

**“UTILIZAÇÃO DE CONTROLE FUZZY PARA A
RACIONALIZAÇÃO DE ENERGIA EM PROCESSO DE
CONDICIONAMENTO DE AR”**

RONALDO DE JESUS SANTOS

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

FACULDADE DE TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

**CONTROLE FUZZY PARA RACIONALIZAÇÃO DE
ENERGIA EM PROCESSO DE CONDICIONAMENTO DE
AR**

RONALDO DE JESUS SANTOS

ORIENTADOR: Dr. Ing. ADOLFO BAUCHSPIESS

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

PUBLICAÇÃO: ENE.DM - 220/05

BRASÍLIA/DF: JUNHO – 2005

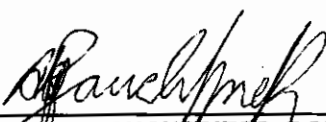
**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

**“UTILIZAÇÃO DE CONTROLE FUZZY PARA A RACIONALIZAÇÃO
DE ENERGIA EM PROCESSO DE CONDICIONAMENTO DE AR”**

RONALDO DE JESUS SANTOS

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA
ELÉTRICA DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, COMO
PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE.**

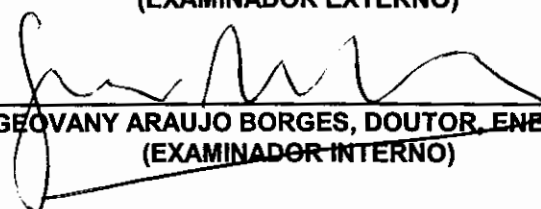
APROVADA POR:



**ADOLFO BAUCHSPIES, DOUTOR, ENE/UNB
(ORIENTADOR)**



**CARLOS EDUARDO PEREIRA, DOUTOR, UFRGS
(EXAMINADOR EXTERNO)**



**GEOVANY ARAUJO BORGES, DOUTOR, ENE/UNB
(EXAMINADOR INTERNO)**

BRASÍLIA, 03 DE JUNHO DE 2005.

FICHA CATALOGRÁFICA

SANTOS, RONALDO DE JESUS.

Controle Fuzzy para Racionalização de Energia em Processo de Condicionamento de Ar [Distrito Federal] 2005.

xvii, 134p., 297 mm (ENE/FT/UNB, Mestre, Engenharia Elétrica, 2005). Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Elétrica.

1. Sistemas Inteligentes

3. Economia de Energia

I. ENE/FT/UnB

2. Lógica Fuzzy

4. Automação Predial

II. Título

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

SANTOS, RONALDO DE J. (2005). Controle Fuzzy para Racionalização de Energia em Processo de Condicionamento de Ar. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, Publicação ENE.DM-220/05, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 134p.

CESSÃO DE DIREITOS

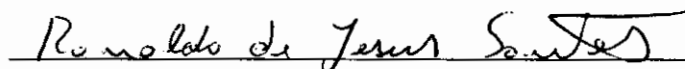
AUTOR: Ronaldo de Jesus Santos.

TÍTULO: Controle Fuzzy para Racionalização de Energia em Processo de Condicionamento de Ar.

GRAU: Mestre

ANO: 2005

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.



Ronaldo de Jesus Santos

Rua Maceió Qd.133 Lt.01 Ap.304 Bl.06 Pq. Amazônia
74.843-140 Goiânia – GO – Brasil.

Pai, amado e admirado.
Saudade eterna.

AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar à minha amada esposa, pelo apoio incondicional desde a idéia inicial, passando pelos anos de sacrifício e separação, à confecção do trabalho final. Lição do amor eterno e verdadeiro.

Sou eternamente grato aos meus pais e irmãos que sabendo da grandeza do desafio acreditaram e confiaram suas esperanças em mais esta etapa de nossas vidas.

Ao prof. Adolfo Bauchspiess em especial pela oportunidade de desenvolver este trabalho, pelo apoio, pela amizade, consideração e impecável orientação.

Ao prof. Geovany A. Borges pela sua amizade e o tempo dispensado, sempre com muito apreço e consideração, na co-orientação deste projeto.

Aos amigos de mestrado: Bruno Luigi, Daniel Fontana, Kenneth Sampaio, Flávio Vidal, Gustavo Mello e Alfredo Américo pelo apoio e amizade.

À empresa Landis&Gyr pelo apoio material e financeiro oferecido neste projeto, confiando na competência desta instituição e dos alunos nele envolvido. A Capes pela ajuda financeira através da bolsa de mestrado.

RESUMO

CONTROLE FUZZY PARA RACIONALIZAÇÃO DE ENERGIA EM PROCESSO DE CONDICIONAMENTO DE AR

Autor: Ronaldo de Jesus Santos

Orientador: Adolfo Bauchspiess

Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica

Brasília, junho de 2005.

O mercado de energia elétrica no Brasil experimenta um crescimento de 4,5% ao ano, devendo ultrapassar os 100mil MW (Mega Watts) em 2008. Para atender a esta demanda, seriam necessários investimentos da ordem de 7 bilhões de dólares ao ano. Nos anos de 2002 e 2003, porém, os investimentos não ultrapassaram a quantia de 5 bilhões de dólares, gerando um déficit anual de 23% em 2002 e 35% em 2003. O aumento do consumo de energia associado à falta de investimentos na geração e distribuição desta, obriga o governo e a sociedade a tomada de medidas alternativas a fim de evitar o colapso no sistema energético do país num futuro próximo. Segundo pesquisa da empresa Metroquattro®, os aparelhos de condicionamento de ar são responsáveis pela maior parte do consumo de energia em prédios não residenciais, chegando ao valor 62,9% da energia consumida (prédios pequenos).

A proposta deste trabalho é construir um controlador “inteligente” que utilizando a tecnologia de automação predial disponível no mercado atual, e que possa ser incorporado ao controle de sistemas de ar condicionado. E através do monitoramento de variáveis geralmente negligenciadas pelos controladores tradicionais (incidência solar diferenciada), em conjunto com a estratégia de controle escolhida em função de um conhecimento especialista, gere uma economia substancial no consumo de energia destes aparelhos, preocupando-se sempre com a manutenção do conforto térmico do ambiente controlado. Por se tratarem de sistemas não lineares, variantes no tempo e deslocamento, a opção escolhida para implementação deste controlador foi à técnica de controle moderno conhecida como controle *fuzzy*.

Para validação da eficiência no controle e economia de energia dos controladores implementados, foi construída uma maquete que representa um prédio não residencial

composto por cinco salas, cada qual com portas e janelas que interligam os ambientes internos e externos da maquete. Na fase inicial do projeto, foi levantado um análogo elétrico linear da maquete construída a fim de poupar tempo na fase de projeto e testes dos controladores estudados, uma vez que este pode ser utilizado e simulado em software. Após a validação final dos controladores no sistema térmico real, verificou-se que todos os controladores implementados foram capazes de manter o conforto térmico do ambiente, sendo que os controladores: proporcional e *fuzzy* conseguiram os melhores resultados neste sentido e com a menor variação de temperatura.

O controlador “inteligente” *fuzzy* superou os outros controladores em termos de economia de energia chegando a atingir o valor de 25% em relação ao controle liga-desliga, enquanto que o controle proporcional obteve apenas 8,3% para a mesma comparação.

ABSTRACT

FUZZY CONTROL FOR ENERGY RATIONALIZATION IN AIR CONDITIONING PROCESS

Author: Ronaldo de Jesus Santos

Supervisor: Adolfo Bauchspiess

Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica

Brasília, July of 2005.

The electrical energy market in Brazil is growing 4,5% a year, exceeding 100 thousand MW (Mega Watts) in 2008. To take care of to this demand, would be necessary investments of 7 billions dollars per year. In the years of 2002 and 2003, however, the investments did not exceed the amount of 5 billions dollars, generating an annual deficit of 23% in 2002 and 35% in 2003. The increase of energy consumption associated with the lack of investments in generation and distribution, compels the government and society take alternative actions to prevent the collapse in the country energy system in a near future. In a the Metroquattro Company research was concluded that the air conditioning devices are responsible for the major energy consumption in non residential buildings, getting the value of 62.9% of the consumed energy (small building). This work objective is to project an "intelligent" controller that using the automation technology available in the market actually, could be incorporated the control of air conditioning systems. And through the monitoring of variables generally missed by traditional controllers (differentiated solar incidence), in set with the control strategy chosen in function of a specialist knowledge, generates a substantial economy of energy consumption in these devices, being also focused in maintaining thermal comfort of the controlled environment. By the fact of dealing with non linear, time variant and displacement systems, the option chosen for implementation of this controller was to the modern control technique known as fuzzy control. For the control and energy economy efficiencies validation of the implemented controllers, a prototype which represents a non residential building was built. It has five rooms, each one with doors and windows that establish internal and external environment connections. In the initial phase of project, a linear electric analogous of the constructed prototype was built in order to save time in the project and tests phases of the studied controllers, once this can be used and simulated in software. After the final controllers validation in the real thermal system, was verified that all the implemented

controllers were able to keep the environment thermal comfort, and the controllers: proportional and fuzzy obtained the best results in this direction with the lesser temperature variation. The "intelligent" fuzzy controller was better than the others in terms of energy economy reaching the value of 25% when compared to the traditional on-off controller while the proportional control got only 8,3%.

SUMÁRIO

1 - INTRODUÇÃO.....	1
1.1 OBJETIVO DO TRABALHO	3
1.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	5
2 - CONTROLE DE PROCESSOS TÉRMICOS.....	7
2.1 CONTROLE LIGA-DESLIGA.....	7
2.3 CONTROLE PID.....	10
2.3.1 Lei de controle	10
2.3.1.1 Controle proporcional.....	12
2.3.1.2 Controle integral.....	12
2.3.1.3 Controle derivativo.....	13
2.3.2 Controle digital pid.....	13
2.3.2.1 Discretização do controle pid.....	15
2.4 CONTROLE FUZZY	17
2.4.1 Fuzzyficador	19
2.4.2 Máquina de inferência	23
2.4.3 Defuzzyficador.....	24
3 - SISTEMA TÉRMICO DE AUTOMAÇÃO PREDIAL	26
3.1 DESCRIÇÃO DO SISTEMA	26
3.2 FENÔMENOS ENVOLVIDOS	28
3.2.1 Radiação.....	29
3.2.2 Condução.....	30
3.2.3 Convecção.....	32
3.4 PROJETO DE AQUECIMENTO.....	34
3.4 ANÁLOGO ELÉTRICO	35
4 -APARATO EXPERIMENTAL	41
4.1 HARDWARE.....	41
4.1.1 Circuito de Medição e Controle	41

4.1.2 Circuito de Comunicação Serial Multiponto.....	45
4.1.3 Driver de Potência	47
4.1.4 Circuito de Medição de Potência	48
4.2 SOFTWARE DE AUTOMAÇÃO.....	49
4.2.1 Supervisório	50
4.2.2 Servidor de Comunicação Web.....	52
4.2.3 Protocolo de Comunicação.....	54
 5 - RESULTADOS EXPERIMENTAIS E ANÁLISE.....	 57
5.1 PARAMETRIZAÇÃO DO ANÁLOGO ELÉTRICO.....	57
5.2 PROJETO DO CONTROLADOR INTELIGENTE.....	63
5.3 CONTROLE DO SISTEMA DE CONDICIONAMENTO DE AR.....	73
 6 – CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS.....	 86
6.1 – PRINCIPAIS CONCLUSÕES	86
6.2 – PERSPECTIVAS PARA CONTINUIDADE DAS PESQUISAS	87
 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	 88

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 - Consumo de energia não-residencial em Brasília, 2001 (Metroquattro®).....	2
Tabela 1.2 - Condições de conforto térmico, 1992 (ASHRAE <i>Standard</i> 55).....	4
Tabela 4.1- Características do microcontrolador PIC8F252.....	42
Tabela 4.2 - Características do sensor de temperatura LM35.....	42
Tabela 4.3 - Valores do byte ST.....	54
Tabela 5.1 - Consumo total dos controladores sem variação da temperatura externa.....	79
Tabela 5.2 - Consumo total dos controladores com variação da temperatura externa.....	82
Tabela 5.3 - Economia de energia em relação ao controle liga-desliga sem diferença de temperatura externa entre as salas.....	84
Tabela 5.4 - Economia de energia em relação ao controle liga-desliga com diferença de temperatura externa entre as salas.....	85

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Diagrama de blocos do controlador liga-desliga.....	8
Figura 2.2 - Histese no acionamento liga-desliga.	8
Figura 2.3 - Forma de onda típica na saída do controlador liga-desliga.....	9
Figura 2.4 - Banda proporcional X Ação linear do controlador PID.	11
Figura 2.5 - Implementação típica do controlador digital.....	14
Figura 2.6 - Diagrama de blocos: etapas de processamento <i>fuzzy</i>	18
Figura 2.7 - Funções de pertinência tipo sigmóide.....	20
Figura 2.8 - Função de pertinência tipo triangular.	21
Figura 2.9 - Função de pertinência tipo trapesoidal.	22
Figura 2.10 - Superfície resultante da relação entre as variáveis do controlador <i>fuzzy</i>	25
Figura 3.1 - Planta baixa da maquete de automação predial.....	27
Figura 3.2 - Maquete de automação predial em madeira prensada	28
Figura 3.3 - Sobreposição do análogo elétrico e da planta baixa da maquete.	37
Figura 3.4 - Análogo elétrico da maquete de automação predial.....	39
Figura 4.1 - Configuração básica de ligação elétrica do LM35.	43
Figura 4.2 - Esquema de ligação do LM35 com o PIC18F252.....	43
Figura 4.3 - Onda PWM (<i>Pulse Width Modulation</i>).....	44
Figura 4.4 - Circuito elétrico de medição e controle do processo térmico.	45
Figura 4.5 - Barramento de comunicação serial multiponto.	46
Figura 4.6 - Optoacoplador MOC3081.....	47
Figura 4.7 - Circuito do <i>driver</i> de potência.....	48
Figura 4.8 - Esquemático do dispositivo de medição de potência consumida - <i>Datasheet</i> SA9602E.....	49
Figura 4.9 - Evolução das temperaturas no tempo	50
Figura 4.10 - Área de parametrização e definição de estratégias no supervisório.	50
Figura 4.11 - Área de habilitação de variáveis e visualização de temperaturas no supervisório.	51
Figura 4.12 - Supervisório de automação predial.....	51
Figura 4.13 - Funcionamento lógico do programa servidor.....	52
Figura 4.14 - Interface do programa servidor.	54
Figura 4.15 - Protocolo de comunicação PUS	54

Figura 4.16 - Protocolo de comunicação PDS	55
Figura 4.17 - Protocolo de comunicação PSD.	56
Figura 5.1 - Resposta ao degrau no atuador da sala um	58
Figura 5.2 - Resposta ao degrau no atuador da sala cinco	58
Figura 5.3 - Modelo simulink para obtenção da resposta ao degrau	59
Figura 5.4 - Resposta ao degrau do análogo elétrico sala um.....	60
Figura 5.5 - Resposta ao degrau do análogo elétrico sala cinco	61
Figura 5.6 - Diferença entre o sinal real e simulado na sala um	61
Figura 5.7 - Diferença entre o sinal real e simulado na sala cinco.....	62
Figura 5.8 - Condições de conforto térmico - ASHRAE <i>Standart</i> 55 ()	64
Figura 5.9 - Funções de pertinência da variável erro	66
Figura 5.10 - Função de pertinência da variável <i>setpoint</i>	66
Figura 5.11 - Função de pertinência da variável diftext	67
Figura 5.12 - Funções de pertinência da variável saída.....	67
Figura 5.13 - Visão das regras e funções de pertinência do controlador <i>fuzzy</i>	68
Figura 5.14- Superfície de relação entre erro X <i>setpoint</i> X saída	69
Figura 5.15- Superfície de relação entre erro X diftext X saída.....	70
Figura 5.16 -Modelo simulink para ajuste do controlador <i>fuzzy</i>	71
Figura 5.17 - Resposta do controlador proporcional com ganho fixo ($K_p=3$) à variação do <i>setpoint</i>	72
Figura 5.18- Resposta do controlador inteligente à variação do <i>setpoint</i>	72
Figura 5.19- Controle <i>fuzzy</i> para <i>setpoint</i> de 60°C e temperatura externa a sala de 45°C .	74
Figura 5.20- Planta baixa da nova configuração da maquete.....	75
Figura 5.21- Controle liga-desliga com delta de 1°C	75
Figura 5.22- Controle proporcional com $K_p=3$	76
Figura 5.23- Controle <i>fuzzy</i>	77
Figura 5.24- Consumo de energia dos atuadores no controle liga-desliga sem variação de temperatura externa	78
Figura 5.25- Consumo de energia dos atuadores no controle proporcional sem variação de temperatura externa	78
Figura 5.26- Consumo de energia dos atuadores no controle <i>fuzzy</i> sem variação de temperatura externa	79
Figura 5.27- Controle liga-desliga com delta de 1°C e temperatura externa de 40°C	80
Figura 5.28- Controle proporcional com $K_p=3$ e temperatura externa de 40°C	81

Figura 5.29- Controle <i>fuzzy</i> e temperatura externa de 40°C	81
Figura 5.30- Consumo de energia dos atuadores no controle liga-desliga com variação de temperatura externa	82
Figura 5.31- Consumo de energia dos atuadores no controle proporcional com variação de temperatura externa	83
Figura 5.32- Consumo de energia dos atuadores no controle <i>fuzzy</i> com variação de temperatura externa	83

1 - INTRODUÇÃO

O mercado de energia elétrica no Brasil experimenta um crescimento da ordem de 4,5% ao ano, devendo ultrapassar a casa dos 100 mil MW (Mega Watts) em 2008. O planejamento de médio prazo prevê a necessidade de investimentos da ordem de US\$ 6 a 7 bilhões/ano para a expansão da matriz energética brasileira e atendimento da demanda do mercado consumidor (www.EnergiaBrasil.gov.Br, 2005).

Segundo dados do governo até março de 2002 havia uma projeção de investimentos de 6,41 bilhões (US\$), porém até agosto deste mesmo ano foram investidos apenas 4,94 bilhões (US\$), ou seja, houve um déficit de 23 % em investimentos que gerou déficit também relativo a potência de energia gerada neste período que chegou a 22% menos que o projetado.

Considerando o mesmo período para o ano de 2003 a situação foi ainda pior, o déficit subiu para 40% em relação a produção de energia e 35% em relação a investimentos no setor. Ou seja, dos 7,19 bilhões (US\$) projetados para investimento até março de 2003 foram repassados efetivamente somente 4,69 bilhões de dólares.

O aumento do consumo de energia aliado a falta de investimentos na geração e distribuição da mesma impôs ao órgão gestor deste setor a tomada de medidas a fim de racionalizar o uso deste recurso. Dentre estas estão: campanhas publicitárias de conscientização do uso racional de energia elétrica, criação de fundos de financiamento e incentivo à pesquisa, alteração de limites de consumo para indústrias, aumento de valores de multas para quem ultrapassar tais limites, entre outros.

As classes de consumo residencial, comercial e rural obtiveram expressivos ganhos de participação no consumo de energia elétrica nos últimos 4 anos, enquanto o segmento industrial teve a menor participação neste crescimento, principalmente pela utilização de tecnologias mais eficientes no uso da eletricidade, aliada às medidas de racionalização de consumo postas em prática especialmente na década de 90 (www.aneel.gov.br, 2005).

Um estudo feito pela empresa Metroquattro®, uma integradora local de automação predial, mostrou que em Brasília, para prédios não-residenciais, a maior demanda por energia é para a climatização, conforme mostra a Tabela 1.1. Estes dados evidenciam a relevância da racionalização de energia para a realidade atual do Brasil.

Tabela 1. 1 – Consumo de energia não-residencial em Brasília, 2001 (Metroquattro®).

Uso Final	Consumo Médio de Energia Elétrica		
	<i>Pequenos</i>	<i>Médios</i>	<i>Grandes</i>
<i>Ar Condicionado</i>	62,9 %	56,0%	48,6%
<i>Iluminação</i>	28,8 %	32,0%	18,5%
<i>Elevadores</i>		3,5%	10,4%
<i>Bombas</i>	-	0,3%	2,5%
<i>CPD's, computadores</i>	7,0 %	8,0%	16,0%
<i>Outros</i>	1,3 %	0,2%	4,0%
TOTAL	100,0 %	100,0%	100,0%

A pesquisa e o desenvolvimento de tecnologia para a automação de casas, escritórios e prédios são em grande parte responsabilidade de uma área da engenharia conhecida como, automação predial. A automação predial tem se desenvolvido muito nos últimos anos, graças à rápida evolução e baixo custo da tecnologia eletroeletrônica, popularizando o acesso a este tipo de tecnologia. Este fator possibilita a implementação de novas técnicas de controle como a lógica *fuzzy* em dispositivos eletrônicos de automação.

1.1 – OBJETIVO DO TRABALHO

A automação predial é uma área em pleno desenvolvimento na qual diversos trabalhos de pesquisa vêm sendo realizados. Tais trabalhos têm como proposta desde o controle simples de um sistema térmico específico, que pode visar o conforto de um determinado ambiente, até a investigação de sistemas, onde a rapidez e eficiência do controle são os fatores de interesse. A rapidez da evolução desta área se deve não somente pelo uso de dispositivos eletrônicos de última geração, como também pela popularização e aplicabilidade desta tecnologia em diversos setores da sociedade. O setor energético brasileiro, por exemplo, anseia por soluções que possam gerar uma economia no consumo de energia, o que conseqüentemente evitaria ações emergenciais como: racionamento, horário de verão, cobrança de encargos para manutenção de outras fontes de energia, entre outros. E a automação predial inteligente vem de encontro a tal anseio sendo detentora de tecnologias capazes de contribuir para a obtenção de tais soluções.

O principal objetivo deste trabalho é fazer uso da tecnologia de automação predial disponível no mercado e em conjunto com teorias e técnicas de controle moderno aplicáveis a sistemas térmicos, implementar um dispositivo de controle “inteligente” que atue sob aquecedores, condicionadores de ar, fazendo com que estes através da estratégia de controle baseada no conhecimento especialista gerem economia de energia em relação a métodos de controle tradicionais altamente difundidos e utilizados neste tipo de equipamento.

1.2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Desde que Willis Carrier, em 1902, projetou o primeiro sistema de ar condicionado para uma gráfica em Nova York (www.global.carrier.com , 2005) uma grande evolução pôde ser presenciada. Nos anos 70, devido ao embargo ao petróleo em 1973, Sistemas de Automação Predial (BAS - Building Automation Systems) passaram a incorporar Sistemas de Gerenciamento de Energia (EMS - Energy Management Systems) (Valente de Oliveira, J., et.al, 2000). Atualmente utilizam-se Redes Inteligentes de Gerenciamento de Energia (IEMN - Intelligent Energy Management Network) (Huang, H.-Y. et.al , 2004):

Fanger propôs em 1970 o índice PMV (Predicted Mean Vote), que é largamente utilizado para avaliar conforto em prédios (Charles, K.E., 2003) (Yang, K.H., et.al, 1997). O índice PMV utiliza uma Escala de Sensação Térmica proposta por Fanger (-3,-2,-1,0,1,2,3) e adotada pela ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers).

O índice PMV utiliza quatro variáveis físicas (temperatura do ar, velocidade do ar, temperatura radiante média e umidade relativa) e duas variáveis pessoais (isolação da vestimenta e nível de atividade) para prever a sensação térmica média de um grande conjunto de pessoas. De acordo com o *padrão 55* (1992) da ASHRAE as Condições de Conforto são (Charles, K.E., 2003) descritas na tabela 1.2:

Tabela 1. 2 – Condições de conforto térmico, 1992 (ASHRAE *Standard 55*).

Estação	Temperatura Ótima	Faixa aceitável de Temperaturas	Condições para as demais entradas PMV
Inverno	22°C	20-23°C	Umidade relativa: 50% Velocidade relativa média: < 0.15m/s Temperatura radiante média: 1.2 met Isolação da Vestimenta: 0.9 clo
Verão	24.5°C	23-26°C	Umidade relativa: 50% Velocidade relativa média: < 0.15m/s Temperatura radiante média: 1.2 met Isolação da Vestimenta: 0.5 clo

O projeto EDIFICIO (*Efficient Design Incorporating Fundamentals Improvements for Control and Integrated Optimisation*) (Priolo, C., et.al, 2001), da Comissão Europeia em conjunto com JOULE III investigou (12/1997-11/2000) diferentes aspectos no sentido de melhorar o gerenciamento de energia e conforto em prédios. A tarefa AD1 do projeto EDIFICIO lidava com o Controle Térmico. Diferentes abordagens foram estudadas. A programação dinâmica de Bellman, apesar de fornecer a solução ótima, não era prática, devido à complexidade computacional.

Shepherd e Batty em 2003 mostraram (Shepherd, A.B., Batty, W.J., 2003), baseados em simulações dinâmicas, que o controle *fuzzy* pode reduzir o consumo anual de energia para 81.78% do valor obtido com plantas PID HVAC tradicionais. As variações de conforto observadas: PID 1.92°C, 10.72% umidade relativa; *Fuzzy* 1.72°C, 10.23% umidade relativa.

A lógica *fuzzy* desenvolvida a partir dos trabalhos de Zadeh é largamente utilizada na atualidade em uma grande variedade de aplicações como em eletrônica de consumo, industriais e também de automação predial (Bauchspiess, A., et.al, 2004) (Becker, M., et.al, 1994) (He, M., et.al, 2005) (Hojati, M., Gazor, S., 2002)(Kolokotsa, D., et.al, 2001)(Valente de Oliveira, J., et.al, 2000).

1.3 – ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

O trabalho está dividido em seis capítulos, sendo o primeiro deles a introdução.

No segundo capítulo são apresentados os tipos de controladores mais usados no controle de sistemas de condicionamento de ar, detalhando-se suas principais características e fornecendo embasamento teórico para a implementação dos mesmos no sistema térmico real.

No terceiro capítulo é feita uma descrição detalhada do sistema térmico implementado dando uma visão da estrutura construída (Maquete) através de sua planta baixa e do material do qual esta é constituída. São estudados ainda os fenômenos térmicos envolvidos neste tipo de sistema, conhecimento essencial para o ajuste inicial dos parâmetros do análogo elétrico. Além disso, é feita uma sucinta explanação a respeito do projeto de aquecimento da maquete, passando-se em seguida para o análogo elétrico implementado, suas principais características, as vantagens de sua utilização em projetos desta natureza e a forma como foram ajustados os seus parâmetros.

A maioria dos projetos de automação predial envolve a utilização e desenvolvimento de dispositivos eletrônicos de hardware e a implementação de softwares. Estes têm a função de possibilitar o monitoramento e controle das variáveis do processo. Alguns destes

dispositivos e softwares como: drivers de potência, interface de comunicação serial multiponto, circuito de controle, interface supervisorio, servidor de controle e etc, foram implementados durante a realização deste trabalho e são descritos, discutidos e detalhados no quarto capítulo desta dissertação.

O quinto capítulo é dedicado à demonstração dos resultados obtidos tanto em simulações quanto em experimentos realizados fazendo-se ainda alguns comentários e análises a respeito destes.

No sexto e último capítulo são apresentadas conclusões finais, a contribuição efetiva do trabalho desenvolvido e algumas sugestões para a continuidade do mesmo.

2 – CONTROLE DE PROCESSOS DE CONDICIONAMENTO DE AR

2.1 – CONTROLE LIGA-DESLIGA

O controlador liga-desliga (do inglês, *on-off*) também conhecido como controlador de duas posições é relativamente simples e barato e, por esta razão, largamente utilizado tanto em sistemas industriais como prediais (Ogata, 1990).

A ação deste controlador se resume a duas situações: quando o sinal de realimentação assume valores acima ou abaixo do sinal de referência. No primeiro caso o controlador mantém o sinal de atuação em um valor mínimo (ou zero) e conseqüentemente nenhuma potência é aplicada à planta, já no segundo caso o controlador aplica a potência máxima ao processo.

O controlador liga-desliga possui limitações no que diz respeito ao comportamento dinâmico e em regime permanente do sistema em malha fechada. Suas aplicações restringem-se a sistemas onde a precisão não é requisito, bem como um bom desempenho dinâmico. Como exemplos de aplicação deste tipo de controle, podem ser citados: o termostato da geladeira, o controle de nível de água a partir de bóias e controle de temperatura de aparelhos de ar condicionado.

Controladores proporcionais com ganho muito alto geralmente atuam como controladores liga-desliga, isto se deve ao fato de que todo controlador tem um fator físico limitante no seu sinal de saída, seja a sua fonte de tensão, fonte de corrente ou outro dispositivo responsável pela geração do sinal, ou seja, o limitante físico do dispositivo age como um saturador.

Neste tipo de ação o controlador é modelado por um relê, figura 2.1:

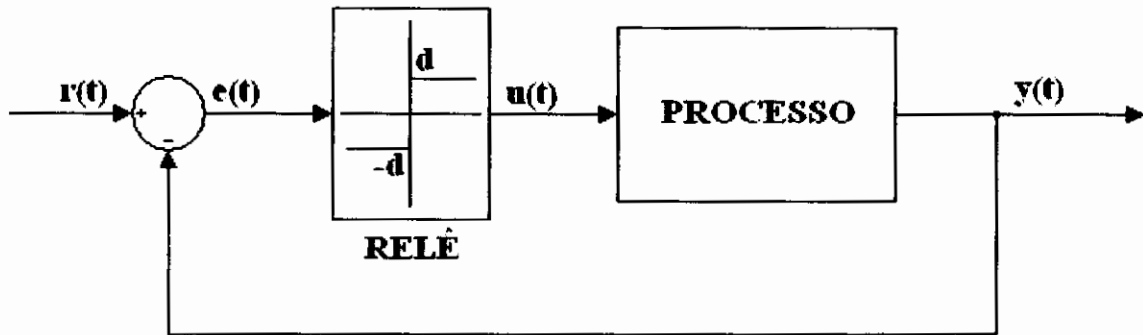


Figura 2.1 – Diagrama de bloco do controlador liga-desliga

O sinal de controle $u(t)$ pode assumir apenas dois valores, equação 2.1:

$$u(t) = \begin{cases} d & \text{para } e(t) > 0 \\ -d & \text{para } e(t) < 0 \end{cases} \quad (2.1)$$

A função pode ser implementada como um simples comparador ou mesmo como um dispositivo físico, geralmente, eletromecânico conhecido como relê. Note que neste caso teríamos uma inconsistência em zero e, na presença de ruídos, haveria chaveamentos espúrios quando o sinal de erro: $e(t) = r(t) - y(t)$ estivesse próximo de zero. Para evitar este tipo de problema, utiliza-se na prática, o que chamamos de “controlador liga-desliga com histerese ou intervalo diferencial”, figura 2.2:

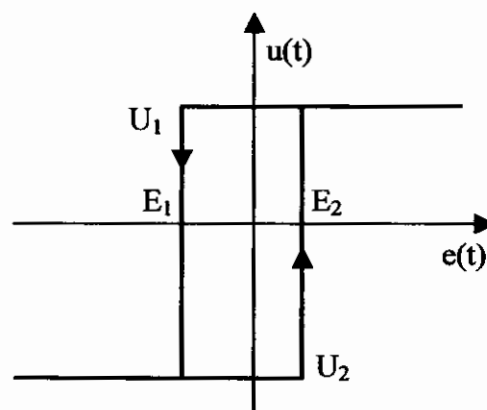


Figura 2.2 – Histerese no acionamento liga-desliga

Neste caso o controlador tem o seguinte comportamento:

- Se $u(t) = U_1$, é necessário que o valor de $e(t)$ seja menor que $-E_1$ para que haja um chaveamento para U_2 ;
- Se $u(t) = U_2$, é necessário que o valor de $e(t)$ seja superior ao valor E_2 para que haja um chaveamento para U_1 .

A figura 2.3 mostra a curva de resposta em malha fechada e o respectivo sinal de controle de um sistema primeira ordem com controlador liga-desliga com histerese.

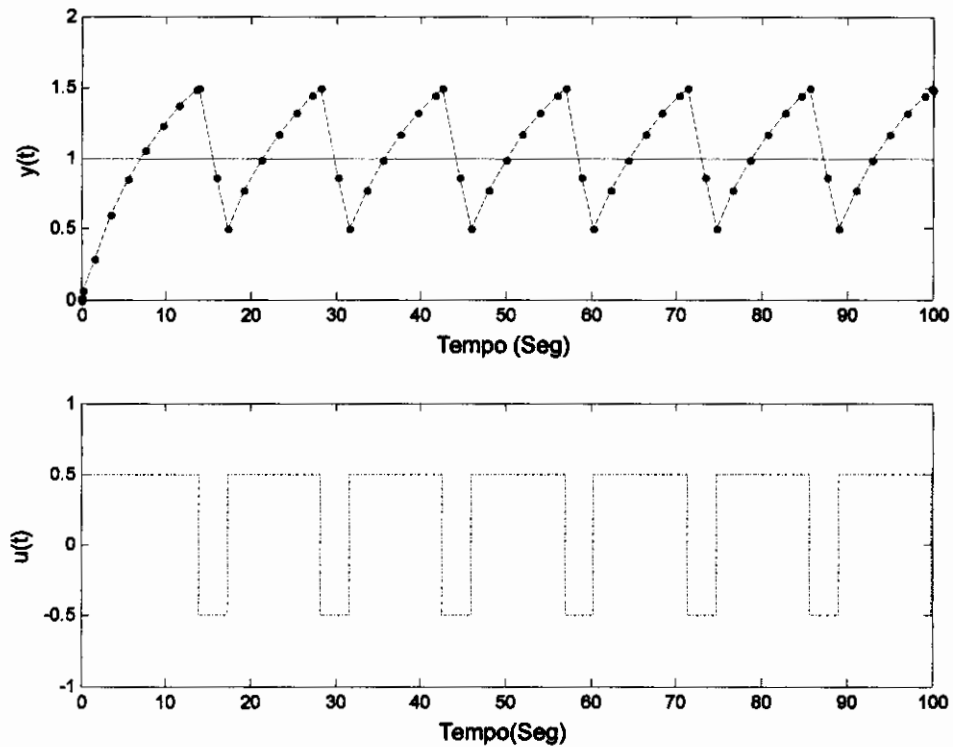


Figura 2.3 – Forma de onda típica na saída do controlador liga-desliga

Nota-se que em regime permanente, a saída do sistema apresenta uma oscilação em torno do valor de referência. Este fato denota a baixa precisão obtida com este tipo de controlador. A amplitude e a frequência da oscilação são funções do intervalo diferencial $[E_1, E_2]$ e de $[U_1, U_2]$ e a determinação do intervalo diferencial deve ser feita levando-se em consideração: a precisão desejada, os níveis de ruído e a vida útil dos componentes.

2.3 – CONTROLE PID

Este tipo de controlador tem sido muito utilizado na indústria devido sua eficiência no controle de sistemas lineares e a facilidade de projeto e baixo custo. No Japão mais de 90% dos loops de controle são do tipo PID (Yamamoto, S. e Hashimoto, I., 1991).

A implementação de controladores PID, bem como outras técnicas de controle, tem passado por inúmeras mudanças no aspecto tecnológico, sendo os primeiros controladores baseados em relês, motores elétricos síncronos, sistemas hidráulicos ou pneumáticos. Estes sistemas foram substituídos por componentes eletrônicos chegando atualmente à utilização de microprocessadores.

Mesmo sendo muito difundidos os controladores PID geralmente não são utilizados da melhor forma possível, sendo freqüentemente ajustados de forma desotimizada, não utilizando sua ação derivativa. Isto se dá principalmente pela dificuldade de ajuste dos três parâmetros que definem as ações do controlador que na maioria das vezes são obtidos heurísticamente através de tentativa e erro.

O principal objetivo deste controlador é aproveitar as características particulares de cada uma das ações a fim de se obter uma melhora do comportamento transitório e em regime permanente do sistema controlado.

2.3.1 – Lei de controle

No controlador PID a ação de controle é gerada pela soma de três termos, equação 2.2:

$$u(t) = u_p(t) + u_i(t) + u_d(t) \quad (2.2)$$

onde $u_p(t)$ faz referência a parte proporcional, $u_i(t)$ a parte integral e $u_d(t)$ a parte derivativa do sinal de controle.

Na prática por questões de ordem física ou de segurança, não é possível a aplicação de sinais de controle de amplitudes ilimitadas, tendo assim um limite máximo U_{Max} e mínimo U_{Min} relacionado ao sinal controle $u(t)$.

Considerando-se os limites de controle tem-se o seguinte sinal de saída, equação 2.3:

$$u_e(t) = \begin{cases} U_{Max} & \text{se } u(t) \geq U_{Max} \\ u(t) & \text{se } U_{Max} > u(t) > U_{Min} \\ U_{Min} & \text{se } u(t) \leq U_{Min} \end{cases} \quad (2.3)$$

Sendo assim, se o sinal de controle ultrapassar U_{Max} ou for menor que U_{Min} dizemos que houve saturação do sinal, neste caso o comportamento do controlador torna-se não linear. Para que este volte a ser linear é necessário que este esteja num dado intervalo $[w_1, w_2]$ chamado banda proporcional, equação 2.4:

$$P_b = w_2 - w_1 \quad (2.4)$$

$$w_1 = \frac{U_{Min}}{K} \text{ e } w_2 = \frac{U_{Max}}{K} \quad (2.5)$$

Desta forma, pode-se dizer que quanto maior a banda proporcional, maior será a faixa de atuação linear do controlador. A representação gráfica desta relação está detalhada na figura 2.4.

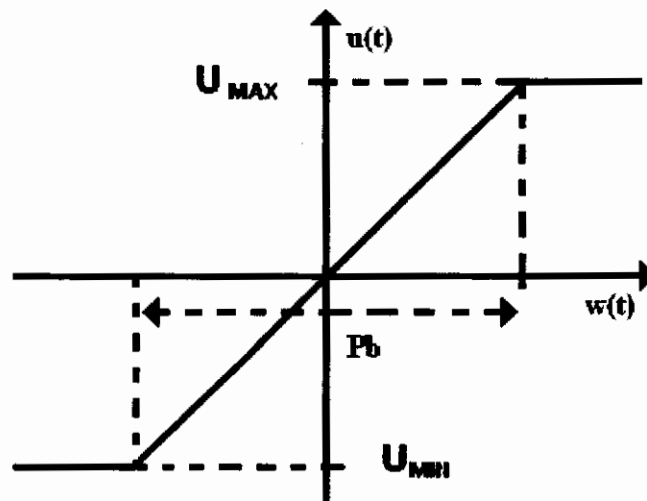


Figura 2. 4 - Banda proporcional X Ação linear do controlador PID.

2.3.1.1 – Controle proporcional

A parte proporcional do controle é uma simples realimentação de sinal, equação 2.6:

$$u_p(t) = K_p \cdot e(t) \quad (2.6)$$

Sendo $e(t)$ o erro e K o ganho proporcional do controlador. O erro $e(t)$ é definido como a diferença entre o valor desejado ($r(t)$: “setpoint”) e o valor real da variável de saída $y(t)$ conhecida como variável controlada.

A equação 2.7 representa o cálculo de erro:

$$e(t) = r(t) - y(t) \quad (2.7)$$

A equação 2.8 é resultado da substituição da equação 2.7 na equação 2.6:

$$u_p(t) = K_p (r(t) - y(t)) \quad (2.8)$$

2.3.1.2 – Controle integral

O controle proporcional geralmente deixa o sistema controlado com um erro em regime permanente (se este tiver pólos na origem) e a ação integral tem a função de eliminar este erro. Este tipo de controle é representado através da equação 2.9:

$$u_i(t) = K_I \int_{-\infty}^t e(s) ds = \frac{K}{T_I} \int_{-\infty}^t e(s) ds \quad (2.9)$$

A idéia é que o sinal de controle $u(t)$ dependa diretamente do erro acumulado.

2.3.1.3 – Controle derivativo

O controle derivativo é usado no sentido de prever a rapidez com que a variável controlada se aproxima ou se afasta do sinal de referência. Sendo descrito pela equação 2.10:

$$u_D(t) = K_D \frac{de(t)}{dt} \quad (2.10)$$

A ação derivativa do controlador PID é de suma importância em sistemas cuja resposta a transitórios deve ser muito rápida, sendo altamente influenciados por perturbações e exigindo uma ação rápida por parte do controlador.

2.3.2 – Controle digital pid

A evolução tecnológica culminou na redução dos custos de produção de dispositivos digitais, facilitando o acesso a este tipo de tecnologia e tornando comum a utilização de microcontroladores na construção de controladores dos mais diversos tipos.

Vários aspectos importantes devem ser considerados quando da implementação de controladores digitais, como: tempo de resposta do sistema, determinação da taxa de amostragem das variáveis analógicas, frequência de trabalho do controlador entre outros.

A figura 2.5 mostra um diagrama de blocos do processo de controle digital de um sistema genérico:

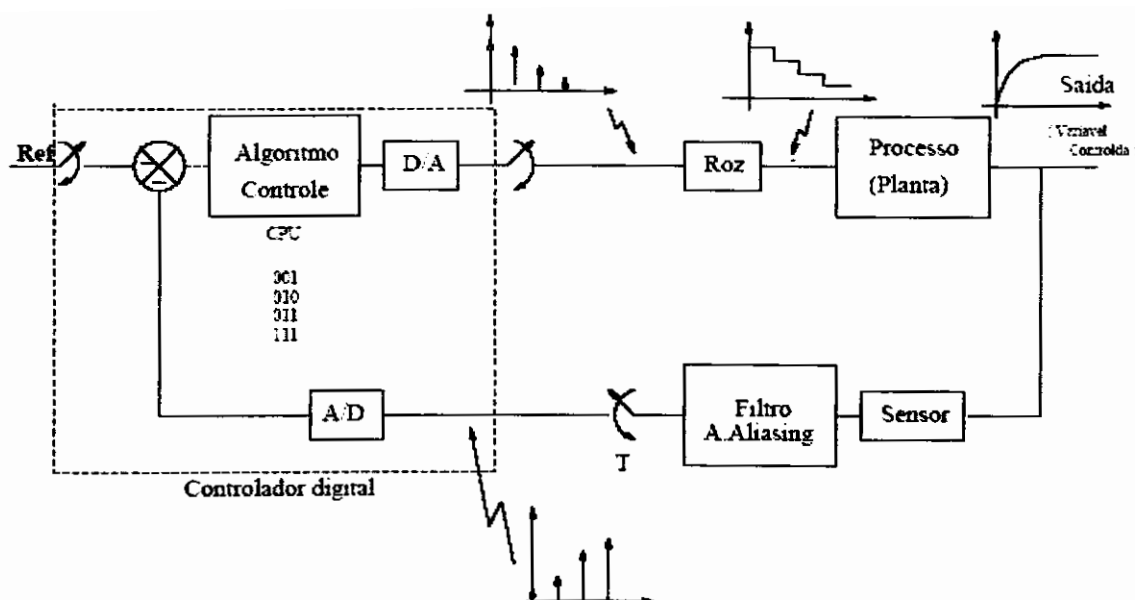


Figura 2.5 –Implementação típica do controlador digital

O algoritmo controle PID em seu formato digital deve seguir a seqüência básica de passos abaixo:

- Esperar a interrupção do relógio interno;
- Ler e digitalizar as entradas analógicas;
- Calcular o sinal de controle;
- Ajustar a saída do controle (Analógica, PWM e etc);
- Atualizar as variáveis de controle;
- Repetir o ciclo de passos;

Seguindo essa seqüência de passos, com a inserção de ferramentas de auxílio como: filtro anti-aliasing, função minimização de mudança de referência e algoritmo de anti-windup, torna-se possível a implementação de um controlador digital PID.

A obtenção das equações discretas que formam a lei de controle do controlador PID é um fator fundamental na implementação deste tipo de controlador. Estas são obtidas a partir de técnicas de digitalização as quais estão descritas nas subseções seguintes.

2.3.2.1 – Discretização do controle PID

Um dos métodos mais comuns de digitalização do controlador PID é a transformação por partes, que parte do princípio de separação do somatório das partes proporcional, integral e derivativo da equação que formam a lei de controle e em seguida a digitalização de cada uma destas somando-as novamente no final do processo.

A parte proporcional do controlador no formato digital está na equação 2.11:

$$u_p(t) = Ke(t) \quad (2.11)$$

Sendo t_k os instantes de amostragem, com $k = 0,1,2,\dots$, assumindo-se instantes de amostragem igualmente espaçados e o período de amostragem dado pela constante T , obtém-se a frequência de amostragem f_A , equação 2.12:

$$f_A = \frac{1}{T} \quad (2.12)$$

A equação 2.13 descreve a ação proporcional do controlador digital:

$$u_p(t_k) = K(r(t_k) - y(t_k)) \quad (2.13)$$

Já o termo integral que em tempo contínuo descrito pela equação 2.14:

$$u_i(t) = K_I \int e(s)ds = \frac{K}{T_I} \int e(s)ds \quad (2.14)$$

Assume o seguinte formato em tempo discreto, equação 2.15:

$$u_i(t) = \frac{K}{T_i} \int e(\tau)d\tau \quad (2.15)$$

Na digitalização da parte integral, podem ser usados diversos métodos de aproximação. Usando a de Euler também conhecida por aproximação pelas diferenças em avanço, obtém-se a equação 2.16:

$$u_I(t_{k+1}) = u_I(t_k) + \frac{KT}{T_i} e(t_k) \quad (2.16)$$

Utilizando o método da aproximação pelas diferenças em atraso chega-se a equação 2.17:

$$u_I(t_k) = u_I(t_{k-1}) + \frac{KT}{T_i} e(t_k) \quad (2.17)$$

Usando um terceiro método de aproximação conhecido como aproximação de Tustin ou Bilinear, o qual se baseia na aproximação numérica da integral a partir do método dos trapézios tem-se a equação 2.18:

$$u_I(t_{k+1}) = u_I(t_k) + \frac{KT}{T_i} \frac{e(t_{k+1}) + e(t_k)}{2} \quad (2.18)$$

O termo derivativo da equação do controlador PID é dado pela equação 2.19:

$$u_D(t) = K_D \frac{de(t)}{dt} \quad (2.19)$$

E assim como o termo integral, o derivativo pode ser digitalizado utilizando-se dos mesmos métodos de aproximação. Segue abaixo a aproximação do termo derivativo para os três métodos.

- Método das diferenças em avanço, ou aproximação de Euler:

$$u_D(t_{k+1}) = \left(1 - \frac{NT}{T_d}\right) u_D(t_k) - KN(y(t_{k+1}) - y(t_k)) \quad (2.20)$$

- Método das diferenças em atraso:

$$u_D(t_k) = \frac{T_d}{T_d + NT} u_D(t_{k-1}) - \frac{KT_d N}{T_d + NT} (y(t_k) - y(t_{k-1})) \quad (2.21)$$

- Método Bilinear ou aproximação de Tustin:

$$u_D(t_k) = \frac{2T_d - NT}{2T_d + NT} u_D(t_{k-1}) - \frac{2KT_d N}{2T_d + NT} (y(t_k) - y(t_{k-1})) \quad (2.22)$$

2.4 – CONTROLE FUZZY

Além do tradicional algoritmo de controle PID existem técnicas de controle que utilizam outras fundamentações teóricas, como: lógica *fuzzy*, redes neurais artificiais, sistemas especialistas, algoritmos genéticos, controle variável e adaptativo e etc.

Operadores humanos são capazes de controlar processos complexos baseando-se em informações imprecisas ou aproximadas. A estratégia adotada pelos operadores humanos é também de natureza imprecisa e geralmente possível de ser expressa em termos lingüísticos. A teoria de conjuntos *fuzzy* e os conceitos de lógica *fuzzy* podem ser utilizados para traduzir em termos matemáticos a informação expressa por um conjunto de regras lingüísticas. Se um operador humano for capaz de articular sua estratégia de ação como um conjunto de regras da forma SE ENTÃO, um algoritmo passível de ser implementado em computador pode ser construído, conforme demonstrado já nos anos 70 (Babuška, 1996). O resultado é um sistema de inferência baseado em regras, no qual a teoria de conjuntos *fuzzy* fornece o ferramental matemático para lidar com tais regras lingüísticas. É importante notar que nesse tipo de sistema não é necessário que o modelo matemático do processo seja conhecido, o que se constitui em uma vantagem sobre outros procedimentos em que é fundamental a descrição matemática do sistema controlado.

Controladores PID convencionais não são aplicáveis a sistemas não lineares, sem mencionar sistemas complexos e vagos que exigem conhecimento especialista. Em casos como este é possível a utilização de controladores *fuzzy* capazes de suportar não somente sistemas lineares como também não lineares.

Sistemas de controle *fuzzy* têm sido investigados em muitas aplicações técnicas e industriais desde sua concepção (Mamdani, 1974). A lógica *fuzzy* tem sido cada vez mais usada com sucesso em muitas aplicações comerciais (Berenji, 1992). Algumas pesquisas mostraram as vantagens do controle *fuzzy* em relação ao tradicional (Shepherd, A.B., Batty, W.J., 2003) como: mais robustez no controle de sistemas complexos (não lineares e variantes no tempo) e a principal vantagem, a facilidade de projeto do controlador graças ao fato de que este tem como base a semelhança com o raciocínio humano sendo o conhecimento especialista o fator determinante para um bom desempenho do controlador eliminando-se a dependência do modelo matemático do processo a ser controlado.

O controle *fuzzy* se baseia em um conjunto condicional de regras, sendo que o ajuste e projeto de controle são definidos por um conjunto de funções de pertinência e regras *fuzzy*. Não existe um procedimento padrão de ajuste e projeto desse tipo de controlador. Desta forma o procedimento mais utilizado é o método da tentativa e erro.

Controladores *fuzzy* são constituídos de quatro partes, responsáveis desde a tradução da informação de entrada até a geração do resultado na saída. O entendimento detalhado de cada uma dessas partes é muito importante para a sua correta implementação.

A figura 2.6 representa em forma de Diagrama de Blocos as etapas de funcionamento do controlador *fuzzy*:

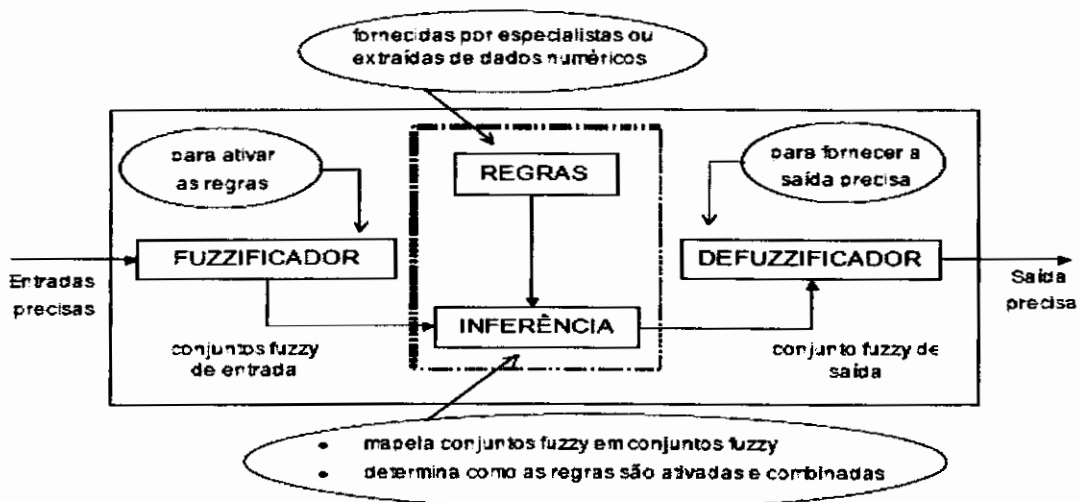


Figura 2.6 – Diagrama de blocos: etapas de processamento *fuzzy*

2.4.1 – Fuzzyficador

O fuzzyficador tem a função de mapear as variáveis reais em lingüísticas, ou seja, realizar a conversão de variáveis reais em variáveis lingüísticas criando uma interface entre o mundo real e os conjuntos fuzzy.

As variáveis utilizadas em aplicações reais são geralmente variáveis contínuas, representadas por números reais ou complexos (corrente elétrica, temperatura, umidade, força, torque etc) em contrapartida, a lógica fuzzy utiliza variáveis lingüísticas. Para que exista uma interface entre o controle ou máquina que utiliza lógica fuzzy e seu exterior (homem, sensores, sistema, etc) faz-se necessária a conversão dos valores exatos em valores lingüísticos e vice-versa.

A idéia da lógica fuzzy está diretamente relacionada ao conceito de função da pertinência. Raciocinando-se com base na teoria clássica de conjuntos, o conceito de pertinência de um elemento a um conjunto fica bem definido. Os elementos de um conjunto A em um determinado universo X simplesmente pertencem ou não pertencem àquele conjunto. Isto pode ser expresso pela função característica f_A da equação 2.25:

$$f_A(x) = \begin{cases} 1 & \text{se } x \in A \\ 0 & \text{se } x \notin A \end{cases} \quad (2.23)$$

O conceito de nebulosidade (*fuzziness*) é introduzido generalizando-se a função característica e é descrita na definição 2.1:

DEFINIÇÃO 2.1 Um conjunto fuzzy é caracterizado por uma função de pertinência mapeando os elementos de um domínio, espaço ou universo de discurso X em um intervalo unitário $[0,1]$ (Zadeh, 1965) Ou seja,

$$A: X \rightarrow [0,1] \quad (2.24)$$

Assim, um conjunto fuzzy A em X deve ser representado como um conjunto de pares ordenados de um elemento genérico $x \in X$ e sua série de funções de pertinência, equação 2.27:

$$A = \{(A(x)/s) | x \in X\} \quad (2.25)$$

A função de pertinência indica o quanto (num intervalo de zero a um) um determinado elemento que está sendo mapeado por esta, pertence a um dado conjunto lingüístico.

A figura 2.7 mostra a distribuição de duas funções de pertinência do tipo sigmóide.

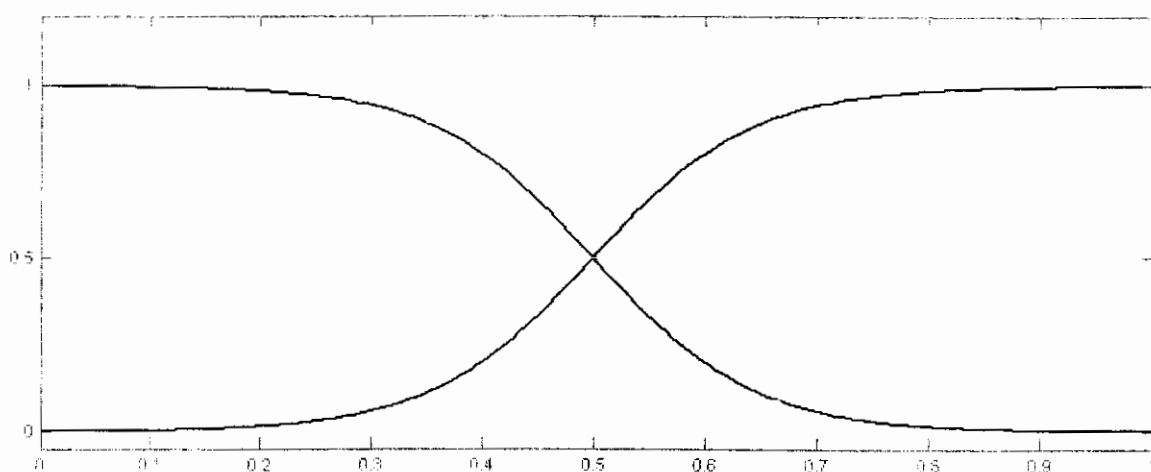


Figura 2.7 –Funções de pertinência tipo sigmóide.

A princípio qualquer função que assuma a forma $A: X \rightarrow [0,1]$ descreve uma função de pertinência associada com um conjunto fuzzy A o qual depende não somente do conceito de ser representado, como também do contexto no qual é usado. Em certos casos o significado semântico capturado pelos conjuntos fuzzy não é tão sensível a variações de forma, e funções simples são muito convenientes. Em muitos casos os conjuntos fuzzy podem ser representados por famílias de funções parametrizadas, sendo que as mais comuns são:

Funções do tipo triangular, cuja representação matemática é dada na equação 2.26:

$$A(x) = \begin{cases} 0, & \text{se } x \leq a \\ \frac{x-a}{m-a}, & \text{se } x \in [a, m] \\ \frac{b-x}{b-m}, & \text{se } x \in [m, b] \\ 0, & \text{se } x \geq b \end{cases} \quad (2.26)$$

Onde m é um valor modal, e a e b representam os limites inferior e superior, respectivamente, para valores não nulos de $A(x)$. No caso de uso da notação explícita a função toma a forma da equação 2.27:

$$A(x; a, m, b) = \max\{\min[(x-a)/(m-a), (b-x)/(b-m)], 0\} \quad (2.27)$$

A representação gráfica da função triangular, figura 2.8:

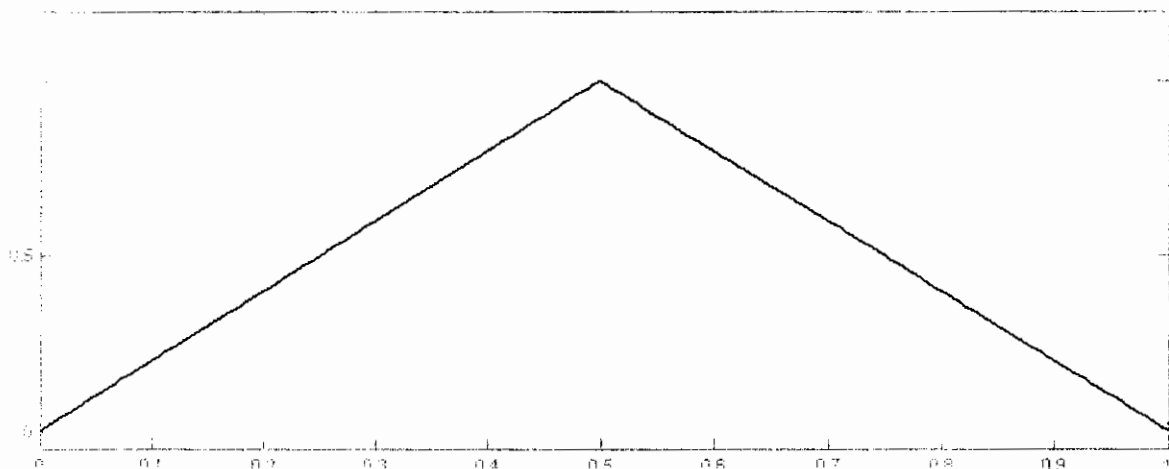


Figura 2.8 - Função de pertinência tipo triangular.

A representação matemática da função trapezoidal é dada pela equação 2.28:

$$A(x) = \begin{cases} 0, & \text{se } x < a \\ \frac{x-a}{m-a}, & \text{se } x \in [a, m] \\ 1, & \text{se } x \in [m, n] \\ \frac{b-x}{b-n}, & \text{se } x \in [n, b] \\ 0, & \text{se } x > b \end{cases} \quad (2.28)$$

Usando a notação equivalente tem-se a equação 2.29:

$$A(x; a, m, n, b) = \max\{\min[(x-a)/(m-a), 1, (b-x)/(b-n)], 0\} \quad (2.29)$$

Sua representação gráfica, figura 2.9:

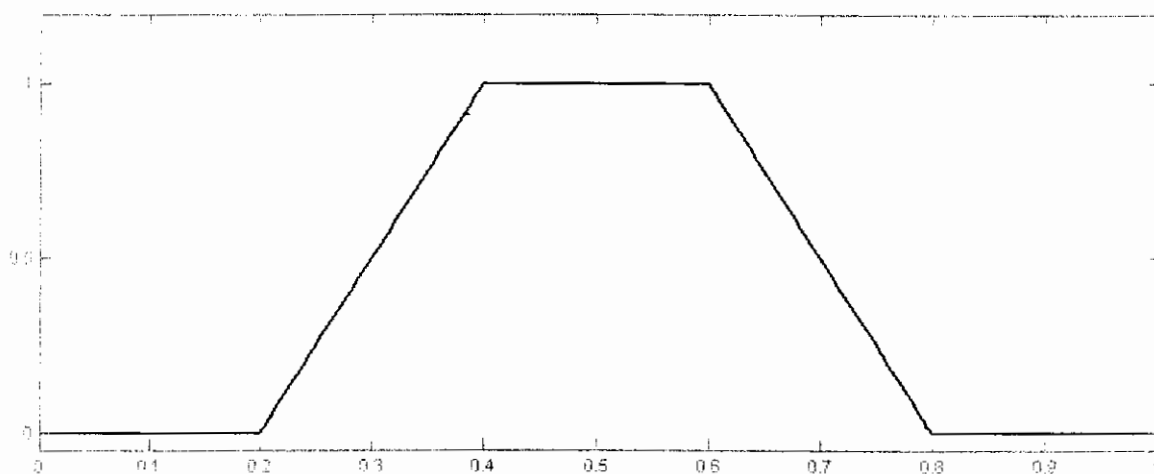


Figura 2.9 - Função de pertinência tipo trapezoidal.

As funções de pertinência do tipo gaussianas, exponenciais e sigmóides, são as mais simples e geralmente as mais utilizadas.

2.4.2 – Máquina de inferência

A máquina de inferência é a segunda etapa de processamento dos dados no controlador. Nela o conhecimento de um especialista é resumido em um conjunto de regras, que ficam armazenadas em uma base de dados e a partir das quais decisões são tomadas. Pode-se dizer que a máquina de inferência é o “cérebro” do controlador fuzzy.

A dependência de uma variável lingüística em relação à outra (independente) é descrita através de uma declaração condicional fuzzy, equação 2.30:

$$R : \text{Se } \Pi^1 \text{ então } \Pi^2 \quad (2.30)$$

onde Π^1 e Π^2 são frases da forma (Π é A) e A é um subconjunto fuzzy de um universo X . Pode ser atribuído a A um significado lingüístico que define o valor de X . Por exemplo:

SE *erro* é grande negativo ENTÃO *saída* é grande positiva.

O algoritmo de controle usa as regras disponíveis e produz, para um determinado estado do processo, a decisão sobre a próxima entrada do processo.

O que fornece ao controlador uma identidade é o conjunto de regras que lhe são fornecidas. Estas constituem a quantidade de informação necessária para executar uma determinada tarefa de controle do processo em questão. Isto é um fator importante que deve ser enfatizado, pois, a essência do controlador reside nas regras de controle, a teoria de conjuntos fuzzy apenas fornece os meios para se traduzir-las em termos matemáticos e para se inferir uma decisão a partir delas.

2.4.3 – Defuzzyficador

A saída do controlador *fuzzy* é um subconjunto *fuzzy* do universo de saída. Como o processo controlado requer um sinal real na sua entrada, deve-se fazer uma interpretação do valor *fuzzy* de saída do controlador. Esta interpretação é chamada de defuzzificação e pode ser realizada de várias formas, sendo as mais utilizadas: Média dos Máximos e Centro de Gravidade.

No caso do método Média dos Máximos a saída determinística (não *fuzzy*), denominada u_{MOM} é obtida tomando-se a média entre os dois elementos extremos no universo de discurso que correspondam aos maiores valores da função de pertinência.

No caso do método Centro de Gravidade a saída denominada u_{COG} é o valor do universo de discurso que divide a área sob a curva da função de pertinência em duas partes iguais.

Cada método de defuzzyficação tem a sua aplicação prática em problemas de controle específicos, mas na maioria dos casos isto não é um fator claro no processo de escolha do mesmo. A forma mais usual de seleção do método de defuzzyficação, assim como na escolha das funções de pertinência, é através de tentativa e erro.

Uma ferramenta importante que pode ser de grande ajuda na escolha destes parâmetros é o gráfico da superfície do controlador, figura 2.10. A maioria das interfaces de desenvolvimento de controladores *fuzzy* como o Matlab®, por exemplo, oferecem essa opção.

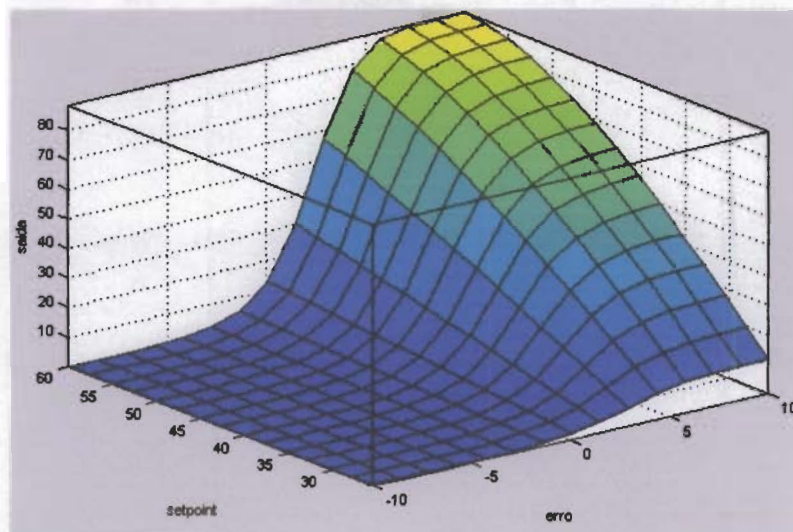


Figura 2.10 –Superfície resultante da relação entre as variáveis do Controlador *Fuzzy*

Através dele é possível acompanhar a evolução da saída em função das entradas. Com a alteração dos métodos de fuzzyficação e defuzzyficação ocorre a modificação do formato da curva, sendo que o processo de mudança de valores e análise do gráfico torna prática a determinação dos parâmetros, métodos e regras convenientes para o controle desejado.

3 – SISTEMA TÉRMICO DE AUTOMAÇÃO PREDIAL

A utilização de um conjunto real de salas para fins de validação dos diversos tipos de controle propostos neste trabalho demandaria recursos como: alocação de salas, instalação de aparelhos de ar condicionado, alteração de layout do ambiente, dentre outros. A fim de simplificar esta etapa do trabalho foi confeccionada uma maquete cujo layout e características estão descritas neste capítulo.

3.1 – DESCRIÇÃO DO SISTEMA

Para fins de validação da eficiência do controle inteligente, foi projetada uma maquete composta por cinco salas e dois túneis. Cada sala possui uma janela localizada na parede que separa o ambiente interno do túnel externo. Além da janela, as salas possuem pelo menos uma porta interligando-as e permitindo ou não o fluxo de ar entre elas.

O ambiente externo foi projetado propositadamente na forma de dois túneis isolados entre si, sendo que a temperatura do ar no interior de cada um deles pode assumir valores distintos. Esta configuração tem a função de possibilitar a simulação de um ambiente real onde ocorre a variação de temperatura externa em função da posição do sol durante o decorrer do dia.

As salas foram numeradas de um a cinco e os túneis de um a dois, a fim de facilitar sua identificação. A disposição das salas, sua identificação numérica entre outros detalhes podem ser observados na planta baixa do projeto, figura 3.1:

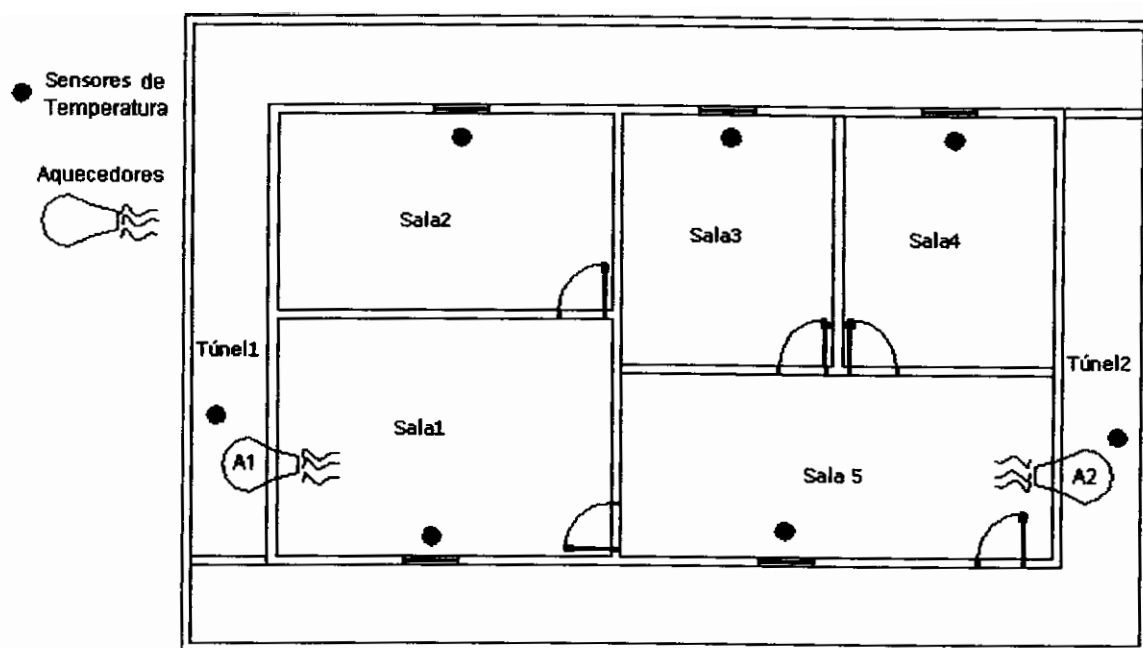


Figura 3.1 – Planta baixa da maquete de automação predial

Além da disposição das portas e janelas, a planta baixa trás também o posicionamento dos sensores de temperatura instalados em cada ambiente cuja função é de prover os dados necessários para monitoração e controle de temperatura nas salas.

Nesta maquete foram instalados dois atuadores, os quais injetam ar aquecido nas salas até que uma determinada temperatura seja atingida conforme referência pré-programada. Para a instalação dos atuadores foram inseridos dois furos nas paredes das salas um e cinco.

A parede que separa a sala três da sala quatro, bem como a que as separa da sala cinco, foram dimensionadas com um pé direito menor que as demais, conseqüentemente não tocando o teto do prédio. Esta abertura superior permite com maior facilidade a troca de calor entre as salas configurando uma situação comum em ambientes comerciais onde a separação interna é feita por meio de divisórias sendo que vários ambientes podem ser aquecidos ou refrigerados por um único dispositivo condicionador de ar.

A partir da planta baixa foi confeccionada, em madeira prensada (material leve, barato e totalmente factível para pequenas construções), a maquete de automação predial onde foi validado o controlador inteligente proposto, figura 3.2.



Figura 3.2 – Maquete de automação predial em madeira prensada

No lugar do teto foi instalado um tampo de vidro dividido em duas partes, o que permite a visualização da situação atual das portas e janelas da maquete. Duas das quinas destes são chanfradas possibilitando o contacto direto do ar dos túneis com o ar do ambiente externo, além de facilitar abertura e fechamento manual de portas e janelas que interligam o meio interno e o externo sem que seja necessária a remoção dos tampos de vidro.

3.2 – FENÔMENOS ENVOLVIDOS

O análogo elétrico é uma aproximação linear do sistema térmico de automação predial (maquete), sistema intrinsecamente não linear. Este modelo é utilizado na fase de desenvolvimento inicial do controlador inteligente, permitindo a simulação de controle do sistema em software direcionando assim o ajuste das funções de pertinência, universo de discurso, base de regras e demais variáveis envolvidas no projeto do controlador fuzzy. Agilizando assim o processo de construção do controlador, que posteriormente deve ter seus parâmetros ajustados em função do controle no sistema real.

Para o desenvolvimento do análogo elétrico do sistema térmico de automação predial, utilizado na etapa de projeto do controlador inteligente, é necessário um estudo dos fenômenos de transporte envolvidos no sistema. Tais fenômenos são importantes para o

correto dimensionamento das grandezas resistivas e capacitivas do análogo, dando a este maior fidelidade no comportamento em relação ao sistema real, o que é conseqüentemente fator determinante no desenvolvimento e ajuste de um controlador inteligente.

Em sistemas térmicos se lida com variáveis diretamente relacionadas ao armazenamento e transporte de calor. A transferência neste tipo de sistema pode ocorrer de três formas: por condução, por convecção ou radiação. As três formas ocorrem simultaneamente e devem ser consideradas, principalmente, para o caso da máxima aproximação de um modelo matemático que represente um sistema térmico real.

3.2.1 – Radiação

A movimentação térmica de partículas elementares as faz emitir energia em forma de radiação eletromagnética. Quanto mais alta a temperatura maior o movimento e mais intensa é a radiação. Esta natureza de radiação é idêntica a outras formas de radiação eletromagnética como: ondas de rádio, luz e raios X. A diferença está simplesmente no comprimento das ondas.

Algumas substâncias absorvem rapidamente a radiação, outras permitem a passagem com maior ou menor intensidade, no caso do vácuo perfeito não há resistência à passagem de radiação. A radiação térmica é contínua e está sempre presente em todas as partes do universo.

Podemos considerar, por exemplo, moléculas em contacto com a superfície de um corpo que absorve radiação, mas que está em contacto com um meio transparente à radiação. As moléculas irradiam energia em todas as direções. Algumas delas deixarão o corpo e viajarão até encontrarem outro meio absorvente, onde transferirão energia aumentando a intensidade de movimentação térmica no corpo recipiente. A temperatura no emissor cairá enquanto a do receptor aumentará, dizemos neste caso que houve transferência de calor. Todo este processo é conhecido como radiação.

Os processos de transferência de calor são quantificados em termos de equações de taxas de transferência de calor apropriadas para cada caso. Tais equações são utilizadas para calcular a quantidade de energia que é transferida por unidade de tempo.

A equação 3.1 demonstra o cálculo do fluxo de calor q (Kcal/s), para os casos em que a transferência de calor é feita por radiação.

$$q_{12} = \frac{\sigma(T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1-\epsilon_1}{A_1 \epsilon_1} + \frac{1}{A_1 F_{12}} + \frac{1-\epsilon_2}{A_2 \epsilon_2}} \quad (3.1)$$

Em que:

- σ = constante de Boltzmann, 0.1713×10^{-8} Btu/(h-ft²-R⁴) ou 5.673×10^{-8} W/(m²-K⁴).
- T = temperatura absoluta, R ou K.
- ϵ = emitância.
- A = área da superfície, ft² ou m².
- F = fator de configuração, uma função geométrica.

Nesta equação assume-se que ambas as superfícies são cinza (onde o fator de emitância ϵ tem o mesmo valor do fator de absorbância α).

3.2.2 – Condução

As moléculas superficiais também irradiam no interior do corpo, mas a energia é absorvida quase que imediatamente por moléculas vizinhas. Uma molécula que está no interior de um corpo tem toda sua energia irradiada absorvida desta maneira e está continuamente perdendo calor para os seus vizinhos, mas também recebe calor deste pelo mesmo processo, então se a região ao redor destas moléculas atinge a temperatura uniforme o efeito em rede é nulo. Se existe gradiente de temperatura qualquer que o seja, haverá transferência de calor na rede partindo das moléculas mais quentes para as mais frias. Este processo é conhecido como condução.

Ao contrário da radiação a condução só acontece na presença de matéria, ou seja, não há condução no vácuo. Desta forma sabemos que a energia em forma de radiação pode passar através de um meio transparente sem afetar a temperatura do mesmo, já no caso da condução de calor de um ponto para outro a variação de temperatura no material que serve de meio é um fator que está implícito ao fenômeno. Em um dia quente, por exemplo, o maior parte do calor necessário para a manutenção da casa fria é perdido por condução através das paredes.

Assim como na radiação o fluxo de calor transferido através de condução pode ser calculado pela equação 3.2:

$$\dot{q} = -kA \frac{dt}{dx} \quad (3.2)$$

Em que:

- $\dot{q}$ = taxa de transferência de calor, em Btu/h ou W.
- k = condutividade térmica, em Btu/(h-ft-F) ou W/(m-C).
- A = área normal ao fluxo de calor, ft² ou m².

A equação 3.2 incorpora o sinal negativo pois $\dot{q}$ flui na direção positiva de x quando $\frac{dx}{dt}$ é negativo.

Considerando uma parede plana onde temperaturas uniformes t_1 e t_2 são as respectivas temperaturas de cada face da parede e a condutividade térmica, a taxa de transferência de calor e a área são constantes tem-se a equação 3.3 para cálculo do fluxo de calor.

$$\dot{q} = \frac{-kA(t_2 - t_1)}{(x_2 - x_1)} \quad (3.3)$$

A equação 3.4 também é muito usada:

$$\dot{q} = \frac{-(t_2 - t_1)}{R'} \quad (3.4)$$

Em que R' é a resistência térmica definida pela equação 3.5:

$$R' = \frac{x_2 - x_1}{kA} = \frac{\Delta x}{kA} \quad (3.5)$$

Existem tabelas que dimensionam as resistências térmicas de paredes compostas pela junção dos mais diversos materiais.

3.2.3 – Convecção

Quando o meio de transporte de calor é líquido ou gasoso, um outro modo de transferência de calor surge a partir da possibilidade de porções de fluido se moverem de uma posição para outra. Suponhamos que exista uma diferença de temperatura entre duas regiões em uma massa de fluido. O calor flui de uma região para outra através de condução e possivelmente através de radiação. Se este fluido estiver agora sendo misturado com um outro fluido mais quente, estes serão transferidos a uma nova condição onde a temperatura será menor que a do fluido mais quente e maior que a do mais frio. Neste caso surgirão grandes gradientes de temperatura e a convecção tratará de dividir rapidamente o calor em excesso. O efeito observado será o aumento da taxa de transferência de calor no líquido como um todo e esta taxa aumentará a medida que aumentar a rapidez com que o líquido é misturado. Este processo é conhecido como convecção.

Na convecção a fórmula para cálculo do fluxo de calor é a mesma da condução, equação 3.6:

$$\dot{q} = hA\Delta t \quad (3.6)$$

Em que:

- $\dot{q}$ = taxa de transferência de calor, em Btu/hr.
- h = coeficiente de transferência de calor, em Btu/(hr-ft²-F) ou W/(m²-s).
- Δt = diferença de temperatura, em F ou C.

O coeficiente de transferência de calor h algumas vezes é chamado de unidade de condutância de superfície ou também coeficiente de transferência de calor conectivo. A equação pode ser expressa em função da resistência térmica:

$$\dot{q} = \frac{\Delta t}{R'} \quad (3.7)$$

Em que:

$$R' = \frac{1}{hA} \quad (3.8)$$

3.3 – PROJETO DE AQUECIMENTO

O sistema térmico de automação predial utilizado representa um conjunto de salas cujo aquecimento do ambiente se dá através de um dispositivo o qual será comentado posteriormente. O condicionamento da temperatura em um ambiente real é geralmente feito por meio de aparelhos de ar condicionado, que podem pertencer a diversas categorias como: unidades centrais, aparelhos de janela, splits e outros.

Com a utilização da maquete, surge um problema de ordem prática com relação ao atuador devido a suas proporções dimensionais. Sendo assim utilizou-se secador de cabelo ao invés de aparelho de ar condicionado, pois em ambos os casos ocorre a transferência de calor para uma determinada massa de ar aquecendo ou resfriando o ambiente controlado.

Foram utilizados então dois secadores de cabelo com potência nominal de 1200 Watts cada simulando a ação de aparelhos de ar condicionado de janela em um ambiente real de salas de escritório, por exemplo. Neste caso a principal mudança em relação ao controle real ocorre na inversão do sinal de saída do controlador tendo em vista que o ar será aquecido e não resfriado como seria no uso do aparelho de ar condicionado.

Outro aspecto importante e que deve ser observado no projeto de aquecimento é a questão do posicionamento dos atuadores no ambiente. Em sistemas que utilizam aparelhos de ar condicionado de janela, por exemplo, o dispositivo é geralmente instalado no ponto mais alto da parede, pois o ar frio tende a descer para o chão chocando-se com o ar quente que sobe trocando calor com o mesmo até que a temperatura desejada seja atingida. No caso da maquete, por se tratar de um aquecedor de ar, o atuador foi instalado na posição mais baixa da parede, pois neste caso o ar quente tenderá a subir trocando calor com o ar frio do ambiente.

3.4 – ANÁLOGO ELÉTRICO

Um problema fundamental na ciência e na engenharia é prever o efeito de uma ação particular sobre um sistema físico. Para auxiliar na resolução de tal problema é aconselhada a utilização de algumas ferramentas tais como o modelamento do sistema. Existem basicamente três métodos de modelamento de um sistema: experimental, matemático e heurístico.

O método experimental necessita da aquisição de dados de entrada e de saída do sistema a ser analisado por parte de um experimentalista. Esses dados são pontos discretos que auxiliam na representação do comportamento do sistema. Uma curva característica é, gerada a partir desses pontos e representa uma aproximação do comportamento do sistema. A maior dificuldade encontrada neste método diz respeito aos procedimentos e à instrumentação utilizados para a efetiva execução do experimento.

O método matemático descreve a dinâmica do sistema analisado por meio de equações que, em conjunto, modelam o comportamento do processo. Neste contexto, faz-se necessária determinação de parâmetros que quantificarão o modelo do sistema. Diz-se que o sistema possui parâmetros concentrados quando estes não possuem relação com o distanciamento ou localização, ou seja, pode-se tratar o parâmetro de uma maneira pontual. Em um sistema a parâmetros distribuídos, por sua vez, existe uma dependência entre as variáveis do sistema e a localização, ou seja, não se pode fazer uma análise pontual do parâmetro como um todo. Um exemplo seria o transporte de calor por condução em uma barra metálica onde a fonte de calor encontra-se em uma de suas pontas. A temperatura, neste caso, dependerá do ponto na barra onde ocorrerá a medição.

O equacionamento de sistemas reais é geralmente bastante complexo visto que praticamente todos os sistemas reais possuem não-linearidades. Desta forma, a fim de se obter um modelo linear (mais simples de se manipular) assume-se algumas idealizações. Sistemas lineares podem ser representados por equações diferenciais ordinárias lineares que geralmente podem ser facilmente resolvidas por diversas técnicas como a transformada de Laplace, por exemplo.

Simplificando ainda mais o processo, pode-se assumir que o sistema é linear em um determinado ponto de operação. Considerações podem ser feitas no que diz respeito à variação das variáveis em relação aos valores assumidos por variáveis físicas. Alguns parâmetros do sistema podem ser considerados invariantes no tempo.

No Método Heurístico utiliza-se de um conhecimento prévio do sistema a ser analisado. Por meio desta experiência prévia, pode-se determinar um conjunto de regras práticas que estão associadas ao comportamento do sistema. Parte-se, então, do particular para o geral, do concreto para o abstrato, para se atingir um resultado rigoroso, com definições e demonstrações de lógica.

Como se sabe, sistemas térmicos em geral tem natureza não linear, variante no tempo e de parâmetros distribuído. São altamente complexos e a modelagem matemática é um dos grandes problemas mesmo para matemáticos experientes.

No desenvolvimento do trabalho optou-se pela simplificação do modelo utilizado aproximando o sistema real de um sistema linear, invariante no tempo e com parâmetros concentrados (análogo elétrico linear). Podendo ser simulado em software este agiliza a fase inicial de projeto do controlador inteligente dando uma direção ao ajuste de parâmetros, sendo que os ajustes finais se dão na validação do controle no sistema real (maquete de automação).

Nessa aproximação utilizou-se principalmente de dois dos três métodos de modelamento: experimental e heurístico, além de algumas relações de fenômenos de transporte presentes em processos desse tipo.

No análogo linear a resistência térmica ao fluxo de calor, oferecida pelas paredes das salas, é substituída por resistências elétricas. A capacidade de armazenamento de calor que cada sala possui, conhecida como capacitância térmica, está representada por capacitância elétrica. Os secadores de cabelo e a temperatura nos túneis estão presentes no circuito elétrico na forma de fontes de tensão. A diferença de temperatura entre as salas é dada por diferenças de tensão elétrica, cuja grandeza determina a intensidade do fluxo corrente entre estas e conseqüentemente a rapidez com que ocorre o equilíbrio térmico.

Foram inseridos no análogo medidores de tensão que possibilitam o monitoramento e controle destas.

A figura 3.3 mostra a sobreposição do análogo elétrico na planta baixa do sistema térmico facilitando a visualização da relação entre o sistema real e os componentes do circuito elétrico.

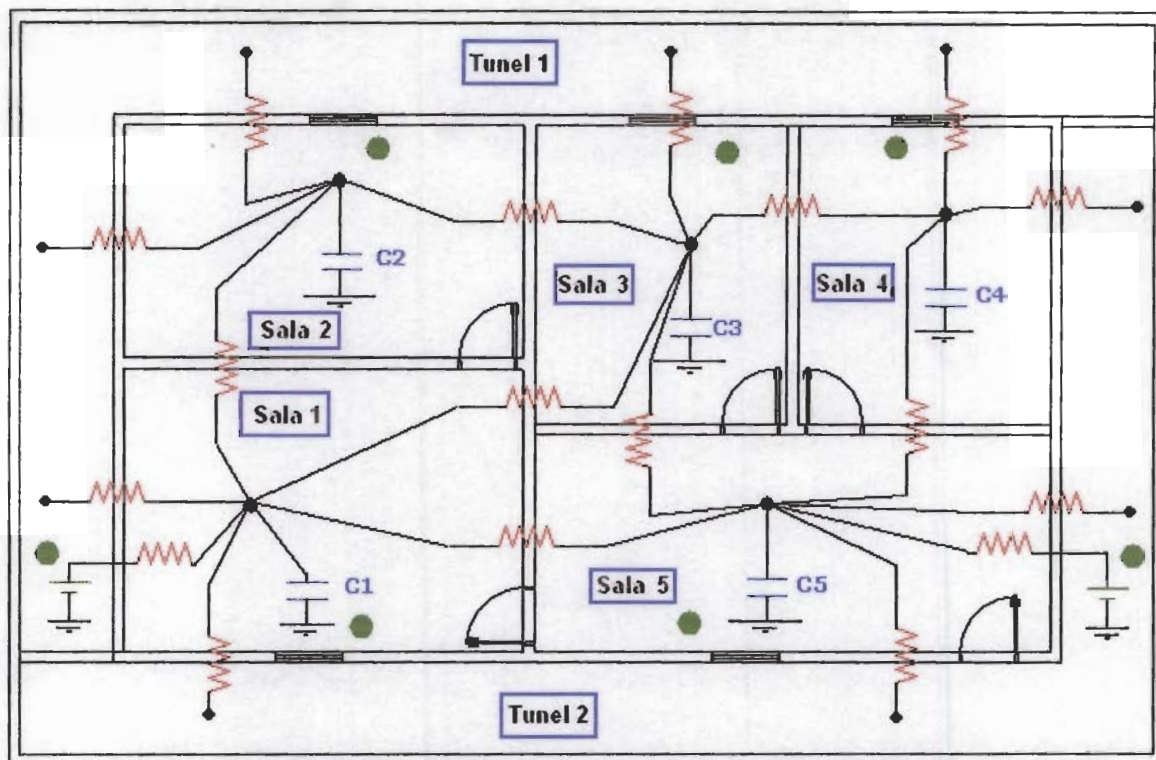


Figura 3.3 – Sobreposição do análogo elétrico e planta baixa da maquete

Observa-se também na figura 3.3 que cada sala tem um ponto de junção elétrica do capacitor e das resistências. Este é o local de medição de tensão correspondente à temperatura da sala em um determinado instante de tempo, ali está conectado o medidor de tensão.

Durante o desenvolvimento do análogo elétrico foram notados alguns problemas de ordem prática como: o secador de cabelos, fonte de calor do sistema real, mesmo depois de desligado este pode fornecer energia térmica ao sistema, pois a temperatura de sua resistência elétrica leva um tempo até atingir o equilíbrio térmico com ambiente; o secador de cabelos é um duto de ventilação onde a passagem do ar é livre, sendo assim haverá troca

de calor entre o ar do interior da sala e o túnel exterior a esta mesmo com o aparelho desligado; existem perdas de calor para o ambiente através do teto e chão na maquete.

Por se tratar de um modelo aproximado do sistema real alguns fatores como: o calor transferido ao processo por meio de radiação e a fuga de calor através do teto e chão da maquete entre outros foram desconsiderados devido à pequena influência no resultado final do projeto de controladores.

A fim de simplificar o modelo elétrico e tendo em vista que a influência dos fatores de ordem prática no funcionamento sistema é muito pequena, foram instalados diodos nas fontes de tensão permitindo o fluxo de corrente nestas somente em uma direção (do exterior para o interior), ou seja, do ponto de maior valor para o de menor valor de tensão (correspondente à temperatura no sistema real). Desta forma fazendo uma analogia, é como se o secador de cabelo se tornasse uma parede sempre que desligado ou até mais do que isso, um isolante térmico considerando que não há passagem de calor por eles neste estado. Estando desligados a única forma de troca de calor entre as salas e o meio externo é por condução através das paredes.

Assim como no sistema real a referência mínima de tensão no análogo elétrico vem da fonte de tensão que representa a temperatura externa ao ambiente. Para fins de leitura em cada sala os respectivos medidores assumem o terra como seu valor de referência, desta forma é possível estabelecer uma relação direta entre a tensão lida pelo medidor e o seu correspondente em °C no caso do processo real.

A figura 3.4 mostra o análogo elétrico utilizado para projetar e ajustar os controladores utilizados neste trabalho.

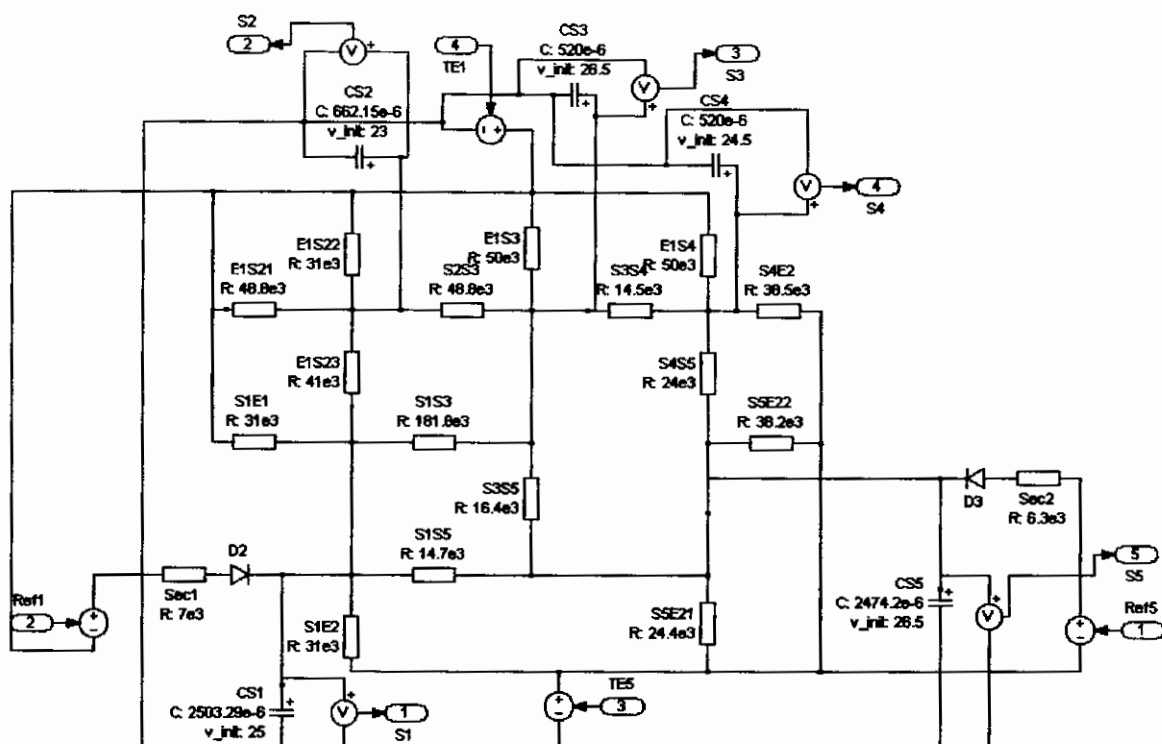


Figura 3.4 – Análogo elétrico da maquete de automação predial.

Para a parametrização inicial das resistências e capacitâncias no análogo elétrico foram utilizados os conhecimentos adquiridos no estudo dos fenômenos de transporte na seção 3.2 deste capítulo.

$$R' = \frac{x_2 - x_1}{kA} = \frac{\Delta x}{kA} \quad (3.9)$$

A equação 3.5 demonstra o cálculo da resistência térmica da parede. É importante observar que resistência é diretamente proporcional à espessura da parede e inversamente proporcional à sua área em conjunto com a condutividade térmica do material com o qual esta foi confeccionada.

A convecção é outro fenômeno presente no sistema térmico e que deve ser considerado para o cálculo das resistências das paredes. Este acontece somente quando há movimento de massa de ar no ambiente, neste caso está diretamente relacionado ao acionamento dos secadores de cabelo por isto foram inseridas resistências nas fontes de tensão que os representam no circuito.

A equação 3.8 mostra que a resistência térmica no caso da convecção é inversamente proporcional à área de passagem da massa de ar e ao coeficiente de transferência de calor da superfície que bloqueia a passagem desta massa.

Baseado nas equações 3.5 e 3.8 foi calculada a resistência térmica de cada parede sendo este inserido no análogo como da resistência elétrica do sistema.

Com respeito à definição das capacitâncias, sabe-se que estas são diretamente proporcionais ao volume do ambiente calculado.

4 – APARATO EXPERIMENTAL

A maioria dos projetos de automação predial envolve a utilização ou desenvolvimento de diversos dispositivos eletroeletrônicos e softwares. Estes têm a função de possibilitar o monitoramento e controle das variáveis do processo.

4.1 – HARDWARE

Alguns dispositivos como: drivers de potência, interface de comunicação serial multiponto, circuito de controle e etc; foram implementados durante a realização deste trabalho e são descritos e discutidos em detalhes.

4.1.1 – Circuito de Medição e Controle

Este circuito tem o microcontrolador como componente principal, considerado o cérebro do sistema de automação. Ele é o responsável pela execução das estratégias de controle, obtendo dados pelas portas analógicas de entrada, processando-os em sua unidade lógico-matemática e acionando os atuadores pelas portas de saída.

Neste projeto foi utilizado o microcontrolador PIC18F252, por se tratar de um dispositivo barato e com diversos dos recursos necessários para a implementação deste projeto, tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Características do microcontrolador PIC 18F252

Frequência de Operação (MHz)	DC-40
Memória de Programa (Bytes)	32k
Memória de Programa (Instruções)	16384
Memória de Dados (Bytes)	1536
Memória EEPROM (Bytes)	256
Quantidade de Interrupções	17
Portas de E/S	A,B,C
Quantidade de Temporizadores	4
Módulos PWM	2
Comunicação Serial	MSSP,Endereçável,USART
Conversor A/D 10 Bits	5 canais de entrada
Conjunto de Instruções	75 Instruções
Multiplicador em Hardware	1

Para medição de temperatura nas salas e túneis da maquete, foram instalados circuitos integrados LM35 fabricados pela National. Este componente eletrônico gera uma saída de tensão, linear e proporcional à temperatura medida pelo mesmo na ordem de 10mV/°C. Sua precisão é de 0.5°C, considerada satisfatória para este tipo de processo levando-se em conta que a sensação térmica humana é imprecisa e varia de 1 a 2°C de pessoa para pessoa. Sua corrente de dreno é muito pequena o que faz com que o seu auto-aquecimento não ultrapasse os 0.1°C, dando maior confiabilidade à leitura. As características mais importantes deste dispositivo podem ser visualizadas na tabela 4.2.

Tabela 4. 2 – Características do sensor de temperatura LM35

Calibração	°C
Fator de Escala	10mV/°C
Precisão	0.5°C
Faixa de Trabalho	-55 a 150°C
Tensão de Operação	4 a 30 V
Impedância de Saída	0.1Ω

Sabendo-se que o sistema térmico utilizado trabalha somente com temperaturas positivas optou-se por instalar o sensor em sua configuração básica (figura 4.1) onde a faixa de trabalho passa a ser de 2 a 150°C e a resolução sobe para ¼°C, conforme descrição do fabricante.

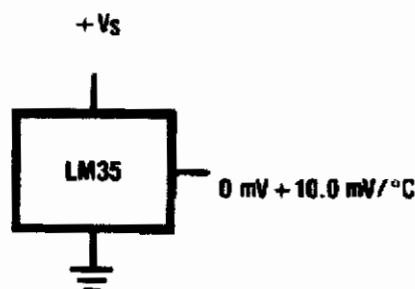


Figura 4.1 – Configuração básica de ligação elétrica do LM35

Os sensores de temperatura foram conectados a amplificadores operacionais na forma não inversora (figura 4.2), provendo um ganho de cinco vezes em seus sinais. Esta ação foi tomada com o objetivo de promover uma equiparação da faixa de trabalho do conversor analógico/digital do microcontrolador (0-5Vcc) com a tensão de saída de cada sensor LM35 (0-1Vcc), considerando que a temperatura máxima de trabalho do sistema não ultrapassa os 100°C.

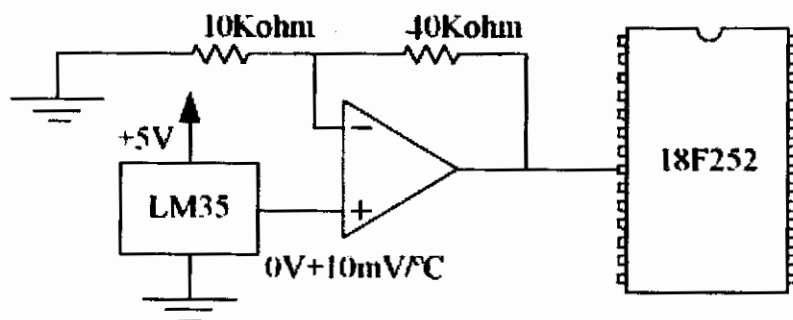


Figura 4.2 – Esquema de ligação do LM35 com PIC18F252.

Para um sinal de pequena amplitude como este é comum a presença de ruídos provenientes de fontes chaveadas, sinais de rádio, relês, motores e outros. Para filtrar estes ruídos foram utilizados capacitores de 1 µF e resistores de 10KΩ conectados ao pino de saída do sensor. Além deste filtro passa-baixas analógico foi implementado em software um filtro digital que mantém o valor do sinal lido para uma determinada faixa de variação.

Para acionar os atuadores foi utilizado um tipo especial de sinal conhecido por *PWM*. A modulação por largura de pulso, do inglês *Pulse Width Modulation*, é uma onda de frequência constante e largura de pulso variável (Figura 4.3).

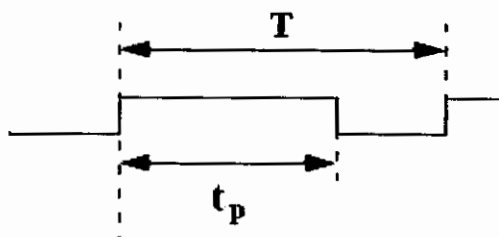


Figura 4.3 – Onda PWM (*Pulse Width Modulation*)

A modulação PWM permite ao sistema gere uma tensão de controle analógica a partir de um sinal digital, pois a tensão média de saída é função da largura do pulso. Esta relação está demonstrada na equação 4.1.

$$V(t) = \begin{cases} V_{pulso} \rightarrow 0 \leq t \leq t_p \\ 0 \rightarrow t_p \leq t \leq T \end{cases} \quad (4.1)$$

Onde t_p é a duração do nível lógico 1 e V_{pulso} é a tensão do pulso do sinal PWM. Sendo assim a tensão média da onda PWM pode ser calculada pela equação 4.2.

$$V_{dc} = \frac{1}{T} \int_0^T V(t) dt = \frac{1}{T} \left(\int_0^{t_p} V_{pulso} dt + \int_{t_p}^T 0 dt \right) = \frac{t_p}{T} V_{pulso} \quad (4.2)$$

A razão entre a largura do pulso e o período da forma de onda recebe o nome de *duty cycle* ou ciclo ativo, e é numericamente descrito em porcentagem.

Após a definição dos componentes e suas respectivas funções no circuito de medição e controle foi projetado o circuito eletrônico deste e em seguida feito a implementação em pronto-board do mesmo, figura 4.4.

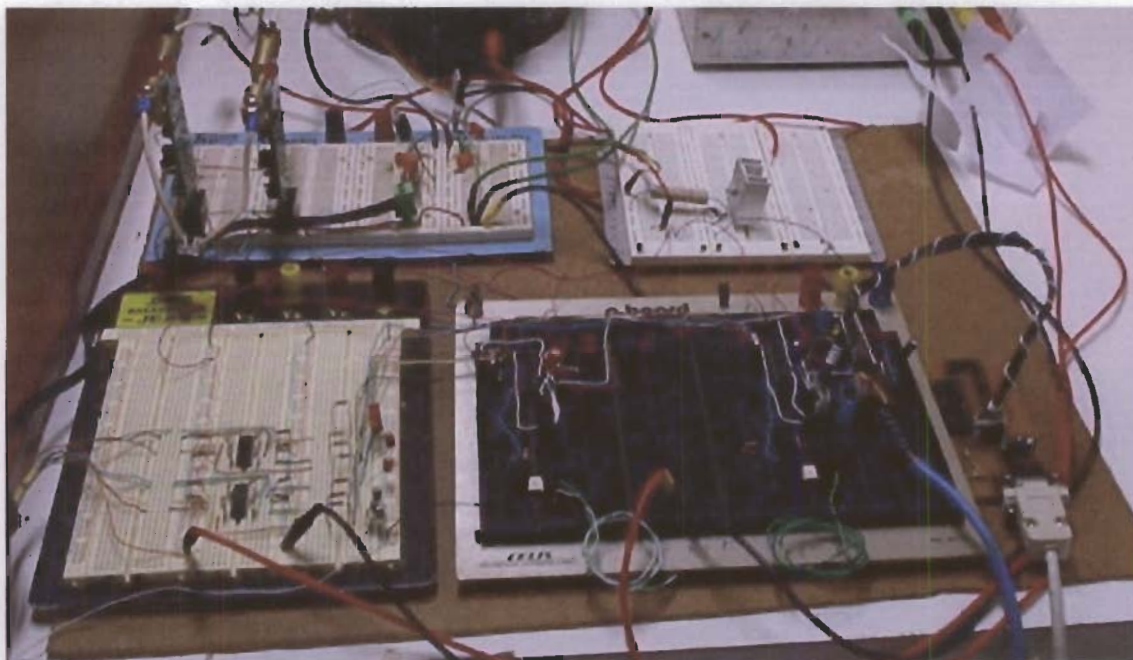


Figura 4.4 – Circuito de medição e controle do processo térmico.

4.1.2 – Circuito de Comunicação Serial Multiponto

Neste trabalho, foi estabelecido que cada aquecedor possuísse o seu próprio circuito de controle, medição, comunicação e potência. Ou seja, cada circuito seria independente em suas ações e estratégias de controle. Sendo assim, para monitorar e controlar os dois circuitos independentes o supervisorio necessitaria estabelecer comunicação com estes. Isto poderia ser feito individualmente usando duas portas seriais ou através de um barramento de comunicação. Tendo em vista que a utilização do barramento é uma opção barata e totalmente factível foi desenvolvido um barramento de comunicação serial multiponto.

Sabe-se que o padrão RS-232C define como modo de operação a comunicação ponto-a-ponto. No entanto, é possível construir um barramento no qual vários elementos podem ser conectados, e então, usufruir uma mesma interface, como também, de um mesmo conjunto de fios tanto para transmitir como para receber dados. Esta implementação é possível desde

que se tenha um modelo de comunicação “mestre-escravo”, onde apenas o dispositivo mestre pode fazer requisições de dados controlando assim a utilização do barramento e evitando possíveis colisões de dados. A figura 4.5 dá uma visão do esquema de conexões e dispositivos utilizados na implementação do barramento RS-232 multiponto.

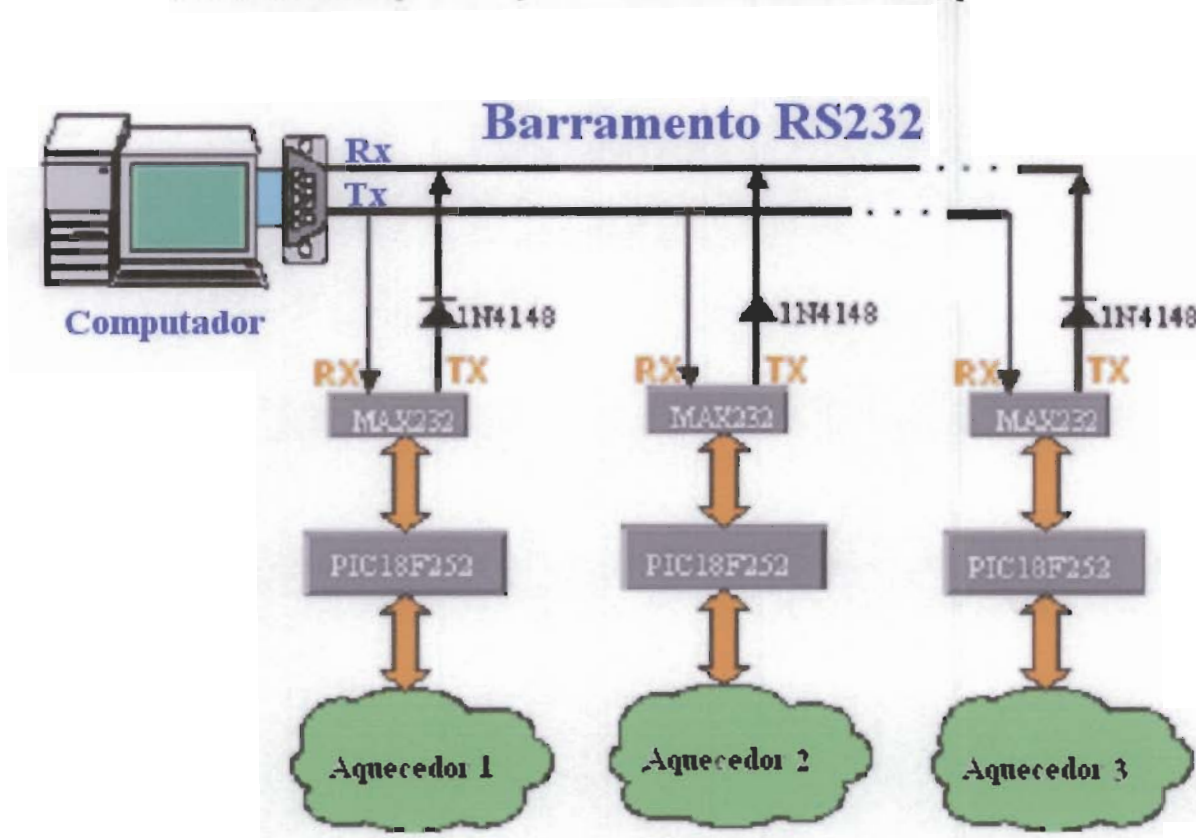


Figura 4.5 – Barramento serial multiponto

Observa-se na figura 4.5 a presença de um diodo 1N4148 em cada linha de transmissão dos dispositivos escravos. Da forma como foi colocado o diodo tem a função de evitar que a comunicação entre um escravo e o mestre seja interrompida por outro escravo, e também que a mensagem que qualquer escravo esteja utilizando o barramento seja recebida por outro escravo.

Para estabelecer a comunicação entre o computador supervisor e os PIC's de controle foi utilizado o MAX232. Este é um conversor popular para ligação entre circuitos TTL e RS-232, ele converte o padrão elétrico 0V e 5V do PIC para o padrão de tensão -10V e +10V do RS-232 e vice-versa.

4.1.3 – Driver de Potência

O *driver* de potência é o circuito responsável pelo acionamento direto dos dispositivos atuadores do sistema térmico. Por trabalhar com potência e tensão na ordem de 1.200 Watts e 220 Volts, respectivamente, foi utilizado um dispositivo eletrônico preparado para suportar tais grandezas, o triac.

Os triacs são dispositivos semicondutores da família dos tiristores e podem conduzir corrente nos dois sentidos. Com ele é possível controlar correntes elevadas com sinais de controle de baixo valor.

Pela sua característica de controlar correntes alternadas de alta intensidade, os triacs são cada vez mais utilizados em eletrodomésticos, equipamentos médicos e industriais e em telecomunicações.

O interfaceamento entre o circuito lógico e o *driver* de potência é feito pelo optoisolador MOC3081, figura 4.6. Este dispositivo possui um componente especial chamado detector de zero, cuja função é garantir que o chaveamento do triac aconteça somente quando a tensão de alimentação atingir amplitude zero. Esta funcionalidade evita o surgimento de ruídos na rede de alimentação proveniente de inserção de carga em momento de picos de tensão.

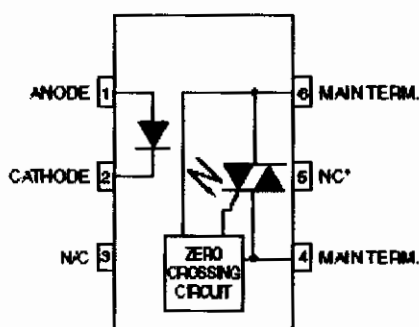


Figura 4.6 – Optoacoplador MOC 3081.

A configuração final do *driver* de potência pode ser observada no circuito elétrico da figura 4.7.

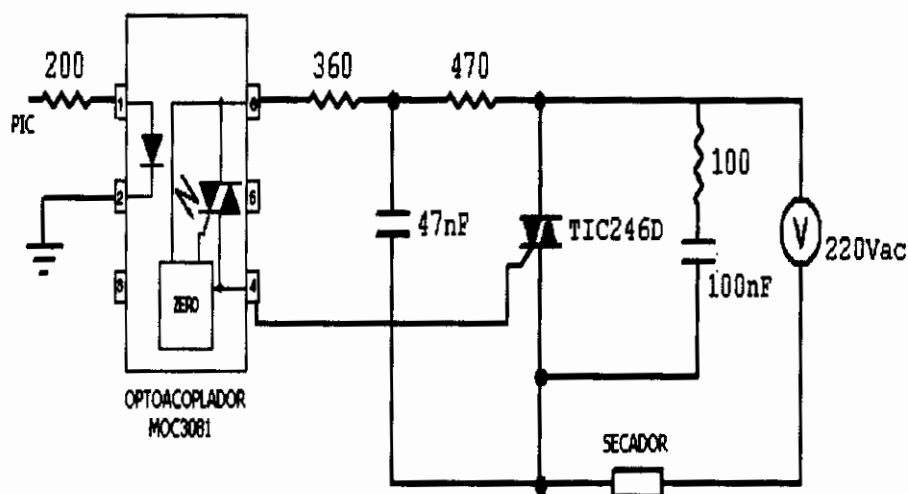


Figura 4.7 – Circuito do *driver* de Potência

4.1.4 – Circuito de Medição de Potência

Conforme mencionado no capítulo primeiro desta dissertação o objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de um controlador inteligente que possibilite a redução do consumo de energia no controle do sistema térmico. Para mensurar a eficiência deste controlador torna-se necessária a utilização de um dispositivo capaz de realizar a medição do consumo de energia dos atuadores para cada estratégia de controle implementada. Foi adquirida então uma placa de medição de potência consumida, através de convênio com a empresa Landis&Gyr, fabricante de medidores de energia residenciais e industriais. O principal componente eletrônico desta placa é o SA9102E, chip medidor unidirecional IC de única fase com saída instantânea de pulso. Este componente gera um pulso na sua porta digital optoacoplada de saída, a cada 0.9W/h (Watt/hora) de potência medido. O esquemático de ligação deste circuito pode ser observado na figura 4.8.

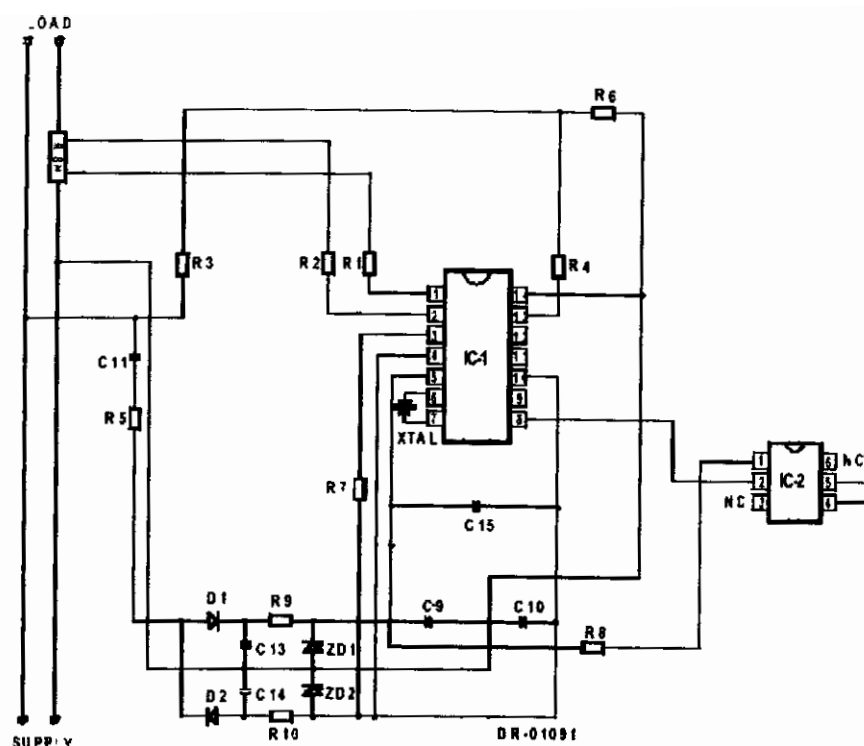


Figura 4.8 – Esquemático do dispositivo de medição de potência consumida.- *Datasheet* SA9602E.

O SA9602E é um circuito integrado CMOS de sinal Analógico/Digital misto que faz o cálculo de potência ativa instantânea consumida através da medição de corrente e tensão de entradas.

4.2 – SOFTWARE DE AUTOMAÇÃO

Para o processo de validação do projeto de automação predial foram desenvolvidos basicamente dois softwares: o sistema supervisor, responsável por interfacear o processo térmico com o usuário de forma visual gráfica e simples para que este possa tanto monitorar as variáveis de controle quanto interagir com o sistema enviando parâmetros de configuração do mesmo; e o software servidor, responsável por interligar o sistema de controle do processo térmico com a interface supervisor através da internet e do barramento de comunicação serial multiponto.

4.2.1 – Supervisório

O supervisório é uma interface gráfica cuja função é facilitar a comunicação entre o usuário e o sistema térmico. Tendo sido totalmente desenvolvida em Java, este programa pode ser executado em qualquer browser de internet desde que a máquina virtual Java esteja instalada no computador do usuário. Este tipo de aplicação conhecida como Applet, é uma das funcionalidades oferecidas pela linguagem Java que conta outros pacotes de funções chamados api's os quais podem ser baixados gratuitamente na internet.

Com o uso da tecnologia Applet o experimento remoto pode ser acessado pelo supervisório remotamente em qualquer lugar do mundo, o que possibilitaria a utilização deste projeto como laboratório virtual de automação em uma próxima etapa do projeto.

O supervisório possui dois gráficos cartesianos onde é possível acompanhar em tempo real a evolução no tempo da temperatura de cada sala e dos túneis, além da porcentagem do ciclo de trabalho da onda PWM aplicada a cada atuador, figura 4.9.

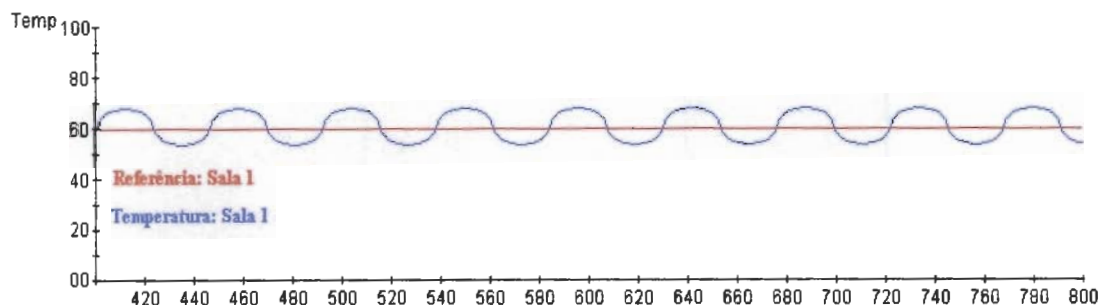


Figura 4.9 - Evolução das temperaturas no tempo.



Figura 4.10 – Área de parametrização e definição de estratégia no supervisório

O supervisório possui ainda botões para seleção da estratégia de controle e campos para inserção de parâmetros como: ganho proporcional, integral e derivativo; frequência, amplitude e offset do sinal de referência; entre outros. Figura 4.10.

Outra funcionalidade implementada é a habilitação ou desabilitação de qualquer das variáveis monitoradas. O valor instantâneo da temperatura de cada sala pode ser visualizado no sinóptico da planta baixa da maquete localizada no canto inferior direito do supervisório, figura 4.11.



Figura 4.11 – Área de habilitação de variáveis e visualização de temperaturas no supervisório.

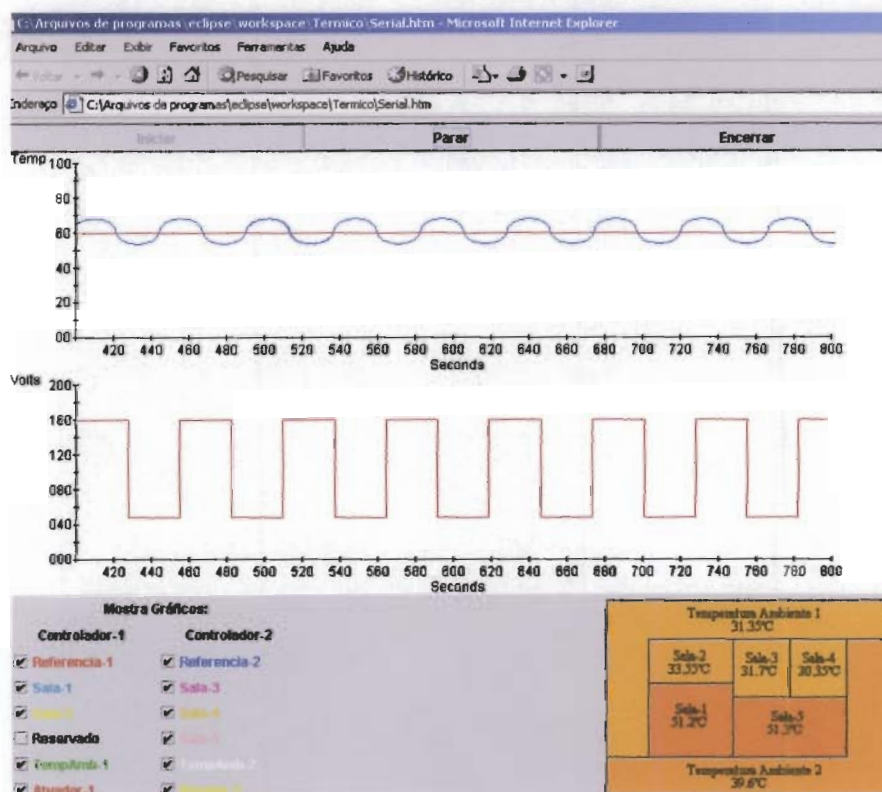


Figura 4.12 – Supervisório de automação predial

A figura 4.12 mostra uma visão geral do applet supervisorio aberto no *web browser* internet explorer da Microsoft.

4.2.2 – Servidor de Comunicação Web

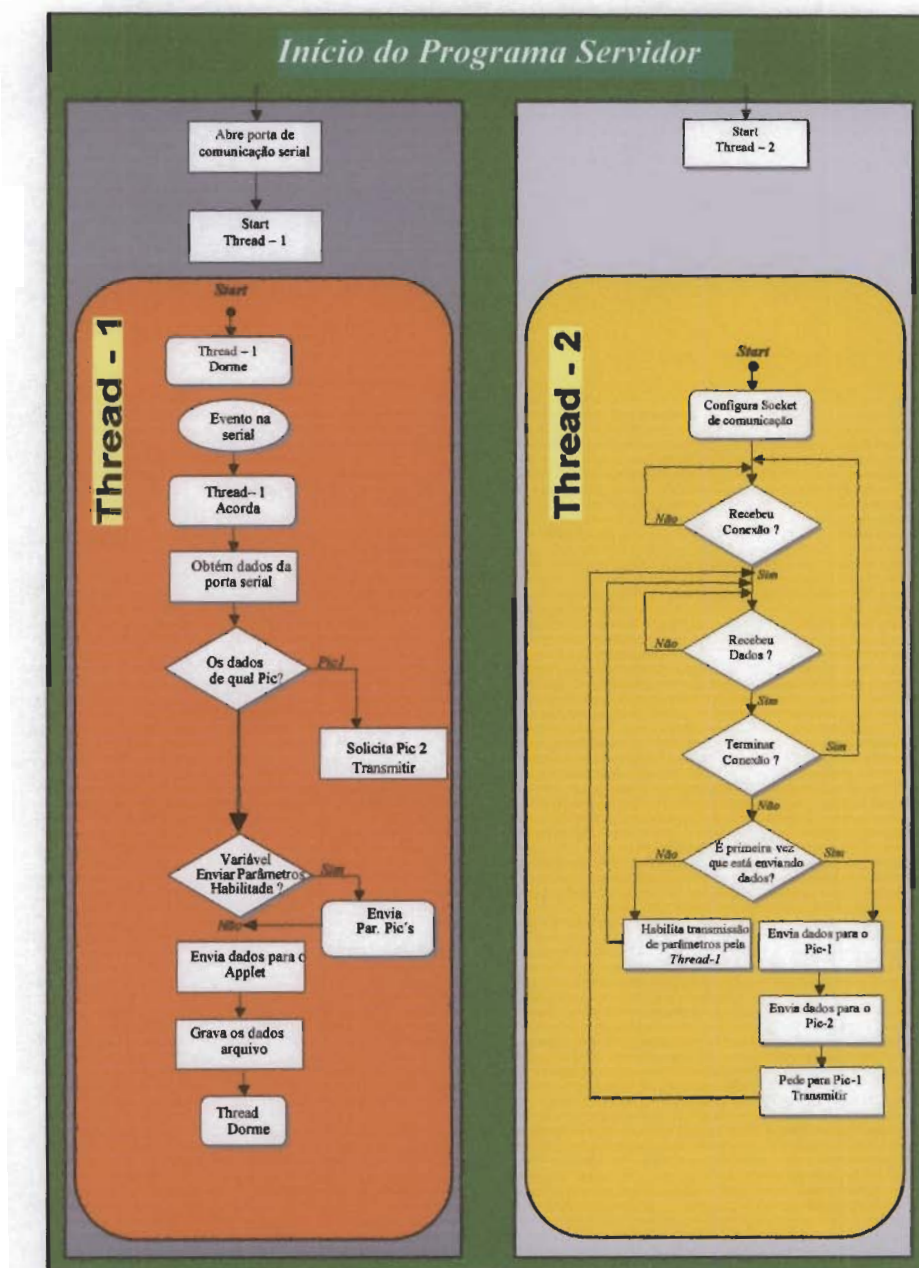


Figura 4.13 – Funcionamento lógico do programa servidor

Localmente, o *web browser* é a interface para o experimento. Este realiza o *download* do *software* cliente em formato de *Applets* Java a partir do servidor WEB e os executa. Além disso, o servidor estabelece a comunicação indireta entre o supervisor e o processo térmico (microcontroladores) possibilitando a troca de dados entre estes. A figura 4.13 mostra esquematicamente o funcionamento lógico do programa servidor.

A execução do servidor de comunicação se dá através de duas threads Java sendo uma delas responsável pela porta serial, de onde é feita a comunicação com o sistema térmico, e a outra pela conexão socket da internet de onde é feita a comunicação com o supervisor remoto. As duas threads são independentes tendo em comum as áreas de dados compartilhados.

A thread um abre a porta serial e vai dormir. A chegada de dados na porta serial dispara uma interrupção que acorda a thread um. Sempre que estes dados forem do dispositivo com identificação igual a um a thread manda uma mensagem para o segundo microcontrolador requisitando seus dados. Assim, após o recebimento das informações dos dois pic's esta os envia ao supervisor e entra em estado de dormência novamente. Se em meio a este ciclo houverem parâmetros vindos do supervisor para serem transmitidos aos microcontroladores esta tarefa é também executada.

Já a thread dois abre uma conexão socket (remota) com o supervisor (applet) que está sendo executado na máquina do cliente e fica aguardando a chegada de dados. Se chegar uma mensagem ordenando o seu término, este é executado de pronto. Não sendo este o caso, se for a primeira vez que o supervisor manda uma mensagem esta é enviada diretamente aos microcontroladores que deverão retornar de imediato os dados de sua situação atual. Em se tratando da segunda vez em diante a mensagem transmitida pelo supervisor a thread um assume a responsabilidade de transmiti-la ao sistema térmico.

Para facilitar a visualização de: tráfego de dados entre o sistema térmico e o servidor de comunicação, mensagens de erro no acesso às portas do computador e envio de mensagens de teste para os microcontroladores. Foi desenvolvida uma interface para o programa servidor, figura 4.14.

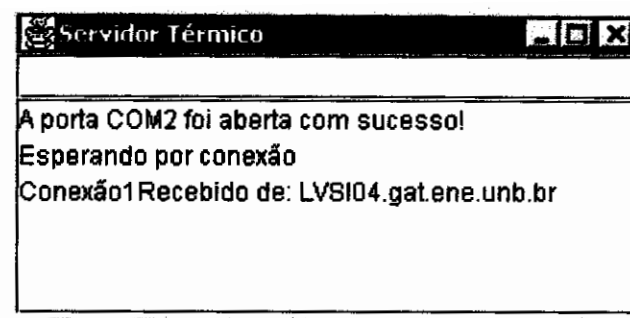


Figura 4.14 – Interface do programa servidor.

Além de possuir a área de texto existe também nesta interface um campo dedicado a entrada de dados. Os dados contidos nesta área são transmitidos pelo barramento de comunicação. Esta ação é tomada geralmente para verificar se a comunicação com o sistema térmico está funcionando corretamente. Foi muito utilizada na fase inicial do projeto.

4.2.3 – Protocolo de Comunicação

O protocolo de comunicação estabelece o padrão de organização dos dados na mensagem entre os dispositivos envolvidos no sistema de comunicação.

No caso de mensagens do controlador um para o servidor o protocolo (PUS - Protocolo de mensagens do controlador Um para do Servidor) está representado na figura 4.15.

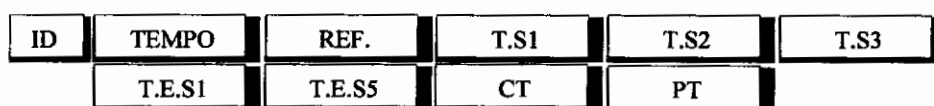


Figura 4.15 – Protocolo de comunicação PUS.

Sendo o campo ID (Identificador) um dado “chave” (único para cada microcontrolador) que permite identificar a origem da mensagem com tamanho de 8 bits, tem-se a possibilidade endereçar até 256 dispositivos com este protocolo.

A *word* TEMPO informa o tempo acumulado de execução desde o início do controle do sistema. Somente o controlador número um tem implementado a contagem de tempo em

seu programa, pois o processo térmico é único e o controle é iniciado e encerrado simultaneamente nos dois microcontroladores.

O bit menos significativo da palavra tempo corresponde a 35 ms, sendo esta composta por 16 bits tem-se que o valor máximo de representação de tempo é de $35 \times 10^{-3} \times (2^{16} - 1)$, ou seja, 2293 segundos.

O campo REF. do protocolo corresponde ao valor de temperatura desejado para o sistema (Referência). Os campos: T.S1,T.S2,T.S3,T.E.S1 e T.E., correspondem aos valores de temperatura das salas 1, 2, 3, temperatura externa à sala 1 e temperatura externa à sala 5, respectivamente. O bit menos significativo destas palavras corresponde a 0,5 °C.

A *word* CT do pacote contém o valor instantâneo da saída PWM de controle do atuador.

A última *word* de dados (PT) contém o valor de potência consumida pelo atuador controlado pelo dado microcontrolador em unidade de pulso. Sendo que cada pulso corresponde a 0.9W.h.

Para as mensagens do controlador dois para o servidor (PDS - Protocolo de mensagens do controlador Dois para do Servidor) foi estabelecido o protocolo da figura 4.16.

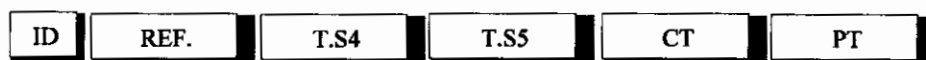


Figura 4.16 - Protocolo de comunicação PDS.

Os campos de dados do protocolo PUS têm o mesmo significado dos campos de dados do protocolo PDS.

Existem dois protocolos de comunicação entre o programa Servidor e os controladores de processo. O PSD (PSD - Protocolo de mensagens do Servidor para os Dispositivos de controle), protocolo para solicitação de Dados, figura 4.17. e o protocolo de envio de parâmetros PEP (PEP - Protocolo de Envio de Parâmetros), figura 4.18.



Figura 4.17 - Protocolo de comunicação PSD.



Figura 4.18 - Protocolo de comunicação PEP.

Onde o byte ST diz ao microcontrolador a que se destina a mensagem enviada, podendo assumir três valores distintos, tabela 4.3.

Tabela 4. 3 – Valores do byte ST

VALOR ST	DESCRIÇÃO
00000001	Pedido de transmissão
00000010	Envio de Parâmetros
00000100	Finalizar Controle

O primeiro valor do byte ST indica ao controlador que o servidor está requisitando o envio de dados do microcontrolador, este os envia empacotados no padrão estabelecido pelos protocolos descritos anteriormente.

Já o segundo valor diz ao controlador que o supervisor está enviando os parâmetros inseridos pelo usuário do sistema, os quais ditarão o funcionamento do controle do sistema térmico.

E por fim o terceiro valor de ST pede ao microcontrolador que finalize o controle naquele instante tendo como última tarefa o envio de dados ao servidor, que por sua vez fecha o arquivo com os dados recebidos durante o controle e fica aguardando um novo início do sistema.

5 – RESULTADOS EXPERIMENTAIS E ANÁLISE

5.1 – PARAMETRIZAÇÃO DO ANÁLOGO ELÉTRICO

Após a parametrização inicial do análogo baseado nas equações de fenômeno de transporte estudadas no capítulo 3 deste trabalho, passou-se ao ajuste final destes valores de resistência e capacitância. Nesta fase do trabalho, o ajuste se procedeu heurísticamente através do método da tentativa e erro baseado nas curvas de resposta ao sinal degrau do sistema térmico real para ambos os atuadores.

A constante de tempo de cada sala está relacionada ao valor da resistência térmica, R , de cada parede e a capacitância térmica, C , de cada sala. Em um sistema que envolve capacitância e resistência em série, a constante de tempo é do tipo RC. Esta é encontrada experimentalmente isolando as salas envolvidas e medindo o intervalo de tempo necessário para atingir 67% da resposta ao degrau.

Durante a obtenção das curvas de temperatura das salas, foi constatado que mesmo depois de atingir os 80°C, a temperatura da sala diretamente aquecida pelo atuador continuava a aumentar. Devido a limitações físicas e de resistência ao calor do sistema térmico real e dos equipamentos envolvidos neste processo, como: tampos de vidro comuns os quais suportam temperaturas de no máximo 80°C, aquecedores de base plástica os quais não suportam temperaturas acima dos 100°C durante longo período de tempo, entre outras questões de ordem prática, foi estabelecido que o sinal degrau seria mantido no atuador até o instante em que a temperatura da sala controlada atingisse o valor máximo de 70°C, impedindo assim possíveis danos aos equipamentos. Desta maneira foram obtidas as curvas referentes às salas um e cinco conforme mostram as figuras 5.1 e 5.2.

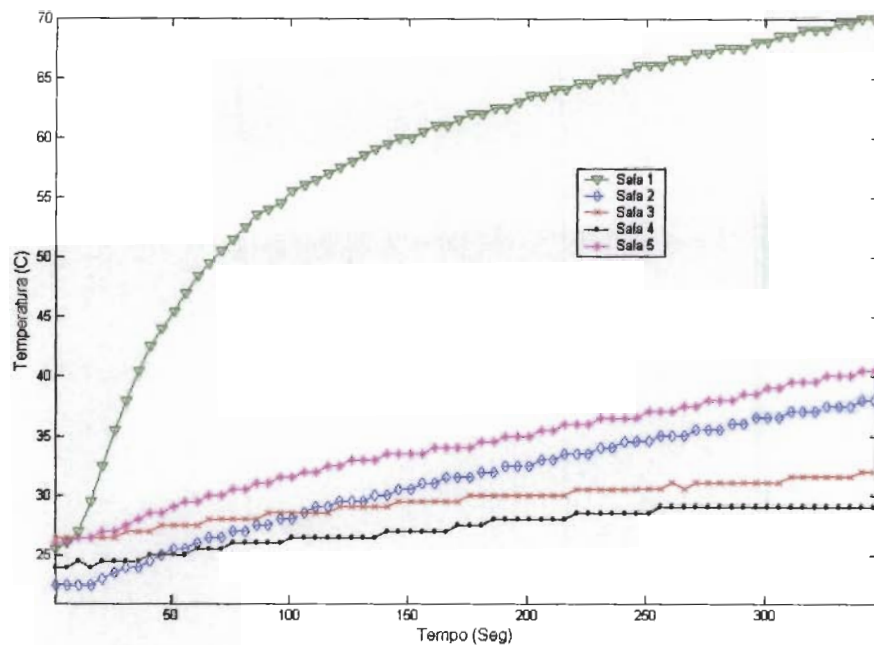


Figura 5.1 – Resposta ao degrau no atuador da sala um.

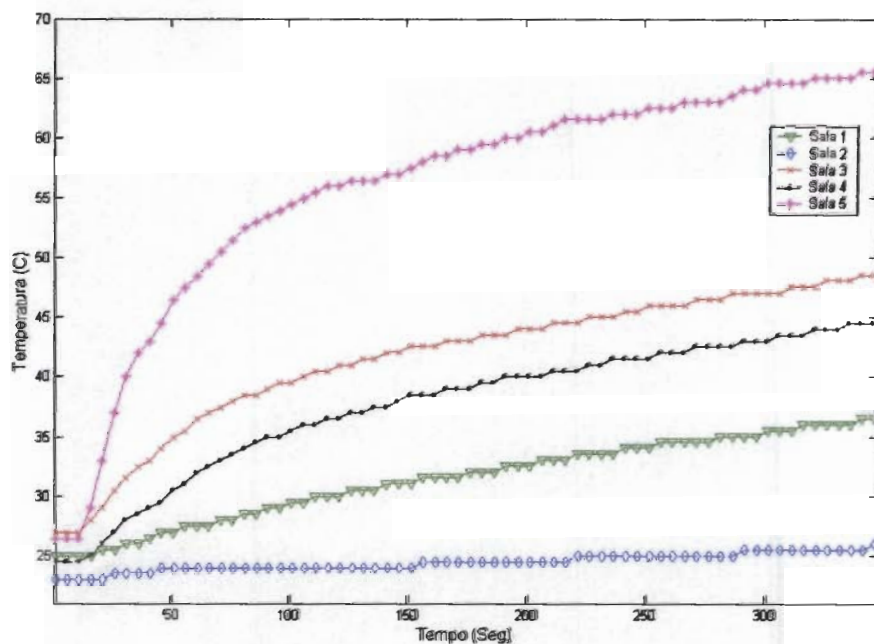


Figura 5.2 – Resposta ao degrau no atuador da sala cinco.

Observa-se na curva da sala um que a temperatura atinge os 70°C no instante $t=350$ segundos, já a sala cinco para este intervalo de tempo sendo aquecida pelo mesmo dispositivo atinge apenas 65,5°C. Isto se deve ao fato desta sala estar interligada a meia parede com outras duas salas (sala três e sala quatro), o que conseqüentemente impõe ao

aquecedor uma carga térmica total maior que a da sala um, a qual se encontra totalmente isolada. Sendo assim o tempo limite estabelecido para observação da temperatura em ambas as salas, foi fixado em 350 segundos. Este processo de medição de temperatura foi realizado com todas as portas e janelas do sistema térmico fechadas.

A fim de reduzir o tempo de simulação do sistema no análogo linear, adotou-se que todos os parâmetros inseridos neste fossem ajustados de tal forma que para obter-se a mesma resposta do sistema térmico real em 350 segundos, a simulação deveria ser concluída em um tempo total dez vezes menor que este, ou seja, 35 segundos.

Todas as simulações foram executadas no software *Simulink* do *Matlab*TM sendo que para a criação e utilização do análogo elétrico foi utilizada também a biblioteca *Plecslib* da *Plexim*TM. Utilizando estas ferramentas foi gerado o seguinte modelo de simulação, figura 5.3:

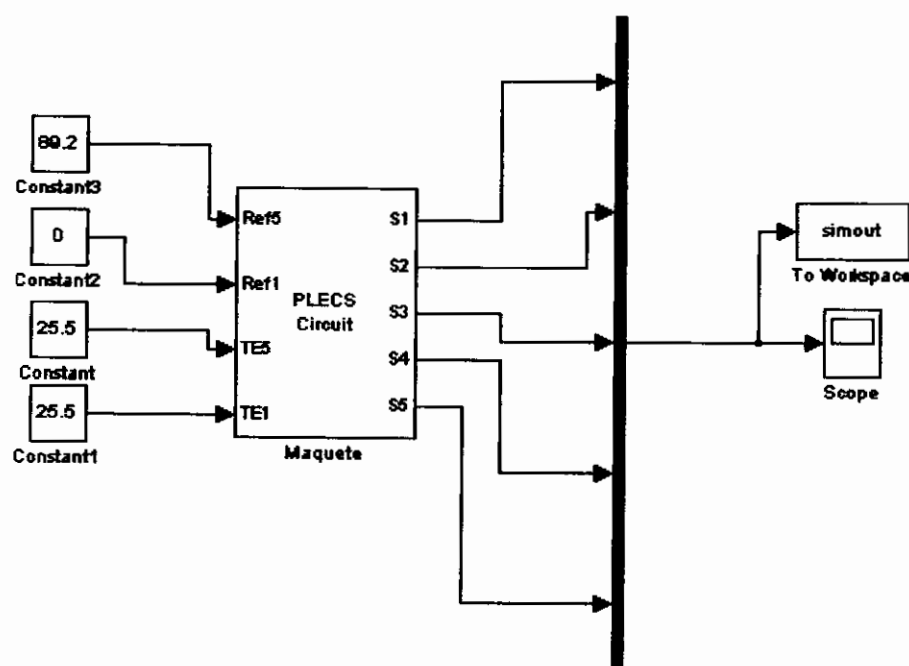


Figura 5.3 – Modelo simulink para obtenção da resposta ao degrau.

Onde TE5 e TE1 são as temperaturas externas às salas 5 e 1 respectivamente, Ref 5 e Ref 1 são os valores de referência de temperatura das salas 5 e 1 e as saídas S1 a S5 são os valores de temperatura das salas de 1 a 5, conforme padrão estabelecido no segundo

capítulo deste trabalho. Além disso o modelo ainda possui um osciloscópio para visualização da evolução das variáveis no plano cartesiano e todas as variáveis são enviadas para o workspace concentradas uma única variável estruturada chamada de simout, o que possibilita a manipulação dos dados para extração de resultados estatísticos e qualquer análise desejada.

Seguindo os preceitos acima estabelecidos, depois de inúmeras tentativas seguidas de ajustes de parâmetros obteve-se como melhores resultado os valores mostrados nas figuras 5.4 e 5.5.

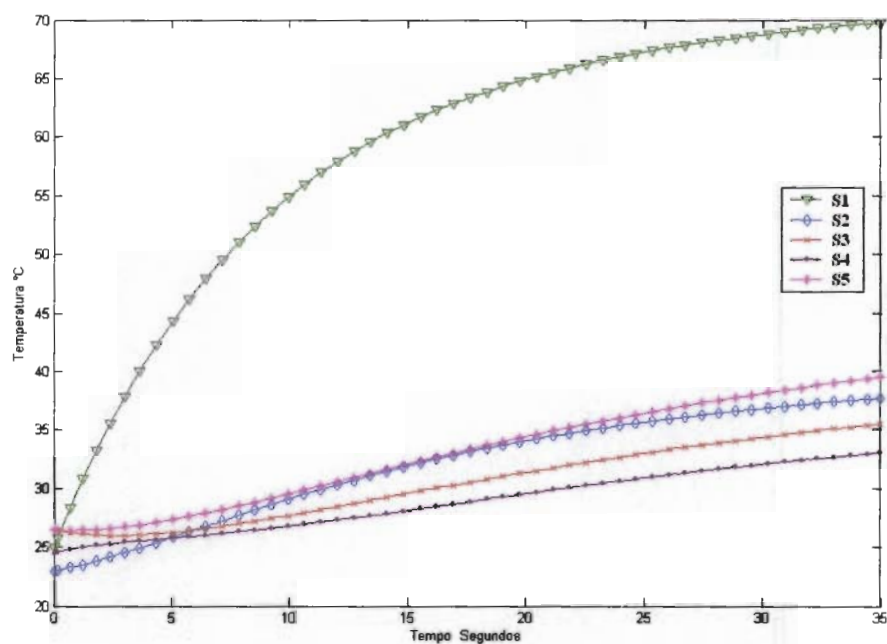


Figura 5.4 – Resposta ao sinal degrau do análogo elétrico sala um.

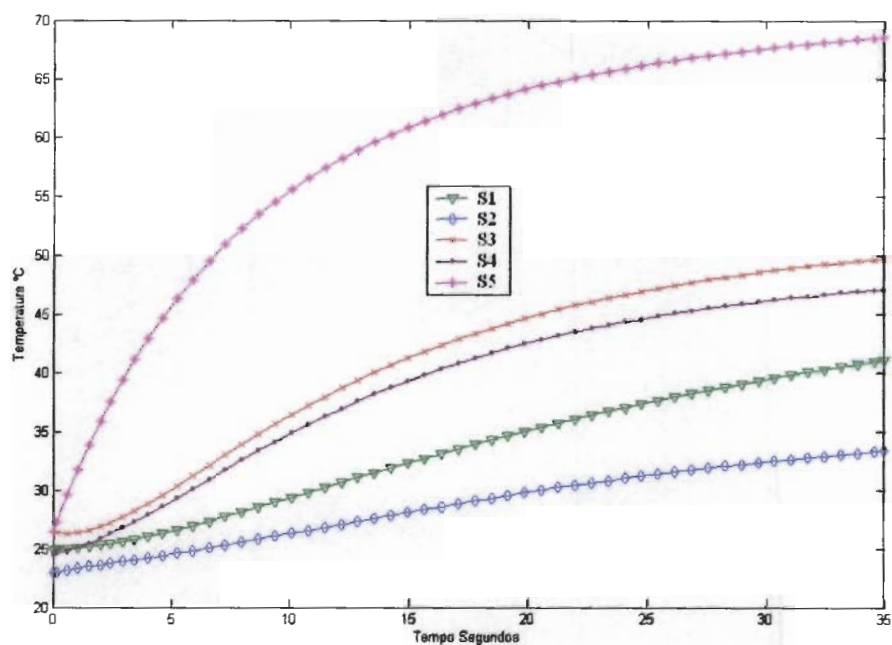


Figura 5.5 - Resposta ao sinal degrau do análogo elétrico sala cinco.

As figuras 5.6 e 5.7 representam a diferença entre os valores obtidos na simulação e os valores obtidos no sistema térmico real.

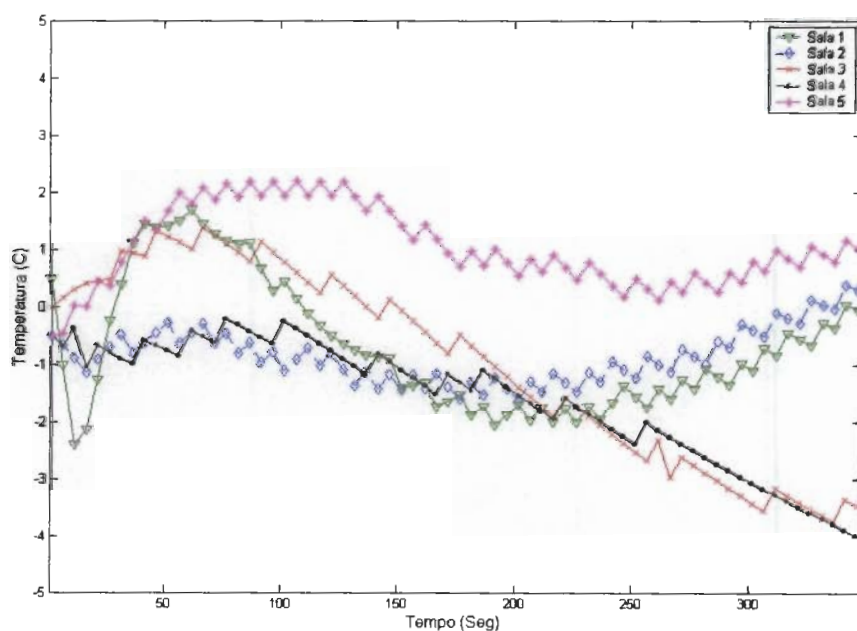


Figura 5.6 - Diferença entre sinal real e simulado na sala um.

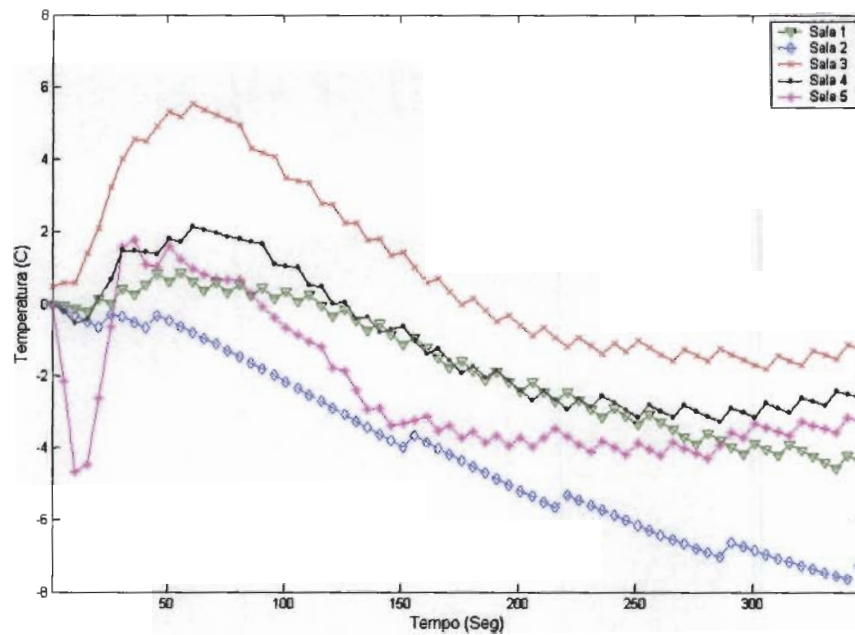


Figura 5.7 - Diferença entre sinal real e simulado na sala cinco.

Nota-se que para ambas as simulações finais, a variação de temperatura das salas onde ocorre a atuação direta do aquecedor em relação ao sinal obtido no sistema térmico real, não ultrapassou a faixa dos $[-4.5, 2.5]^{\circ}\text{C}$. Porém o ajuste de parâmetros para as salas menos afetadas pela atuação dos aquecedores em cada experimento, tornou-se a tarefa mais difícil. Neste caso o melhor resultado obtido foi uma diferença em torno de $[-8, 6]^{\circ}\text{C}$. Levando-se em conta que o sistema simulado é uma aproximação linear de um sistema térmico real, não linear, variante no tempo e deslocamento com características complexas, achou-se por bem finalizar a fase de ajustes do análogo elétrico, dando-se por satisfatórios os resultados obtidos.

5.2-PROJETO DO CONTROLADOR INTELIGENTE

De posse do análogo elétrico devidamente parametrizado de forma a responder semelhantemente ao comportamento do sistema térmico real, passou-se então para a etapa de desenvolvimento do controlador inteligente fuzzy onde a simulação foi uma ferramenta essencial.

Conforme citado no item 5.1 deste capítulo a temperatura do sistema térmico real não deve ultrapassar os 70°C. Sendo assim, na intenção de manter uma faixa de segurança para a temperatura máxima do sistema foi estabelecido para o *setpoint* o valor máximo de 60°C e mínimo de 22.5°C.

Em sistemas que utilizam controladores proporcionais é comum a existência de erro em regime permanente. Este varia em função da referência de temperatura e do ganho do controlador. O controlador inteligente projetado se comporta como um controlador proporcional de ganho variável. O valor do ganho neste caso varia em função do *setpoint* do sistema, sendo assim o erro em regime é o mesmo qualquer que seja o *setpoint*. Este fator é determinante na manutenção do conforto térmico do ambiente controlado, pois temperatura deve permanecer dentro de uma faixa de variação considerada aceitável para os padrões de sensibilidade humana.

Fanger propôs em 1970 o índice PMV (*Predicted Mean Vote*), que é largamente utilizado para avaliar conforto em prédios (Charles, K.E., 2003) (Yang, K.H., Su, C.H., 1997). O índice PMV utiliza uma Escala de Sensação Térmica proposta por Fanger (-3,-2,-1,0,1,2,3) e adotada pela ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers).

O índice PMV utiliza quatro variáveis físicas (temperatura do ar, velocidade do ar, temperatura radiante média e umidade relativa) e duas variáveis pessoais (isolamento da vestimenta e nível de atividade) para prever a sensação térmica média de um grande conjunto de pessoas. De acordo com o *padrão 55* (1992) da ASHRAE as Condições de Conforto são (Charles, K.E., 2003):

Estação	Temperatura Ótima	Faixa de Temperaturas	Condições para as demais entradas PMV
Inverno	22°C	20-23°C	Umidade relativa: 50% Velocidade relativa média: < 0.15m/s Temperatura radiante média: 1.2 met Isolação da Vestimenta: 0.9 clo
Verão	24.5°C	23-26°C	Umidade relativa: 50% Velocidade relativa média: < 0.15m/s Temperatura radiante média: 1.2 met Isolação da Vestimenta: 0.5 clo

Figura 5.8 – Condições de conforto térmico – ASHRAE *Standard 55* (1992).

Sendo assim foi definido como parâmetro de manutenção do conforto térmico que o erro em regime do controlador inteligente deve ser inferior a 2°C.

Em sistemas de condicionamento de ar, mais especificamente aparelhos de ar condicionado de janela a única variável de controle é a temperatura do ambiente. O controle liga-desliga, muito utilizado neste tipo de equipamento aciona o compressor de gás refrigerante em função da variação da temperatura do ambiente, resfriando a serpentina e retirando calor do ar a ser insuflado neste. Algumas das medidas mais comuns de economia de energia no uso de equipamentos deste tipo são: desligar o aparelho sempre que não houverem pessoas no ambiente e 30 minutos antes do final do expediente de trabalho, não utilizar o equipamento em sua máxima potência entre outras (www.Aneel.gov.br, 2005).

Variáveis como: Temperatura externa a sala, temperatura do terreno, intensidade de radiação solar direta e difusa, presença de pessoas no ambiente, entre outras são informações desconsideradas por sistemas de controle tradicionais, mas que poderiam ser usadas estrategicamente no controle destes sistemas para reduzir o consumo de energia. Sistemas de automação predial mais modernos levam em conta este tipo de influência na forma de cenários.

A variação da temperatura do ar captado e refrigerado pelos aparelhos de ar condicionado é um reflexo direto da variação da posição do sol e sua intensidade de radiação sob o ar e o

equipamento durante o longo do dia. Numa situação onde a temperatura interna da sala é controlada por dois aparelhos de ar condicionado instalados em paredes distintas, pode-se imaginar que em determinado horário do dia o sol atuará diretamente sob um dos equipamentos enquanto que o outro permanece sob a sombra. O consumo de energia destes aparelhos está diretamente relacionado à energia termomecânica gasta para retirar uma certa quantidade de calor de um determinado volume de ar. Obviamente o aparelho que se encontra sob a sombra gasta menos energia para resfriar um mesmo volume de ar que o aparelho atingido diretamente pelo sol.

Embasado nesta idéia o controlador inteligente deve favorecer o funcionamento do aparelho que se encontra sob a sombra e reduzir gradativamente o funcionamento do aparelho que está sob o sol, chegando a inibição do funcionamento deste dependendo do quão alta é a temperatura do ar captado por tal. A variável de entrada que determina esta ação do controlador é a diferença de temperatura externa às paredes onde estão instalados os aquecedores. Por se tratar de aquecimento o controlador implementado favorecerá o funcionamento do equipamento cuja temperatura externa é maior e não menor como no resfriamento.

No sistema implementado somente o aquecimento do ambiente é controlado, o valor mínimo para a saída do controlador é zero e o resfriamento ocorre naturalmente sem a influencia de nenhum dispositivo.

Em resumo foram consideradas três variáveis de entrada no controlador inteligente: Erro, *Setpoint* e Diferença de Temperatura Externa às Salas; e de saída a variável: Saída. As funções de pertinência implementadas para cada variável podem ser observadas nas figuras 5.9, 5.10, 5.11 e 5.12.

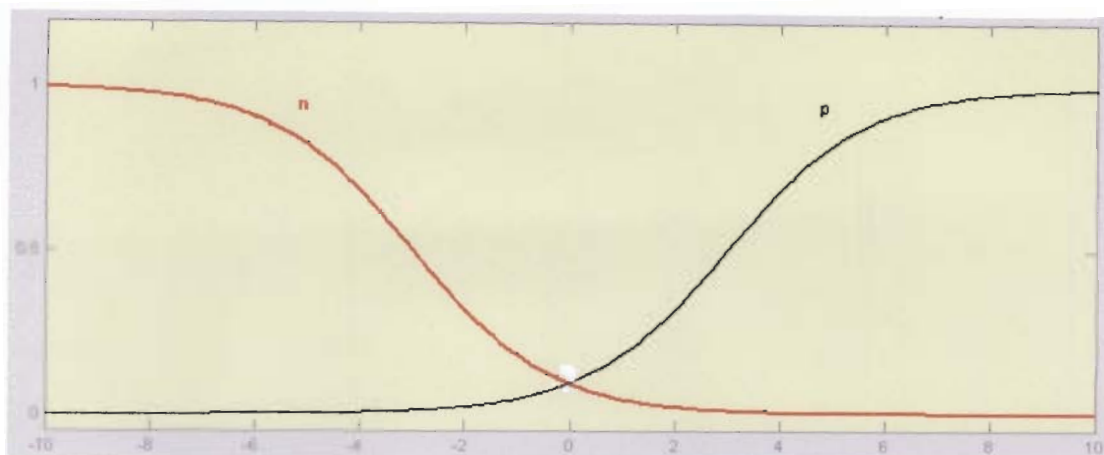


Figura 5.9 – Funções de pertinência da variável erro.

A variável erro possui duas funções de pertinência: erro positivo (p) e erro negativo (n). Para ambas as situações de erro a atuação do controlador é a mesma, porém com sinal invertido por este motivo o erro positivo foi representado por uma função sigmóide e o erro negativo pela sigmóide invertida. A função sigmóide impõe certa não linearidade ao comportamento do controlador que vai de encontro ao comportamento do sistema térmico real por este motivo ela foi escolhida para esta variável.

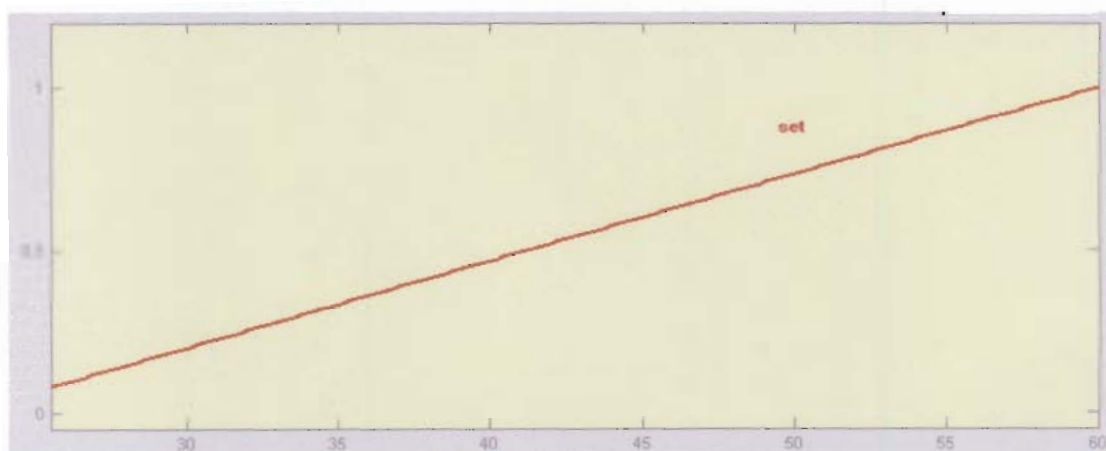


Figura 5.10 – Função de pertinência da variável *setpoint*.

Para a variável *setpoint* foi escolhida a função triangular (set), pois a influência desta na saída é aumentar linearmente o ganho em função do aumento do *setpoint* contribuindo para a manutenção do erro em regime para qualquer que seja a referência de temperatura.

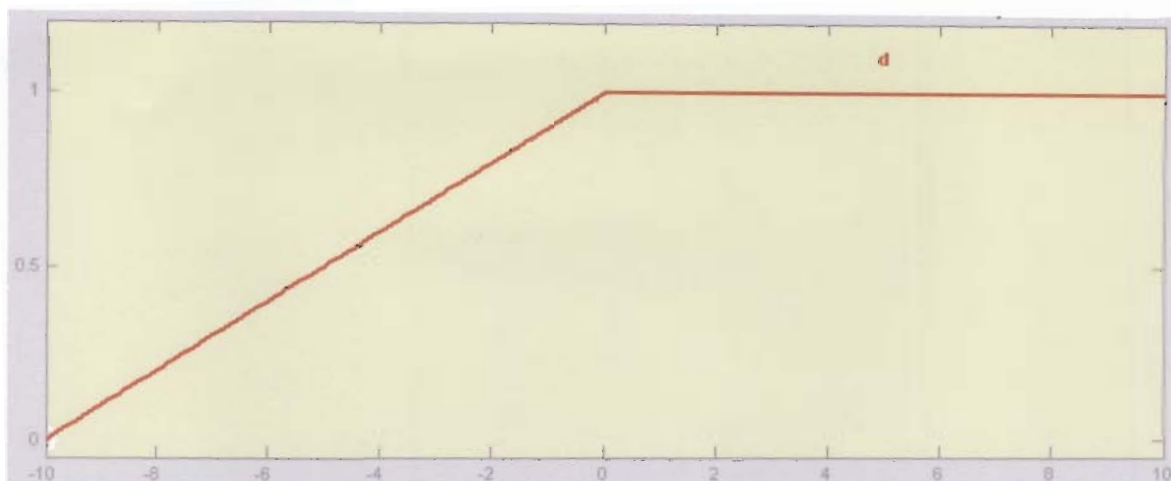


Figura 5.11 – Função de pertinência da variável diftext.

A variável diferença entre temperaturas externas das salas controladas (diftext) contém apenas uma função de pertinência trapezoidal (d). Esta contribui na variação do sinal de controle da seguinte forma: se a diferença de temperatura é positiva ou zero o sinal de controle varia em função do erro e do *setpoint* ; se a diferença de temperatura assumir valores negativos o sinal de controle é reduzido proporcionalmente a diminuição da variável diftext inibindo o funcionamento do atuador se essa diferença for menor que menos 10 °C. Este valor limite foi estabelecido pensando que em um dia comum onde a temperatura ambiente sob o sol é de 35°C o valor mínimo de temperatura sob a sombra não deve ultrapassar os 25°C o que gera uma diferença máxima de temperatura de 10°C. Para o sistema implementado onde a preocupação é o ar aquecido esta diferença se reflete negativamente, ou seja, menos 10°C.

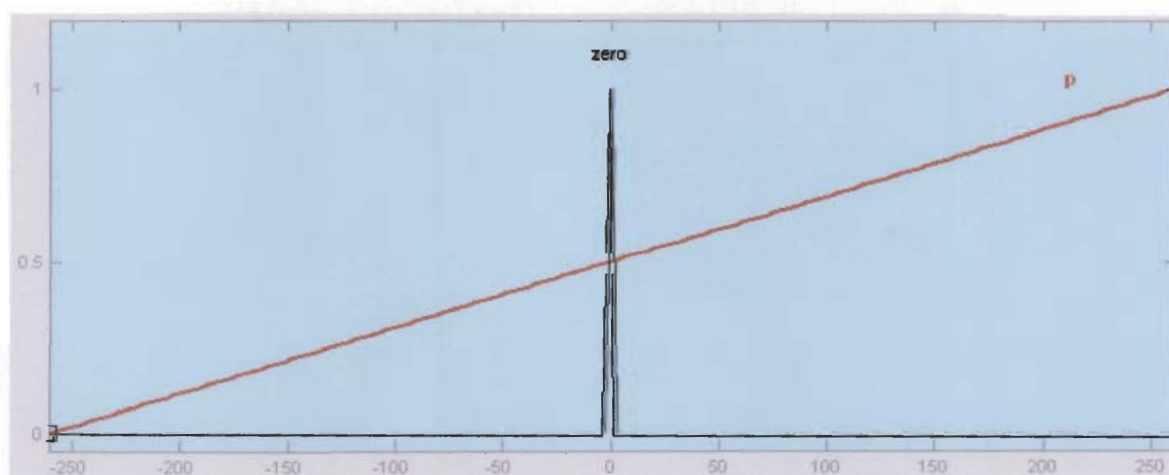


Figura 5.12– Funções de pertinência da variável saída.

A variável saída é composta por duas funções de pertinência triangulares: positivo (p) e zero (zero).

A base de regras do controlador inteligente possui as seguintes funções:

- Se (erro é p) e (setpoint é set) e (diftext é d) então (saída é p)
- Se (erro é n) então (saída é zero)

Através da ferramenta ruler Viewer do Matlab™ é possível visualizar as regras em ação em função do modelo de inferência (figura 5.13), método de agregação e outras características do controlador implementado.

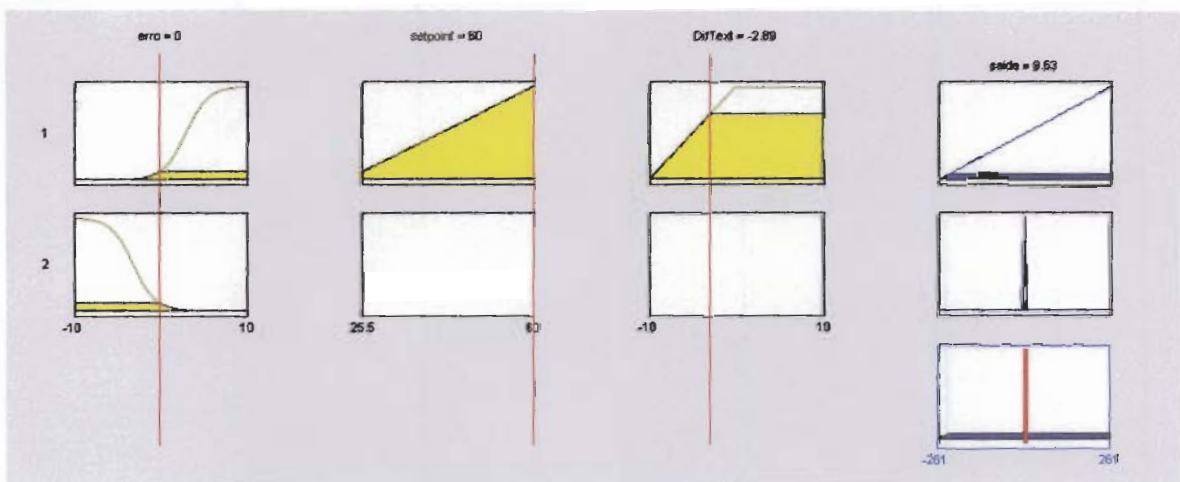


Figura 5.13– Visão das regras e funções de pertinência do controlador *fuzzy*.

Baseado no modelo Mandani, o mais popular para inferência fuzzy (Bauchspiess, 2002), o controlador implementado utilizou a variante prod-max como método de inferência. Neste método para as regras que utilizam o conectivo “and” o grau de pertinência das variáveis envolvidas é multiplicado, já para o conectivo “ou” o maior grau de pertinência é o resultante. Na implicação foi escolhido o operador Min e o operador Max foi utilizado na agregação, sendo o centróide da área o método de defuzzificação do controlador.

As características selecionadas para o controlador inteligente implementado refletem diretamente na relação entre variáveis de entrada e variáveis de saída que pode ser observada na figura 5.14 abaixo.

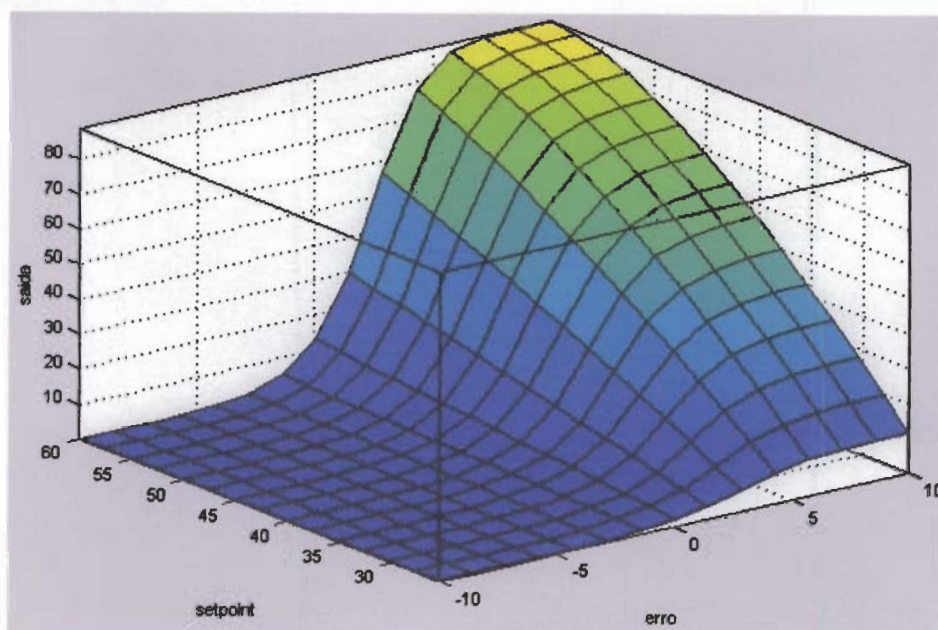


Figura 5.14– Superfície de relação entre erro X setpoint X saída.

Através desta figura é possível observar que para o erro negativo independente o valor de setpoint a saída é sempre zero ou bem próxima deste valor. Isto se deve ao fato de não haver controle para erro negativo.

Outra característica interessante que está bem evidente nesta superfície é a influência do aumento do setpoint para o erro positivo no valor da saída do controlador. É possível observar ainda a ação sigmóide do erro positivo na saída do controlador.

A figura 5.15 estabelece uma superfície que relaciona as variáveis de entrada: erro e diferença entre as temperaturas externa, com a variável de atuação: saída. Desta forma fica clara a visualização da influência da diferença de temperatura externa na ação do controlador o que implicará no funcionamento total ou parcial do aquecedor, gerando consequentemente a economia de energia esperada.

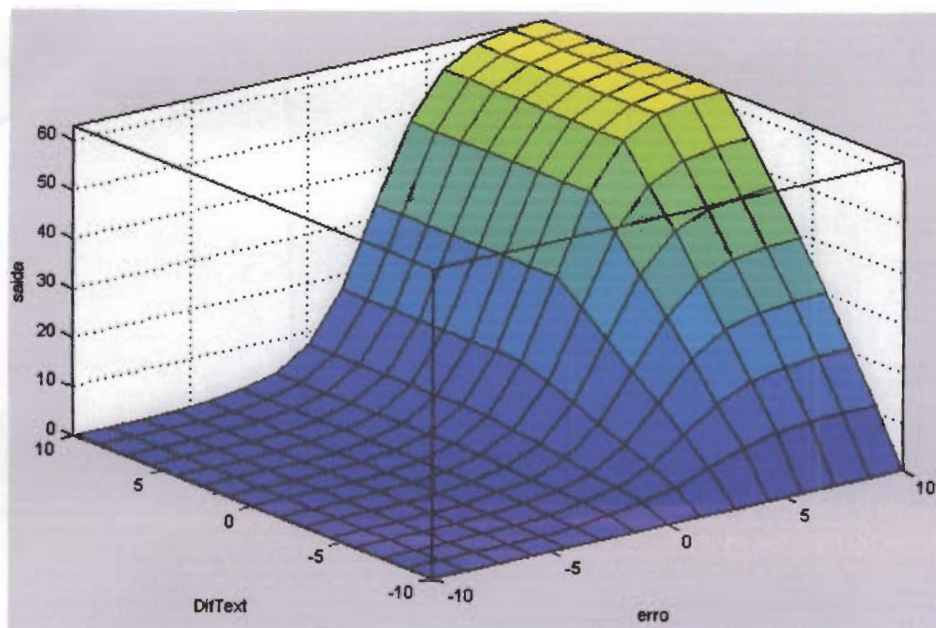


Figura 5. 15– Superfície de relação entre erro X diftext X saída.

Pela figura 5.15 observa-se que no caso de diftext positivo a saída não sofre nenhuma influência, já quando este se torna negativo o valor da saída é reduzido proporcionalmente à redução do valor de diftext podendo chegar a zero quando este alcança o valor máximo negativo.

Na fase de ajuste de parâmetros do controlador fuzzy como: posição das as funções de pertinência das variáveis sob o universo de discurso, limites máximo e mínimo do universo de discurso de cada uma destas, entre outros. Foi utilizado um modelo de simulação apresentado na figura 5.16 abaixo.

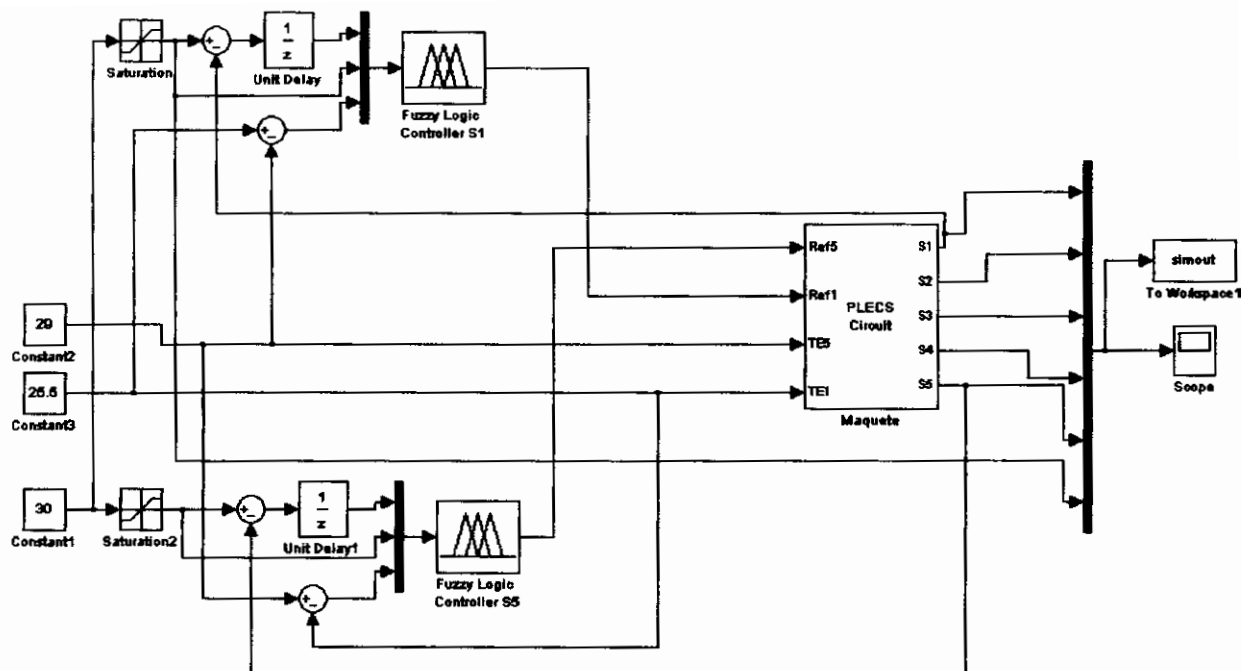


Figura 5. 16– Modelo simulink para ajuste do controlador *fuzzy*.

Para verificação da eficiência do controlador inteligente em relação à manutenção do conforto térmico do ambiente traduzido na manutenção do erro em regime para diferentes valores de setpoint, conforme citado neste mesmo capítulo anteriormente, foi realizada uma simulação onde o valor de setpoint varia de 30 a 60 °C com um degrau de subida de 5°C mantido num período de 100 segundos. A mesma simulação foi repetida para um controlador com ganho fixo, de forma que as figuras 5.17 e 5.18 demonstram os resultados obtidos.

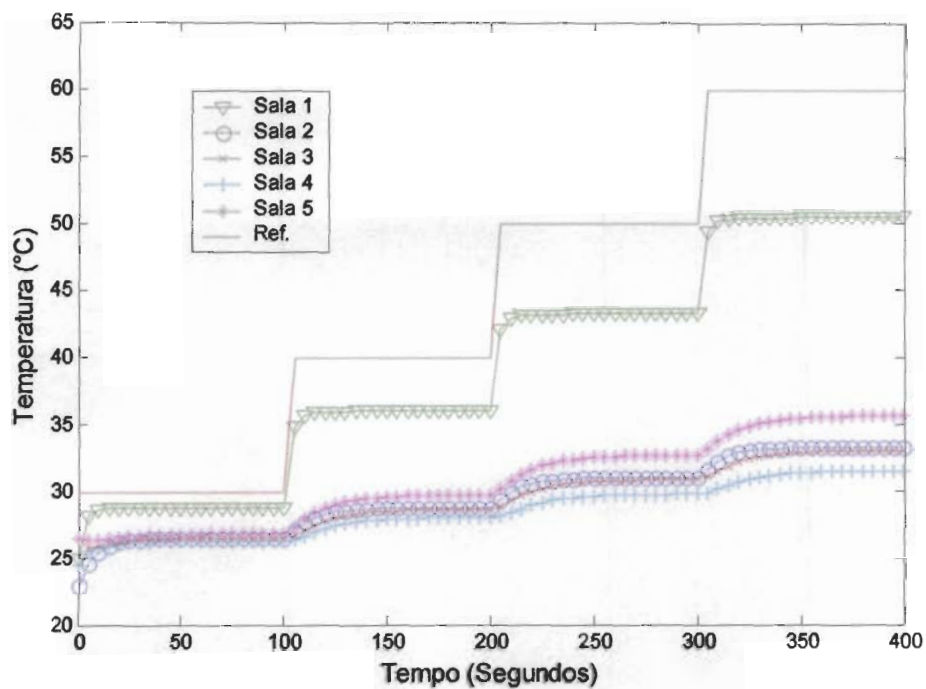


Figura 5. 17– Resposta do controlador proporcional com ganho fixo ($K_p=3$) à variação do *setpoint*.

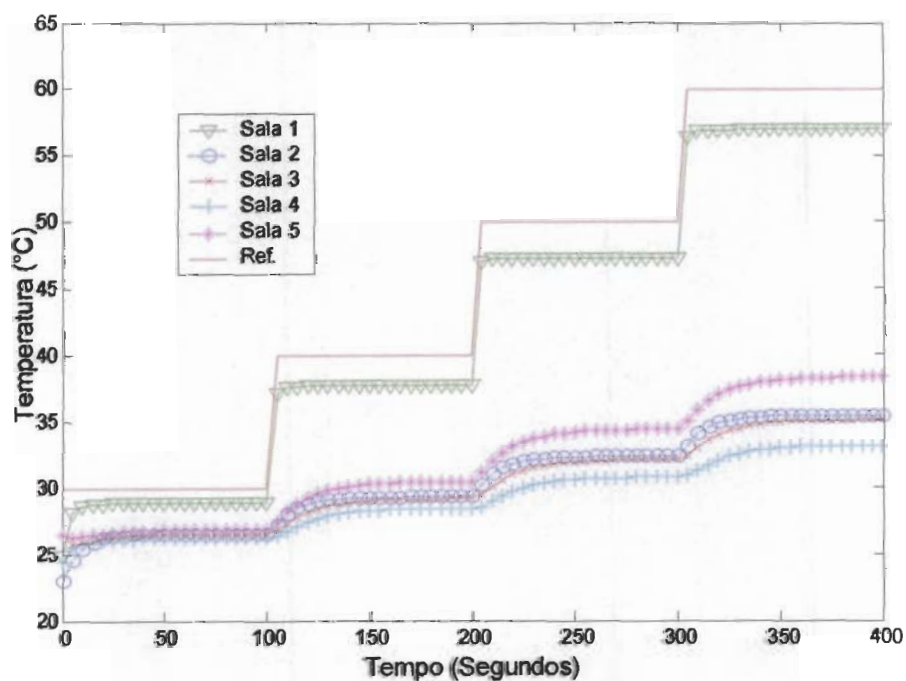


Figura 5. 18– Resposta do controlador inteligente à variação do *setpoint*.

Conforme se pode observar o controlador consegue manter o erro em regime para todos os valores de setpoint enquanto que no caso do controlador proporcional o erro em regime

aumenta à medida que o valor do setpoint aumenta. Isto comprova a eficiência do ajuste da função de pertinência da variável setpoint do controlador inteligente implementado.

5.3 – CONTROLE DO SISTEMA DE CONDICIONAMENTO DE AR

Terminada a fase de simulações e ajustes de parâmetros do controlador fuzzy, passou-se à etapa de implementação deste e mais dois tipos de controladores (liga-desliga e proporcional) estudados no segundo capítulo desta dissertação, em linguagem C.

Gerados os softwares correspondentes a cada tipo de controle, estes foram gravados nos microcontroladores dando início à fase de experimentação no sistema térmico real.

No sistema térmico real somente a temperatura das salas 1 e 5 são controladas. O valor de setpoint da temperatura destas salas é determinado pelo usuário através da interface supervisão. Nos experimentos realizados foi estabelecido que as duas salas teriam o mesmo valor de setpoint. Inicialmente a temperatura externa aos ambientes controlados seria a mesma do laboratório onde está instalada a maquete (em média 27°C). Para fins de análise os experimentos obedeceram ao seguinte critério: o consumo dos atuadores é contabilizado durante 300 segundos a partir do momento em que fica caracterizada a manutenção da temperatura do ambiente controlado, ou seja, o instante inicial em que o controlador atua para alcançar a temperatura desejada é desprezado uma vez que em um sistema de condicionamento de ar esta situação ocorre somente no início do expediente de trabalho. A economia de energia neste caso está diretamente relacionada ao resto do dia em que o aparelho trabalha para manter a temperatura. Outro fator determinante para a utilização deste critério é o fato de que para efeitos de comparação de eficiência todos os experimentos realizados devem partir da mesma situação inicial evitando o favorecimento de qualquer que seja a estratégia de controle analisada.

Para que o controlador inteligente possa gerar economia de energia é importante que haja troca de calor entre as salas controladas uma vez que com a inibição do funcionamento do atuador cuja temperatura externa é menor o outro atuador deve trabalhar para manter a temperatura de ambas as salas controladas. Neste sentido em todos os experimentos a porta que liga as sala 1 e 5 permanece aberta enquanto que todas as outras portas e janelas estão

fechadas. Usando esta configuração na maquete foi realizado um experimento inicialmente simples cujo único objetivo era verificar se o controle inteligente seria capaz de manter a temperatura de ambas as salas em uma situação onde a temperatura externa inibisse totalmente o funcionamento de um dos atuadores. O resultado deste experimento é mostrado na figura 5.19.

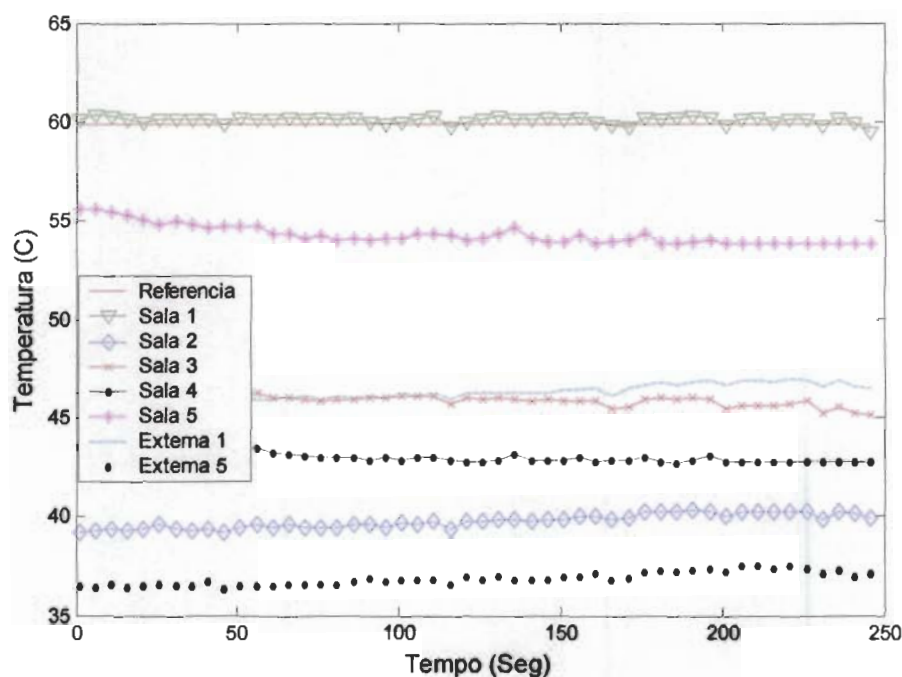


Figura 5. 19– Controle fuzzy para *setpoint* de 60°C e temperatura externa à sala 1 45°C.

Fica evidente que apesar da excelente atuação no controle da sala 1 o sistema não conseguiu manter a temperatura da sala 5 próxima do valor desejado, ao contrário a diferença entre esta e o *setpoint* chega ao valor de 5°C, inaceitável para os padrões de conforto estabelecidos neste capítulo. Esta situação torna claro que a troca de calor entre as salas 1 e 5 não é suficientemente grande a ponto de permitir que apenas um aquecedor controle a temperatura em ambos os ambientes. Diante desta conclusão a atitude tomada para solucionar tal problema foi a mudança da configuração física da maquete retirando a parede de divide as salas 1 e 5, tornado-as uma única sala onde somente um sensor de temperatura é agora instalado (no meio da sala) e serve de referência para os dois controladores. A nova configuração da maquete está representada na figura 5.20.

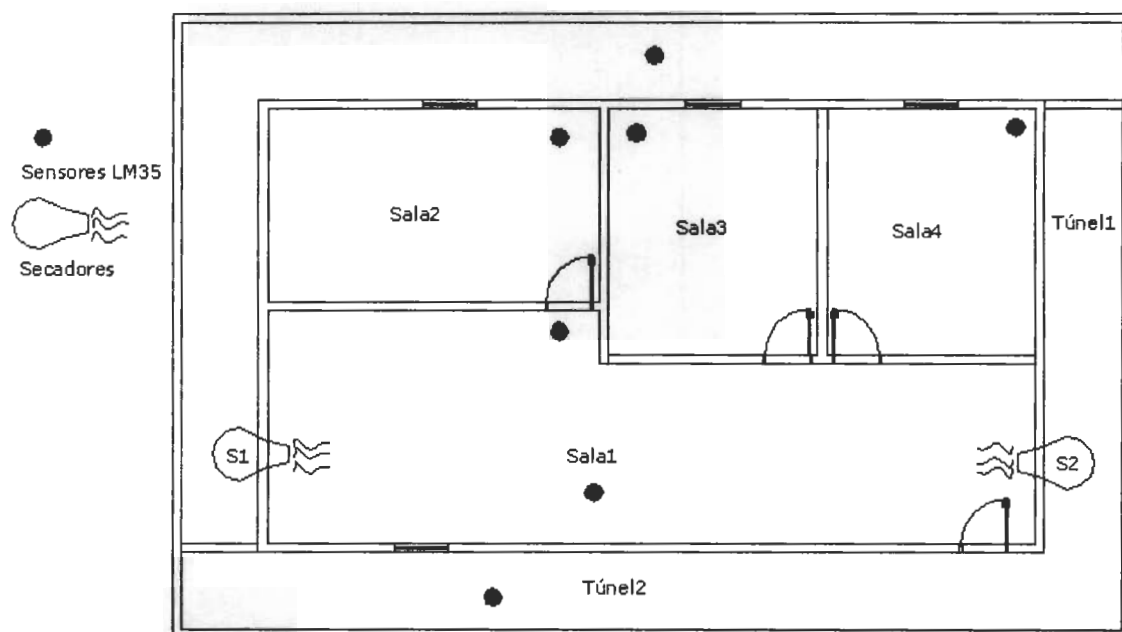


Figura 5. 20– Planta baixa da nova configuração da maquete.

Com a nova configuração da maquete foram realizados os primeiros experimentos onde a temperatura desejada é de 50°C e a temperatura externa é a mesma para os dois atuadores. Os resultados obtidos foram:

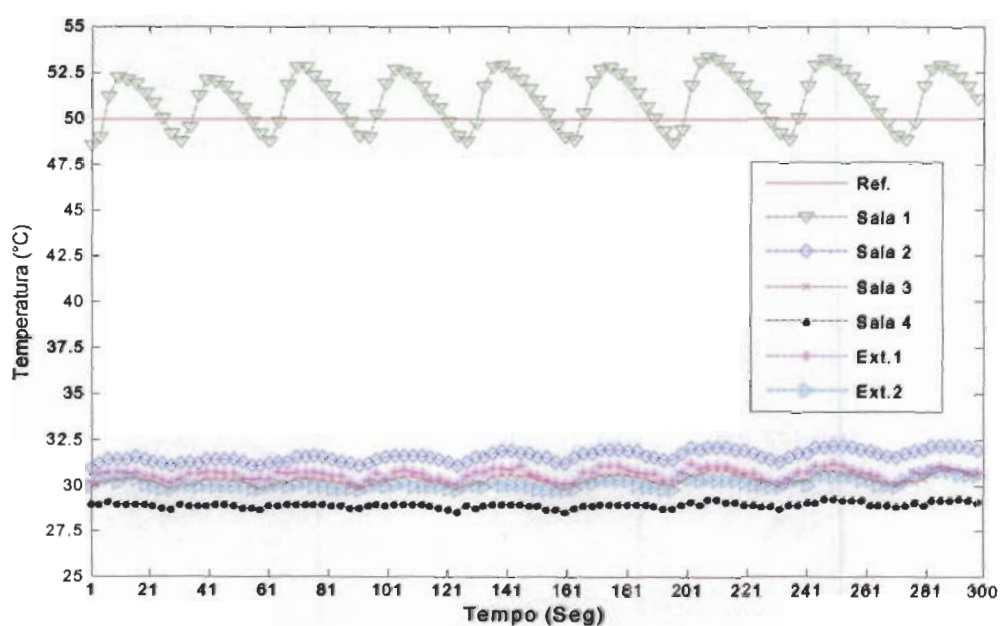


Figura 5. 21– Controle liga-desliga com delta de 1°C.

O controle liga-desliga foi capaz de manter a temperatura do ambiente dentro dos padrões de conforto térmico.

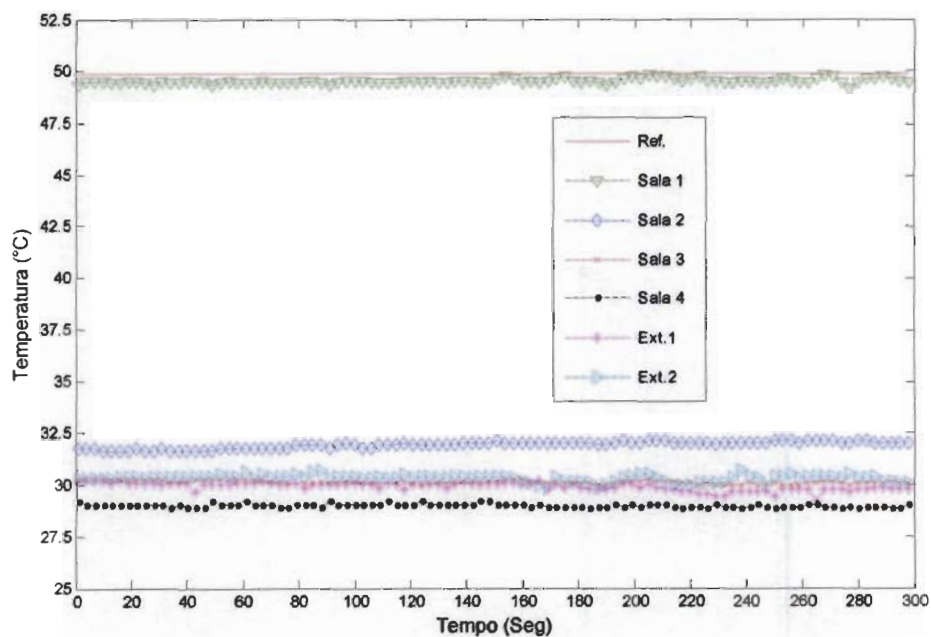


Figura 5. 22– Controle proporcional com $K_p=3$.

No controle proporcional (figura 5.22) nota-se uma redução da variação da temperatura se comparado ao controle liga-desliga. Assim como no controlador anterior o conforto térmico do ambiente foi mantido sendo que neste tipo de controle o erro em regime se manteve fixo em $0,5^{\circ}\text{C}$.

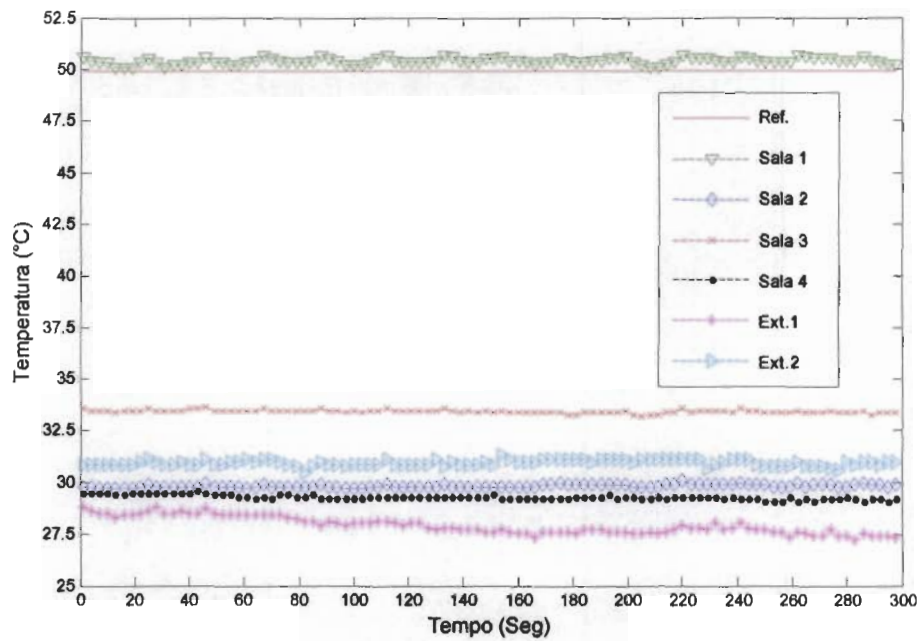


Figura 5. 23— Controle *fuzzy*.

No controle *fuzzy* (figura 5.23) o erro em regime se manteve em menos 0.5°C , o que para os padrões de conforto é satisfatório.

Em termos de consumo de energia os controladores tiveram o seguinte comportamento (figura 5.24, 5.25, 5.26):

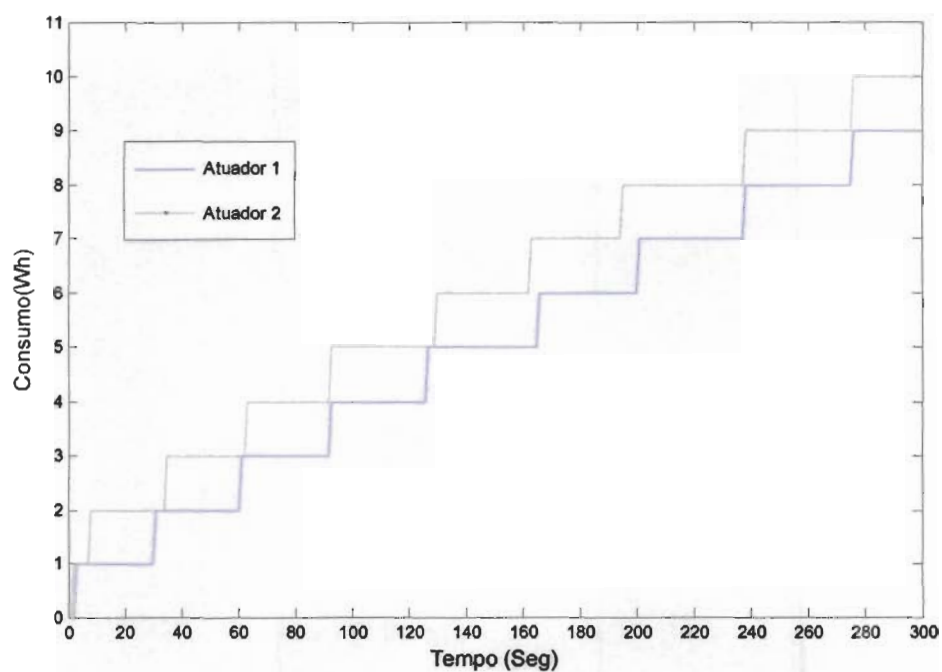


Figura 5.24– Evolução do consumo de energia dos atuadores no controle liga-desliga sem variação de temperatura externa.

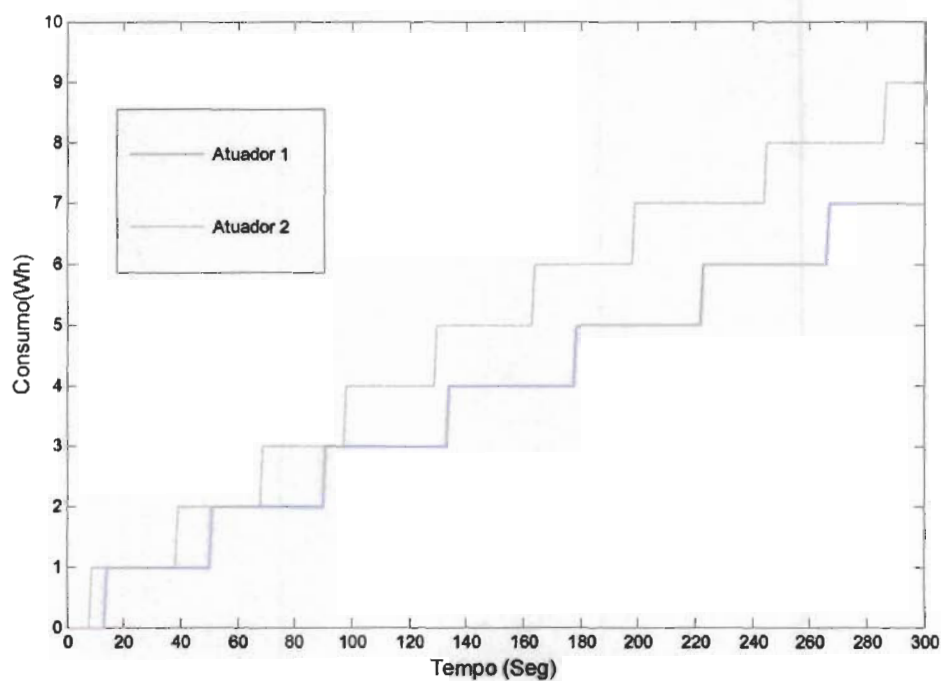


Figura 5.25– Evolução do consumo de energia dos atuadores no controle proporcional sem variação de temperatura externa.

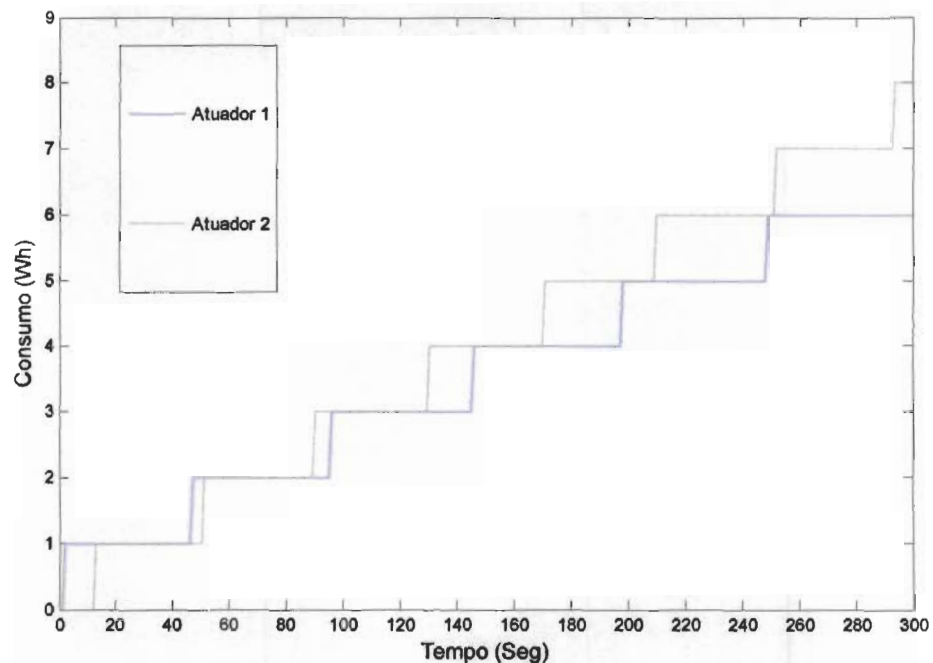


Figura 5.26– Evolução do consumo de energia dos atuadores no controle *fuzzy* sem variação de temperatura externa.

Observando-se os gráficos obtidos tem-se que em todos os casos o apesar da diferença de consumo entre os atuadores o incremento da variável consumo é repetido sempre no mesmo intervalo de tempo. Isto mostra que a estabilização do controle do sistema reflete em um consumo constante de energia elétrica.

A tabela 5.1 mostra o consumo total do sistema para cada tipo de controlador utilizado.

Tabela 5.1- Consumo total dos controladores sem variação de temperatura externa

Tipo de Controlador	Consumo Total (Wh)
Liga-desliga	17,1
Proporcional	14,4
Fuzzy	11,2

Comparando os resultados obtidos pelos controladores: proporcional e fuzzy em relação ao controle liga-desliga, tradicionalmente utilizado neste tipo de sistema, pode-se afirmar que o controle proporcional economizou 15.8% da energia consumida enquanto que o controlador fuzzy economizou 34.5%.

Terminada a fase de experimentação sem variação da temperatura externa, passou-se à etapa seguinte onde a temperatura externa ao atuador dois passa a ser mantida próxima dos 40°C com variação máxima permitida de mais ou menos 0.5°C.

Atendendo os critérios pré-estabelecidos foram realizados mais três experimentos, cujos resultados são demonstrados a seguir.

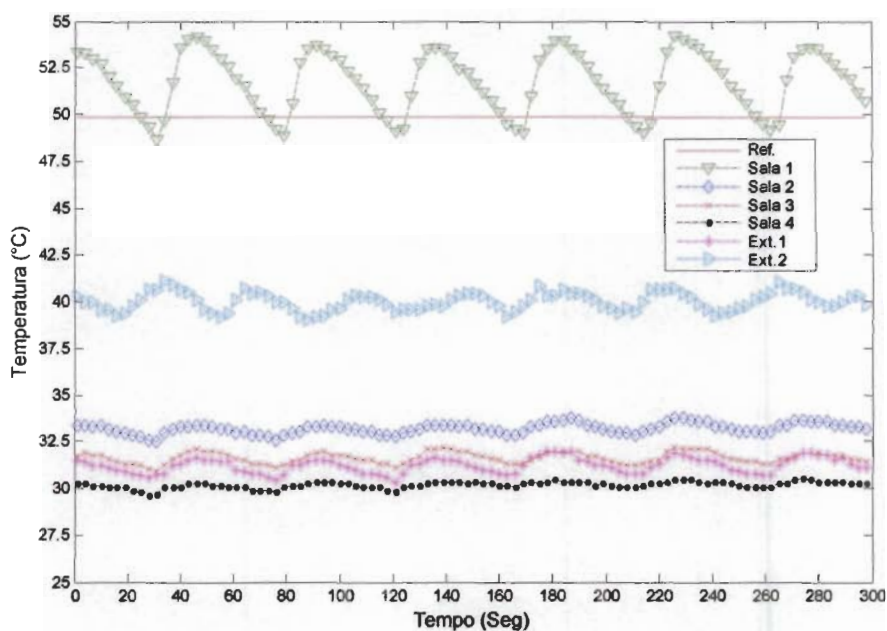


Figura 5.27– Controle liga-desliga com delta de 1°C e temperatura externa de 40°C.

Pela figura 5.27 nota-se que a variação positiva da temperatura controlada aumentou deixando de atender o padrão de conforto térmico do ambiente.

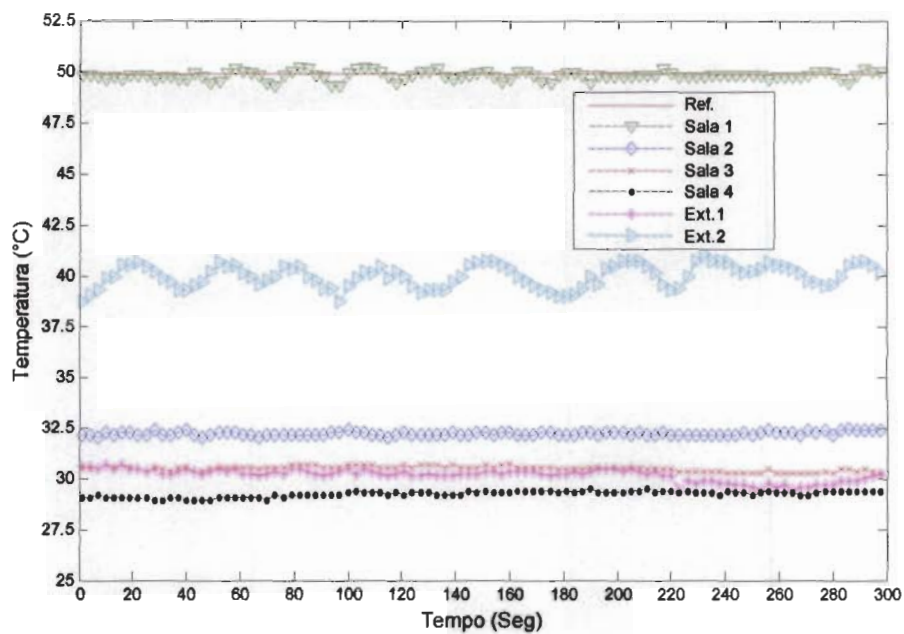


Figura 5.28– Controle proporcional $K_p=3$ e temperatura externa de 40°C.

No caso do controle proporcional (figura 5.28) nota-se que o erro em regime diminuiu sendo zero na maior parte do tempo, o que satisfaz plenamente os padrões de conforto térmico.

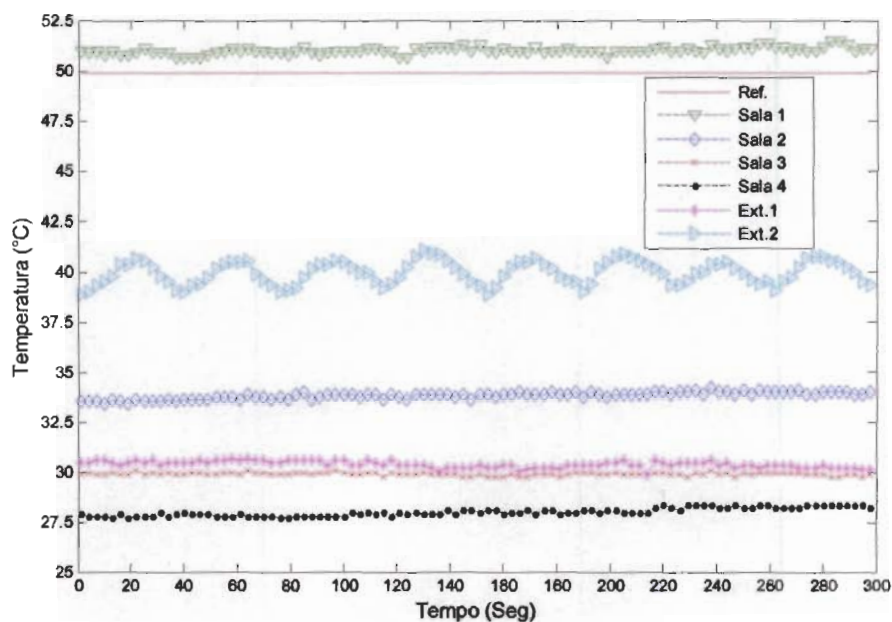


Figura 5.29– Controle fuzzy e temperatura externa de 40°C.

O erro em regime aumentou também para o controle fuzzy. Apesar disso este se manteve em menos 1.5°C o que satisfaz os padrões de conforto térmico pré-estabelecidos.

Em relação ao consumo de energia houve redução para todos os controladores o que era esperado, pois todos eles captaram ar pré-aquecido durante o controle. A tabela 5.2 mostra o consumo total de energia dos atuadores para cada tipo de controlador.

Tabela 5.2- Consumo total dos controladores com variação de temperatura externa

Tipo de Controlador	Consumo Total (Wh)
Liga-desliga	10,8
Proporcional	9,9
Fuzzy	8,1

A evolução do consumo de energia de cada controlador está representada nas figuras abaixo.

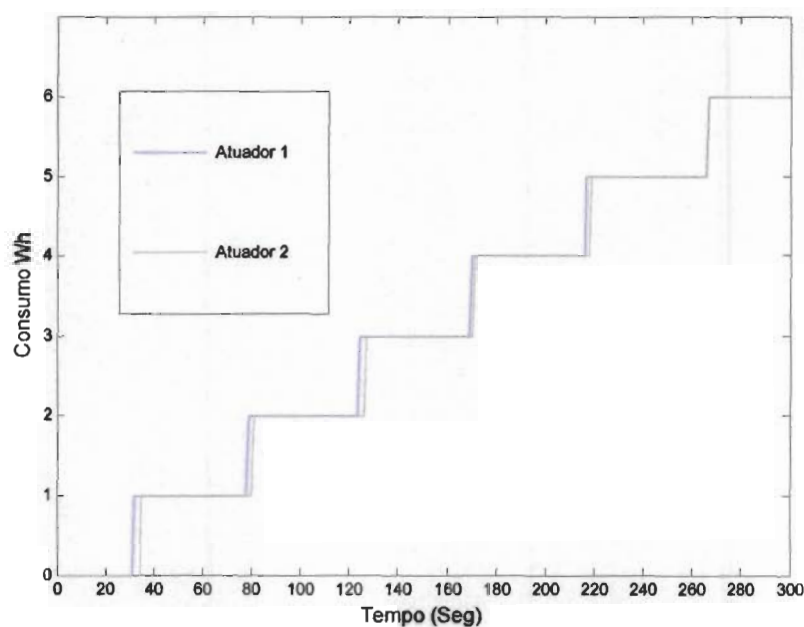


Figura 5. 30– Evolução do consumo de energia dos atuadores no controle liga-desliga com variação de temperatura externa.

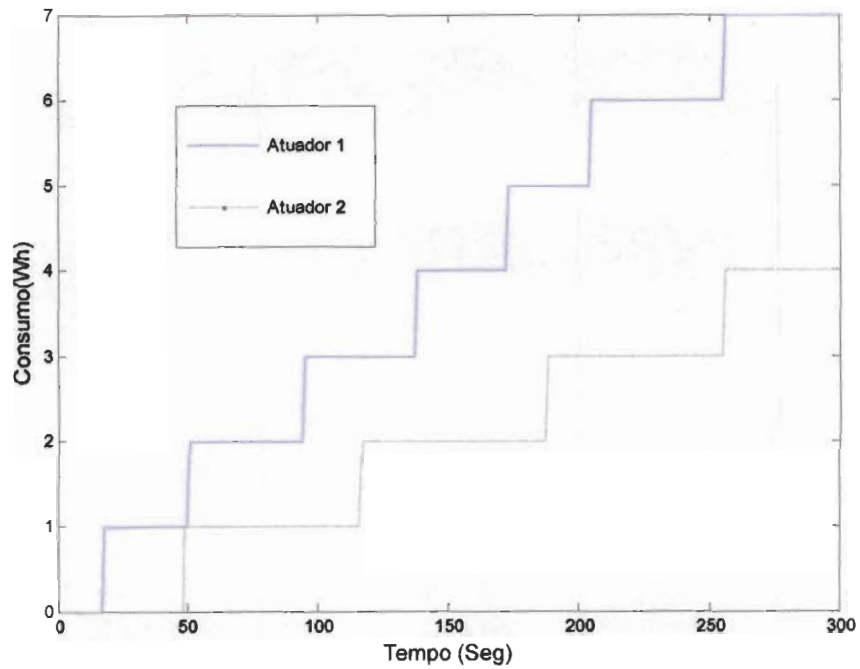


Figura 5. 31– Evolução do consumo de energia por atuador no controle proporcional com variação de temperatura externa.

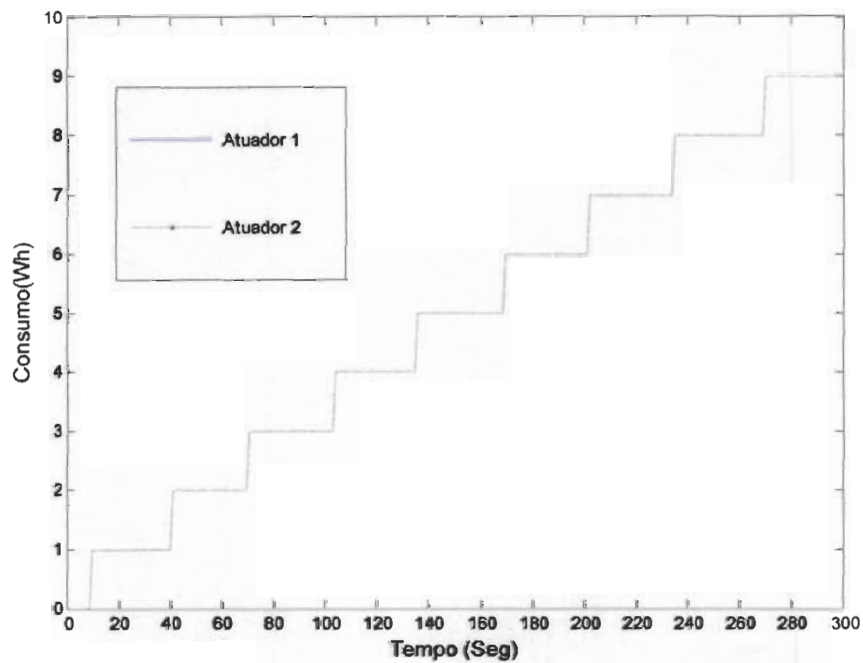


Figura 5. 32– Evolução do consumo de energia por atuador no controle *fuzzy* com variação de temperatura externa.

Observa-se que em todos os experimentos realizados **na primeira** fase o consumo do atuador dois era sempre superior ao do atuador um. Isto ocorre, pois apesar de os dois

atuadores controlarem a temperatura do mesmo ambiente o atuador dois ainda tem uma maior área para aquecimento e conseqüentemente maior carga térmica.

Já na segunda fase, nota-se a redução do consumo de energia do atuador dois chegando em alguns casos, como no controle proporcional, a ser menor que o do atuador um. Isto pode ser atribuído ao fato deste controlador estar captando ar pré-aquecido, gastando menos energia para fazê-lo chegar a temperatura desejada.

Outro fato interessante é que a Constância do acréscimo da variável consumo no tempo acontece também nesta fase experimental, o que caracteriza a estabilidade do sistema no controle e manutenção da temperatura.

No controle liga-desliga o consumo de energia dos atuadores é praticamente o mesmo durante todo o experimento, enquanto que no controle proporcional o atuador dois passa a consumir menos energia que o atuador um. Já no controle fuzzy, observa-se que o consumo do atuador um é zero em todo o experimento, ou seja, este teve inibido sua atuação o que conseqüentemente fez com que o controlador dois assumisse o aquecimento de toda a sala, aumentando o seu consumo e ao mesmo tempo reduzindo-o em relação ao experimento sem pré-aquecimento do ar.

Fazendo uma análise percentual do consumo de energia dos controladores em relação ao controle tradicional liga-desliga, são apresentados os seguintes valores.

Tabela 5.3- Economia de energia em relação ao controle liga-desliga sem diferença de temperatura externa entre as salas

Tipo de controle	Economia (%)
Proporcional	15,8
Fuzzy	34,5

Tabela 5.4- Economia de energia em relação ao controle liga-desliga com diferença de temperatura externa entre as salas

Tipo de controle	Economia (%)
Proporcional	8,3
Fuzzy	25

Pode-se afirmar que a atuação dos controladores proporcional e fuzzy, independentemente da temperatura externa ao ambiente, consegue gerar economia de energia. A economia por ação dos controladores em conjunto com o pré-aquecimento do ar é sem dúvida muito maior do que a ação isolada de um dos fatores, porém com a variação da temperatura externa torna-se mais difícil para os controladores economizar a mesma quantidade de energia que sem este fator.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bauchspiess, A., Souza, A.S. Leite, A.A.C., Ramos, L.M.A., Pereira, E.S., Santos, R.J. (2004). "Fuzzy Thermal Control with Remote Access for Building Automation". In: *11th IFAC INCOM*, Savador/Brazil, 6 pp.
- Bauchspiess, A. (2004). "Introdução aos Sistemas Inteligentes." In: *Aplicações em Engenharia de Redes Neurais Artificiais, Lógica Fuzzy e Sistemas Neuro-Fuzzy*.
- Babuška, R. and Verbruggen, H. B. (1996). "An Overview of Fuzzy Modelling for Control." In: *Control Eng.Practice Vol.4* 11, 1593-1606.
- Becker, M., Oestereich, D., Hasse, H., Litz, L. (1994). "Fuzzy control for Temperature and Humidity in Refrigeration Systems". In: *IEEE Conference on Control Applications*, pp.1607-1612.
- Berenji, H.R. (1992). "Fuzzy logic controllers." In: R.R. Yager and L.A. Zadeh, Eds., *An Introduction to Fuzzy Logic Applications in Intelligent Systems*. Kluwer Academic Publishers, Boston, MA, 69-96.
- Cela, A. and Hamam ,Y. (1992). "A fuzzy robust controller for trajectory tracking of robotic systems." In: *Proc. 1992 IEEE/RSJ Internat. Conference on Intelligent Robots and Systems*. Raleigh, NC, 767-774.
- Charles, K.E. (2003). "Fanger's Thermal Comfort and Draught Models." In: *IRC-RR-162 National Research Council Canada – Institute for Research in Construction*.
- Eftekhari, M.M., Marjanovic, L.D. (2003). "Application of Fuzzy Control in Naturally Ventilated Building for Summer Conditions." In: *Energy and Buildings*, 35, 645-655.
- He, M., Cai, W.-J., Li, S.-Y. (2005). "Multiple fuzzy model-based temperature predictive control for HVAC systems". In: *Information Sciences* 169, pp.155-174.
- Hojati, M., Gazor, S. (2002). "Hybrid Adaptive Fuzzy Identification and Control of Nonlinear Systems". In: *IEEE Trans. on Fuzzy Systems*. Vol.10,No2, April 02. pp.198-210
- Hooi, Teoh, Chee, Singh, M., Siah, Y.K., bin Ahmad, A.R.(2001). "Building low-cost intelligent building components with controller area network (CAN) bus." In: *Electrical and Electronic Technology*. Proceedings of IEEE Region 10 International Conference on, Volume:1. 466 – 468.

- Huang, H.-Y., Yen, J.-Y., Chen, S.-L., Ou, F.-C. (2004). "Development of an Intelligent Energy Management Network for Building Automation". In: *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*. Vol.1, No.1, July 2004, pp.14-25.
- Kolokotsa, D., D Tsiavos, G. S. Stavrakakis, K. Lalaitzakis and E. Antonidakis (2001). "Advanced Fuzzy Logic Controllers Design and Evaluation for Buildings Occupants Thermal-Visual Comfort and Indoor Air Quality Satisfaction". In: *Energy and buildings*. Vol. 33, 531-543
- Levine, W.S. (1996). "The Control Handbook." In: *IEEE / CRC PRESS*.
- Li, H.X., Tso, S.K.(1999)."A fuzzy PLC with gain-scheduling control resolution for a thermal process – a case study." In: *Control Engineering Practice*. 523-529.
- MacConnell, P.F., Owens, D.H. (1994). "Intelligent fuzzy regulation of residential buildings." In: *Control Applications*., Proceedings of the Third IEEE Conference. 1629 - 1634.
- Malki, H.A., Li ,H. and Chen ,G. (1994). "New design and stability analysis of fuzzy proportional-derivative control systems." In: *IEEE Trans. Fuzzy Systems*. 2, 245-254.
- Mamdani , E.H. (1974). "Application of fuzzy algorithm for control of simple dynamic plant." In: *Proc. IEEE*, 121, 1585-1588.
- Mamdani, E.H. (1976). "Advances in the linguistic synthesis of fuzzy controllers." In: *International J. Man Machine Studies*, 669-678.
- Mamdani, E.H. (1993). "Twenty years of fuzzy control: Experiences gained and lessons learnt." In: *Proc. 2nd IEEE Int. Conf. on Fuzzy Systems*, San Francisco,339-344.
- Misir, D., Malki, A.H., Chen, G. (1996). "Design and analysis of a fuzzy proportional-integral-derivative controller." In: *Fuzzy Sets and Systems*. 79, 297-314
- Ogata, K. (1990)."Engenharia de Controle Moderno". In: 2° Edn. *Prentice Hall*.
- Pedrycz, W. and Gomide, F. (1998)."An Introduction to Fuzzy Sets: Analysis and Design." In: *Mit Press*.
- Priolo, C., Sciuto, S., Sperduto, F. (2001). "EDIFICIO – Efficient Design Incorporating Fundamentals Improvements for Control and Integrated Optimisation -Final Report". In: *Contract N° JOE3 CT97 0069, The European Commission & JOULE III* , 160pp
- Santos, R.J., Bauchspiess, A. Borges, G.A.. (2004). "Laboratório Remoto de Automação Predial". In: *COBENGE2004 – Congresso Brasileiro de Engenharia, Brasília*. 6pp.
- Shaw, L.S, Simões, M.G. (1999). "Controle e Modelagem Fuzzy".In: *Edgarg Blucher*,São Paulo, 165p.

- Shepherd, A.B., Batty, W.J. (2003). "Fuzzy control strategies to provide cost and energy high quality indoor environments in buildings with high occupant densities". In: *Building Services Engineers Res. Technol.* 24, 1, pp.35-45
- Valente de Oliveira, J. and Lemos, J.M. (2000). "A comparison of some adaptive-predictive fuzzy-control strategies". In: *IEEE Trans. On Systems, Man and Cybernetics – Part C: Applications and Reviews*, Vol.30, N° 1, February 2000, pp. 138-145.
- Yamamoto, S. and Hashimoto, I. (1991). "Present status and future needs: The view from Japanese industry." In: *Chemical Process Control*. CPCIV, Padre Island, TX 1-28.
- Yang, K.H., Su, C.H. (1997). "An Approach to Building Energy Savings Using the PMV Index" In: *Building and Environment*, Vol.32, No1, pp25-30
- Ying, H., Siler, W. and Buckley, J.J. (1990). "Fuzzy control theory: a nonlinear case." In: *Automática*. 26, 513-520.
- Yousof, R. and Omatu, S. (1993). "A multivariable self-tuning PID controller." In: *Internat. J. Systems Sci.* 24, 1887-1403.
- www.aneel.gov.br/, acessado em 25 de novembro de 2004.
- www.energiabrasil.gov.br/, acessado em 25 de novembro de 2004.
- www.microchip.com/, acessado em 15 de março de 2004
- www.global.carrier.com, acessado em 06 de fevereiro de 2005.
- www.mathworks.com, acessado em 15 de janeiro de 2005
- www.plexim.com, acessado em 15 de janeiro de 2005
- Zadeh, L.A. (1965). "Fuzzy sets." In: *Information and Control*. 8:338-53.
- Zhong, H.S., Shaohua, T. and Zhuang, W.P. (1993). "Fuzzy self-tuning of PID controllers." In: *Fuzzy Sets and Systems*. 56, 34-46.
- Zupančič, B., Škrjanc, I. (1998). "Advanced Fuzzy Control of the Temperature in the Test Chamber." In: *Faculty of Electrical Engineering, University of Ljubljana*.