala.



Figura 3.1 - Foto do sistema híbrido de climatização instalado na sala do GRAV na Universidade de Brasília

A planta baixa do GRAV está mostrada na figura 3.2. Trata-se de um ambiente com 15.45 m² e 79.6 m³ de ar.



Figura 3.3 Foto do *dumper* do sistema de refrigeração. À esquerda com a entrada semi-aberta e a direita fechada.

- A abertura e fechamento do *dumper* estão eletricamente associados ao ligamento e desligamento do compressor. Ou seja, o comando de acionamento do compressor automaticamente liga o motor responsável por abrir o *dumper* e vice-versa.
- O sistema evaporativo de resfriamento nada mais é do que uma manta de celulose, um compressor de água e o sistema de ventilação. Ao acionarmos este sistema a bomba se encarrega de molhar a manta e o ventilador faz com que o ar circule pela mesma, perdendo parte da sua energia para as moléculas de água.
- A manta de celulose, que deve ser molhada durante o funcionamento do sistema evaporativo, encontra-se imediatamente após a entrada de ar do ambiente externo, ou seja, todo ar que vem de fora passa, necessariamente, antes pela manta. Essa característica, como será citado mais a frente, pode ser um problema em dias em que a umidade relativa do ar esteja muito alta.

Maiores detalhes do funcionamento e especificações técnicas deste sistema podem ser encontradas em anexo e no trabalho de Flores (2009) em sua tese de mestrado “Sistema híbrido de climatização visando conforto térmico e eficiência energética”.

4 AS REDES SEM FIO

Este capítulo trata de uma breve motivação à criação das redes wireless, em seguida trata-se do padrão Zigbee e a forma de aplicação deste no trabalho.

4.1- MOTIVAÇÃO

A complexidade e o grande número de dispositivos eletrônicos nos quais convivemos atualmente, podem gerar diversos transtornos com relação à grande quantidade de fios e cabos em determinados ambientes. Quando se fala em tecnologias *wireless* a primeira idéia que nos remete é a eliminação dos custos relacionados ao cabeamento entre dispositivos separados por uma longa distância. Entretanto a aplicação dessa tecnologia não se restringe a esse tipo de rede.

Além da transmissão de dados em longas distâncias, e dos custos relacionados a esse cabeamento, um dos fatores que impulsionaram as tecnologias wireless foi a necessidade de maior organização dos dispositivos eletrônicos em ambientes domésticos ou industriais. Seja por uma questão de segurança, custo ou organização, a utilização desse tipo de sistema não se restringe a longas distâncias, e o seu uso tem se tornado cada dia mais difundido.

Dessa forma, além dos padrões mais comuns de transmissão sem fio para longas distâncias alguns outros padrões têm surgido com o intuito de eliminar a necessidade de cabeamento em dispositivos pouco distantes uns dos outros.

4.2- PADRÃO ZIGBEE

O zigbee é definido como um padrão de comunicação sem fio com pequeno alcance, baixo custo de implementação e baixa potência de operação. O baixo custo do sistema é praticamente um pré-requisito do mesmo para sua popularização, por se tratar de um padrão de comunicação a pequena distância, seu custo com relação à instalação de fios deve ser vantajoso. Trata-se de um padrão aberto com características que o tornam adequados à aplicação em dispositivos de sensoriamento e controle extremamente presentes no nosso dia-a-dia.

O padrão ZigBee define as camadas física, de controle de acesso ao meio(MAC), de rede e de aplicação, segundo o modelo OSI, formando a chamada pilha ZigBee (ZigBee stack).

O protocolo é resultado do trabalho da ZigBee Alliance, um consórcio de mais de 70 empresas com o intuito de desenvolver e promover o padrão. Ele surgiu a partir da necessidade vista pelas empresas em se encontrar um padrão que aliasse baixo custo e baixa potência com uma maior complexidade de rede do que os padrões encontrados anteriormente no mercado.

Dentre os padrões de comunicação mais comumente utilizados antes do desenvolvimento do ZigBee podemos citar o Bluetooth e o Wi-fi, que apesar de confiáveis e extremamente difundidos não abrangiam todas as características desejadas para os tipos de aplicações no qual foi desenvolvido esse padrão.

O modelo de rede do padrão inclui basicamente três tipos de dispositivos de acordo com suas atribuições na rede. São eles; dispositivo final, coordenador e roteador. Um modelo simplificado de uma rede ZigBee é mostrado na figura a seguir.

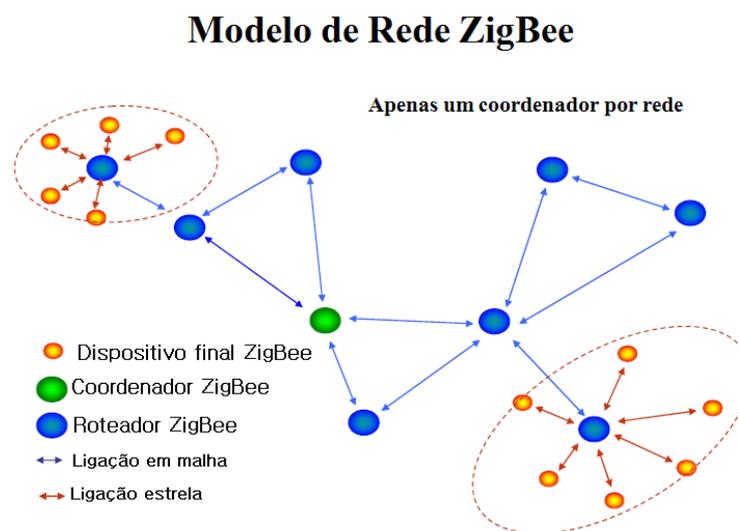


Figura 4.1 - Modelo de Rede ZigBee. (Fonte: ZigBee Training - Technical Learning Center)

O modelo proposto define que para cada rede, deve haver apenas um coordenador. Dispositivo este, que terá completo controle sobre a rede e, portanto, terá a função de gerenciá-la.

Os dispositivos finais serão responsáveis por desempenhar as funções requeridas pelo coordenador, seja ele um dispositivo de sensoriamento ou atuação. Caso a distância entre o coordenador e um ou alguns dispositivos finais não permita que haja comunicação entre eles, o padrão ZigBee define um terceiro tipo de dispositivo, com a função de intermediar a comunicação entre dispositivos finais e coordenador. Este é o Roteador, cuja tarefa será de estender a comunicação da rede entre distâncias maiores do que a alcançada utilizando-se apenas dois dispositivos.

Nota-se também no modelo dois tipos distintos de ligação entre dispositivos. A ligação entre os dispositivos finais e o respectivo roteador ou coordenador é chamada ligação estrela, e esta não permite a comunicação entre dois dispositivos finais diretamente.

Já no caso da ligação entre os diversos roteadores, a comunicação não é restrita entre eles e o coordenador. Neste caso é possível que haja troca de informações entre dois elementos roteadores da rede, e esta é a chamada ligação em malha.

A seguir ilustramos outras características do padrão de comunicação ZigBee.

- Máximo de 65535 nós por coordenador.
- Banda de operação de 2.4GHz, 915MHz e 868MHz.
- Baixo custo.
- Boa penetração por paredes, devido à frequência de operação, fazendo com que seja adequado ao uso doméstico ou comercial.
- Fácil instalação.
- Consumo médio de 3µA em Standby e 35mA em operação.
- Utiliza o padrão 802.15.4.
- Taxas de 250Kbps.

4.2.1- BITCLOUD

O Bitcloud é uma plataforma de desenvolvimento de software desenvolvida pela Atmel com o intuito de facilitar a implementação de aplicações de redes sem fio em determinados microcontroladores e transmissores de rádio da empresa. Através do Bitcloud tornou-se possível a integração entre o microcontrolador e o transmissor de radiofrequência em aplicações que utilizam o protocolo ZigBee.

É importante deixar claro que este trabalho não tem por objetivo tratar de todas as funções e aplicações possíveis para o Bitcloud. O objetivo dos textos que se seguem é dar uma visão geral do comportamento e as principais características desta plataforma. Informações mais completas e uma relação com todas as funções e características podem ser encontrados em Queiroz e Azevedo (2009).

O Bitcloud possibilita grande facilidade no desenvolvimento de aplicações de redes sem fio, visto que oferece um conjunto vasto de APIs que torna a comunicação entre microcontrolador e transmissor de rádio muito menos dispendiosa para o desenvolvedor do software. Ao mesmo tempo o Bitcloud mantém completa compatibilidade com o padrão ZigBee.

A arquitetura de pilha do Bitcloud está mostrada na figura 4.2:

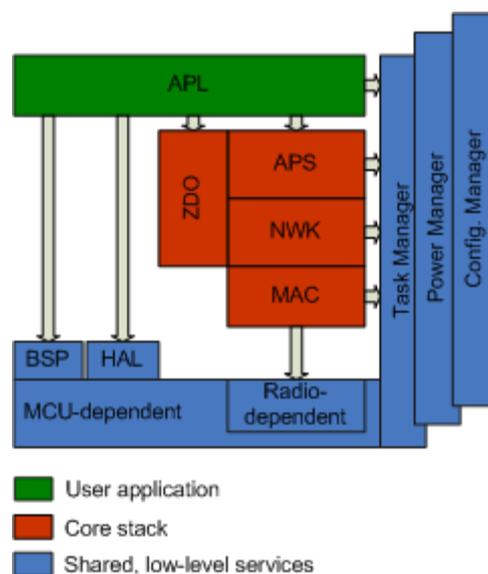


Figura 4.2 – Pilha Bitcloud (Bitcloud Stack)

No topo da pilha temos os níveis de maior visibilidade e transparência ao desenvolvedor. A medida que descemos na pilha encontramos camadas cada vez mais “obscuras” do ponto de vista da aplicação.

A camada no APS, mostrada no topo da pilha provem a camada com a maior visibilidade para aplicação.

Paralelamente às camadas APS e NWK temos a API ZigBee Device Object (ZDO). Esta camada é responsável pelas principais funções de manutenção da rede e gerência de energia. Funções de início, reset, formação, entrada na rede, sleep e wakeup estão presentes nesta camada

4.2.2- FORMAÇÃO DA REDE

O processo de formação da rede Zigbee através do BitCloud consiste em 3 passos básicos:

1. Configuração dos parâmetros de rede
2. Requisição de início da rede
3. Confirmação de inicialização da rede.

O funcionamento e características principais de cada um dos passos são citados nos tópicos adiante.

4.2.2.1- CONFIGURAÇÃO

Compreende os passos necessários para a definição do funcionamento e formação da rede. Para esta etapa são utilizados alguns parâmetros, entre eles:

CS_CHANNEL_PAGE - Define a modulação de frequência utilizada. Valores 0, 2 ou 5 são aceitos para diferentes bandas de frequência de acordo com a coluna “Channel Page (decimal)” da Tabela 4.1. É importante ressaltar que a disponibilidade ou não deste recurso depende do módulo que se está utilizando.

CS_CHANNEL_MASK - Define a mascara da rede. Trata-se de número de 32 bits que define quais canais serão utilizados pela rede naquela frequência. Isso porque uma mesma rede ZigBee é capaz de funcionar com diferentes canais em cada dispositivo. Este parâmetro deve ser configurado de acordo com a coluna “Channel numbers (decimal)”.

Tabela 4.1- Relação entre os parâmetros de configuração da rede e bandas de frequência utilizada (fonte: BitCloud User Guide)

Channel page (decimal)	Frequency Band	Channel numbers (decimal)	Modulation scheme	Data rate, kbps
0	868 MHz	0	BPSK	20
	915 MHz	1 - 10	BPSK	40
	2.4 GHz	11 - 26	O-QPSK	250
2	868 MHz	0	O-QPSK	100
	915 MHz	1 - 10	O-QPSK	250
5	780 MHz	0 - 3	O-QPSK	250

CS_EXT_PAN_ID – Trata-se de um identificador de 64 bits utilizado por todos os dispositivos que compartilham uma mesma rede. Este identificador é verificado no momento da requisição de associação de um dispositivo a uma rede. Na rede desenvolvida neste trabalho o valor definido para este parâmetro teve que ser modificado para evitar conflitos devido à existência de outra rede no ambiente.

Os dispositivos que desejam ingressar em uma mesma rede devem possuir o mesmo CS_EXT_PAN_ID. Caso seja configurado em 0x0 em um roteador ou em um *end device*, então o dispositivo ingressará na primeira rede que encontrar.

Durante a formação, o coordenador da rede gera outro identificador, o PAN ID, que é um identificador muito mais "leve" (16 bits). Este será anexado ao frame das mensagens trocadas entre os dispositivos. Como essa identificação é gerada randomicamente, caso o coordenador encontre outra rede com o mesmo parâmetro ele automaticamente muda o seu PANID para evitar conflitos durante a transmissão de dados. Apesar de se tratar de uma estratégia importante para a segurança da rede, este procedimento pode gerar problemas caso o coordenador, por alguma razão, seja momentaneamente desligado. Isso porque ao se reiniciar utilizando as mesmas configurações anteriores o coordenador pode reconhecer a sua

própria rede como conflitante e gerar automaticamente outro PANID perdendo assim conexão com os dispositivos da rede anterior.

Para evitar tais conflitos é possível definir previamente o PANID dos dispositivos através da função CS_WriteParameter() como mostrado no exemplo a seguir:

```
bool predefPANID=true; //global variable
uint16_t nwkPANID=0x1111; //global variable
...
CS_WriteParameter(CS_PREDEFINED_PAN_ID_ID, &predefPANID);
CS_WriteParameter(CS_NWK_PANID_ID, &nwkPANID);
```

Dessa forma o PANID não será gerado randomicamente o que evita perdas de conexão causadas por um reset indesejável do dispositivo coordenador.

4.2.2.2- REQUISIÇÃO DE FORMAÇÃO DA REDE

A requisição para início da rede é feita através da função ZDO_StartNetworkReq(). Como parâmetro desta função será passada um estrutura do tipo ZDO_StartNetworkReq_t. A definição desta estrutura é feita no documento “BitCloud Stack Documentation” e esta transcrita a seguir.

```
typedef struct
{
    ZDO_StartNetworkConf_t confParams;
    void (*ZDO_StartNetworkConf) (ZDO_StartNetworkConf_t *conf);
} ZDO_StartNetworkReq_t;

typedef struct
{
    uint8_t      activeChannel;
    ShortAddr_t  shortAddr;
    PanId_t      PANid;
    uint64_t     extPANid;
    ShortAddr_t  parentAddr;
    ZDO_Status_t status;
} ZDO_StartNetworkConf_t;
```

Portanto, a requisição de início da rede é feita atribuindo as configurações desejadas à estrutura ZDO_StartNetworkReq_t e passando-a como parâmetro para a função assíncrona ZDO_StartNetworkReq().

4.2.2.3- CONFIRMAÇÃO DE CRIAÇÃO, ENTRADA E SAÍDA NA REDE

Feita a requisição de início/entrada na rede, a camada ZDO do BitCloud informa a aplicação do usuário sobre o resultado da operação através da função de callback `ZDO_StartNetworkConf()`. Essa função retorna um argumento do tipo `ZDO_StartNetworkConf_t` que contém informações como o status de formação ou entrada na rede, endereço obtido pelo nó, etc.

Após a entrada de um dispositivo *end device* na rede, o seu respectivo nó ou roteador recebe uma notificação através da função `ZDO_MgmtNtkUpdateNotf()` cujos argumentos informam entre outros, o status da operação e endereço do dispositivo final que acaba de ser conectado. Essa notificação não é feita na entrada de um dispositivo coordenador. Caso ocorra perda de sinal por um *end device* e este, conseqüentemente, saia da rede, a mesma função `ZDO_MgmtNtkUpdateNotf()` é a responsável por informar o dispositivo sobre o problema para que o mesmo tome as ações apropriadas para o reingresso. Após receber essa mensagem a aplicação deve tomar alguma ações, mas não deve iniciar os procedimentos de reingresso na rede dentro dessa mesma função. A função deverá apenas definir os parâmetros necessários para que esse procedimento seja feito quando o controle voltar para a rotina principal. O resultado da tentativa de reingresso do dispositivo na pilha será informado também pelo `ZDO_MgmtNtkUpdateNotf()`. Caso o procedimento de reingresso na rede falhe, a aplicação será responsável pela mudança de parâmetros da rede e uma nova tentativa, caso necessário.

Em muitas aplicações pode ser necessário que um determinado dispositivo se retire da rede quando alguma determinada ação ocorrer. Em um local com mais de uma rede ZigBee operando, pode ser interessante ao usuário poder retirar um dispositivo de uma rede e transferi-lo para outra através de um simples toque de um botão. Para que essa operação seja possível é necessária uma função que retire determinado dispositivo da rede. Isso é feito através da `ZDO_ZdpReq()` executada como mostrado abaixo:

```

static ZDO_ZdpReq_t zdpLeaveReq;
...
//set corresponding cluster ID
zdpLeaveReq.reqCluster = MGMT_LEAVE_CLID;
zdpLeaveReq.dstAddrMode = EXT_ADDR_MODE;
zdpLeaveReq.dstExtAddr = 0; // for own node address shall be 0
zdpLeaveReq.ZDO_ZdpResp = ZDO_ZdpLeaveResp; // callback

//for own node address shall be 0
zdpLeaveReq.req.reqPayload.mgmtLeaveReq.deviceAddr = 0;
//specify whether to force children leave or not
zdpLeaveReq.req.reqPayload.mgmtLeaveReq.removeChildren = 0;

//specify whether to perform rejoin procedure after network leave
zdpLeaveReq.req.reqPayload.mgmtLeaveReq.rejoin = 1;
ZDO_ZdpReq(&zdpLeaveReq); // request network leave

```

Como pode ser visto, um dos parâmetros passados para essa função é o endereço do nó que se deseja retirar da rede. Esse parâmetro permite que o dispositivo retire-se da rede ou ainda que mande uma requisição de retirada para outro dispositivo, permitindo maior autonomia no gerenciamento da rede.

Definido todos os parâmetros da rede e com os dispositivos conectados estão finalizadas as rotinas necessárias para o início da troca de dados entre os módulos. A forma com que isso é feito e alguns exemplos de configuração podem ser encontrados no documento “BitCloud User Guide” encontrado no site da Atmel.

5 ESTRATÉGIAS DE CONTROLE

Apresentaremos a seguir as estratégias de controle utilizadas para o sistema de refrigeração em questão, destacando pontos fortes e fracos de cada uma e as conclusões obtidas.

Após implementada a rede com todos os módulos enviando as leituras dos sensores para o módulo coordenador, e este estando apto a enviar mensagens para o módulo atuador tornou-se necessário a implementação de uma estratégia de controle para mantermos a temperatura o mais próximo possível à temperatura desejada. Por conveniência utilizaremos neste trabalho o termo “temperatura de referência” como para a temperatura desejada.

5.1- OPÇÃO 1 – CONTROLE LIGA E DESLIGA

O controle denominado “liga-desliga” é a estratégia mais comumente utilizada em sistemas de refrigeração. Trata-se basicamente de um controle com histerese onde o sistema deve ser ligado quando a temperatura atingir um limiar superior e desligado ao atingir um limiar inferior.

Apesar de eficiente em acompanhar a temperatura de referência sob as mais diversas condições ambientais este tipo de controle não tem a economia de energia como co-objetivo. Desta forma optou-se por não utilizá-lo. Maiores informações sobre esta estratégia de controle, bem como uma comparação com um sistema fuzzy pode ser visto no trabalho de Ferreira Jr, 2009.

5.2- OPÇÃO 2 – CONTROLE PID

O controle PID (proporcional-integral-derivativo) é uma das formas mais utilizadas em controle de temperatura, velocidade ou posição de sistemas cujo modelo matemático já é previamente conhecido ou pode ser facilmente obtido de forma experimental.

Neste tipo de função de transferência temos geralmente como entrada o erro do sistema e como saída tensão, corrente, velocidade, etc, dependendo do tipo de variável que se deseja controlar. Tendo em mãos um modelo matemático do sistema que o descreva de forma

precisa, o controle PID nos permite obter uma resposta rápida, com pouco sobre-passo e erro nulo em regime permanente para a entrada de referência constante.

No sistema em questão temos dois pontos negativos com relação à esta estratégia de controle:

1. O sistema de refrigeração adotado não possui regulador de potência, ou seja, existem apenas os estados ligado e desligado para o mesmo. A forma de contornar este problema é através da conversão da saída do PID para um sinal de PWM. Entretanto, esta solução gera outra questão: não podemos ligar e desligar o compressor do ar condicionado e o ventilador muito rapidamente em função de diminuir suas vidas úteis ou até mesmo queimá-los.
2. Como dito no texto acima, a eficiência do controlador PID está diretamente ligada à precisão do modelo matemático do sistema. Ou seja, para um modelo complexo como o da sala em questão onde há trocas de calor das mais diversas maneiras e cujo modelamento é extremamente complexo, o uso do controlador PID de forma adequada exigirá cálculos dispendiosos e de alto grau de complexidade.

Apesar das limitações do controlador PID para este sistema, decidiu-se utilizá-lo como forma de comparação ao modelo *fuzzy* adotado neste trabalho. A forma de implementação e maiores detalhes serão explicitados mais a frente.

5.3- OPÇÃO 3 – CONTROLE FUZZY

A estratégia de controle *fuzzy* como explicada anteriormente permite o controle de sistemas cuja complexidade dificulta o projeto de controladores que exigem um modelo matemático.

Apesar de eliminar dispendiosos cálculos matemáticos, o controlador *fuzzy* obtêm um resultado não-ótimo, ou seja, a escolha de um controlador *fuzzy* envolve a análise de uma questão crucial; precisão no controle versus necessidade de um modelo matemático complexo. Como o objetivo deste trabalho não é a obtenção de um modelo extremamente preciso do ambiente e a necessidade do uso de pulso de PWM com elevado período reduzirá drasticamente a precisão de qualquer controlador, a utilização de um controlador *fuzzy* foi visto como a estratégia mais adequada.

6 PROJETO DOS CONTROLADORES

A seguir procuramos explicar todas as etapas realizadas durante o desenvolvimento do trabalho, mostrando alguns problemas e soluções encontrados.

6.1- CONTROLADOR PID

Como citado anteriormente, a implementação de um controlador PID adequado exige um modelo matemático bastante preciso do sistema ou a utilização de métodos relativamente complexos para a obtenção do mesmo. Apesar de alguns trabalhos em andamento terem por objetivo a obtenção precisa de tal modelo, atualmente ainda não está disponível.

A forma adotada para estimar a função de transferência do sistema e tornar possível a implementação de um controle PID foi através da resposta ao degrau do sistema. Apesar de pouco preciso por desconsiderar variações de fatores externos como umidade e temperatura externa, esta foi a forma encontrada para projetar o controlador.

A curva característica foi obtida utilizando-se um sistema por histerese entre as temperaturas de 20°C e 24°C, valores estes escolhidos por considerar que o sistema funcionará, na maior parte do tempo, dentro desta faixa.

O controlador por histerese foi facilmente implementado a partir do software Matlab e a curva obtida durante algumas horas de teste pode ser vista na figura 6.1.

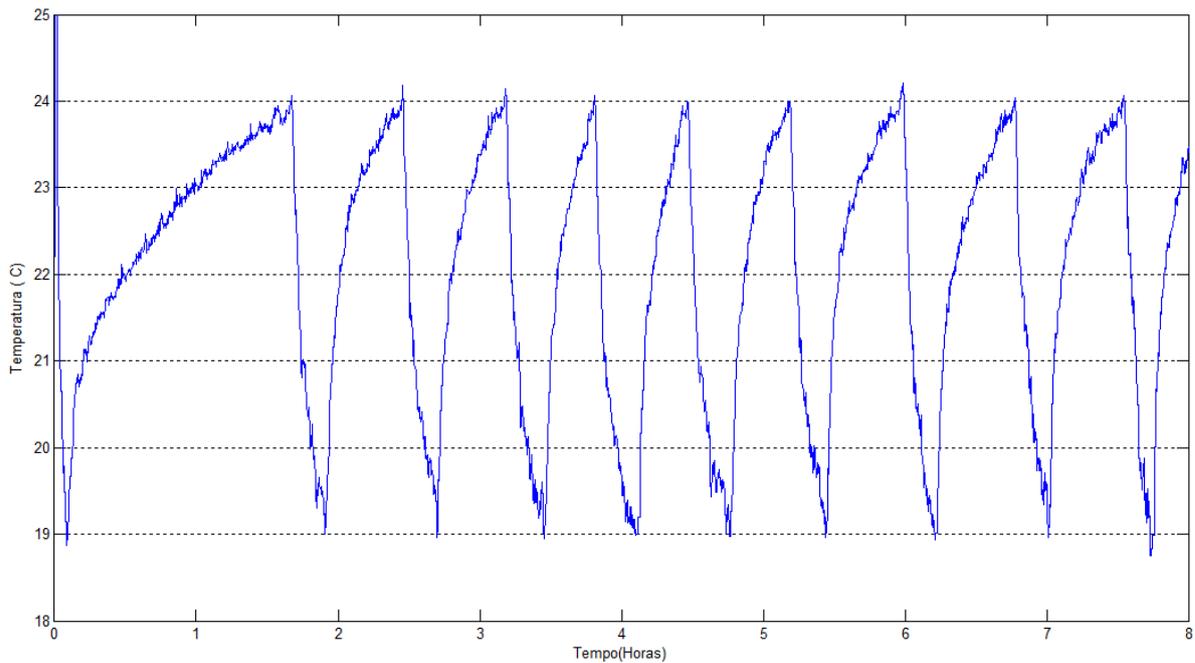


Figura 6.1 - Comportamento da temperatura utilizando um controlador liga-desliga às 16:00 horas no mês de outubro de 2009

A partir desta curva e utilizando a GUI *ident* do Matlab foi possível determinar a função de transferência do sistema para as condições externas naquele momento. Nesta GUI tem-se a opção de escolher entre funções de transferência de ordem zero, um ou dois, bem como as opções de utilizar um integrador, delay zero na função de transferência.

O modelo escolhido foi de uma função de transferência com um pólo diferente de zero. A função de transferência de primeira ordem obtida foi:

$$G(s) = \frac{19,2}{894,17s + 1}$$

A partir desta FT utilizou-se o recurso *sisotool* do Matlab para o projeto do controlador.

Na versão 7.6 (R2008) do MatLab existe a ferramenta *Automated Tuning*. Com o uso desta ferramenta o software faz o cálculo de um controlador com alguns parâmetros, que podem ser configurados previamente.

Uma vez obtido o controlador, o passo seguinte é implementá-lo no sistema real. A forma escolhida para isso foi através do Simulink, uma ferramenta gráfica do MatLab, que facilita bastante o processo de implementação do controlador, bastando para isso a utilização

de um bloco chamado “Discrete PID Controller” cuja saída é o sinal de controle. Deve-se deixar claro que o bloco citado, apesar de possuir saída discreta funciona com os mesmos parâmetros da função de transferência em domínio “s” (contínua). A transformação do domínio contínuo para discreta é feita pelo Simulink.

O modelo completo do controlador PID em ambiente Simulink pode ser visto na figura 6.2.

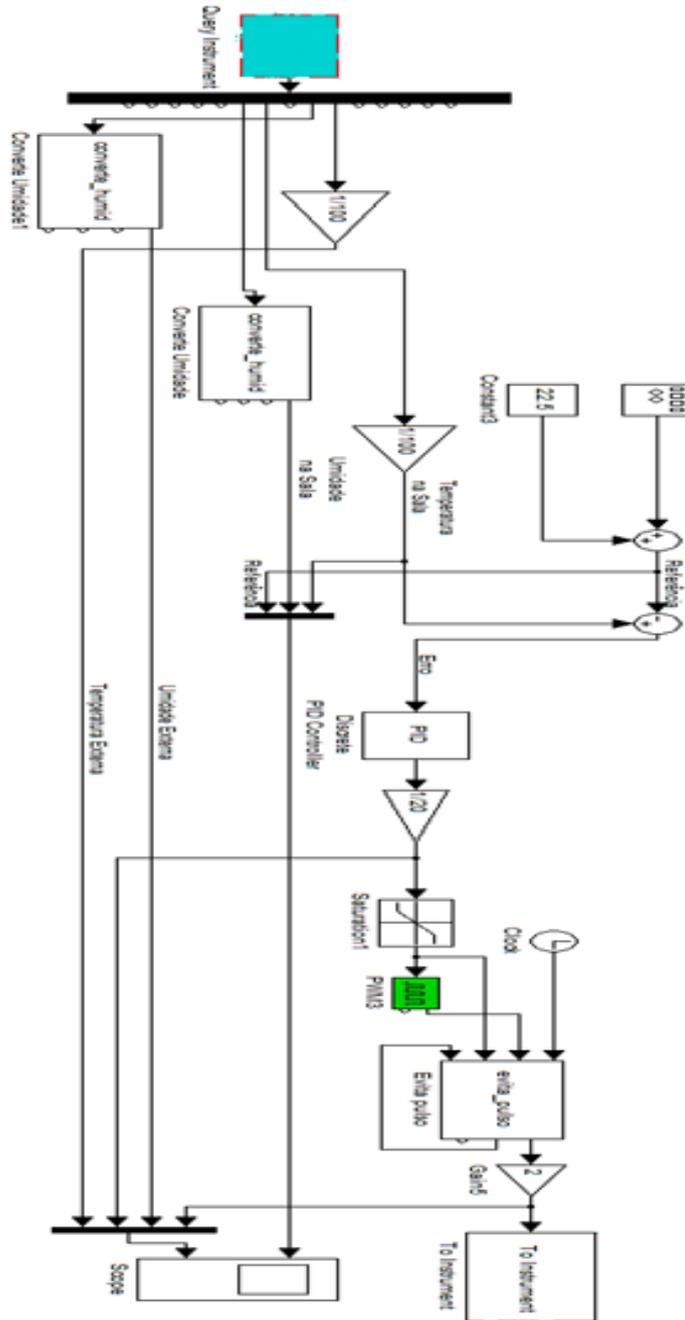


Figura 6.2 - Implementação do controlador PID no Simulink.

É importante citar que o controlador final utilizado não foi o mesmo do projetado em ambiente Matlab. A partir de diversos testes e ajustes, chegou-se ao implementado. Obviamente a necessidade de ajustes e testes posteriores ao projeto dá-se devido à falta de um modelo preciso do sistema em questão.

Observa-se, também, que não houve estratégia de utilização do sistema híbrido nem evaporativo no controlador PID. A justificativa para isso é que este sistema é extremamente dependente da umidade externa. Na verdade, podemos entendê-lo como um modelo com duas perturbações significativas, temperatura e umidade externas. O funcionamento adequado do controlador em questão dependeria fortemente da obtenção de modelos para estas perturbações e tornaria o projeto muito mais complexo. Esse assunto será tratado com maiores detalhes mais à frente quando for explicada a forma de implementação do controle *fuzzy*. Como o objetivo do controlador PID projetado é apenas de servir como modelo alternativo de comparação ao controle *fuzzy*, decidiu-se por utilizar apenas o sistema convencional de refrigeração.

Algumas questões são importantes para entender o funcionamento do controlador implementado na Figura 6.2:

- Os blocos “Query Instrument” e “To Instrument” são blocos do próprio Simulink cuja função é implementar a comunicação serial entre o módulo coordenador e o software. Observa-se na saída do “Query Instrument” um demultiplexador com 15 saídas. Isso é necessário, pois o módulo coordenador envia um único pacote de dados contendo as informações de todos os sensores e atuadores presentes na rede. A descrição de todos esses dados é feita no capítulo 3. O demultiplexador tem a função de separar cada um desses dados para que possam ser convenientemente utilizados pelo sistema de controle. Observa-se ainda que boa parte dos dados de saída do demultiplexador não está sendo utilizado, isso porque são sensores com funções muito específicas cujas informações não são relevantes ao controle. Por exemplo, pode-se citar os dados de umidade e temperatura no interior do equipamento cujos valores não têm nenhuma influência no sistema proposto.
- A saída do bloco “evita pulso” por definição pode ser 0 (zero) ou 1 (um),

entretanto, as informações que são “entendidas” pelo módulo coordenador e que, portanto, deverão ser enviadas via serial são as mensagens 0, 1, 2 ou 3, respectivamente correspondentes aos estados “liga ventilador”, “liga sistema evaporativo”, “liga sistema convencional” e “liga sistema duplo”. Dessa forma, como escolheu-se utilizar apenas o sistema convencional de refrigeração, foi colocado na saída do bloco “evita pulso” um ganho de 2, fazendo com que este possa ser diretamente conectado ao bloco referente ao envio de dados para a serial (“Query Instrument”). Ou seja, caso a saída esteja em 0 será enviada a mensagem “0” referente ao estado “liga ventilador” e caso esteja em 1 será enviada mensagem “2” referente à “liga sistema convencional” via serial para o módulo coordenador. Esta mensagem será, em seguida, repassada via RF ao módulo atuador que tomará as ações necessárias.

- Observa-se também que o bloco “converte umidade” possui quatro saídas da qual apenas uma está sendo utilizada. Este bloco foi criado devido a uma necessidade encontrada neste trabalho em “transformar” o valor retornado pelo sensor SHT71 em um valor de umidade relativa. Isso porque o valor retornado pelo sensor deve ser substituído em uma equação de segundo grau dada pelo fabricante para que se obtenha a real medida da umidade. Como se trata de um modelo com números da ordem de 10^{-6} houve dificuldades em fazer as transformações necessárias no próprio microcontrolador e, por isso, decidiu-se por fazer as conversões em ambiente Simulink. O modelo da equação proposta pelo fabricante é:

$$RH_{\text{linear}} = c_1 + c_2 \cdot SO_{RH} + c_3 \cdot SO_{RH}^2 \text{ (\%RH)}$$

Onde SO_{RH} é o valor retornado pelo sensor e RH_{linear} é o valor de umidade relativa propriamente dito. De acordo com a precisão escolhida (12 ou 8 bits), os valores de c_1 , c_2 e c_3 podem ser, respectivamente para o SHT’s V4 e SHT’s V3, como pode ser observado nas tabelas 6.1 e 6.2:

Tabela 6.1 - Valores de c_1 , c_2 e c_3 para SHT V4

SO_{RH}	c_1	c_2	c_3
12 bit	-2.0468	0.0367	-1.5955E-6
8 bit	-2.0468	0.5872	-4.0845E-4

Tabela 6.2 - Valores de c_1 , c_2 e c_3 para SHT V3

SO_{RH}	c_1^*	c_2^*	c_3^*
12 bit	-4.0000	0.0405	-2.8000E-6
8 bit	-4.0000	0.6480	-7.2000E-4

Sendo assim são quatro as possibilidades de acordo com modelo e precisão escolhidos.

Com o intuito de criar um bloco genérico, que possa ser utilizado em qualquer modelo de sensor SHT71 e com qualquer precisão, decidiu-se por implementar as 4 operações simultaneamente. Dessa forma, caso deseje-se utilizar outra configuração do sensor, basta escolher a saída adequada do bloco. Neste trabalho utilizou-se o SHT V4 com precisão de 12 bits.

O bloco “evita pulso” foi criado devido a uma necessidade observada no decorrer do trabalho e seu funcionamento será explicado no próximo tópico “CONTROLADOR FUZZY”.

6.2 - CONTROLADOR FUZZY

A escolha de um controlador *fuzzy* como a principal estratégia de controle neste trabalho foi por acreditar que este, quando bem elaborado, pode trazer inúmeras vantagens na relação desempenho versus complexidade de implementação. Mesmo se houvessem características detalhadas do ambiente com relação às perdas de calor, o sistema com um controlador PID não seria um produto adequado na medida em que mudanças físicas no ambiente resultariam em grandes diferenças no desempenho do ar condicionado. Até mesmo mudanças relativamente simples como a instalação de cortinas ou aumento na área da sala gerariam a necessidade de obter, novamente, os modelos precisos do ambiente para esta nova

configuração.

Obviamente o controlador *fuzzy* também está sujeito à perdas de desempenho devido às mudanças no ambiente. Contudo, se bem projetado, este tipo de sistema pode possuir maior robustez e, principalmente, maior facilidade de ajuste. Notou-se um exemplo claro desses aspectos durante o desenvolvimento deste trabalho.

Os testes do controlador *fuzzy* tiveram início no começo do mês de outubro de 2009, período marcado pelas chuvas na cidade de Brasília. Dessa forma, a temperatura no ambiente externo não passava de 30°C nas horas mais quentes do dia. Para estas condições foi projetado o primeiro controlador. Ele tinha como parâmetro de entrada apenas o erro da temperatura e funcionava com um erro sempre inferior à $\pm 1^\circ\text{C}$. Passados cerca de 30 dias, com as chuvas um pouco menos frequentes e com a umidade relativa do ar bastante elevada, foi observado um aumento significativo na temperatura do ar no ambiente externo, temperatura esta que atingia facilmente 35 graus e chegava a picos de 40°C em alguns dias. Sob estas novas condições o controlador antes projetado já não conseguia mais alcançar a temperatura de referência ficando sempre cerca de meio grau acima.

Tendo em vista a nova situação, duas eram as opções: projetar um novo controlador para estas novas condições de ambiente externo ou aumentar a robustez do controlador já existente adicionando como entrada a temperatura externa.

A segunda opção foi escolhida e o novo controlador leva em conta não mais apenas o erro (temperatura interna menos referência), mas também a temperatura externa da sala para calcular o valor da saída. A idéia é que quanto mais quente a temperatura do ar no ambiente exterior mais difícil será de manter a temperatura na referência desejada e, portanto, será preciso valores de *duty cycle* muito mais altos. Após vários testes e ajustes o controlador foi implementado. Para verificar o funcionamento do mesmo e mostrar o quanto a temperatura externa realmente influi no desempenho, foi desenvolvido o seguinte teste: ao invés de colocar como variável de entrada para o controlador a temperatura externa real, coloca-se um valor constante de 27.5°C “enganando” o controlador. Assim, a temperatura externa variou entre cerca de 31,5°C à 34,5°C no período do teste (2 horas).

O resultado deste teste pode ser visto na figura a seguir. São mostrados de cima para baixo a temperatura externa, temperatura interna e temperatura de referência.

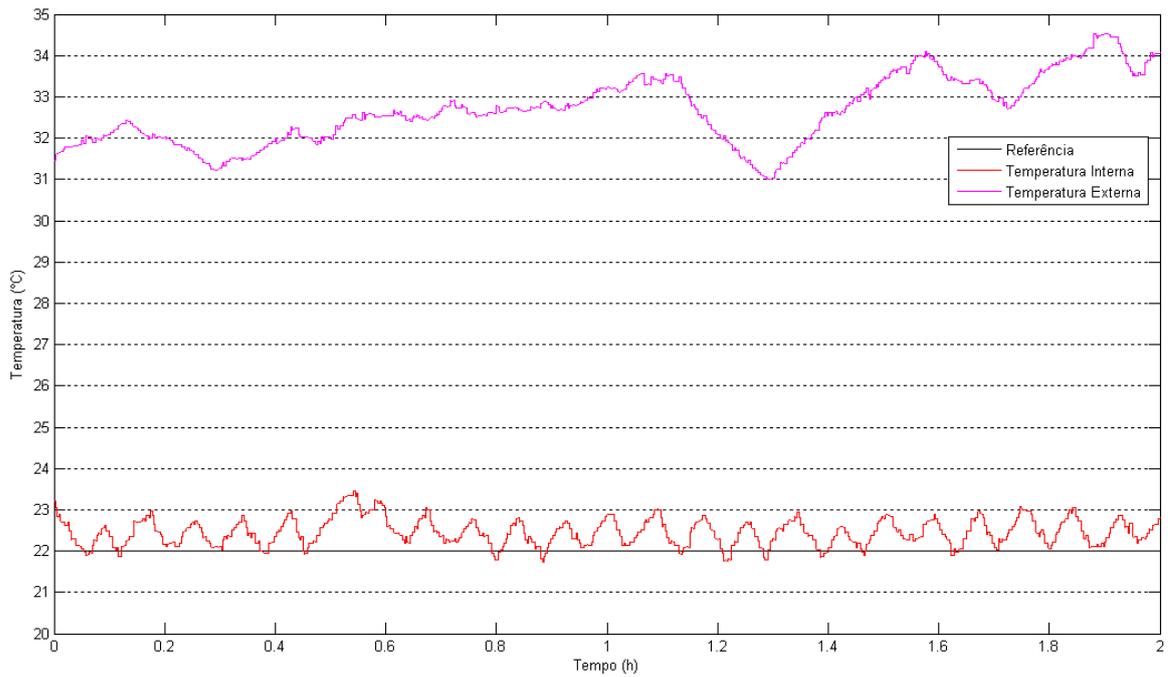


Figura 6.3- Comportamento do sistema com temperatura externa do sistema abaixo da real

Como pode ser visto, a faixa de operação do sistema ficou acima da temperatura de referência, isso porque o controlador estava funcionando como se a temperatura externa estivesse fixa em 27.5°C , enquanto na verdade ela estava bem acima, comprovando a forte dependência da temperatura externa para o funcionamento do sistema.

Logo em seguida, para manter as condições as mais próximas possíveis e comprovar o funcionamento do controlador, foi feito outro teste utilizando a temperatura externa real como entrada do sistema. O resultado é mostrado na figura 6.4.

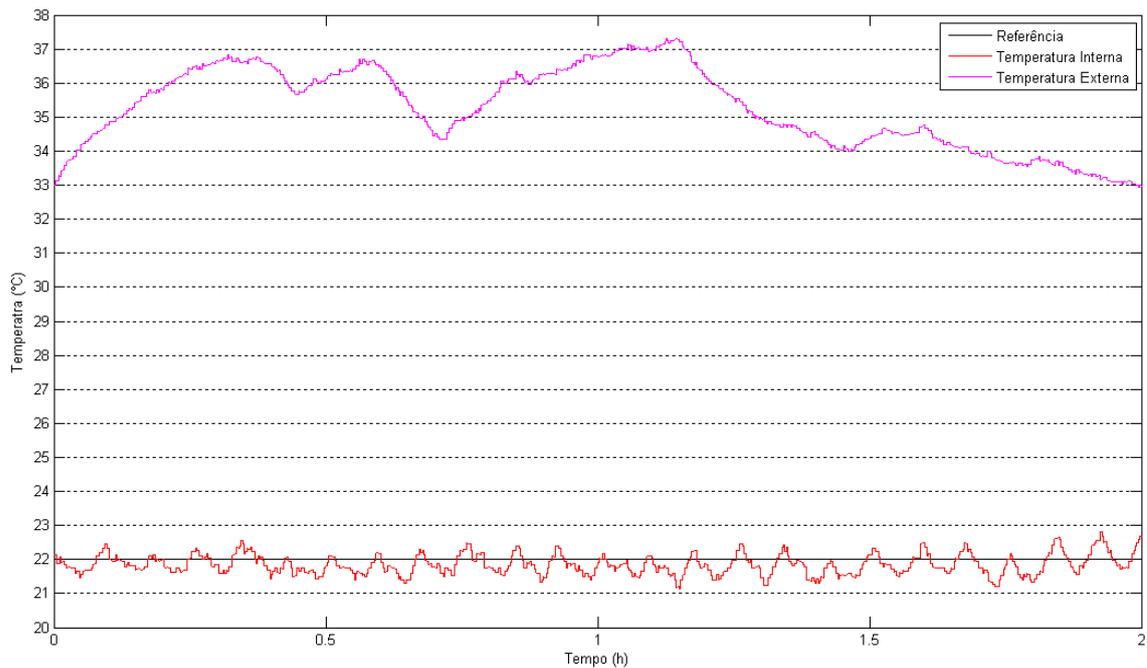


Figura 6.4- Funcionamento do controlador *fuzzy* utilizando a referência correta de temperatura externa

Vê-se que agora o sistema acompanha corretamente a temperatura de referência com um erro sempre inferior à $\pm 1^{\circ}\text{C}$.

Um terceiro teste foi realizado a fim de levar em conta o número de pessoas no interior do ambiente. O teste foi realizado durante o período de uma reunião onde haviam quatro pessoas sentadas e conversando ao redor da mesa. Durante este período novamente colocou-se no controlador um valor de temperatura externa fictícia de 36°C , enquanto que a temperatura real variou aproximadamente entre 27°C e 33°C . Sob condições normais, a temperatura média do ambiente ficaria abaixo da referência já que o controlador estaria “superestimando” o sistema. Entretanto, como pode ser observado na figura 6.5, não é isso que ocorre. A temperatura média no interior ficou, durante o período da reunião, bastante próxima à temperatura de referência, mostrando que a carga térmica com esta quantidade de pessoas no ambiente é equivalente ao ambiente vazio e com 36°C de temperatura externa.

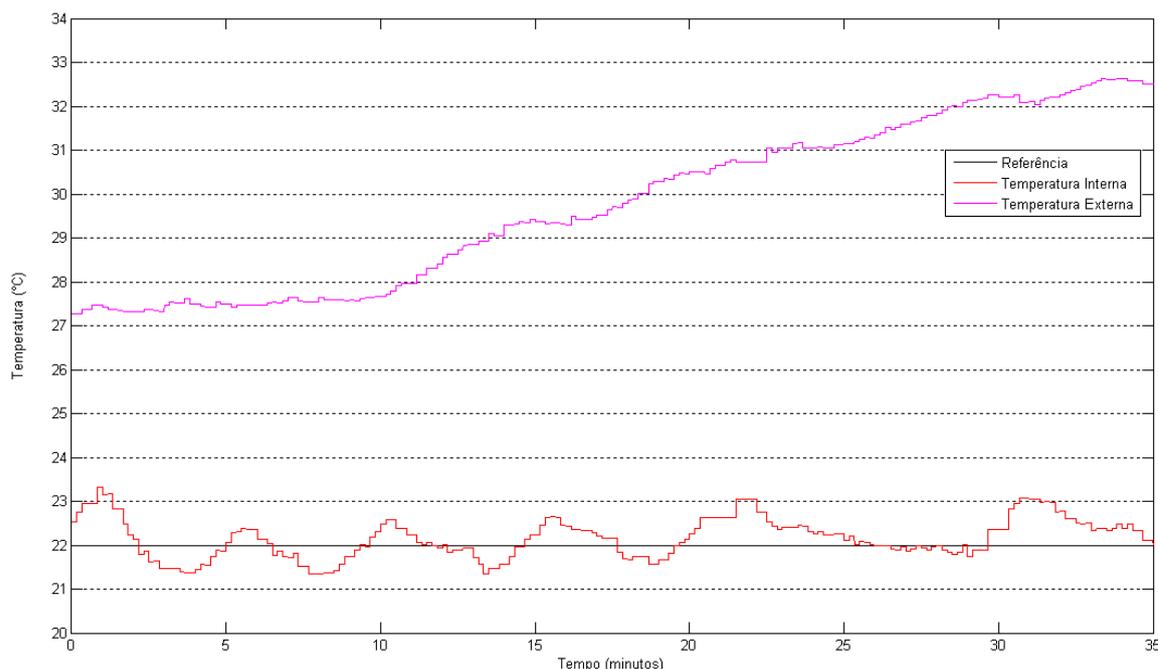


Figura 6.5- Comportamento do controlador *fuzzy* "superestimado" com 4 pessoas no ambiente

Obviamente, o fato de se trabalhar em uma sala de reunião relativamente pequena faz com que este fator (número de pessoas no ambiente) tenha maior peso do que teria em ambientes maiores. Como atualmente não há recursos para estimar o número de pessoas presentes no ambiente, fica impossível fazer um controle que leve em conta tal parâmetro. O objetivo deste teste foi simplesmente provar que, neste ambiente, este fator pode e deve ser levado em conta para o aumento da robustez do controlador.

A forma de implementar o controlador no sistema em questão foi através do bloco "Fuzzy Logic Controller" do Simulink. Este bloco permite o uso de controladores *fuzzy* projetados a partir da ferramenta "FIS editor" do MatLab.

O controlador final, bem como o seu conjunto de regras e funções de pertinência, podem ser vistos nas figuras 6.6 a 6.10:

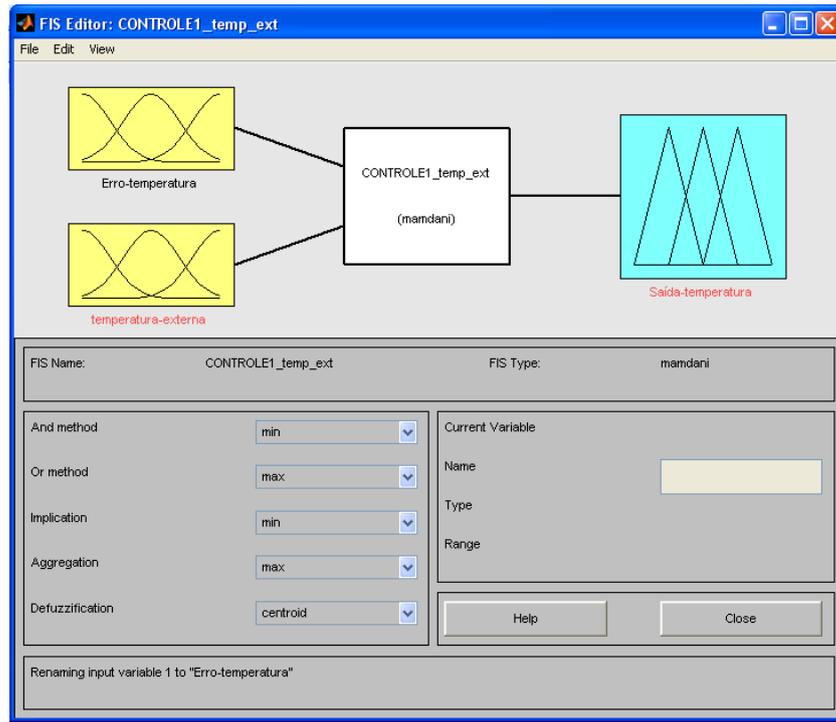


Figura 6.6- Controlador *fuzzy* - Modelo implementado em MatLab

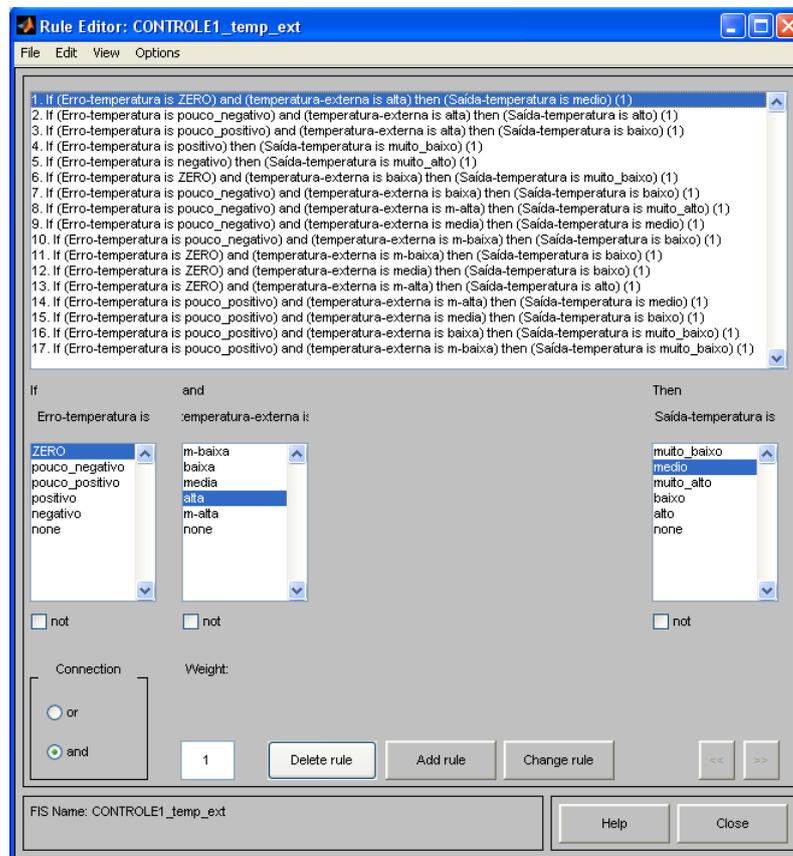


Figura 6.7 - Controlador *fuzzy* - Modelo implementado em MatLab

Pode-se reparar no conjunto de regras a forma gradual que a “Saída-temperatura” aumenta a medida que a temperatura externa aumenta. Obviamente o objeto é que a mantenhamos a temperatura ambiente controlada para qualquer condição de temperatura externa

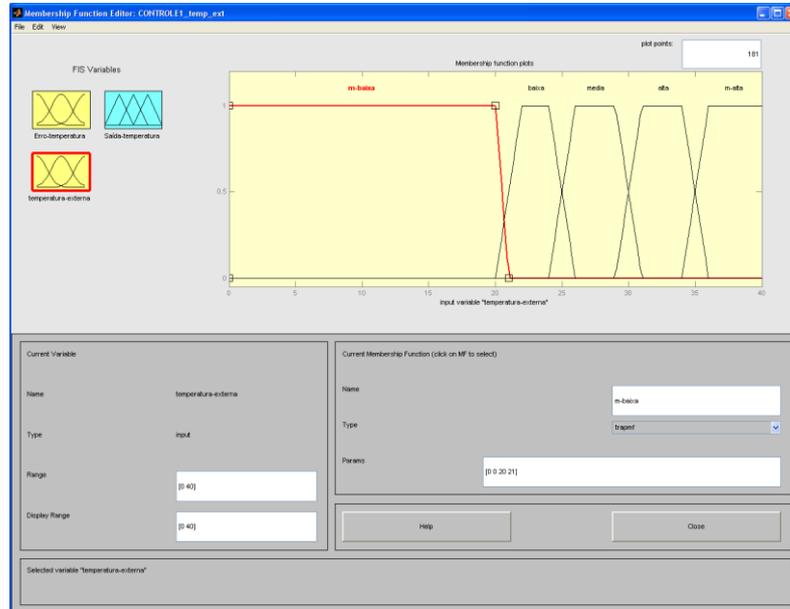


Figura 6.8 - Controlador *fuzzy* - Modelo implementado em MatLab

A forma, e as características finais de cada função de pertinência foram obtidas a partir de ajustes realizados durante a realização do trabalho.

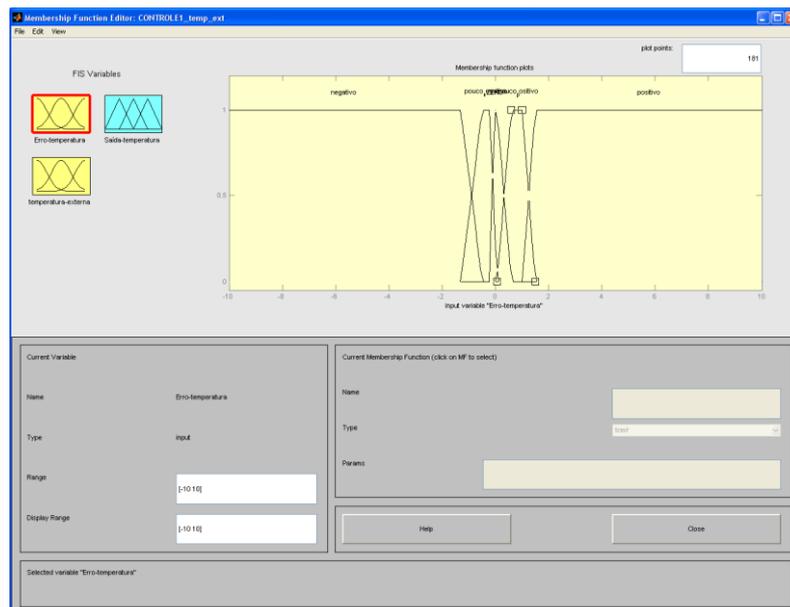


Figura 6.9 - Controlador *fuzzy* - Modelo implementado em MatLab

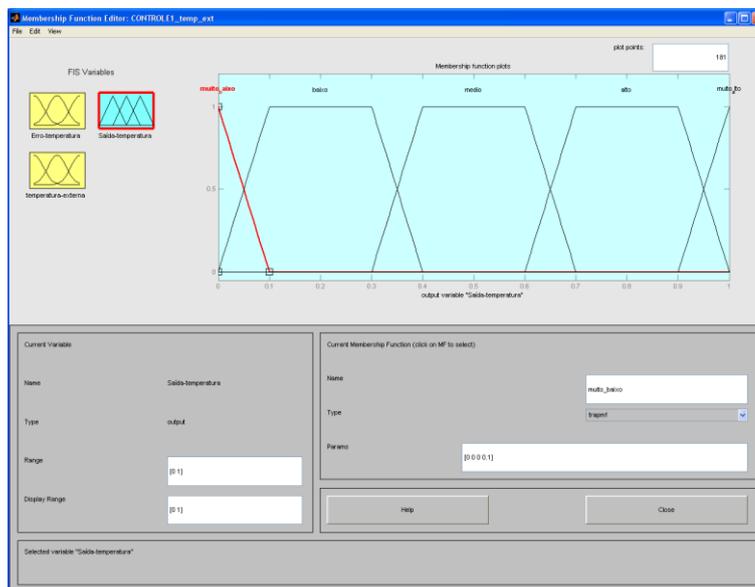


Figura 6.10 - Controlador *fuzzy* - Modelo implementado em MatLab

A partir da tabela 6.1 pode-se ver claramente como o conjunto de regras é influenciado pela temperatura externa.

Tabela 6.3 – Conjunto de regras Fuzzy

Erro/Temperatura Externa	m-baixa	Baixa	Média	Alta	m-alta
Pouco positivo	Muito Alto	Muito Alto	Muito Alto	Muito Alto	Muito Alto
Positivo	Muito baixo	Muito Baixo	Baixo	Baixo	Médio
Zero	Baixo	Baixo	Médio	Médio	Alto
Pouco Negativo	Baixo	Médio	Médio	Alto	Muito alto
Negativo	Muito Baixo	Muito Baixo	Muito Baixo	Muito Baixo	Muito Baixo

Para realizar a comunicação entre o módulo e o Simulink foi desenvolvida uma interface serial que permite a troca de dados com o computador. Além disso, o módulo foi programado para enviar a cada 10 segundos um pacote de dados correspondente aos valores lidos dos sensores por cada um dos módulos. Estes dados são recebidos pelo Simulink através do bloco “Query Instrument”, da *Toolbox Instrumentation*..

Finalizadas as questões referentes ao controlador de temperatura o passo seguinte foi desenvolver uma lógica de controle para ativação do sistema evaporativo. Novamente, tinha-se duas opções possíveis:

1. Utilizar o sistema evaporativo como forma de controle da umidade no interior da sala.
2. Utilizar o sistema evaporativo como estratégia de economia de energia.

No primeiro caso seria utilizado o sistema híbrido apenas para umidificar o ar, visando o máximo de conforto térmico possível. Já na segunda opção seria utilizado o sistema evaporativo o máximo possível, visando “desafogar” o sistema convencional responsável pela maior parte do consumo de energia e ao mesmo tempo evitando que o ar no interior da sala ficasse excessivamente seco.

A vantagem do primeiro sistema é, principalmente, o controle da umidade, fator fundamental para a manutenção dos elementos presentes em certos ambientes. Alguns museus, por exemplo, devido às características de seus acervos, podem desejar manter a umidade relativa do ar controlada dentro de determinada faixa.

Já na segunda opção a principal vantagem é, como já dito, a economia de energia. Visto que o sistema evaporativo consome cerca de 80% a menos de potência que o ar condicionado convencional, a utilização deste sistema, o máximo possível, fará com que se tenha consideráveis taxas de economia.

Visto que o ambiente em questão não exige um controle de umidade criterioso e o objetivo deste trabalho é a economia de energia foi escolhido para implementação o segundo modelo.

Uma vez decidida a estratégia, o próximo passo foi a decisão de como esta seria implementada. A primeira idéia que pode ser pensada é ligar o ar condicionado evaporativo o tempo todo, já que assim obteria-se o máximo de economia de energia possível. Entretanto,

existem duas limitações cruciais com relação ao uso deste sistema. A primeira é no que diz respeito ao excesso de umidade no ar. Ou seja, ao ligar o evaporativo, o ar que entra no ambiente será constantemente “molhado”. Com o tempo, a umidade pode atingir valores intoleráveis podendo gerar oxidações em sistemas elétricos, mofos e até mesmo curtos-circuitos devido à condensação da água presente no ar.

A segunda, e não menos importante, limitação do sistema evaporativo é a questão da capacidade de resfriamento. Este tipo de ar condicionado tem a capacidade aumentada à medida que se diminui a umidade do ar na entrada do sistema. É, portanto, um sistema ideal para locais de baixa umidade relativa média. Para o correto dimensionamento do sistema seria importante um estudo detalhado da capacidade de resfriamento do ar, sistema evaporativo presente na sala em questão, entretanto, como este comportamento nunca foi objeto de estudos anteriores, fez-se como referência a tabela 6.11 utilizada em uma apresentação de Flores (2003).

Temperatura do ar externo na entrada	25°C	30°C	35°C	40°C
Umidade Relativa	Redução de Temperatura (°C)			
30%	8,5	9,6	10,8	12,0
40%	7,1	8,0	8,8	9,7
50%	5,7	6,5	7,1	7,8
60%	4,4	5,0	5,5	5,9
70%	3,2	3,6	4,0	4,4

Figura 6.11 - Relação entre temperatura do ar externo na entrada do sistema evaporativo e queda de temperatura possível (*apud* Ferreira, 2009)

Utilizando por base estes valores pode-se, a partir das medidas de umidade e temperatura externas, calcular o quanto o sistema evaporativo seria capaz de resfriar o ar e, conseqüentemente, decidir entre ligá-lo ou não. Isso foi implementado da seguinte forma:

para cada faixa de “Temperatura do ar externo na entrada”, mostrada na tabela acima, foi obtido, através do software Excel, uma curva que relaciona a umidade relativa do ar com a redução de temperatura. Foram, portanto, obtidas 4 equações: para 25°C, 30°C, 35°C e 40°C. As equações encontradas foram:

- Para 25°C:

$$y=(0,0004*\text{humid}^2-0,1687*\text{humid}+13,251)$$

- Para 30°C:

$$y=(0,0003*\text{humid}^2-0,1786*\text{humid}+14,697)$$

- Para 35°C:

$$y=(0,0008*\text{humid}^2-0,2476*\text{humid}+17,497)$$

- Para 40°C:

$$y=(0,0011*\text{humid}^2-0,3043*\text{humid}+20,089)$$

Onde “y” é a máxima queda de temperatura possível de ser obtida pelo uso do sistema evaporativo naquelas condições.

A figura a seguir mostra o gráfico e a equação obtidos em Excel para a temperatura de 40°C.

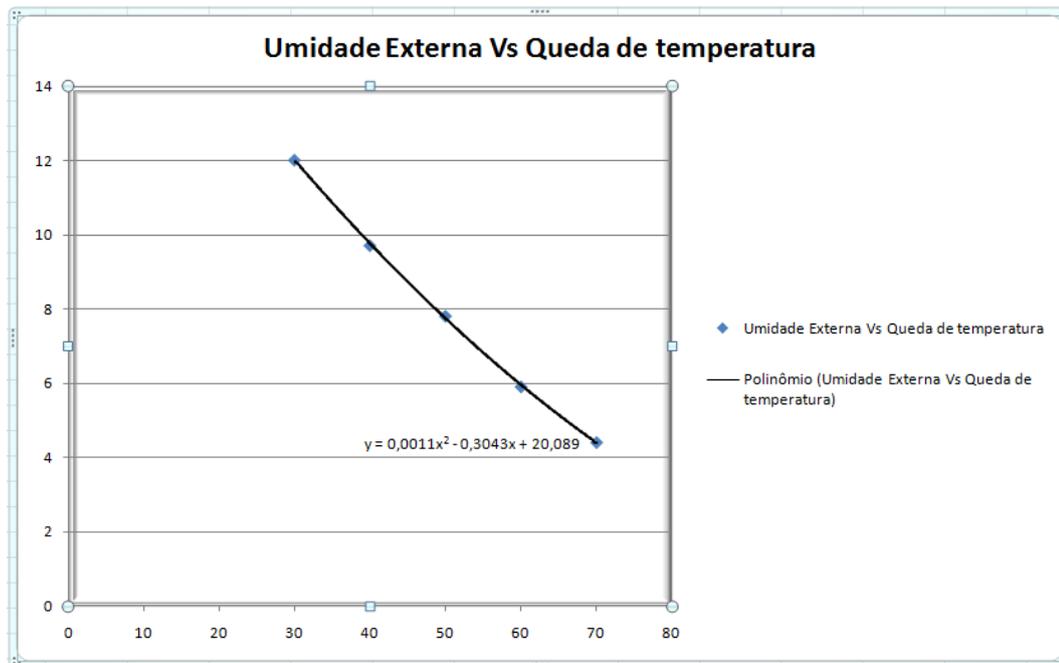


Figura 6.12 - Umidade externa versus Queda de temperatura (40°C)

Entende-se a curva acima como uma separação entre os estados aciona/desaciona do sistema evaporativo. Valores de umidade externa e queda de temperatura que definem pontos abaixo da curva habilitam o funcionamento do sistema, enquanto que valores que definem pontos acima da curva representam uma faixa na qual o sistema evaporativo não possui desempenho suficiente para resfriar o ar na temperatura desejada. Dessa forma, encontrou-se uma solução bastante eficaz para o problema de decidir qual sistema deve ser acionado (evaporativo ou convencional).

A partir destas quatro equações foi desenvolvido um bloco de Simulink para implementar a lógica de controle definida. O bloco é composto por uma “s-function” (código em .m que especifica um bloco no Simulink) nomeado como “tabela_func” e mais alguns outros blocos que evitam o funcionamento do sistema evaporativo em situações indesejadas. A “s-function” verifica em qual valor de temperatura externa o sistema está operando, (25°C, 30°C, 35°C ou 40°C) utiliza a equação correspondente e compara a queda de temperatura desejada com a queda que o sistema evaporativo é capaz de prover. Caso a queda desejada seja maior que a possível, a saída do bloco será um sinal de controle que desabilita o envio de mensagens para ligar o sistema evaporativo, caso contrário o sistema será habilitado. Além disso, o bloco desabilita o sistema evaporativo caso a umidade externa ou interna excedam um

limiar máximo, que, neste trabalho foi escolhido como 90%.

O bloco criado, bem como um trecho do código implementado em Matlab, pode ser visto a seguir:

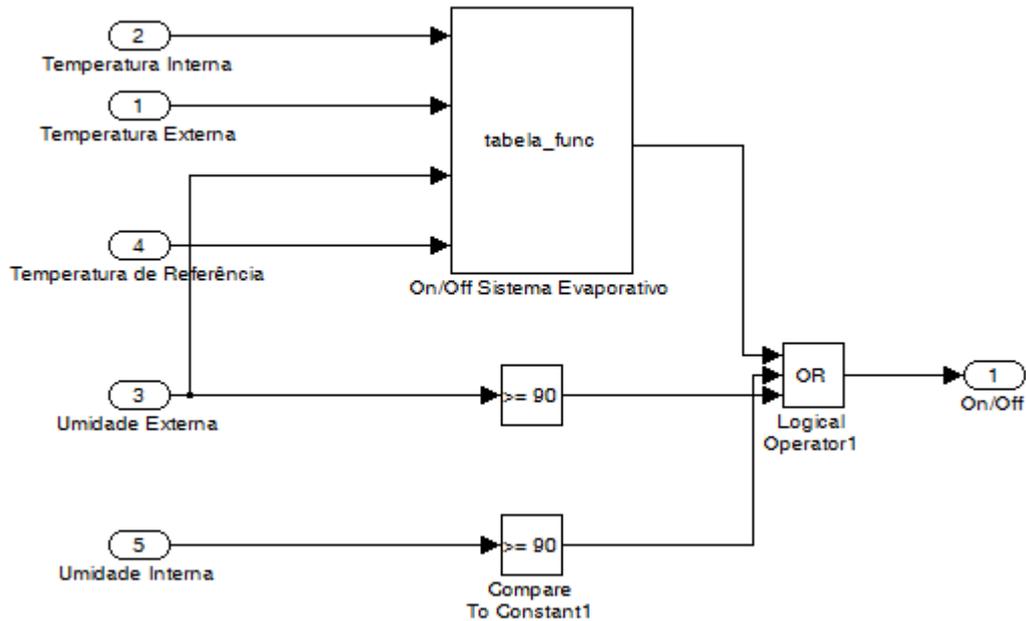


Figura 6.13- Bloco "on/off sistema evaporativo"

```

temp_int=block.InputPort(1).Data;
temp_ext=block.InputPort(2).Data;
humid=block.InputPort(3).Data;
referencia=block.InputPort(4).Data;
referencia=block.InputPort(4).Data;
queda=temp_ext-referencia;
block.OutputPort(1).Data=1;
if(temp_ext>37.5)
    y=(0.0011*humid^2-0.3043*humid+20.089)-3
    if(queda>y)
        block.OutputPort(1).Data=0;
    end
end

if(temp_ext>32.5 && temp_ext<=37.5)
    y=(0.0008*humid^2-0.2476*humid+17.497)-3
    if(queda>y)
        block.OutputPort(1).Data=0;
    end
end

if(temp_ext>27.5 && temp_ext<=32.5)

```

```
y=(0.0003*humid^2-0.1786*humid+14.697)-3
if(queda>y)
    block.OutputPort(1).Data=0;
end
```

Além de calcular a saída, este bloco imprime na janela de comando do MatLab, a cada 10 segundos, a queda de temperatura desejada e a queda de temperatura possível, segundo a função calculada. Dessa maneira, é possível, caso o sistema evaporativo esteja desabilitado, verificar qual a queda de temperatura possível e desejada naquelas condições.

É importante notar que para o cálculo da queda de temperatura possível no MatLab foram subtraídos 3 graus do resultado calculado pelas funções. Isso se deve ao fato de que a temperatura no interior da sala nunca fica igual à temperatura na saída do sistema evaporativo devido às trocas de calor ocorridas no ambiente. Ou seja, a função trata da temperatura do ar na saída do sistema evaporativo e não a temperatura da sala propriamente dita. Para que a temperatura da sala e a da saída do evaporativo fossem as mesmas seria necessário isolar termicamente o ambiente evitando assim, todos os tipos de trocas de calor possíveis.

Além dos modos convencional e evaporativo, o sistema ainda conta com o modo híbrido de operação. Nesta função tanto o compressor quanto a bomba de água do sistema evaporativo estão ativos e o *dumper* se encontra aberto. A grande vantagem desta forma de funcionamento é que a percentagem de ar que vem de fora do ambiente é resfriado ao passar pelas mantas úmidas do ar condicionado evaporativo, sendo assim, chega menos quente ao sistema convencional.

Visto que o objetivo deste trabalho é economizar o máximo de energia possível, tomou-se a decisão de utilizar também este modo de operação. Entretanto, o uso desta função está limitada ao aumento excessivo da umidade relativa do ar no interior da sala. Desse modo a estratégia utilizada para o funcionamento do sistema evaporativo está descrito na figura 6.14:

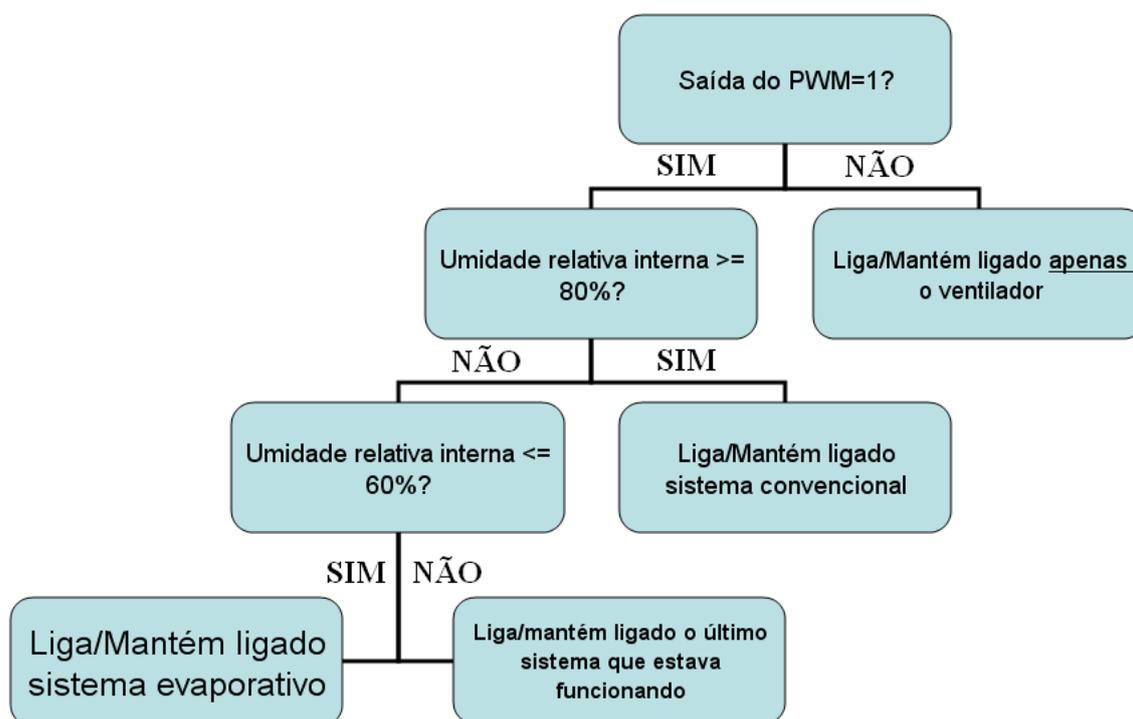


Figura 6.14 - Estratégia de funcionamento do sistema evaporativo

Pode-se dizer que o sistema em questão funciona em regime de histerese. Os valores de umidade relativa mostrados no esquemático (60% e 80%) podem ser facilmente modificados para atender a outras especificações de ambientes diferentes.

Com todas as estratégias de funcionamento definidas, o passo seguinte foi desenvolver os *firmwares* que rodarão nos módulos para adquirir os dados dos sensores e enviá-los ao módulo coordenador. Para isso foi utilizado como referência o trabalho de Ávila e Saloio (2009).

Resumidamente, a rede de sensores funcionava da seguinte maneira: a cada 10 segundos os módulos 1, 2 e 3 liam os valores de seus respectivos sensores e enviavam, cada um, um único pacote de dados com tais medições ao módulo 0. Também a cada 10 segundos, o módulo 0 (coordenador) agrupava os dados recebidos e enviava em um único pacote estas informações via serial. Estas informações são processadas pelo software MatLab que envia como resposta os comandos 1, 2, 3 ou 4, correspondendo às ações expressadas no item 4.3 “Caracterização do sistema utilizado”. Estes comandos são enviado ao módulo 4 (atuador) que acionará as saídas correspondentes. Esse procedimento é cíclico, ou seja, é repetido continuamente durante todo o funcionamento do sistema.

Pode-se resumir o funcionamento cíclico dos módulos sensor, atuador e coordenador de acordo com as figuras 6.16 a 6.18.

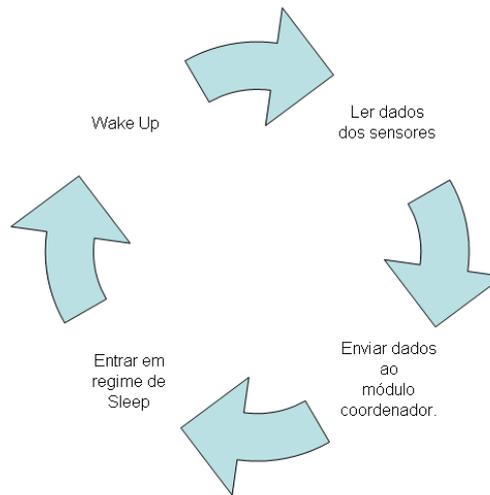


Figura 6.15 - Funcionamento do módulo sensor

Sintetizando, a rede de sensores funciona da seguinte maneira: a cada 10 segundos os módulos 1, 2 e 3 lêem os valores de seus respectivos sensores e enviam, cada um, um único pacote de dados com tais medições ao módulo 0. Terminada esta tarefa os módulos entram em regime de “sleep”, onde são desligados quase todos os seus periféricos visando economizar energia. Terminado o período de “sleep” (10 segundos), o módulo acorda e reinicia todo o processo.

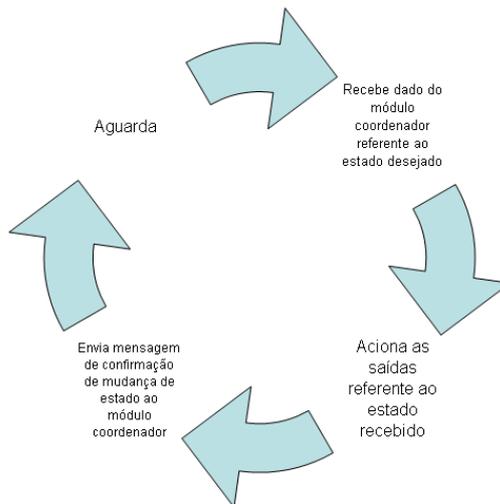


Figura 6.16 - Funcionamento do módulo atuador

O módulo atuador (vide figura 6.16) tem a tarefa de acionar e desacionar o sistema desejado, seja ele convencional, evaporativo ou híbrido. Para isso ele recebe uma mensagem do módulo coordenador referente ao estado desejado de acordo com o item 4.3 “Caracterização do sistema utilizado”. Em seguida ele aciona as saídas correspondentes àquele estado através de 3 relês de estado sólido correspondendo ao acionamento do ventilador, do compressor e da bomba d’água (sistema evaporativo). Após atualizadas as saídas, o módulo atuador envia ao coordenador uma mensagem de confirmação, informando o novo estado.

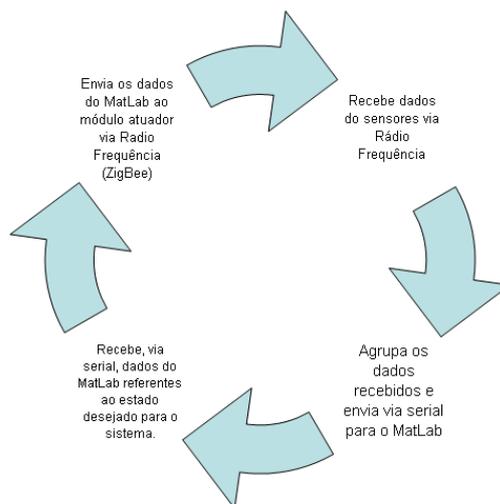


Figura 6.17 - Funcionamento do módulo coordenador

O coordenador é o módulo cujo funcionamento envolve o maior número de tarefas na rede. Seu funcionamento pode ser descrito na figura 6.17. Além de enviar e receber mensagens dos outros módulos, o módulo atuador também envia e recebe mensagens ao software MatLab através de comunicação serial. É importante citar que o MatLab envia a cada 10 segundos, via serial, um número inteiro referente ao estado desejado para o sistema de acordo com o controle desenvolvido. Em muitos casos esta mensagem não é modificada por um longo período de tempo, indicando que se deseja manter o estado fixo. Como estratégia de não sobrecarregar a rede com mensagens redundantes o módulo coordenador compara o estado desejado (recebido via serial a cada 10 segundos) com o estado atual do módulo atuador (recebido via comunicação sem fio) e só envia a mensagem ao atuador caso os estados sejam diferentes.

Finalizado o código, e definidas as estratégias de controle fez-se necessário criar o sistema em ambiente em Simulink para implementar o controle. O sistema final utilizado durante as simulações do controlador *fuzzy* pode ser visto na figura 6.18.

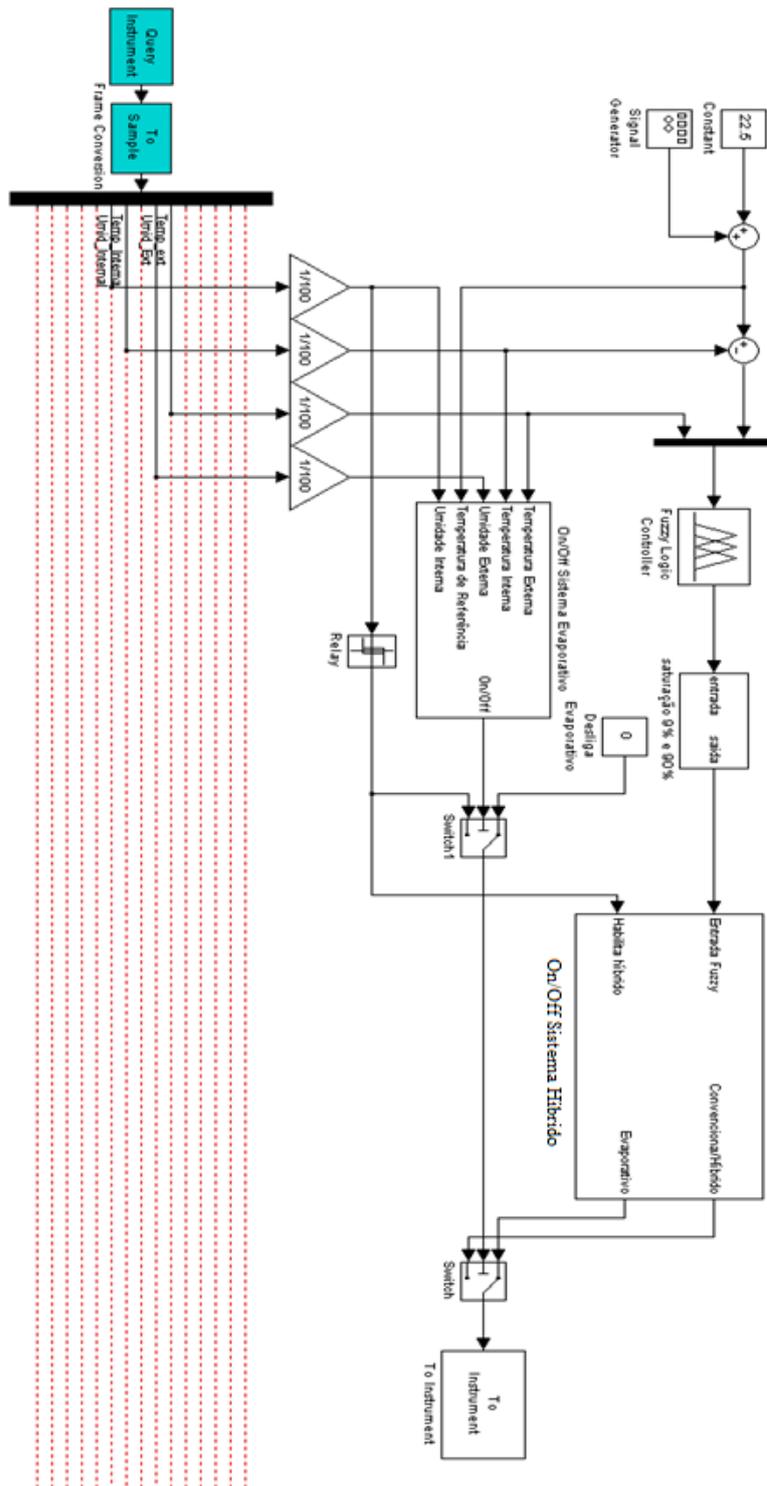


Figura 6.18 – Sistema completo implementado para o controlador *fuzzy*

Grande parte dos blocos mostrados na figura 6.19 foram, como já dito, criados a partir de necessidades observadas durante o desenvolvimento do trabalho e serão explicados a seguir:

- On/Off Sistema evaporativo – Desenvolvido para habilitar ou desabilitar o funcionamento do sistema de resfriamento evaporativo. O funcionamento e a motivação de criação do bloco já foram expostos acima.
- On/Off Sistema híbrido – Em conjunto com o bloco “On/Off Sistema evaporativo” este bloco completa a lógica de controle utilizada para a ativação dos sistemas convencional, evaporativo e híbrido. Lógica essa já definida acima. Sua composição pode ser vista na figura 6.20.
- Saturação 9% e 90% - Este bloco foi criado devido à necessidade de se evitar que valores inferiores a 9% de *duty cycle* gerem pequenos “pulsos” de ativação do sistema de refrigeração. Por exemplo, caso a saída do controlador *fuzzy* esteja em 0,05 (5%) e o período do PWM selecionado seja de 300 segundos o bloco “PWM” acionaria o sistema por 15 segundos e em seguida o desligaria. Este comportamento reduziria a vida útil do compressor. Com a utilização deste bloco, valores inferiores a 0.09 na saída do controlador *fuzzy* são automaticamente substituídos por 0.

Este mesmo bloco também evita que valores de PWM superior a 90% façam com que o sistema de refrigeração seja desligado e ligado pouco tempo depois. Dessa forma, valores superiores a 0,9 são substituídos por 1(100%).

- Evita Ruído – Este bloco está localizado dentro do “On/Off Sistema híbrido” (ver figura 6.20) ele foi o último bloco a ser criado, e devido ao seu relativo alto grau de complexidade decidiu-se por criá-lo a partir de um modelo s-function ou seja um código em MatLab que é traduzido para transformar-se em um bloco do Simulink. A motivação da criação deste bloco foi detecção de alguns pulsos de pequena largura gerados pelo bloco PWM durante alguns testes. Pulsos estes que geravam o acionamento do sistema de refrigeração por pequenos

instantes de tempo. Apesar de um comportamento semelhante ao evitado pelo bloco “Saturação 9% e 90%”, a causa deste é bastante diferente. De forma simplificada, o que se tenta evitar com este bloco são pulsos indesejados, causados, principalmente, por ruídos na leitura dos sensores ou por mudanças bruscas no sinal de saída do controlador *fuzzy*.

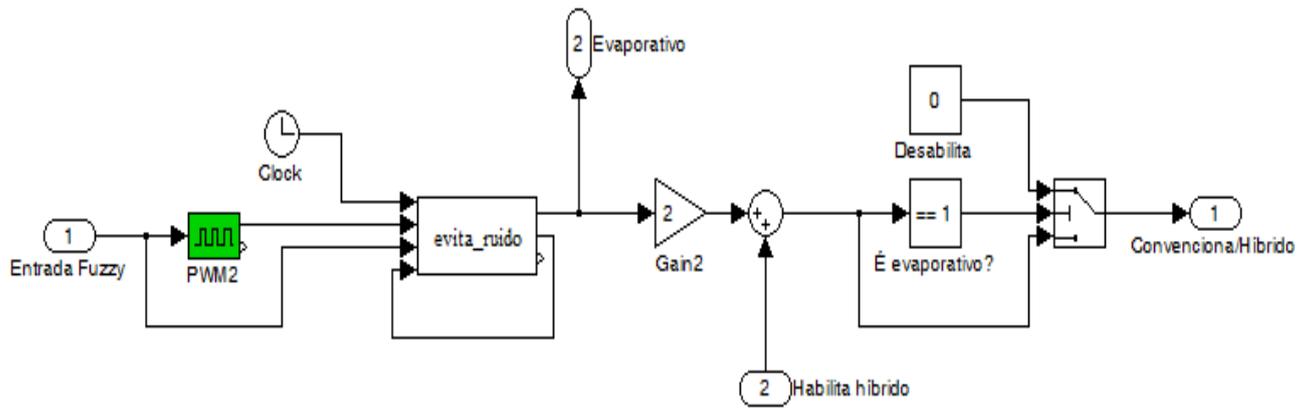


Figura 6.19 – Bloco On/Off Sistema híbrido em detalhes

7 TESTES

A seguir, apresentam-se os resultados obtidos com a aplicação dos sistemas descritos no tópico anterior. Os testes a seguir visam validar o funcionamento dos controladores.

Para que se possa comparar o desempenho dos dois controladores foi estabelecido um padrão de testes com as seguintes características:

1. Todos os testes tiveram início às 09h e término às 18h tendo, portanto, uma duração de 9 horas.
2. Para os dois controladores houve dois procedimentos distintos de funcionamento:
 - Temperatura de referência fixa em 22°C durante todo o período de testes.
 - Temperatura de referência variando entre 22°C e 23°C a cada 3 horas.
3. Procurou-se sempre realizar os testes em dias com condições externas semelhantes.
4. O funcionamento normal da sala não foi alterado, ou seja, não foi vetado o acontecimento de reuniões ou o acesso de pessoas ao ambiente durante os testes.

7.1- CONTROLADOR PID

A falta de tempo para ajustes do controlador PID e o excesso de chuvas no período de realização do trabalho dificultaram a obtenção de um controlador ideal. Apesar disso o controlador se comportou de maneira bastante eficaz na manutenção da temperatura.

7.1.1- TEMPERATURA DE REFERÊNCIA FIXA (22°C)

A seguir são mostrados os gráficos obtidos a partir das leituras dos sensores durante o teste com o controlador PID e referência fixa em 22°C.

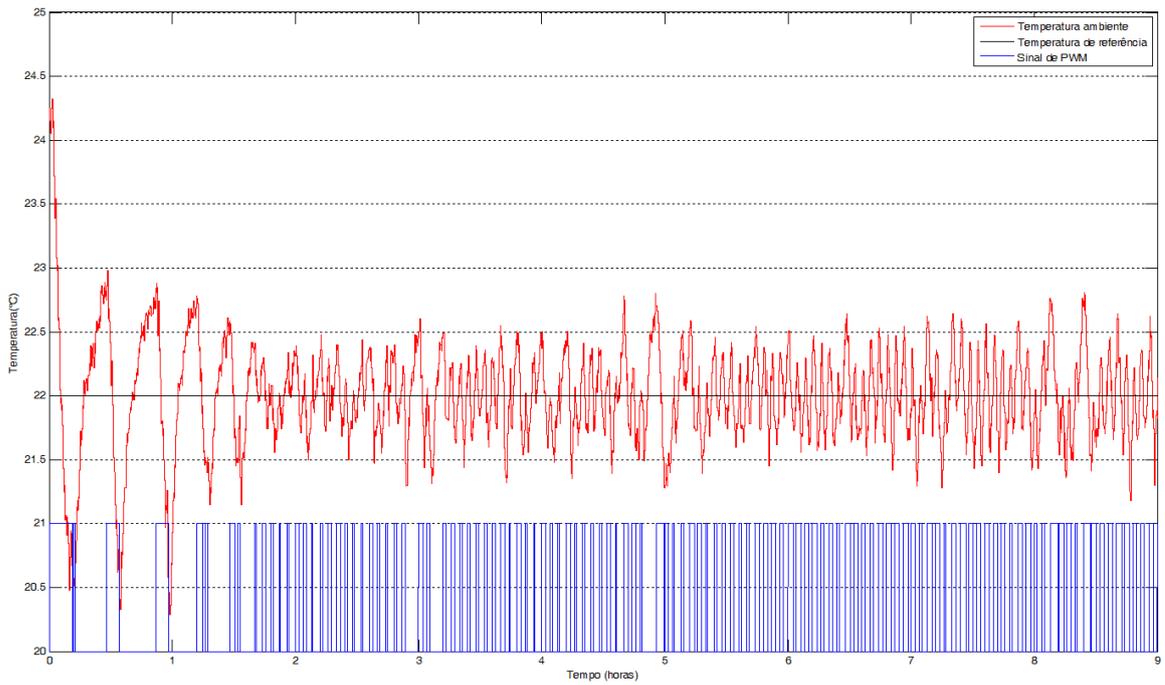


Figura 7.1 - Comportamento da temperatura ambiente utilizando um controlador PID e temperatura de referência fixa.

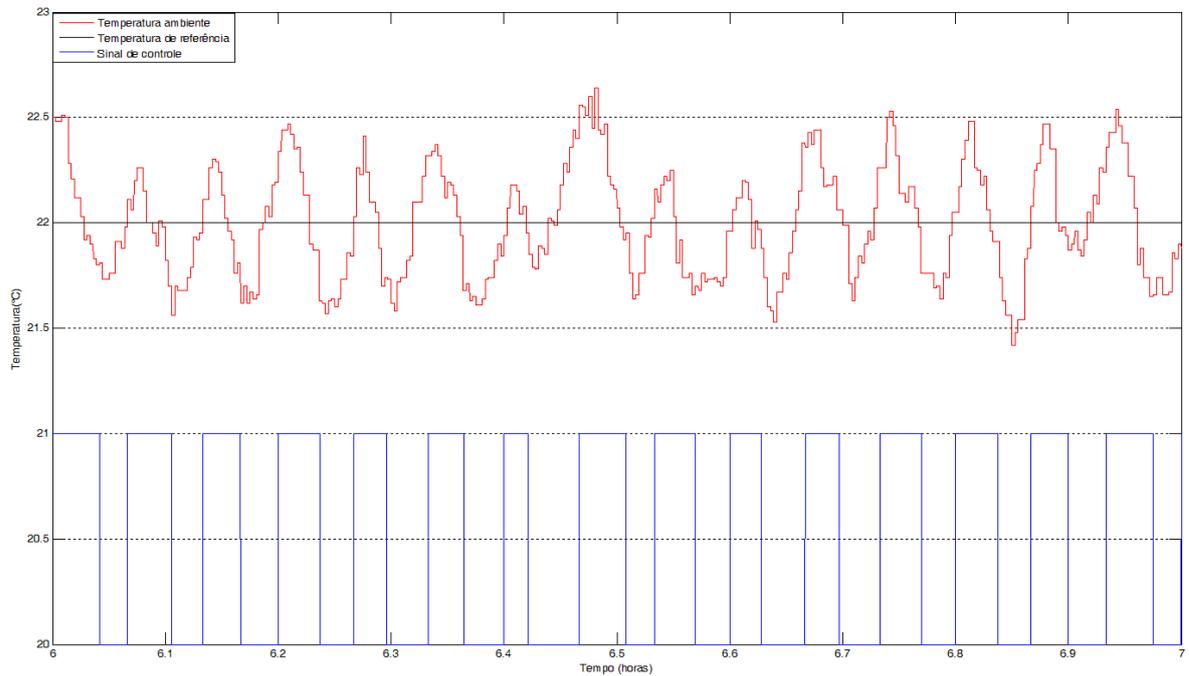


Figura 7.2 - Comportamento da temperatura ambiente utilizando um controlador PID e temperatura de referência fixa (zoom em um período de 1 hora).

Nota-se que durante o teste o controlador, apesar de iniciar com um grande erro em regime estacionário, conseguiu manter em média um erro sempre inferior à $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ em regime permanente. Deve-se ficar claro que o sinal de PWM não tinha amplitude de 21 como visto no gráfico, por isso foi feito um deslocamento do sinal de PWM para cima para que se pudesse visualizá-lo paralelamente à temperatura. Os gráficos a seguir mostram outros dados obtidos por outros sensores da rede durante a simulação.

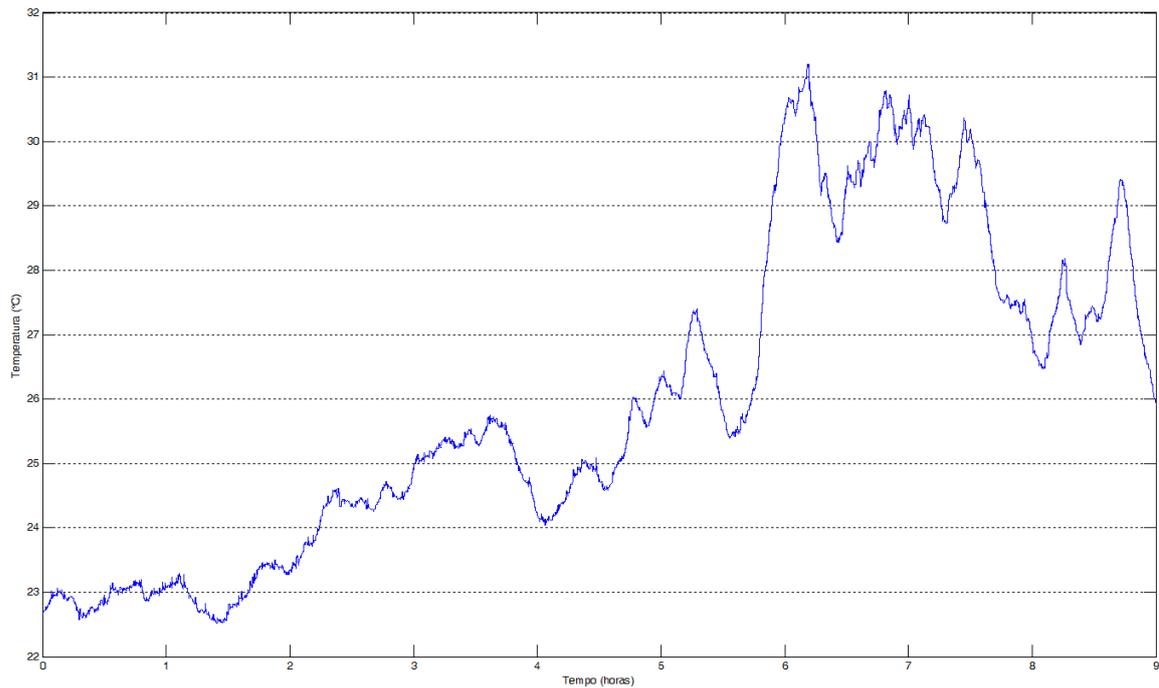


Figura 7.3 - Comportamento da temperatura externa durante o teste do controlador PID com temperatura de referência fixa.

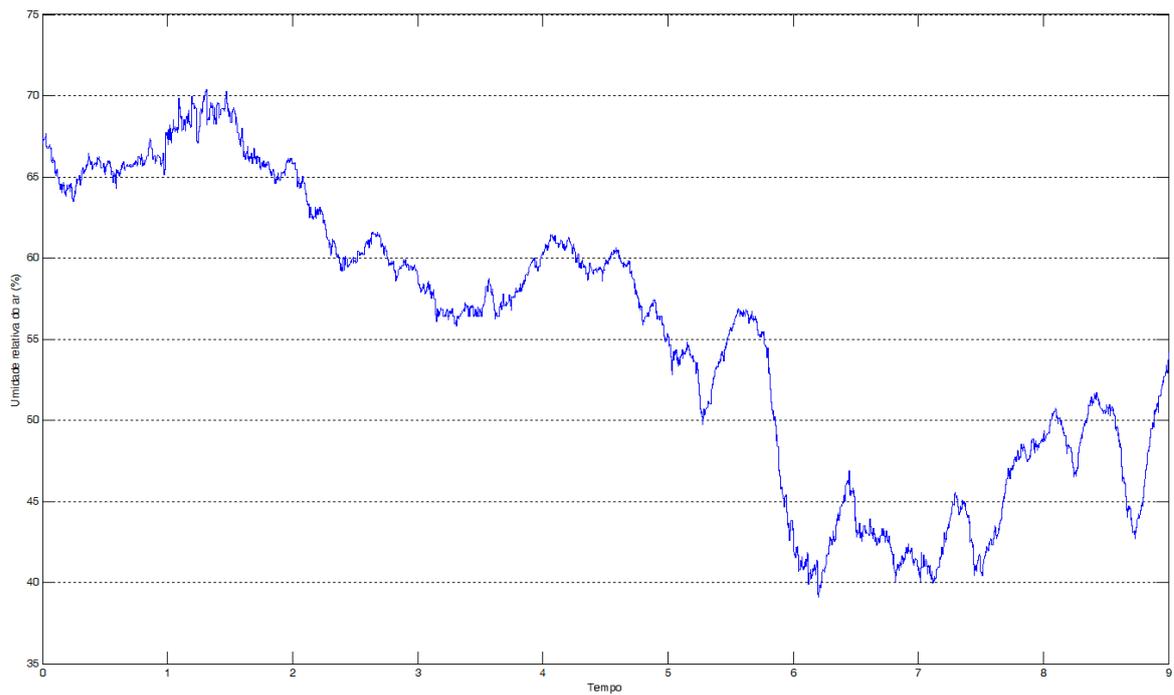


Figura 7.4 - Comportamento da umidade relativa do ar externa durante o teste do controlador PID com temperatura de referência fixa.

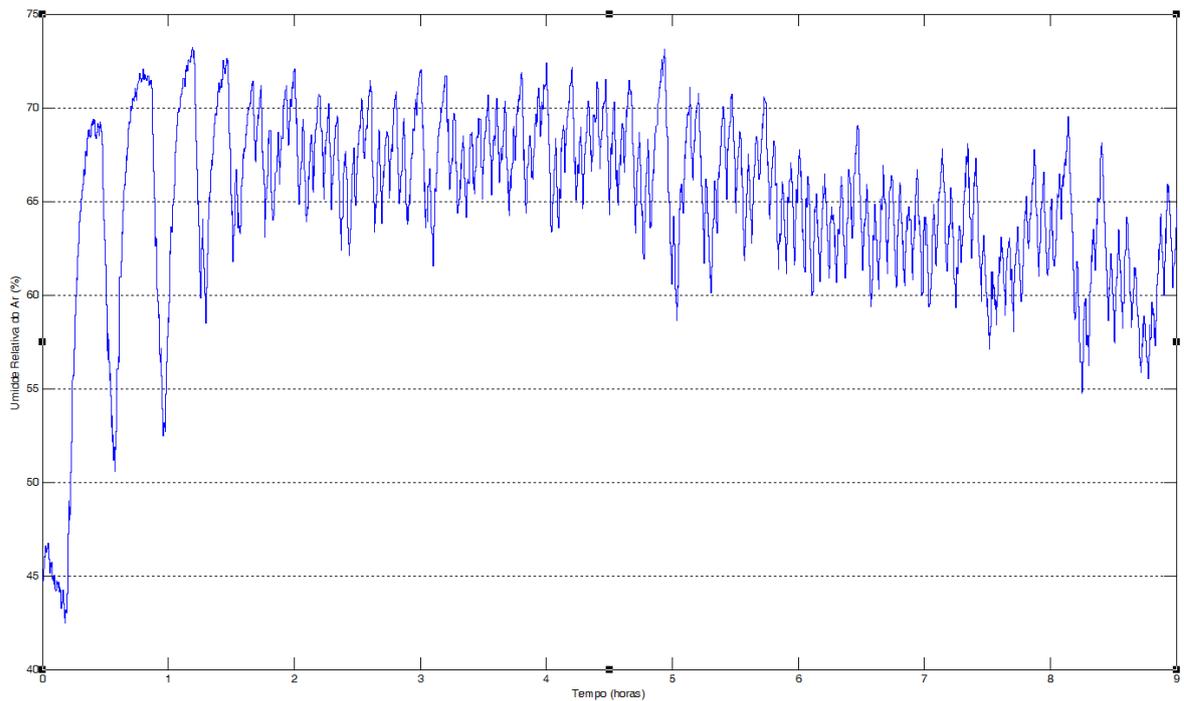


Figura 7.5 - Comportamento da umidade relativa do ar interna durante o teste do controlador PID com temperatura de referência fixa.

Durante este teste a temperatura externa média foi de 25,93°C e o consumo do sistema de refrigeração foi de 8,8 KWh.

7.1.2- TEMPERATURA DE REFERÊNCIA VARIANDO (22°C E 23°C)

A seguir são mostrados os gráficos obtidos a partir das leituras dos sensores durante o teste com o controlador PID e referência variando entre 22°C e 23°C.

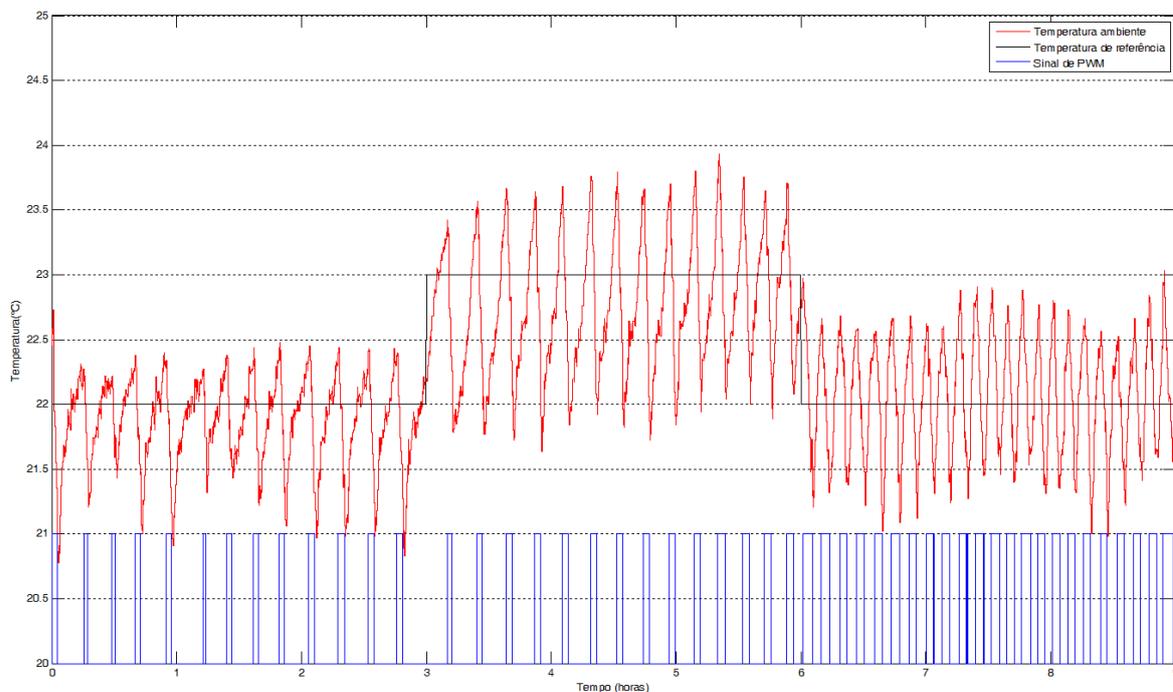


Figura 7.6 - Comportamento da temperatura ambiente utilizando um controlador PID e temperatura de referência variando entre 22°C e 23°C.

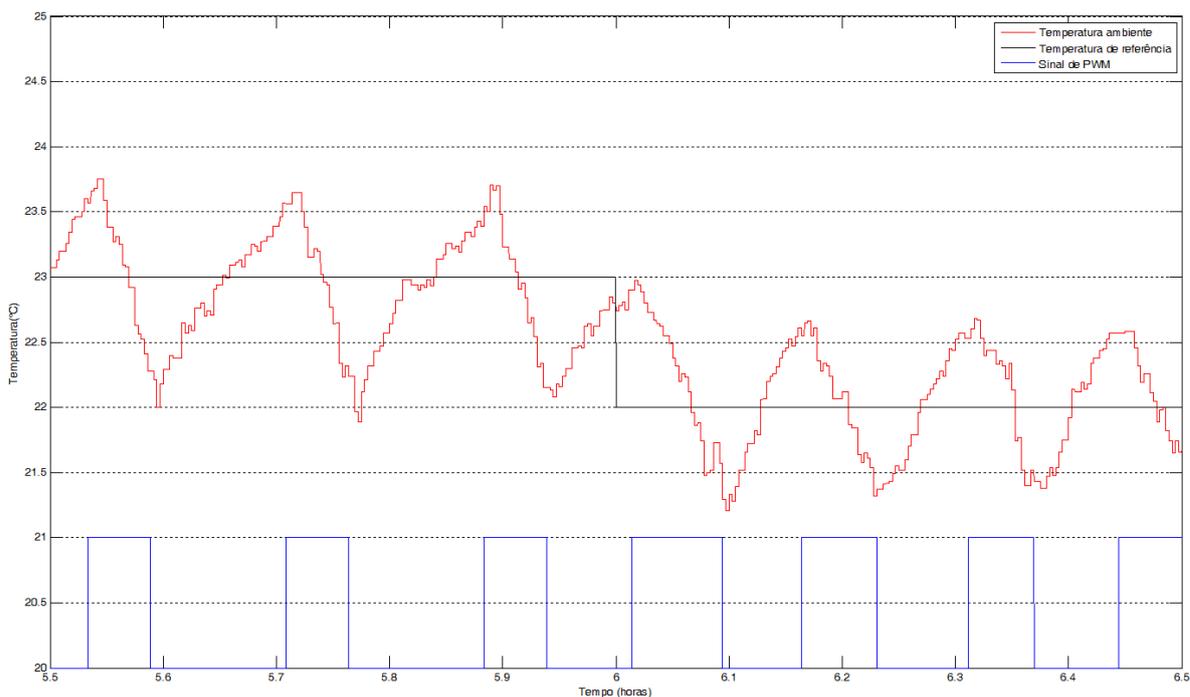


Figura 7.7 - Comportamento da temperatura ambiente utilizando um controlador PID e temperatura de referência variando entre 22°C e 23°C (zoom em um período de 1 hora no momento da transição de 23°C para 22°C).

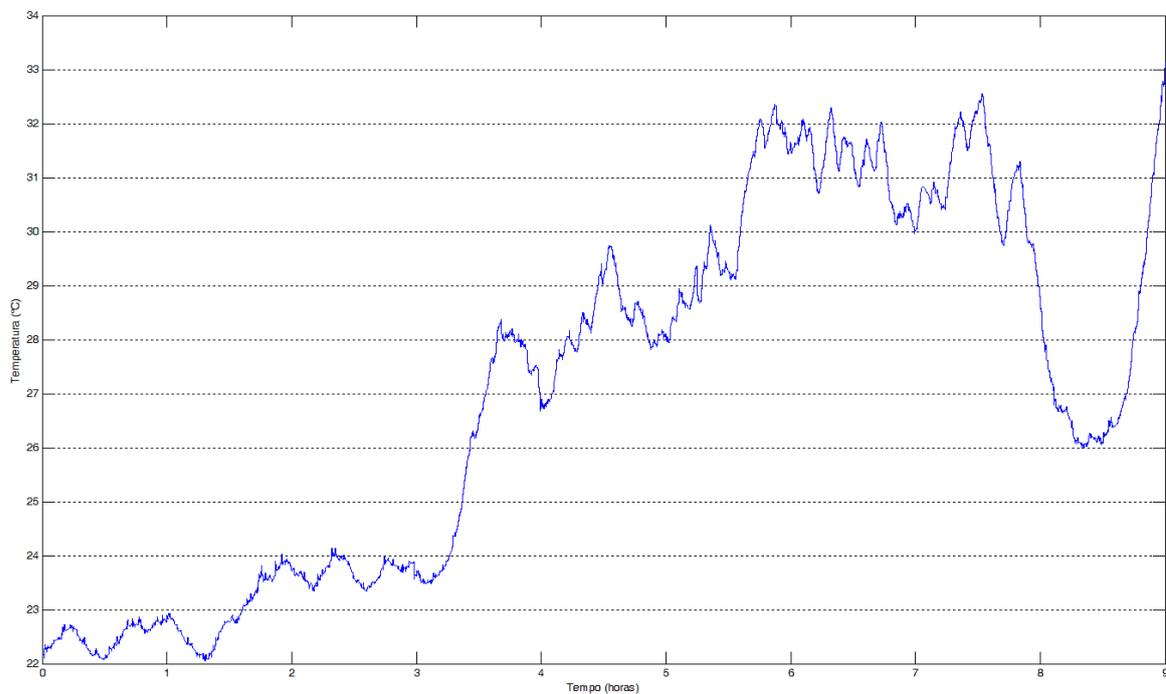


Figura 7.8 - Comportamento da temperatura externa durante o teste do controlador PID com temperatura de referência variando entre 22°C e 23°C.

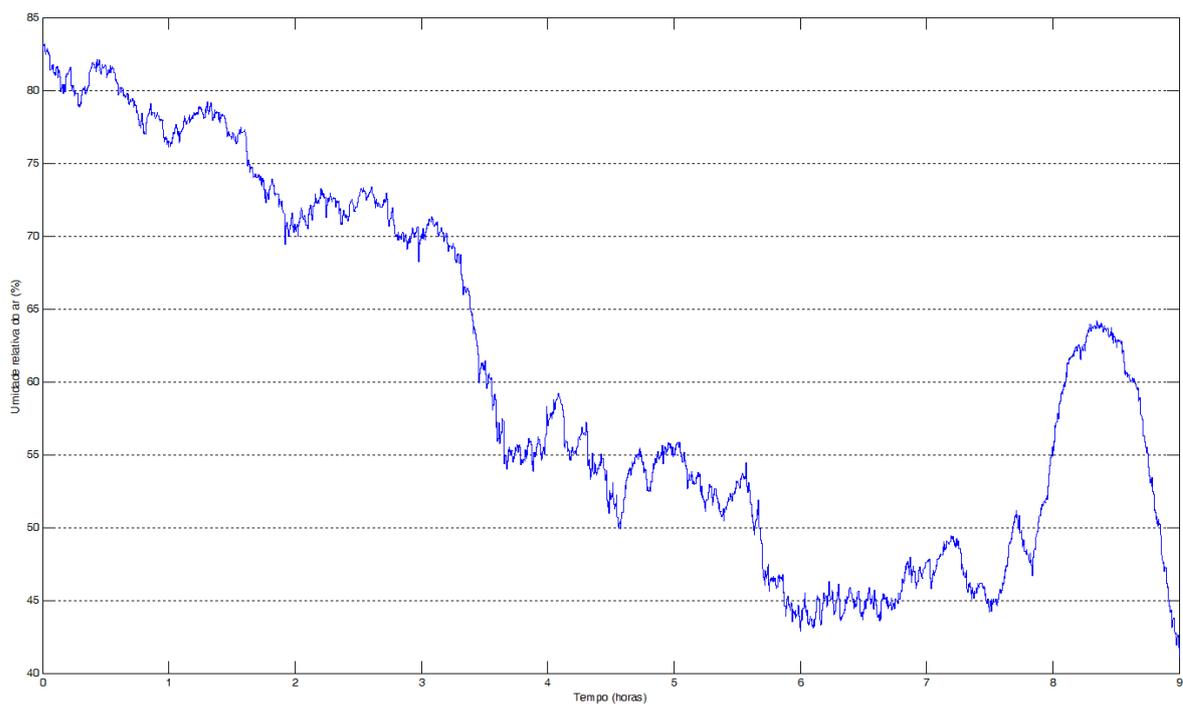


Figura 7.9 - Comportamento da umidade relativa do ar externa durante o teste do controlador PID com temperatura de referência variando entre 22°C e 23°C.

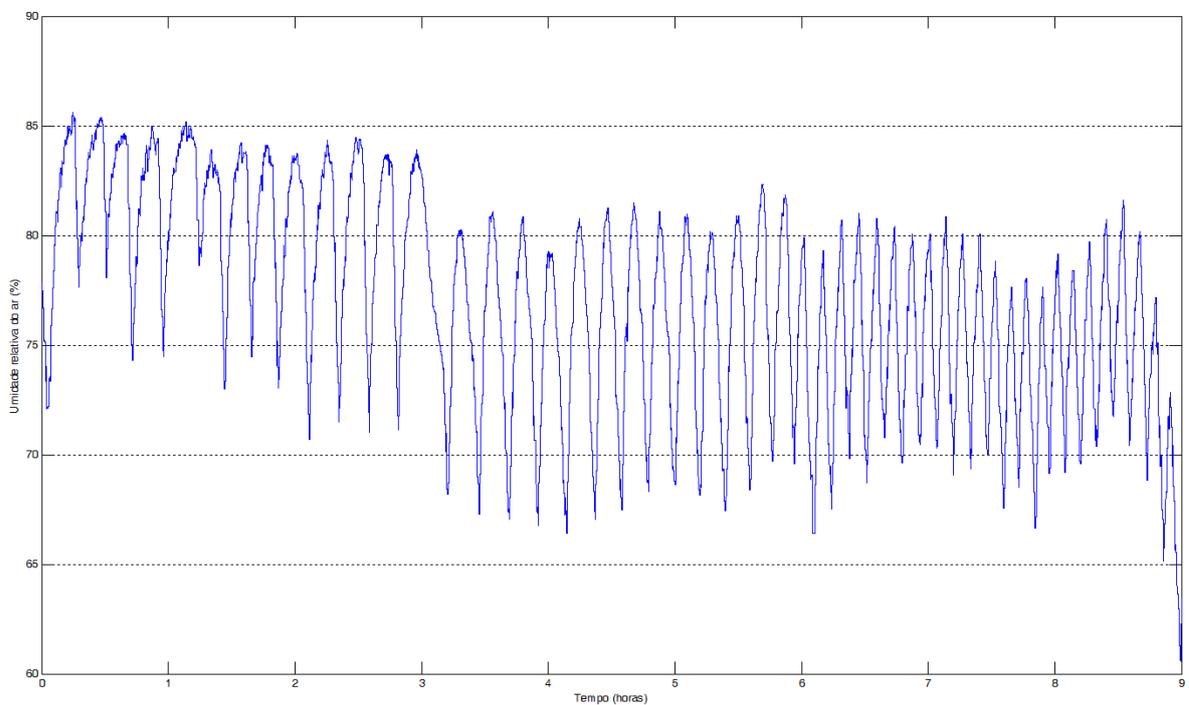


Figura 7.10 - Comportamento da umidade relativa do ar interna durante o teste do controlador PID com temperatura de referência variando entre 22°C e 23°C.

Durante este teste a temperatura externa média foi de 27,04°C e o consumo do sistema de refrigeração foi de 5,94 KWh.

7.2- CONTROLADOR FUZZY

Os gráficos a seguir dizem respeito às simulações realizadas utilizando o controlador *fuzzy*.

7.2.1- TEMPERATURA DE REFERÊNCIA FIXA (22°C)

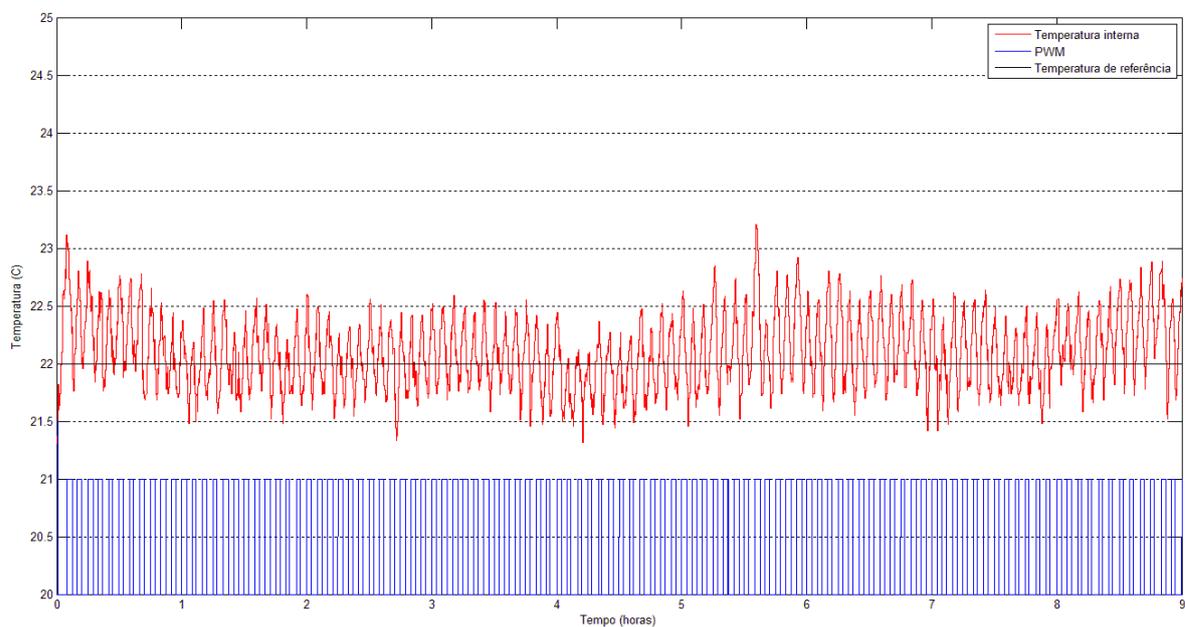


Figura 7.11 - Comportamento da temperatura ambiente utilizando um controlador *fuzzy* e temperatura de referência fixa em 22°C.

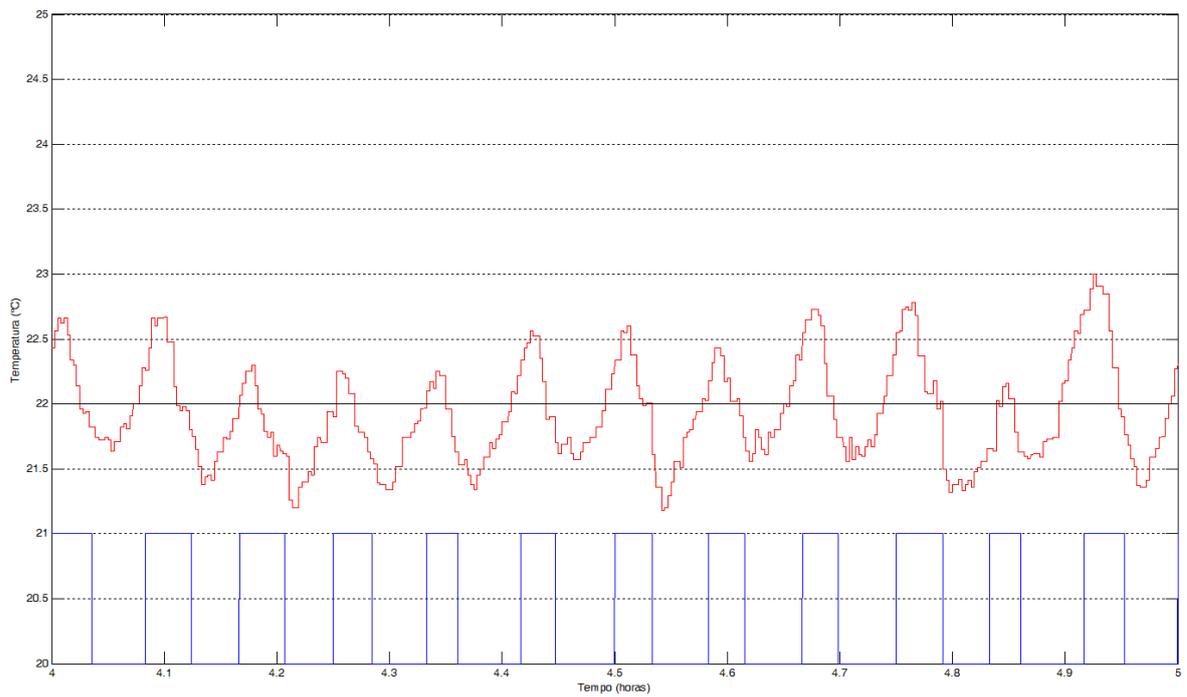


Figura 7.12 - Comportamento da temperatura ambiente utilizando um controlador *fuzzy* e temperatura de referência fixa em 22°C (zoom em um período de uma hora).

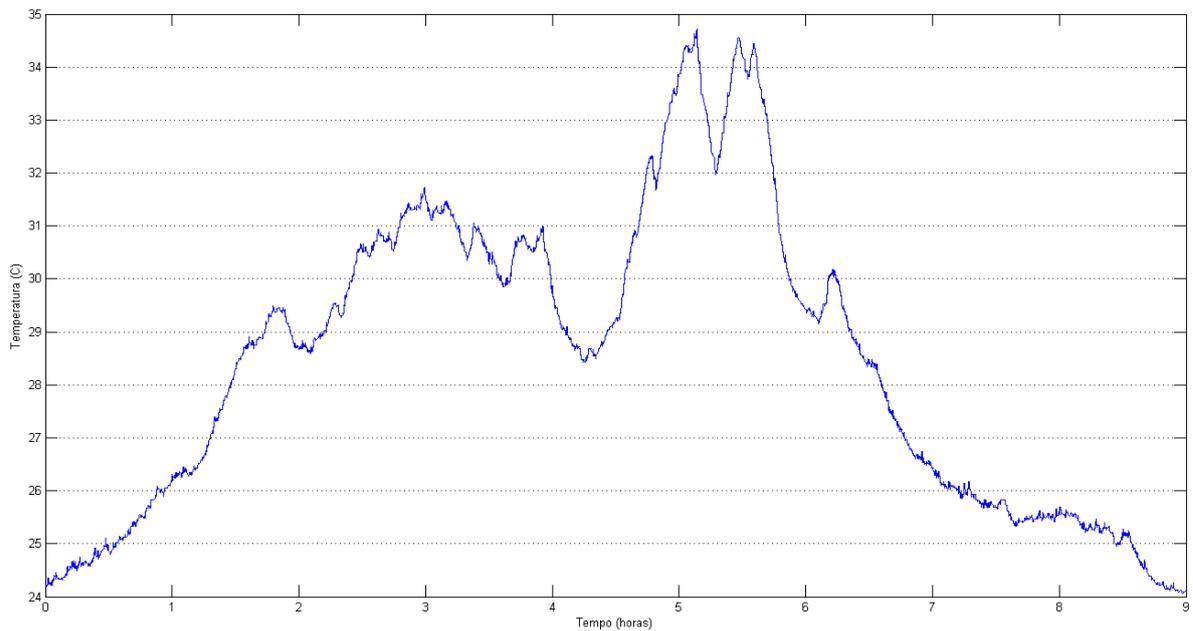


Figura 7.13 - Comportamento da temperatura externa utilizando um controlador *fuzzy* e temperatura de referência fixa em 22°C.

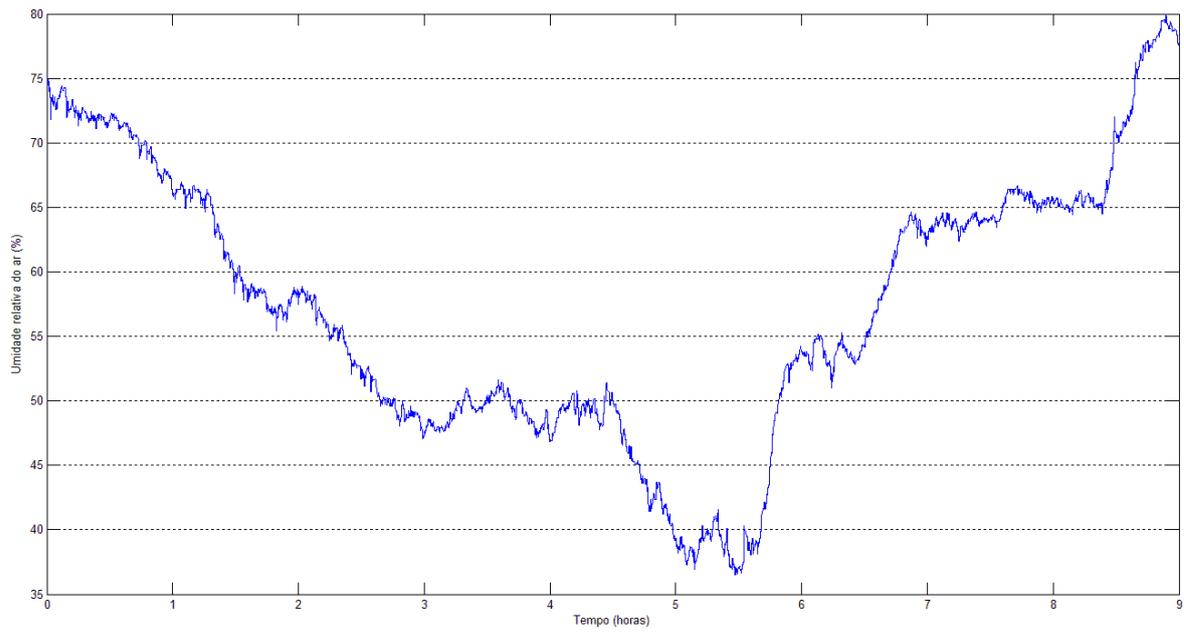


Figura 7.14 - Comportamento da umidade relativa externa utilizando um controlador *fuzzy* e temperatura de referência fixa em 22°C.

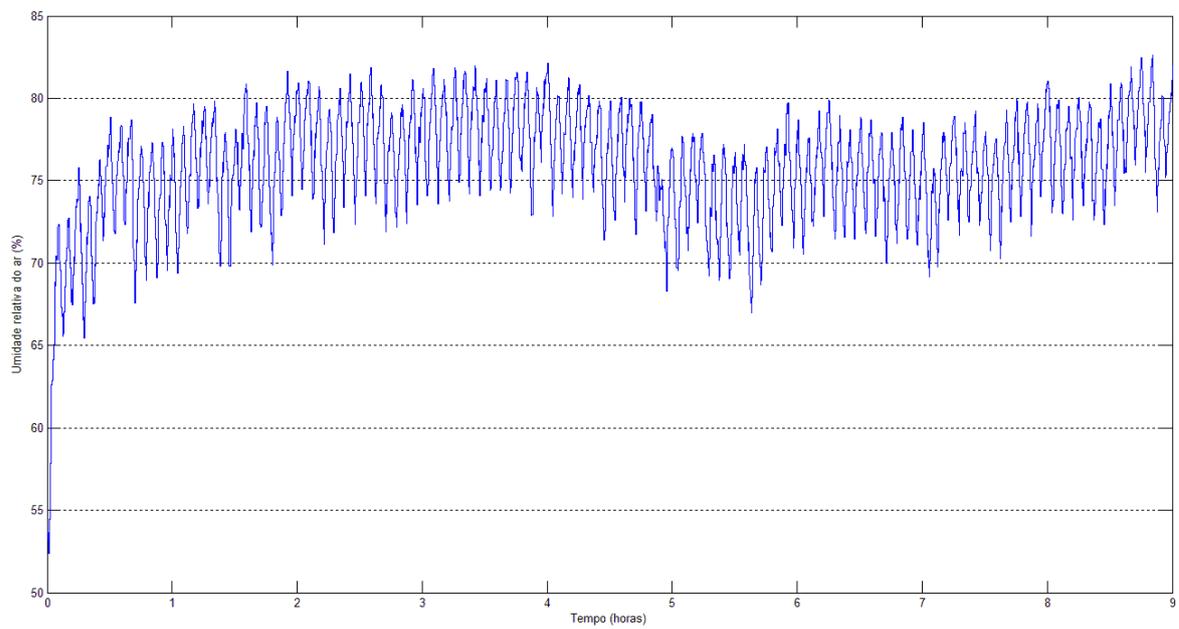


Figura 7.15 -Comportamento da umidade relativa interna utilizando um controlador *fuzzy* e temperatura de referência fixa em 22°C.

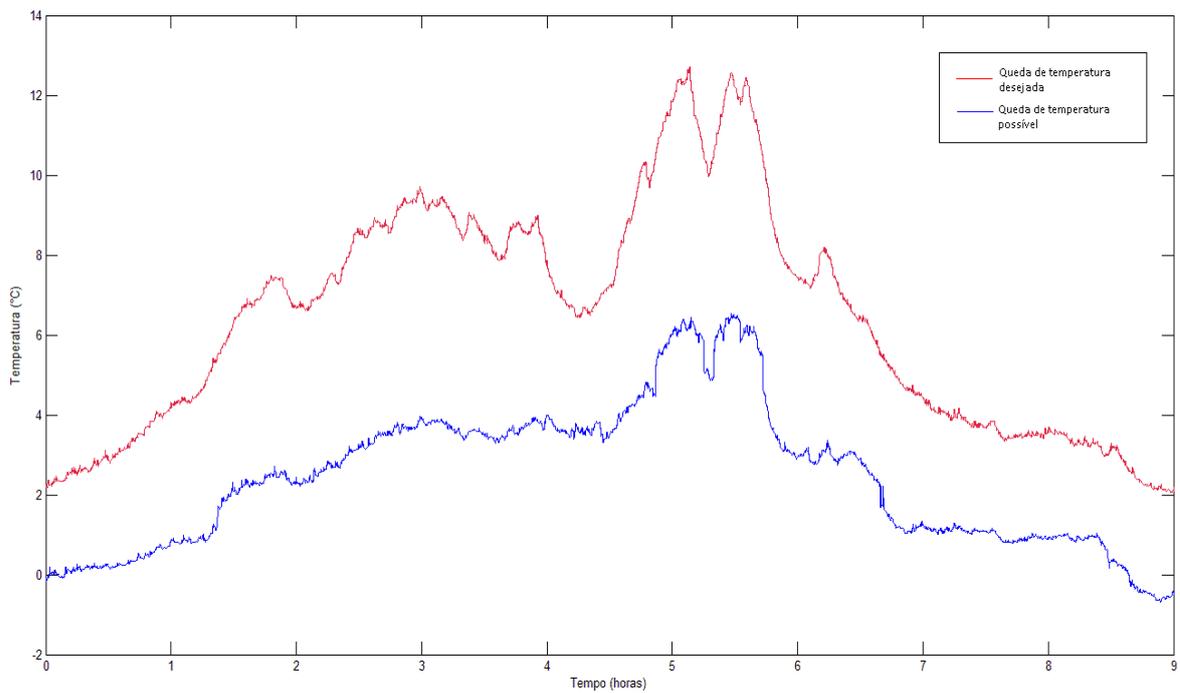


Figura 7.16 – Queda de temperatura possível (estimada) e desejada.

A temperatura externa média durante estes testes foi de 28,32°C e o consumo de 8,04 KWh

7.2.2- TEMPERATURA DE REFERÊNCIA VARIANDO (22°C E 23°C)

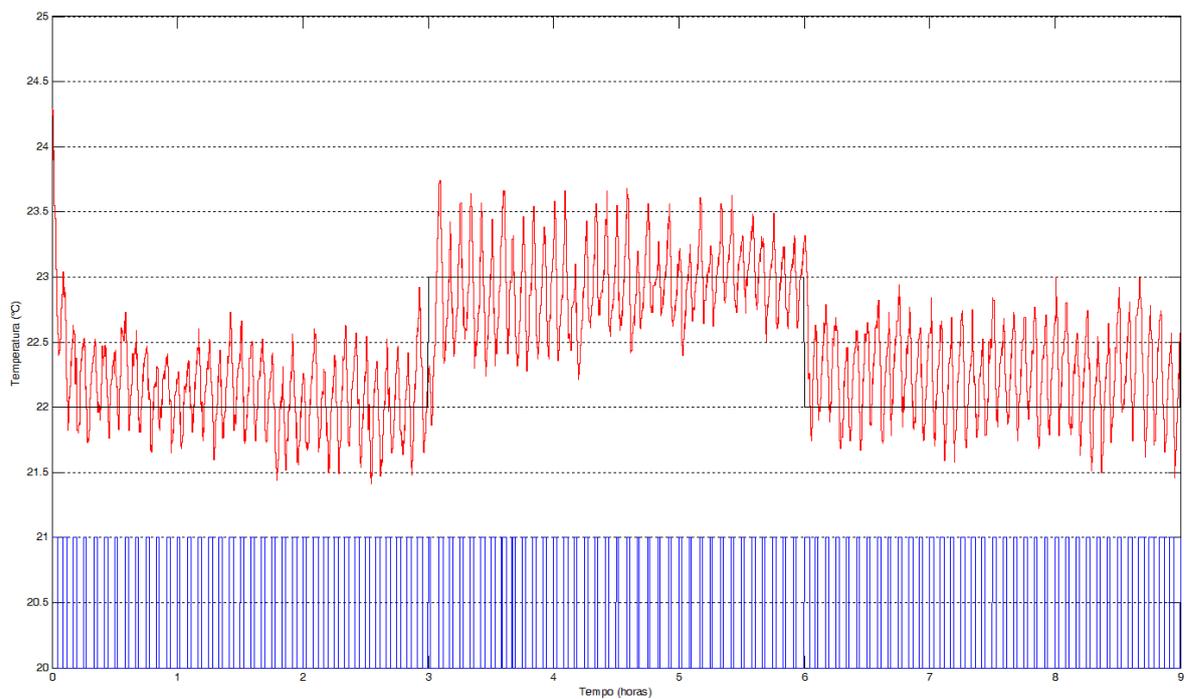


Figura 7.17 -Comportamento da temperatura ambiente utilizando um controlador *fuzzy* e temperatura de referência variando entre 22°C e 23°C.

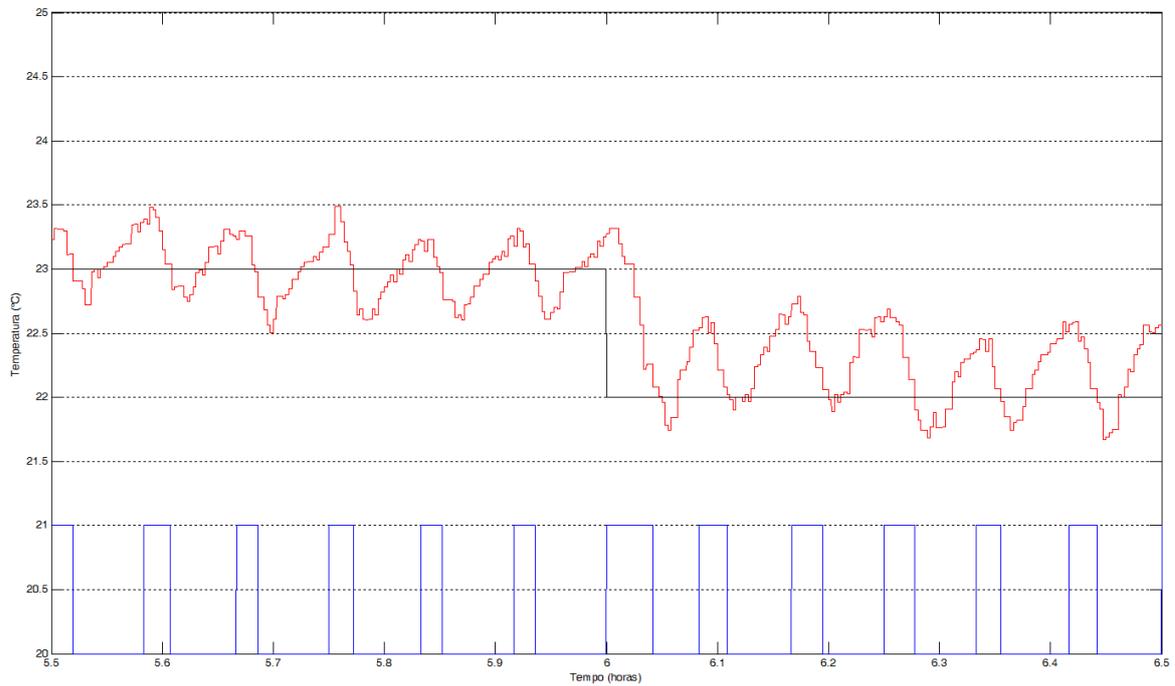


Figura 7.18 - Comportamento da temperatura ambiente utilizando um controlador *fuzzy* e temperatura de referência variando entre 22°C e 23°C (zoom de uma hora).

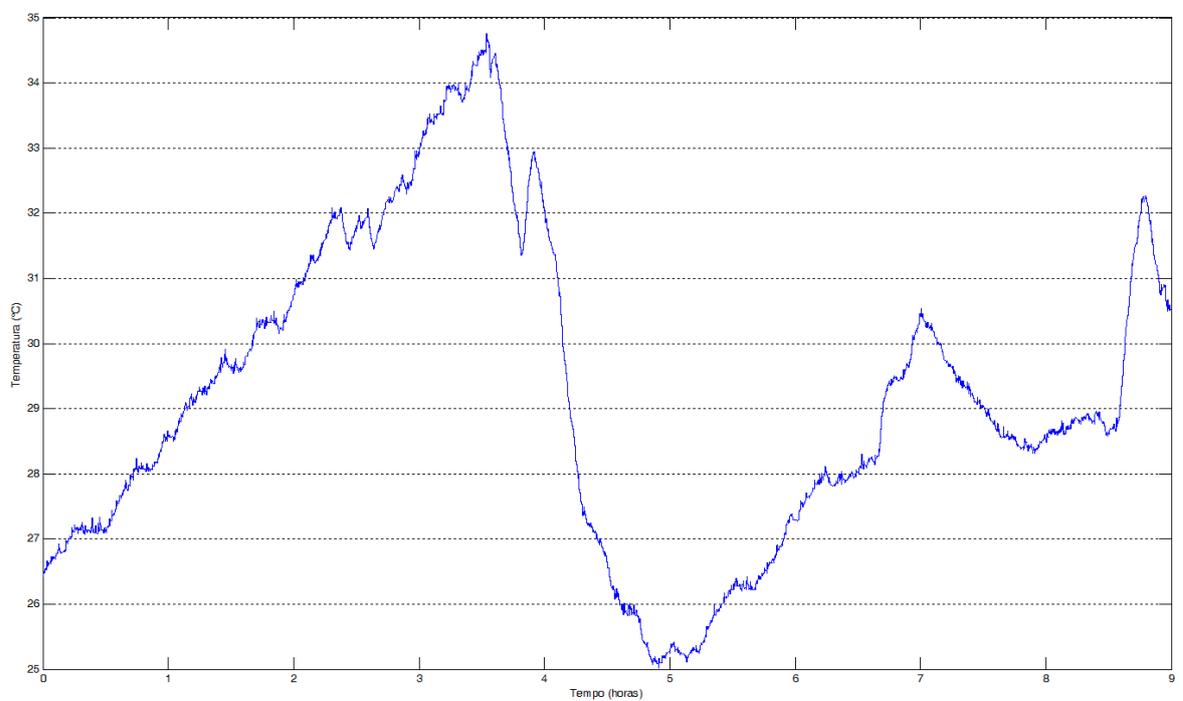


Figura 7.19 - Comportamento da temperatura externa utilizando um controlador *fuzzy* e temperatura de referência variando entre 22°C e 23°C.

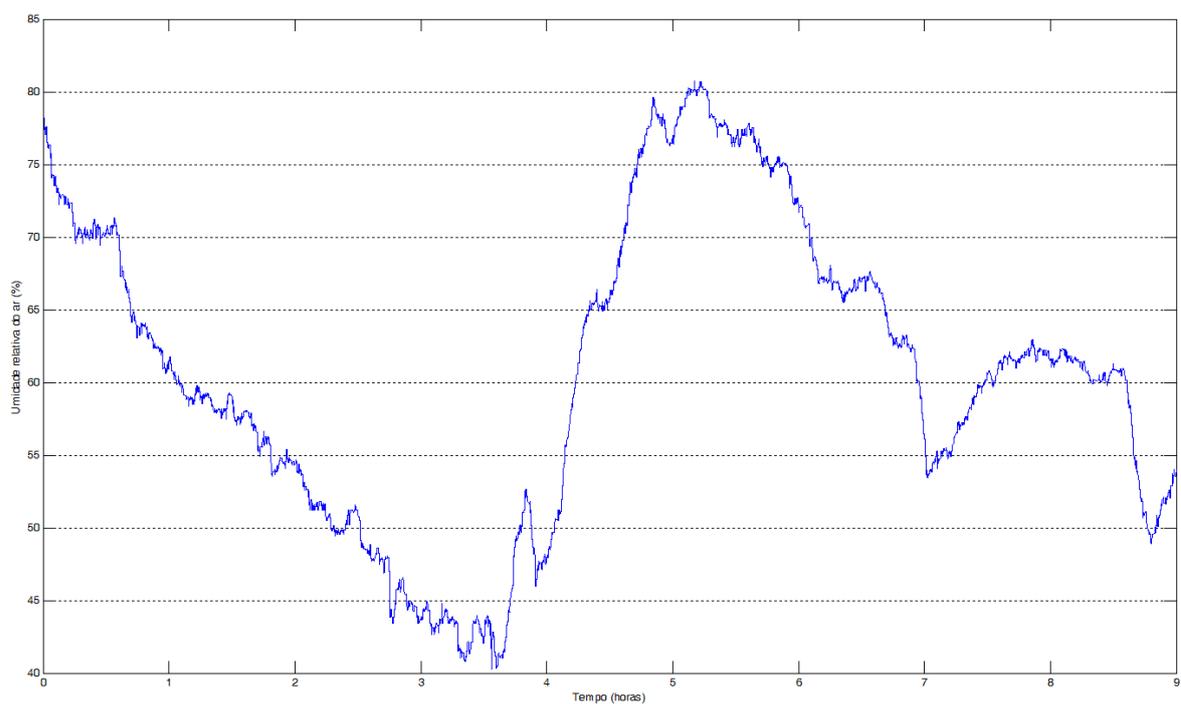


Figura 7.20 - Comportamento da umidade externa utilizando um controlador *fuzzy* e temperatura de referência variando entre 22°C e 23°C.

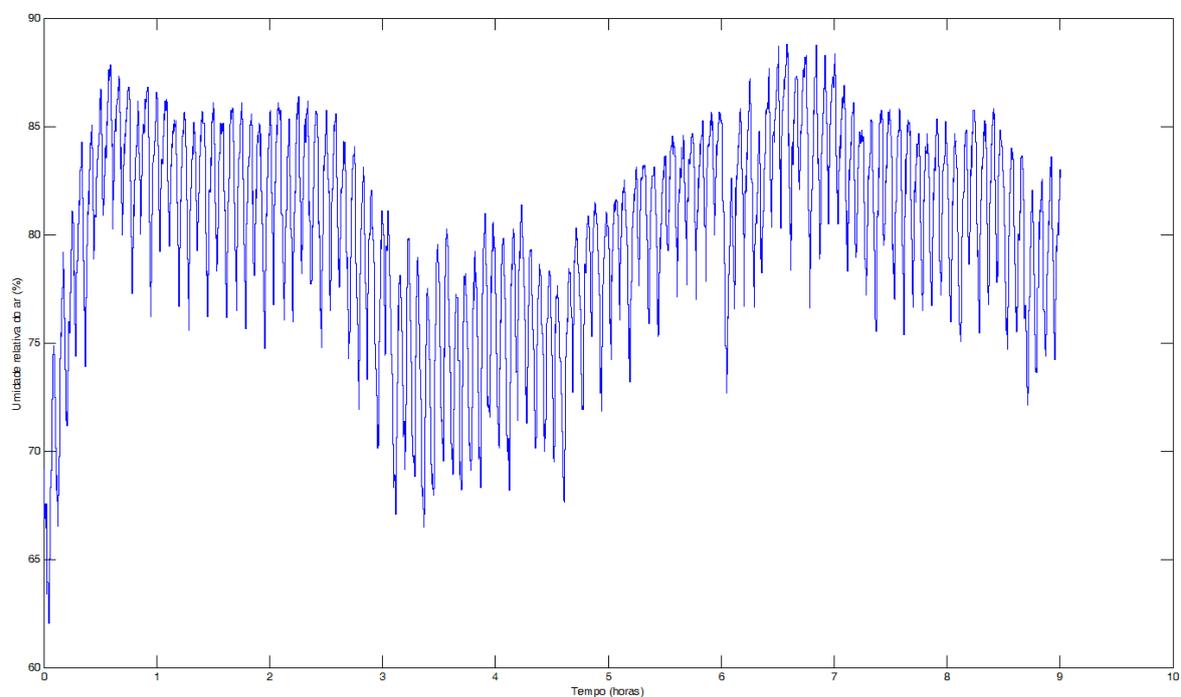


Figura 7.21 - Comportamento da umidade relativa interna utilizando um controlador *fuzzy* e temperatura de referência variando entre 22°C e 23°C (zoom de uma hora).

A temperatura externa média durante estes testes foi de 29,26°C e o consumo de 6,37 KWh.

8 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Faz-se a seguir uma análise dos dados coletados durante a realização dos testes.

8.1- CONTROLADOR PID

A implementação do controlador PID foi bastante dificultada devido à chegada do período chuvoso. A inconstância das variáveis externas (excesso de chuvas torrenciais) e a falta de tempo disponível (grande parte do tempo foi gasto para estabilizar a rede de sensores e resolver problemas de perdas de comunicação) gerou enormes dificuldades em implementar um controlador PID. Ao final, chegamos a dois modelos de controladores com parâmetros bastante distintos.

O primeiro deles (vide o teste com temperatura de referência constante) possuía um tempo de resposta bastante lenta e, por isso, propiciava pouca variação na saída com as mudanças de temperatura. Sua saída variava sempre na faixa de 0 a 1 correspondendo à 0 e 100% de PWM. A desvantagem deste controlador é a lentidão da resposta para mudanças bruscas de temperatura, já a vantagem é a maior estabilidade para ruídos causados por distúrbios no sistema.

O segundo modelo implementado era um controlador com alta velocidade de resposta e alto valor de sobrepasso. A vantagem deste sistema é a rápida velocidade de resposta, entretanto, o seu funcionamento acaba por saturar o bloco de PWM já que, em boa parte do tempo, a saída do controlador atinge valores maiores do que 1 devido ao alto sobrepasso.

Acredita-se que, apesar de funcionarem de maneira razoável, os modelos obtidos neste trabalho não são ideais e nem robustos o suficiente para torná-los viáveis. Contudo, a proposta do trabalho nunca foi obter um modelo ótimo, e sim algo que pudesse servir como método comparativo. Apesar disso, ambos os modelos apresentaram um erro médio inferior à $\pm 1^\circ\text{C}$.

Obviamente, não apenas o controlador influi na amplitude do erro. Esta também está diretamente relacionada ao período de PWM. Como não se pode ligar e desligar o sistema de refrigeração com muita frequência, sob risco de danificar o compressor, escolheu-se um período de 300 segundos de PWM, ou seja, 5 minutos.

Os dados de consumo e temperatura média dos testes com o controlador PID podem ser vistos na tabela 8.1.

8.2- CONTROLADOR FUZZY

A implementação do controlador *fuzzy* para controle da temperatura foi o objetivo principal deste trabalho. Como se falou no capítulo referente à análise dos dados, várias foram as tentativas antes de se chegar a um modelo final de controlador. No fim, conseguiu-se implementar um modelo bastante robusto de controlador que leva em conta a temperatura externa. Vê-se nos gráficos 7.13 e 7.19 que a temperatura externa variou consideravelmente durante o dia dos testes, mas mesmo assim o controlador conseguiu trabalhar sempre de maneira a manter o erro inferior à $\pm 1^\circ\text{C}$ durante todo o período de testes.

Pode-se observar na figura 7.19 um comportamento que demonstra bem a robustez do controlador. Observa-se uma queda de temperatura de praticamente 10°C em um período de menos de uma hora causada por uma chuva torrencial exatamente no horário de almoço. Pode-se afirmar, com toda certeza, que um controlador que considerasse apenas o erro e a temperatura de referência, desconsiderando, portanto, a temperatura externa no controle, não conseguiria manter a temperatura da sala em uma faixa tão constante quanto o observado no gráfico 7.17.

Obviamente que o desempenho do controlador não está imune a fatores como o número de pessoas no ambiente ou nível de radiação solar. Entretanto, ainda não existe maneira de saber o número de pessoas dentro do ambiente e nem o nível de atividade das mesmas, por isso o uso dessa variável foi descartado. Com relação à radiação solar observou-se que a mesma só influirá no controle de forma significativa em caso de diferença entre dia e noite. Como o sistema em questão funcionará apenas durante o dia não houve preocupação em utilizar essa variável.

Com relação ao uso do sistema evaporativo, vê-se que a alta umidade relativa do ar durante este período do ano impossibilitou o seu uso. Pode-se observar nas figuras 7.15 e 7.20 que a umidade relativa no interior da sala permaneceu, durante todo o tempo, em valores extremamente elevados impossibilitando a utilização do sistema evaporativo. Talvez se houvesse controle total sobre o *dumper*, ele poderia ser mantido aberto mesmo durante o desligamento do sistema convencional. Dessa forma, teria uma redução da quantidade de ar

úmido vindo de fora e poder-se-ia com isso reduzir a umidade relativa do ar no ambiente da sala, e assim poderia utilizar o sistema duplo de resfriamento (sistema convencional+sistema evaporativo). Entretanto, mesmo se fosse possível o acionamento do sistema duplo, o sistema evaporativo não poderia ser utilizado, pois não consegue resfriar o ar nessas condições (ar externo quente e úmido).

A figura 7.16 mostra as curvas de queda de temperatura possível e queda de temperatura desejada. A primeira é calculada pelo bloco “On/Off Sistema evaporativo” e a segunda é a temperatura externa menos a referência. Nota-se que as curvas seguem praticamente paralelas, justificando o não acionamento do sistema evaporativo.

Os dados de consumo e temperatura média dos testes com o controlador *fuzzy* podem ser vistos na tabela 8.1.

8.3 - ANÁLISE DE CONSUMO

Infelizmente, devido à grande quantidade de chuvas, o sistema evaporativo não foi acionado nenhuma vez durante os testes com o controlador *fuzzy*. Dessa forma, a economia de energia gerada pelo sistema não pôde ser mensurada.

Segundo o trabalho de mestrado de Ferreira Jr (2009), um modelo de controlador *fuzzy* consegue uma economia de energia de quase 20% quando comparado a um sistema liga-desliga.

Tabela 8.1 – Consumo e temperatura média das simulações com controlador PID *fuzzy*.

PID	Consumo (KWh)	Temperatura média (°C)
Referência fixa	8,8	25,93
Referência variável	5,94	27,04
FUZZY	Consumo (KWh)	Temperatura média (°C)
Referência fixa	8,04	28,32
Referência variável	6,37	29,26

Como foram implementados dois controladores PID com características distintas não se pode generalizar a análise e desconsiderar as peculiaridades de cada um.

No primeiro controlador implementado (PID com referência fixa) o erro da temperatura é bastante semelhante ao controlador *fuzzy* nas mesmas condições (vide figuras 7.1 e 7.11). O consumo do controlador PID foi de 8,8 KWh, enquanto que o controlador *fuzzy* consumiu apenas 8,04 KWh obtendo assim uma economia de 8,6%, entretanto, devemos levar em conta não apenas o consumo de energia, mas também a temperatura externa média. Nota-se que durante o teste com o controlador *fuzzy*, a temperatura externa média foi aproximadamente 3°C mais alta com isso podemos concluir que com condições externas exatamente iguais a economia de energia seria superior ao valor obtido neste teste.

Já o segundo controlador, se submetido a uma análise pouco crítica, poderia sugerir que não houve economia de energia já que o PID consumiu 5,94 KWh e o *fuzzy* consumiu 6,37 KWh. Entretanto, analisando calmamente os dois cenários vê-se que a temperatura média no dia do teste do controlador *fuzzy* foi 2,22°C acima do que no dia com o controlador PID. Além disso, observa-se que o erro do controlador PID é significativamente maior que o erro do controlador *fuzzy*. A razão para isso é que o número de vezes em que o sistema de resfriamento é acionado é muito menor no controlador PID do que no *fuzzy* fazendo com que, obviamente, o consumo seja inferior. Com isso, conclui-se que este teste não pode ser levado em conta para comparar o consumo de energia já que os cenários e o comportamento dos controladores são bastante distintos.

Como não foi possível avaliar a economia de energia gerada pelo uso do sistema evaporativo, foi decidido estimá-lo baseando-se em conhecimentos do sistema e alguns dados aproximados.

Como já citado acima, é factível estimar uma economia de cerca de 20% relacionado ao uso do controlador *fuzzy* se comparado a um sistema liga-desliga de acordo com o trabalho de Ferreira Jr (2009). Além disso, uma economia estimada de 80% é associada ao uso do sistema evaporativo se comparado ao sistema convencional. Dessa forma, se for considerado que em um dia seco em que se utiliza um controlador *fuzzy*, passa-se em média 20% do tempo operando com o sistema evaporativo e 80% com o sistema convencional teria-se:

$$0,80*((0,8*1)+(0,2*0,2))=0.672$$

Ou seja, haveria uma economia de 32,8%. Caso fosse um pouco mais otimista, e considerasse cada sistema (evaporativo e convencional) funcionando metade do tempo, teria-se:

$$0,80*((0,5*1)+(0,5*0,2)) = 0,48$$

Portanto, uma redução de mais da metade. Obviamente, esses valores não se manteriam constantes ao longo de todo ano, já que como visto neste trabalho, com a chegada do período chuvoso, a redução de consumo estaria restrita aos 20% relacionados ao controlador *fuzzy*. Entretanto, fica claro que a economia gerada pela implantação de tal sistema o torna extremamente viável e, principalmente, lucrativo.

9 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

O seguinte capítulo busca apontar questões levantadas durante o desenvolvimento deste trabalho apresentando conclusões finais e algumas previsões e sugestões de trabalhos futuros.

Conclui-se com este trabalho a viabilidade da implementação de um sistema de refrigeração híbrido com a utilização de um controlador *fuzzy* e uma rede Zigbee. A viabilidade do *fuzzy* se baseia na facilidade de implementação, bom desempenho e, principalmente, na economia de energia gerada pelo mesmo. Apesar de todos os problemas enfrentados durante a realização do trabalho, pode-se notar a grande facilidade para o desenvolvimento deste tipo de controlador, principalmente devido ao fato de possuir um funcionamento quase que intuitivo. Obviamente, um conhecimento prévio de características do ambiente é desejável e ajuda significativamente na implementação da lógica *fuzzy*. Entretanto, esses conhecimentos não são nem de longe comparáveis aos inúmeros modelos matemáticos necessários para a implementação de outros tipos de controladores e, portanto, torna o sistema muito mais “comerciável”, já que possui grande facilidade de ser posto em prática.

Pode-se classificar o sistema com lógica *fuzzy*, com relação à complexidade de implementação, como um modelo nem tão complexo quanto controladores que exigem métodos matemáticos (PID, PI, etc), mas também não tão simples quanto um método liga-desliga. Contudo, a economia gerada pela implementação do controle *fuzzy* torna-o vantajoso com relação ao método mais simples. Entretanto, sua aplicabilidade possui a desvantagem de não ser tão genérica. Ou seja, para que se obtenha um comportamento adequado, é necessário um controlador específico para cada ambiente em que se deseje implementá-lo, modelo este que irá variar principalmente devido às características de trocas de calor, volume de ar e capacidade de resfriamento do sistema. Esse é o fator que o torna ainda pouco difundido. Talvez a utilização de um controlador que tenha como variáveis de entrada termos mais genéricos como o erro ou a taxa de variação do erro, e que possua uma robustez aceitável, possa obter a flexibilidade necessária para impulsionar a popularização desse sistema.

Durante o desenvolvimento do trabalho, muitos problemas foram constatados e solucionados. Entre eles podemos citar a estabilidade da rede Zigbee, a implementação de uma lógica de controle realmente híbrida, problemas de leitura do sensor de umidade relativa, e até mesmo questões de robustez do controlador *fuzzy* que só foram possíveis serem observadas graças à grande variação do clima neste período do ano. Entretanto, com a experiência obtida durante este trabalho, algumas questões foram levantadas para implementações em trabalhos futuros. Entre estas questões podemos citar:

- Implementação de um controlador PID mais robusto através de um levantamento completo de todas as variáveis que influem termicamente no ambiente – Como já dito inúmeras vezes neste trabalho, o controlador PID utilizado não possui a robustez necessária para funcionar adequadamente em todas as épocas e com qualquer tipo de mudança de variáveis externas. Apesar da rede de sensores possuir todos os sensores necessários, o controle não leva em conta fatores como temperatura externa, temperatura das salas ao redor, irradiação solar, número de pessoas no ambiente, etc. Um levantamento de todas essas variáveis e uma medição de como cada uma influi no sistema é um trabalho bastante dispendioso, mas que possibilitará a implementação de um controle adequado.
- Possibilitar o controle da abertura e fechamento do dumper do sistema – Como também já foi dito, o funcionamento do sistema convencional de refrigeração está eletricamente atrelado ao sistema de abertura e fechamento do dumper, isto é, ao ligarmos o sistema convencional o dumper se abre e ao desligá-lo o dumper se fecha. Seria interessante que este controle ficasse por conta do projetista.

Um problema sério encontrado neste trabalho foi a dificuldade em controlar a umidade no interior da sala. Em dias chuvosos se, por alguma razão, o sistema evaporativo for acionado, mesmo que por pouco tempo, a manta permanecerá úmida por um longo período (talvez o dia todo) e isso gera um excesso de umidade que não pode ser controlado. Se houvesse o controle do dumper, este poderia manter-se sempre aberto evitando com isso que um excesso de umidade vindo do sistema evaporativo pudesse prejudicar o conforto térmico.

- Desenvolver um duto de entrada de ar sem passar pelo sistema evaporativo – A justificativa desta proposta é a mesma da dita acima. Pode-se ver nas figuras 7.18 e 7.19 que variações

bruscas de umidade e temperatura ocorrem neste período do ano. Se o sistema evaporativo estivesse sendo utilizado por um período de tempo e subitamente o tempo fechasse e começasse a chover, seria interessante que o ar vindo de fora não passasse mais pela manta úmida, condição esta, que é impossível para o sistema atual.

- Desenvolver uma lógica *fuzzy* utilizando como variáveis de entrada o erro e a taxa de variação do erro – Com a experiência adquirida neste trabalho chegou-se a conclusão que a forma mais simples e robusta de implementar um controlador *fuzzy* para a finalidade proposta seria utilizando-se as variáveis “erro” e “variação do erro”. Isso porque, da forma que o controlador foi feito, o seu desempenho ainda está diretamente relacionado às variáveis externas.
- Implementação do controlador *fuzzy* em linguagem C no próprio microcontrolador – Se isso fosse feito poderia ter uma rede sem fio, completamente independente de um PC. O uso do PC seria optativo e apenas com o intuito de integrar a rede a um software supervisor.
- Integração da rede com outros sensores e atuadores para automação predial – Poderia-se desenvolver, por exemplo, um conjunto de sensores e atuadores visando detecção de incêndio, detecção do número de pessoas no ambiente, entre outros. Para isso, far-se-ia uso de funções mais avançadas de rede como a adição de módulos roteadores. A vantagem em não criar outra rede para estes fins é que com uma rede maior poderia-se obter todas as informações de forma centralizada.

10 REFERÊNCIAS

- Urzedá, C. C. (2006). *“Software Scada como Plataforma para Racionalização Inteligente de Energia Elétrica em Automação Predial”*. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade de Brasília, 81p.
- Santos, R. J. (2005). *“Controle fuzzy para Racionalização de Energia em Processo de Condicionamento de Ar”*. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade de Brasília, 134p.
- Oliveira, D. B. S., Zanatt, M. P. B. F. e Santos, R. A. (2007). *“Redes de Sensores e Atuadores Wireless para Automação Predial”*. Projeto de Graduação, Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade de Brasília, 48p.
- Gallo, E. A. e Ribeiro, F. N. (2007). *“Índice de Conforto Térmico ISO7730 em Automação Predial.”* Projeto de Graduação, Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade de Brasília, 98p.
- MESHNETICS, *ZigBit™ Development Kit 2.0 User’s Guide*, manual fornecido em CD pelo fabricante, 2008.
- Queiroz, R. B. and Azevedo, R. C. A. (2009). *“Rede de Sensores sem Fio para Automação Predial com Módulos MeshBean”*. Projeto de Graduação, Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade de Brasília, 81p.
- ATMEL CORPORATION, *BitCloud User Guide* 2009, disponível em < http://www.atmel.com/dyn/resources/prod_documents/doc8199.pdf.> , acesso em 5 de agosto de 2009.

Ávila, Alexandra; Saloio, Breno. *Instrumentação e controle de um sistema de ar condicionado híbrido*(2009). Projeto de Graduação, Departamento de Engenharia Mecatrônica da Universidade de Brasília

FANGER, P. O. Thermal comfort – analysis and applications in environmental engineering. United States: McGraw-Hill Book Company, 1972. 244 p.

ISO 7730. Moderate Thermal Environments – Determination of the PMV and PPD indices and specification of the conditions for thermal comfort. International Organization for Standardization, Geneva, 1995.

Link J, Pepler R. 1970. Associated fluctuations in daily temperature, productivity and absenteeism. No 2167 RP-57, ASHRAE Transactions 1970, vol 76, Part II,

Federspiel C, Liu G, Lahiff M et al. 2002. Worker performance and ventilation: of individual data for call-center workers. Proceeding of Indoor Air 2002.

Niemelä R, Hannula M, Rautio S, Reijula K, Railio J. 2002. The effect of indoor air temperature on labour productivity in call centres – a case study. Energy and Buildings.

Seppanen, Olli; Fisk, William J; Faulkner, David. *Cost Benefit Analysis of the night-time ventilative cooling in office building*

Em: <http://www.osti.gov/bridge/servlets/purl/813396-hZB8LT/native/813396.pdf>

Bauchspiess, A., Souza, A. S., Leite, A. A. C, Ramos, L. M. A., Perreira, E. S. e Santos, R. J.(2004). “Fuzzy Thermal Control with Remote Access for Building Automation.” In: *11th IFAC INCOM*, Savador,Brazil, 6 pp.

Tanscheit, R. (1999). “*Fundamentos de Lógica Fuzzy e Controle Fuzzy.*” DEE – Puc, Rio de Janeiro.

Ferreira Jr., P. A. and Bauchspiess, A. (2009). “Energy Saving in Building Automation Using ZigBee Wireless Network and Fuzzy Control.” In: *20th International Congress of Mechanical Engineering*, Gramado – RS.

<http://www.energaia.pt/poupe/ar.php>

http://www.refrigeracao.net/Assuntos_atuais/brasil_grande_mercado.htm

11 – ANEXO I

Algumas especificações do projeto do ar condicionado híbrido, instalado no LAVSI serão mostradas abaixo.

AI.1 Planta Baixa

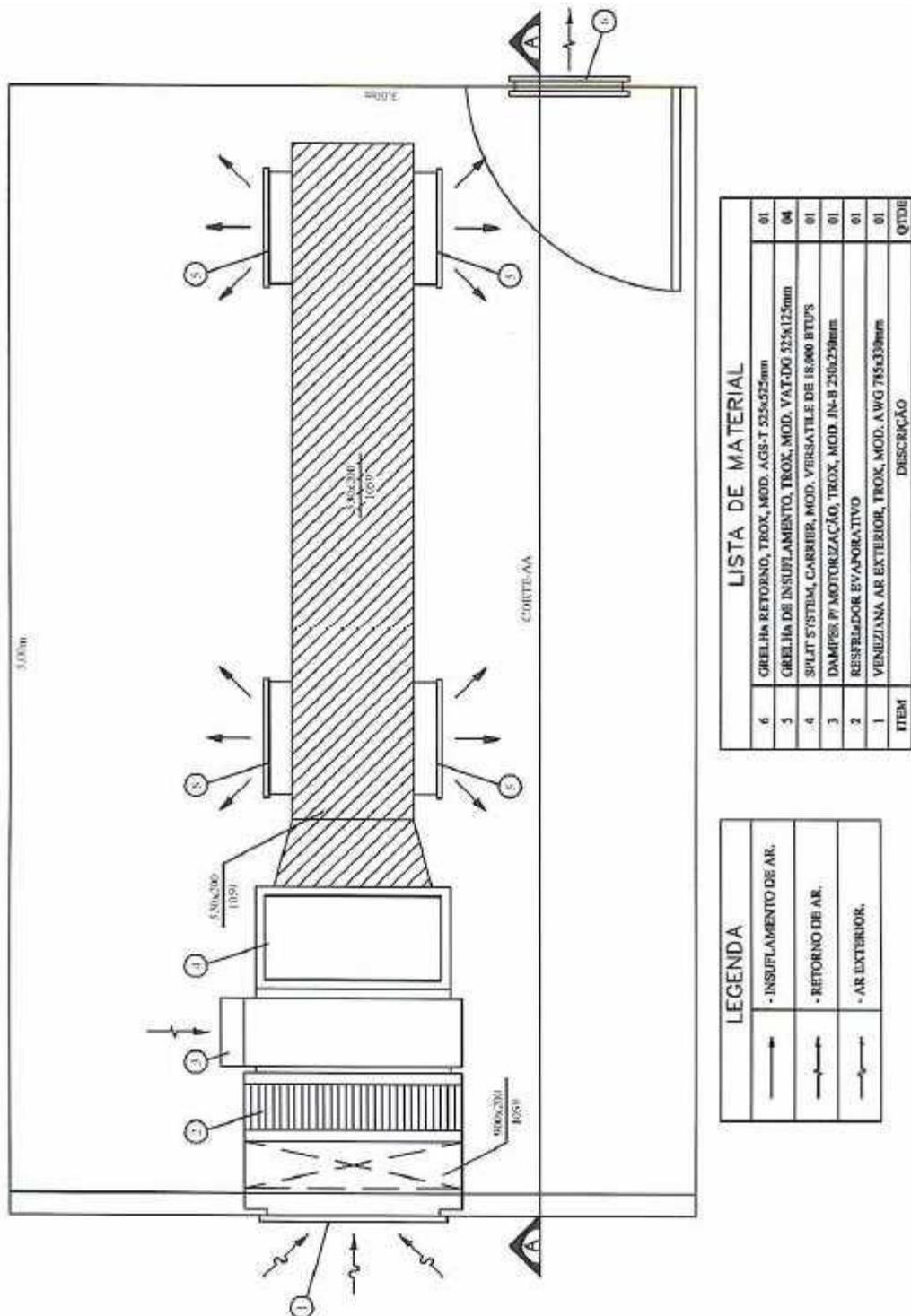
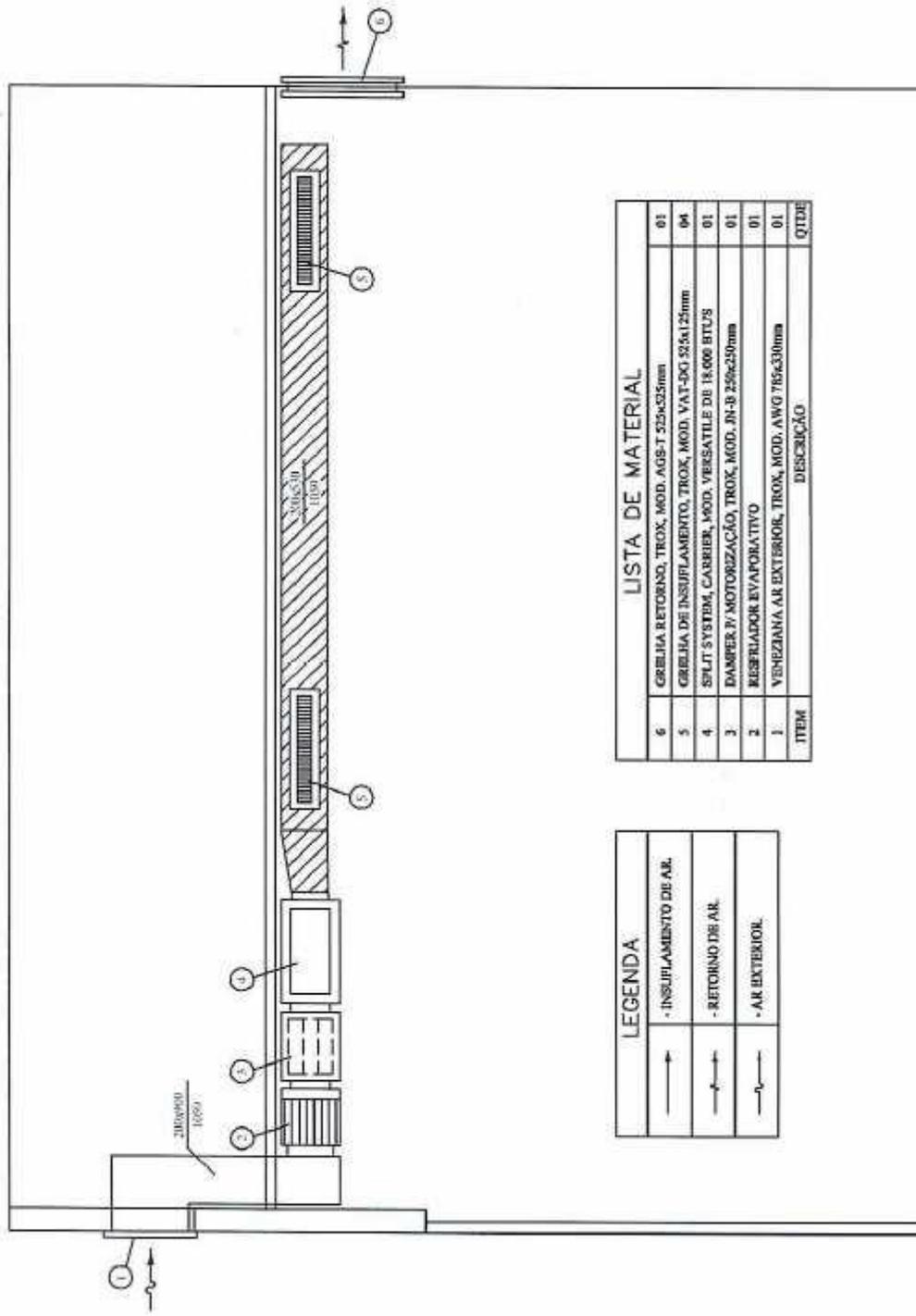


Figura AI.1 - Projeto do Sistema Híbrido do Laboratório LAVSI (Planta Baixa)

Al.2 Vista em



corte

LISTA DE MATERIAL	
ITEM	DESCRIÇÃO
6	GRELHA RETORNO, TROX, MOD. AGS-T 525x335mm
5	GRELHA DE INSUFLAMENTO, TROX, MOD. VA-T-DC 525x125mm
4	SPLIT SYSTEM, CARRIER, MOD. VERSATILE DE 18.000 BTU/S
3	DAMPERS 7/ MOTORIZAÇÃO, TROX, MOD. JN-B 250x250mm
2	REFRIGERADOR EVAPORATIVO
1	VENEZANA AR EXTERIOR, TROX, MOD. AWG 765x310mm

LEGENDA	
	- INSUFLAMENTO DE AR.
	- RETORNO DE AR.
	- AR EXTERIOR.

Figura Al.2 - Projeto do Sistema Híbrido do Laboratório LAVSI (Planta Baixa)

Al.3 Diagrama de Força

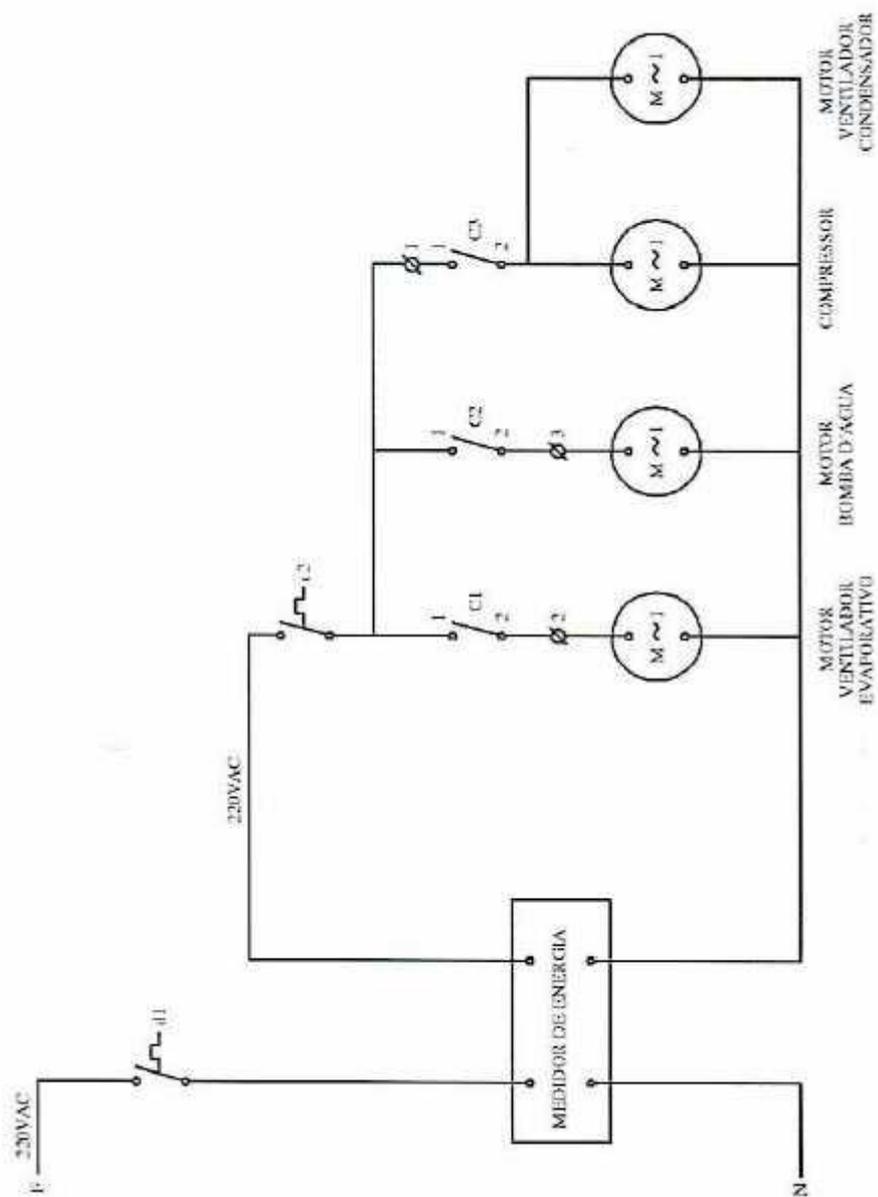


Figura Al.3 - Projeto do Sistema Híbrido do Laboratório LAVSI (Diagrama de Força)

Al.4 Diagrama de Comandos

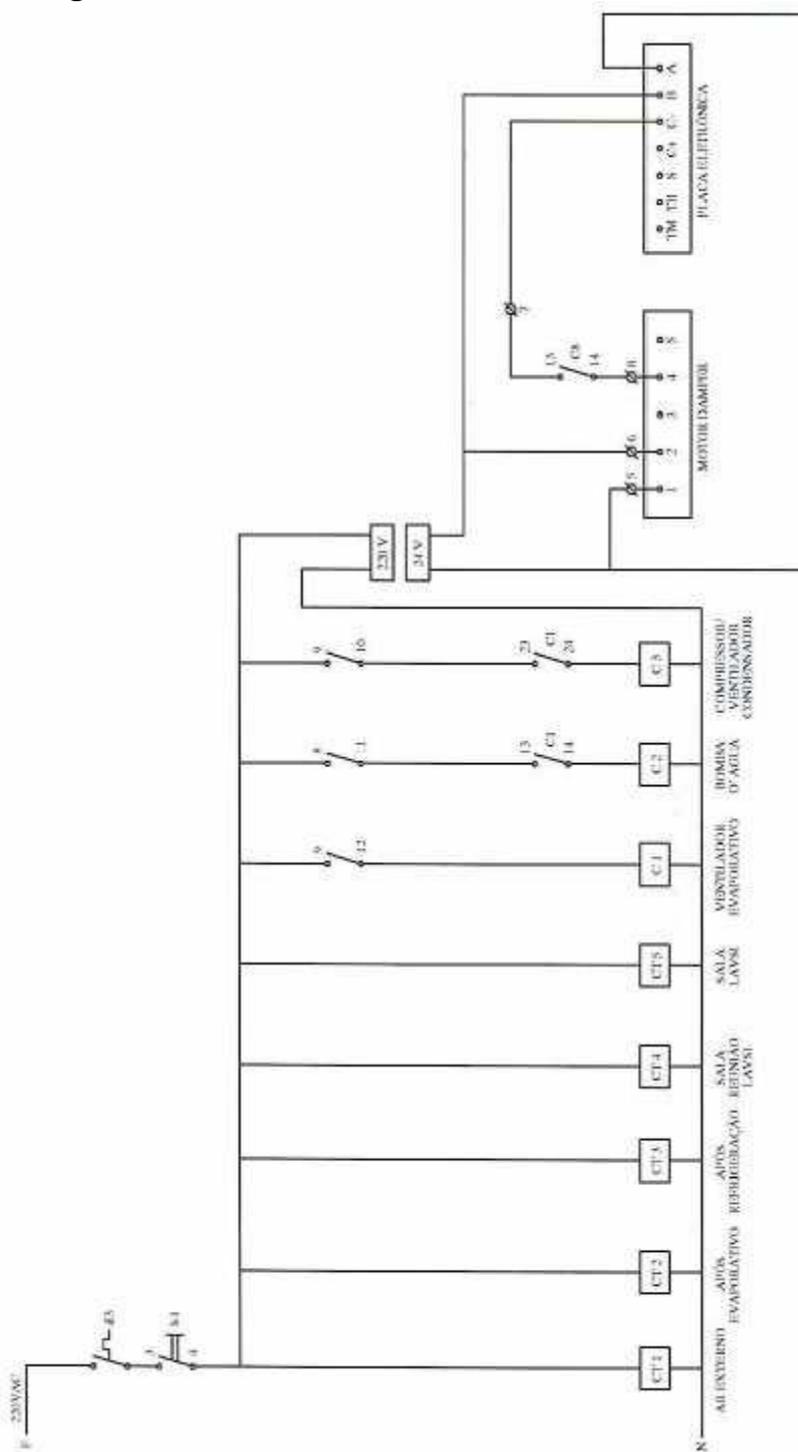


Figura Al.4 - Projeto do Sistema Híbrido do Laboratório LAVSI (Diagrama de Comando)