
CONTROLE *FUZZY* PARA RACIONALIZAÇÃO DE ENERGIA EM PROTÓTIPO DE PROCESSO TÉRMICO PREDIAL

Ronaldo de Jesus Santos

ronaldojs@unb.br

Geovany Araújo Borges

gaborges@unb.br

Gustavo Amaral Ferreira de Melo

gafmelo@yahoo.com

Adolfo Bauchspiess

adolfofs@unb.br

Laboratório de Automação, Visão e Sistemas Inteligentes – www.lavsi.ene.unb.br

Grupo de Robótica, Automação e Visão Computacional - GRAV

Departamento de Engenharia Elétrica - Universidade de Brasília

70910-900 - Brasília - DF

Resumo Este artigo apresenta o desenvolvimento de um projeto que busca a racionalização inteligente de energia com foco no condicionamento térmico predial. Como a automação predial lida com cargas térmicas não lineares, variantes no tempo no tempo e a parâmetros distribuídos foi investigada a utilização de lógica *Fuzzy* para implementar um sistema especialista, baseado em regras, que leva em conta os diferentes contextos do gerenciamento predial. Nos experimentos conduzidos em laboratório foi possível constatar uma economia da ordem de 25% do controle *Fuzzy* em comparação com o controle *on-off* normalmente utilizado em aparelhos de ar-condicionado de janela. A automação do protótipo predial foi baseada no microcontrolador PIC18F252 da Microchip™. Um interface Internet permite o acesso remoto ao protótipo de automação predial para integração futura.

Palavras Chaves: Sistemas Térmicos, Automação Predial, Racionalização de Energia, Controle *Fuzzy*.

Abstract: This paper presents the development of a project that aims intelligent energy saving focused on the thermal conditioning of buildings. As building automation deals with non-linear, time-varying and distributed parameter systems we investigated the use of *Fuzzy* logic to implement an expert, rule based systems that takes care of the different contexts in the building management. The laboratory experiments show an energy saving of the order of 25% for the *Fuzzy* controller when compared with the usual on-off controllers of window air conditioners. The prototype automation was based on a Microchip™ PIC18F252 microcontroller. The Internet infrastructure was used to give the building prototype remote access and future integration to Building Automation Systems.

Keywords: Thermal Systems, Building Automation, Energy saving, *Fuzzy* Control.

1 INTRODUÇÃO

Lógica *Fuzzy*, redes neurais, algoritmos genéticos e sistemas especialistas são parte de um paradigma relativamente novo conhecido como sistemas inteligentes. Estes foram criados para uma grande variedade de problemas que não são adequadamente resolvidos pelas técnicas tradicionais. (Azevedo, *et al.*, 2000). A lógica *Fuzzy* busca incorporar os processos mentais típicos do ser humano em sistemas de controle. O controlador *fuzzy* deve ser capaz de lidar com sistemas dinâmicos complexos sem que o respectivo modelo matemático seja conhecido de forma explícita.

Desde sua primeira aplicação prática por Mamdani em 1976, o controle *Fuzzy* vem sendo utilizado na solução de uma grande variedade de problemas. Muitos trabalhos tem sido publicados na área de racionalização de energia e conforme térmico. Mauris (2002) aplica a simbologia *Fuzzy* em sensores de conforto, gerenciando a temperatura e umidade e obtendo conforto térmico. Haissig (1999) aplicou controle adaptativo *Fuzzy* em controle de temperatura de sistemas de aquecimento hidráulico. Becker et al, 1995 aplicou controle *fuzzy* a uma câmara de refrigeração. Vários trabalhos utilizando controle *Fuzzy* focam a economia de energia, e.g., Yonezawa et al., 2000, Priolo et al., 2001, Shepherd et al., 2003.

Comparado ao controle PI o controle inteligente demonstrou resultados melhores. Este trabalho almeja desenvolver ferramentas, que baseadas no uso de controle *Fuzzy*, tratem informações geralmente não usadas em prédios comuns como: temperatura externa, presença de pessoas na sala, intensidade luminosa entre outras, processando-as e ajustando o controle dos dispositivos de ar condicionado do ambiente controlado de forma a reduzir o consumo de energia mantendo a sensação de conforto térmico.

2 PROTÓTIPO DE PROCESSO TÉRMICO

Sistemas térmicos são processos onde as variáveis estão relacionadas ao armazenamento e transporte (fluxo) de calor. Nestes sistemas, a transferência de calor pode ocorrer por três formas distintas: condução, convecção e radiação. Na prática, uma destas três formas é predominante. Em geral são consideradas apenas duas formas de transferência de calor, desprezando-se o efeito da radiação.

Processos térmicos são inerentemente sistemas a parâmetros distribuídos, ou seja, suas variáveis mudam de valor conforme a localização das mesmas no processo. Para simplificar o problema, admitimos que o sistema térmico pode ser controlado com precisão usando apenas alguns pontos de medição. Indo ainda mais longe, com propósitos de simulação, o sistema poderia ser aproximado por parâmetros concentrados.

O protótipo de sistema térmico usado neste trabalho representa um típico conjunto de escritórios, Figura 1 (Bauchspiess et al., 2004). Possui cinco salas com portas e janelas que podem ser abertas ou fechadas, simulando a operação normal de um ambiente de escritório. Duas fontes de aquecimento, secadores de cabelo com potência nominal de 1.2kW cada, estabelecem a temperatura do ar nas cinco salas. O aquecimento do ar é de muito mais fácil implementação principalmente no caso de protótipos em escala reduzida que o resfriamento. Desta forma optou-se pela análise do aquecimento do ambiente em questão. Um modelo simplificado planar a parâmetros concentrados RC pode ser visto na Figura 2.



Figura 1 – Protótipo do sistema térmico.

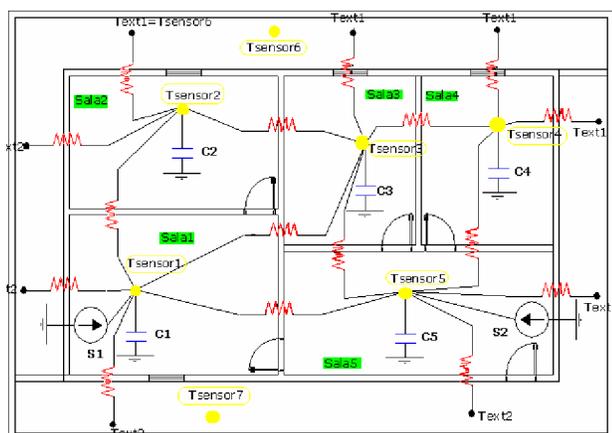


Figura 2 – Modelo simplificado a parâmetros concentrados.

O protótipo consiste em três grandes áreas. A primeira é representada por duas salas adjacentes (salas 1 e 2). A maior (sala 1) recebe calor da fonte S1. A segunda área é composta por duas salas em meia parede (salas 3 e 4) e um corredor (sala 5), onde está a fonte de calor S2. As duas primeiras áreas representam a parte principal do protótipo. A terceira área é constituída de dois túneis (T1 e T2) nos quais outras fontes de aquecimento foram instaladas controlando a temperatura do ambiente externo as salas. Isto simula o efeito do sol em um lado e da sombra em outro lado do prédio, o qual afeta a eficiência energética do sistema. Em cada sala, corredor e túnel foi instalado um sensor de temperatura.

3 ANÁLOGO ELÉTRICO

A analogia elétrica linear do processo térmico é composta por capacitores, resistores e fontes independentes, Figura 3. Nesta, o fluxo de calor equivale à corrente elétrica e a temperatura equivale à tensão elétrica.

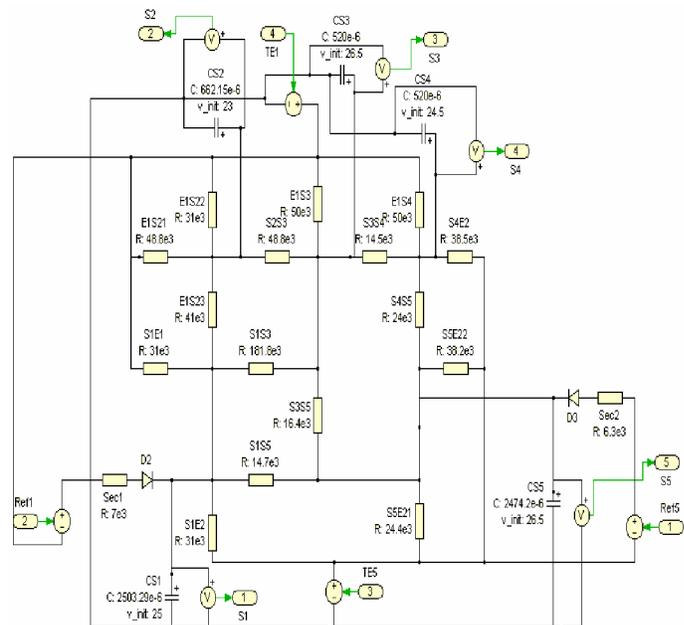


Figura 3 –Análogo elétrico linear (PLECS - Plexim GmbH).

Sistemas térmicos lidam com variáveis diretamente relacionadas ao armazenamento de transporte de calor. Para o ajuste inicial dos valores das resistências e capacitâncias do análogo foram utilizadas as equações de transferência de calor e capacitância térmica, de forma a dar maior fidelidade ao comportamento do análogo em função dos fenômenos envolvidos no sistema térmico real.

Feito o ajuste inicial do sistema os esforços foram direcionados no sentido do ajuste final dos parâmetros. 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 RC. Esta é encontrada experimentalmente isolando as salas envolvidas e medindo o intervalo de tempo necessário para atingir 67% da resposta ao degrau, Figuras: 4 e 5.

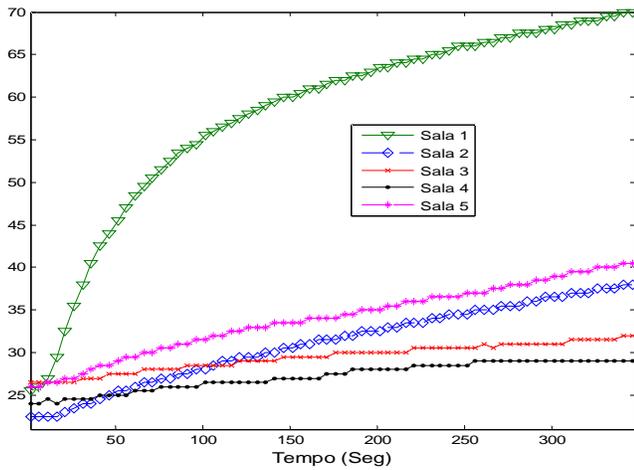


Figura 4 – Resposta ao degrau maquete sala 1.

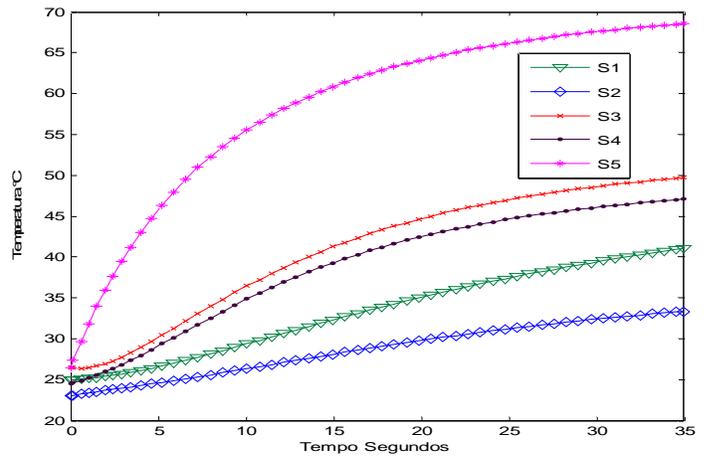


Figura 7 – Resposta ao degrau análogo sala 5.

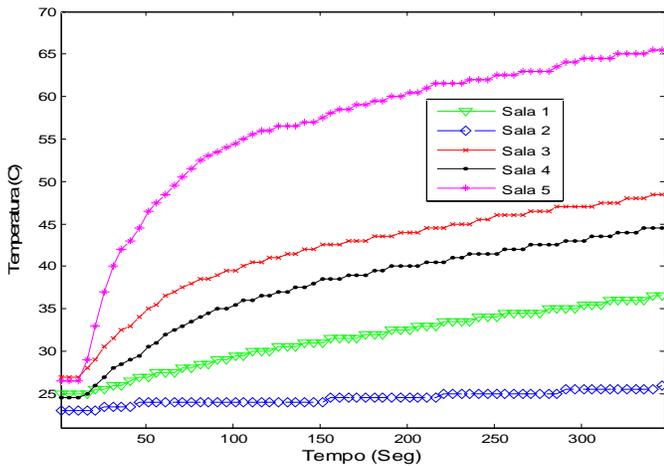


Figura 5 – Resposta ao degrau maquete sala 5.

De forma heurística, através da comparação da resposta do sistema real em relação ao simulado, obteve-se um melhor ajuste, como visto nas figuras 6 e 7. É visível o efeito causado pelas não linearidades do processo térmico real. Apesar disto esta aproximação foi muito útil no desenvolvimento do controlador *Fuzzy*, devido à praticidade e rapidez da sintonia em um ambiente virtual em relação ao real.

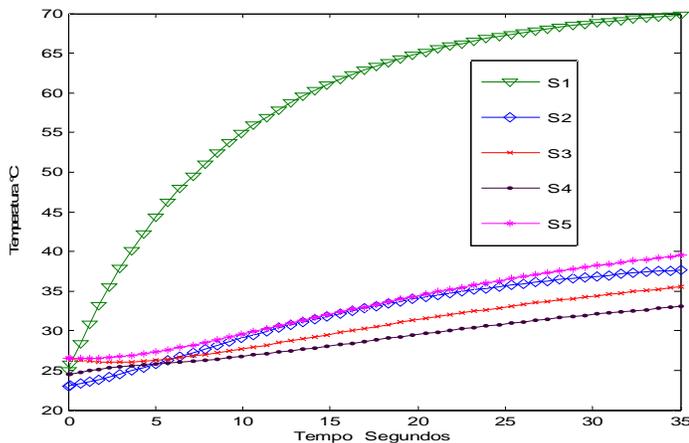


Figura 6 – Resposta ao degrau do processo análogo, sala 1.

4 CONTROLE DO PROCESSO TÉRMICO

A figura 8 mostra o diagrama de blocos do sistema implementado.

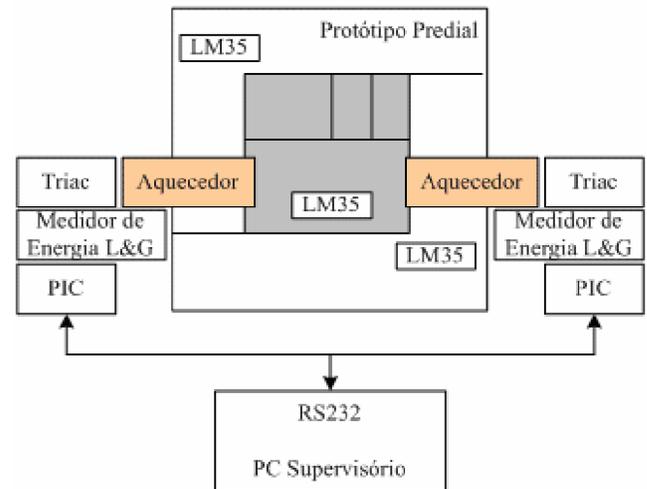


Figura 8 – Diagrama de blocos do protótipo de automação predial implementado.

O controle do processo térmico foi implementado utilizando microcontroladores PIC18F252 da Microchip™. Este dispositivo RISC de 28 pinos opera até 40 MHz e possui cinco canais A/D de 10 bits, duas saídas PWM, 4 Timers, e 16Kbytes de memória de programa. Este dispositivo de baixo custo (~R\$26,00) oferece, pois, as ferramentas necessárias para a implementação digital do controlador proposto.

4.1 Medição de Temperatura

O sensor de temperatura LM35 usado neste projeto é um circuito integrado com baixa impedância de entrada que gera uma tensão de saída linear e proporcional à temperatura medida, em graus Celsius. Este usa propriedades intrínsecas do semicondutor como princípio de medição. A calibração do sensor não é necessária, ele fornece, independente da alimentação 10mV/°C. A precisão nominal é de 0,5°C a 25°C.

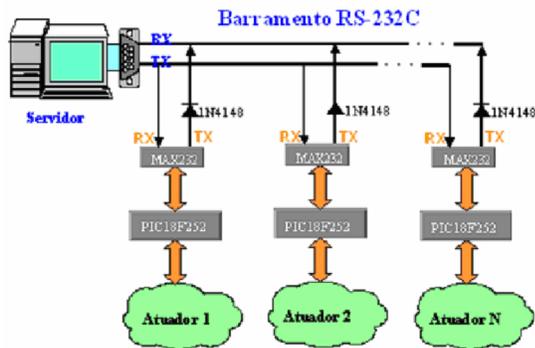


Figura 12 – Arquitetura de comunicação processo térmico.

No caso da comunicação entre usuário remoto e servidor, a arquitetura de comunicação foi baseada no modelo cliente/servidor e desenvolvida em Java. Desta maneira o operador pode acessar o sistema supervisório usando qualquer sistema operacional que suporte um browser web com a máquina virtual Java. Todos os web browsers relativamente recentes vem com esta máquina virtual. Ver Figura 13.

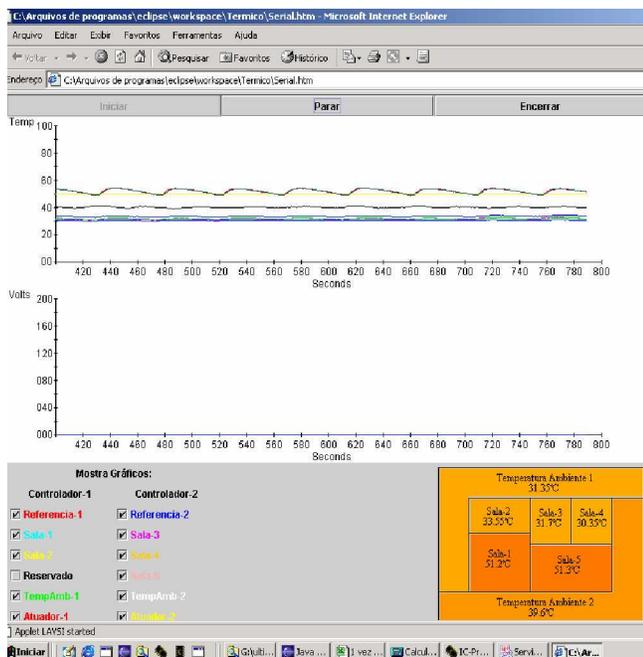


Figura 13 – Aplicativo applet supervisório.

A linguagem Java tem características favoráveis para desenvolvimento de software cliente/servidor assim como ferramentas necessárias para estabelecer comunicação em tempo real em uma arquitetura cliente/servidor. É portátil, vastamente registrada, tem bibliotecas matemáticas e é *freeware*. Do ponto de vista de segurança os applets (programas executáveis em *browsers*) oferecem grandes vantagens devido a estes não terem acesso a dados locais (do cliente), não sendo capazes de ver ou modificar qualquer informação no computador do cliente sem a iniciativa do mesmo. Através do applet Java o cliente pode configurar o controlador do processo térmico, definindo suas prioridades, monitorando as diversas variáveis do processo bem como a atuação do controlador no atuador.

Um “sentimento de realidade” em experimentos remotos é a representação gráfica da situação atual do processo controlado (Belousov et al., 2001), nesta linha implementamos em nossa interface gráficos aonde o usuário pode visualizar não só as temperaturas como também o sinal efetivo nos aquecedores.

5 CONTROLADOR FUZZY

A capacidade criativa humana de raciocínio inexato, incerto ou difuso, contrasta com a forma de operação de computadores e máquinas em geral. Lógica *Fuzzy* tenta incorporar a forma humana de pensar em sistemas computacionais. Quando esta técnica é aplicada a sistemas de controle, é usual chamarmos esta configuração de controle *Fuzzy*. Este tipo de controle é utilizado geralmente em sistemas dinâmicos complexos.

Um sistema *Fuzzy* tem seu comportamento esquematizado para o seguinte universo de variáveis e ações: Variáveis de entrada, *Fuzzyficador*, inferência, base de regras, *defuzzyficador* e variáveis de saída, Figura 14.

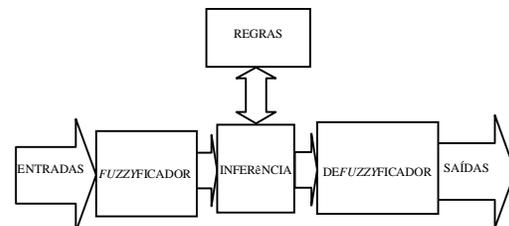


Figura 14 – Diagrama de um sistema *Fuzzy*.

Um conjunto de regras adequado pode racionalizar o consumo de energia elétrica para o condicionamento de ar em instalação prediais. Cada contexto pode ter regras específicas. A transição entre contextos é feita de forma “natural” (suave) pela utilização de funções de pertinência *fuzzy*. O conjunto de regras da Tabela 1 leva, de forma heurística, à redução do consumo de energia em um ambiente de escritório que recebe incidência solar diferenciada e tem em cada um dos lados um aparelho de ar condicionado (Sala 3 Figura 15).

Tabela 1 – Regras *Fuzzy* genéricas para Racionalização de Energia

1. If (ausência is longa) then (saída is zero)
2. If (tempo is almoço) then (saída is zero)
3. If (tempo is manha) then (saida2 is zero)
4. If (tempo is tarde) then (saida1 is zero)
5. If (erro is p) then (saida is p)
6. If (erro is n) then (saida is n)

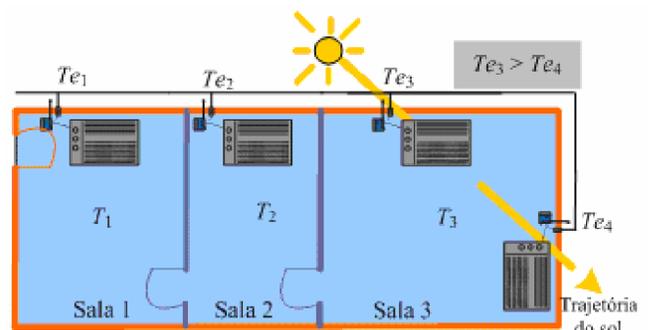


Figura 15 – Ambiente Típico e variação da incidência solar.

Um sensor de presença (ausência) permite desligar o condicionamento de ar após um período pré-definido sem ocupação da sala (1.). A proximidade do horário de (almoço) pode reduzir a potência e inclusive desligar o aparelho (2.). Com antecedência apropriada do reinício das atividades o aparelho é novamente religado (3. e 4.). Nesta situação, em ambientes típicos, sem automação, os funcionários em geral, simplesmente deixam os aparelhos de ar condicionado ligados durante o almoço. As regras (5.) e (6.) são para a operação proporcional do controlador. A variável 'saída' significa saída1 e saída2 ativas.

No protótipo predial, por razões práticas, foi investigada apenas a economia de energia considerando temperaturas externas diferentes (incidência solar). Foi implementado em MatLab o controlador *Fuzzy*, conforme Figura 16, com 3 entradas (erro, setpoint e diftext) e uma saída. O erro é a variável responsável por informar ao sistema o quão distante do valor desejado está a temperatura da sala controlada; o setpoint acrescenta a saída um ganho proporcional de forma a manter um valor aceitável de erro em regime permanente para qualquer que seja o valor de temperatura desejado; enquanto que a variável diftext controla a saída em função da diferença de temperatura do ar que entra no atuador que este controla e do ar do atuador imediatamente oposto a este, fazendo com que o atuador que tem o ar mais quente em sua entrada trabalhe mais que o que tem o ar mais frio.

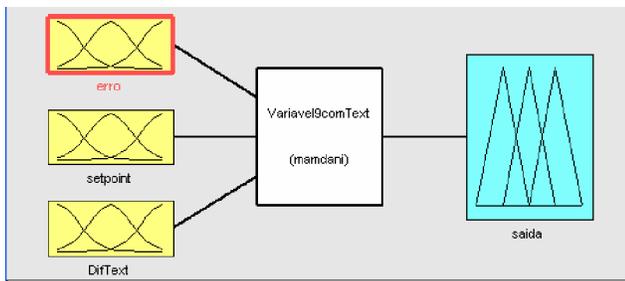


Figura 16 – Variáveis de Entrada e Saída do Controlador *Fuzzy* implementado.

A variável saída gera em função das entradas, regras, métodos, implicações e agregações um valor tal que será aplicado diretamente nos aquecedores através do circuito de potência.

Foram utilizadas apenas duas regras na base de dados, umas delas determina o funcionamento do aquecedor quando o erro é positivo e a outra basicamente manda o valor da saída para zero quando o erro é negativo. Esta ação é tomada pelo fato de não existir ações e dispositivos implementados nesta fase do trabalho que possibilitem o resfriamento do ambiente controlado.

É possível projetar o controlador *fuzzy* definindo suas funções de pertinência, figura 17, e um conjunto de regras, Tabela 2. A superfície de controle não linear permite visualizar o funcionamento do controlador *fuzzy*, Figura 18.

Tabela 2 – Regras *Fuzzy* utilizadas no protótipo predial

- | |
|--|
| <ol style="list-style-type: none"> 1. If (erro is p) and (setpoint is set) and (DifText is d) then (saida is p) (1) 2. If (erro is n) then (saida is zero) (1) |
|--|

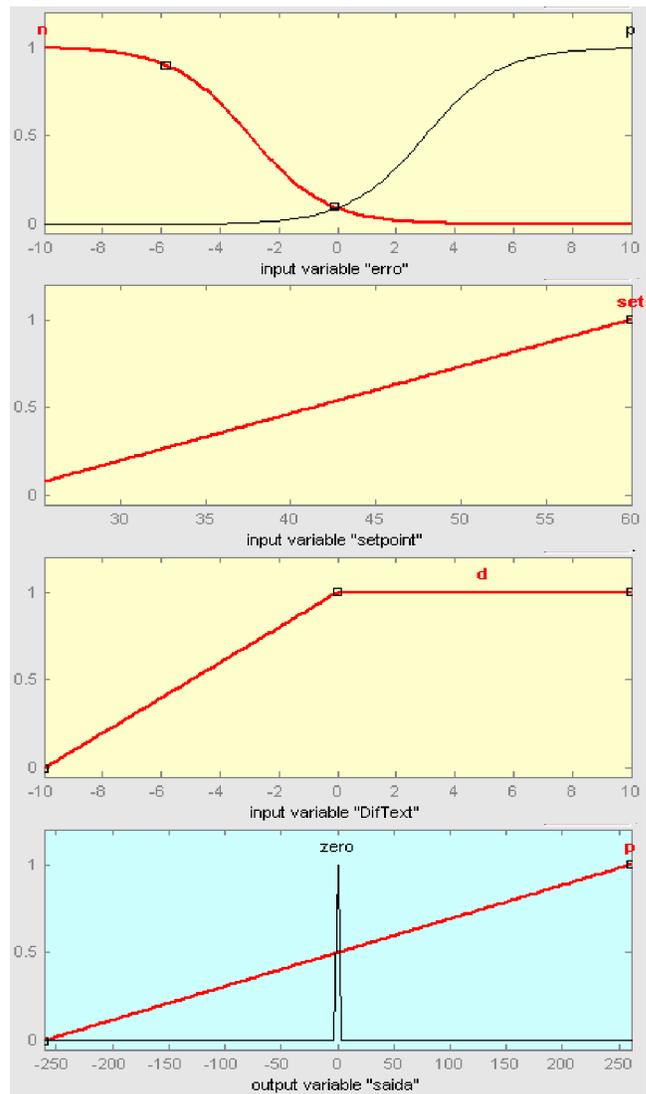


Figura 17 – Funções de pertinência implementadas.

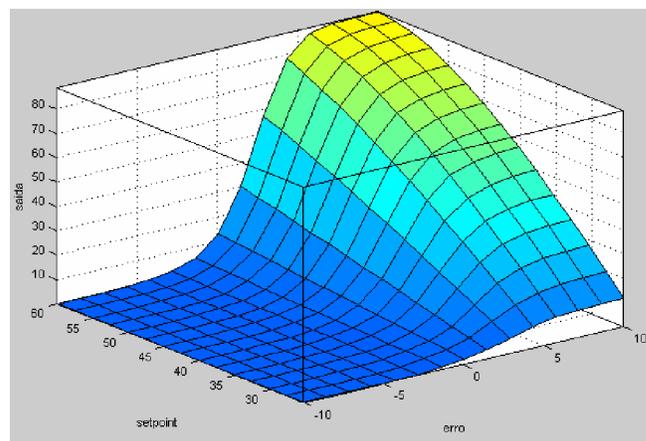


Figura 18 – Superfície de controle *fuzzy* resultante.

De posse do controlador devidamente configurado e testado através de simulações de controle em software atuando sob o análogo elétrico construído, passou-se a implementação deste no microcontrolador PIC18F252 conseguindo-se os resultados apresentados mostrados na próxima seção.

6 RESULTADOS

A fim de verificar a eficiência do controlador proposto foram implementados também controladores: on-off (base do controle de aparelhos de ar condicionado de janela); controladores PID (muito utilizados no controle de sistemas dinâmicos lineares).

Os experimentos realizados foram divididos em duas etapas. Na primeira os controladores atuavam no sinal de controle de forma que a temperatura das salas 1 e 5 se mantivesse em torno do sinal de referência, neste caso 50°C.

Foi mantida a mesma temperatura do ar para os ambientes externos aos controlados (túneis de simulação da temperatura externa).

Na segunda etapa o valor da referência de temperatura se manteve, porém para todos os controladores a temperatura do ambiente externo ao atuador dois foi mantida em aproximadamente 40°C através de controle on-off manual.

Durante os experimentos, além das temperaturas das salas foram registrados os consumos em Wh dos aquecedores utilizados.

A análise de eficiência do controle e energética foi baseada na manutenção da temperatura das salas durante 300 segundos depois de alcançado o regime permanente.

Para a manutenção do conforto térmico do ambiente foi considerada uma variação máxima da temperatura de $\pm 2^\circ\text{C}$, faixa usualmente aceita para climatização (Charles, 2003, Gouda et al., 2001).

Os resultados obtidos na primeira etapa podem ser observados nas figuras a seguir:

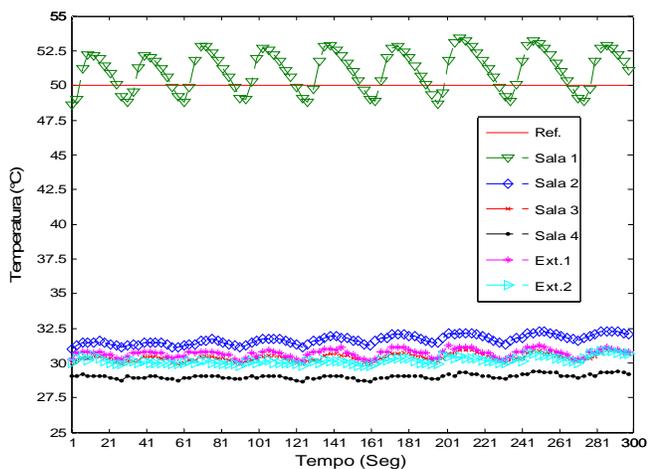


Figura 19 – Controle on-off - primeira etapa.

A figura 19 mostra o comportamento da variável controlada em função da atuação do controlador on-off, cujo parâmetro de controle (delta) foi ajustado para 1°C.

Pode-se observar que a temperatura da sala 1 se manteve entre 48° C e 53.5°C e a temperatura ext1(ambiente externo ao atuador 1 ou a sala 1) ficou próxima dos 31°C durante o experimento. Levando-se em conta o fato de que não há

controle de resfriamento dos ambientes da maquete, pode-se dizer o controle on-off foi eficiente no sentido de manter a temperatura da sala dentro dos padrões de conforto térmico.

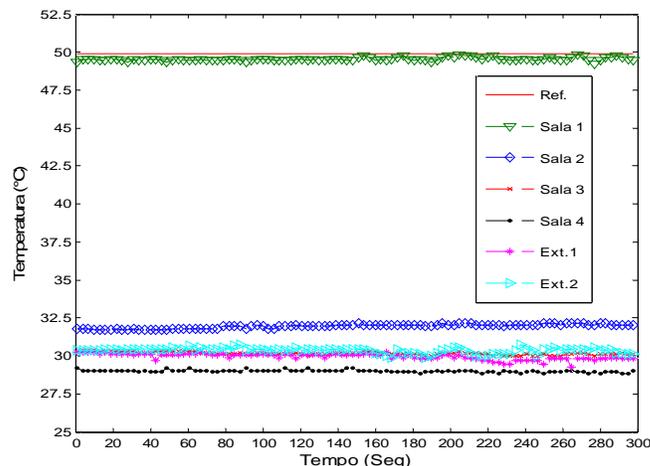


Figura 20 – Controle proporcional - primeira etapa.

No controle proporcional (figura 20) utilizando-se de um ganho proporcional k_p de 3 unidades observa-se que a variação de temperatura do ambiente controlado foi consideravelmente reduzida em relação ao controle on-off. Fator positivo em relação à manutenção do conforto térmico.

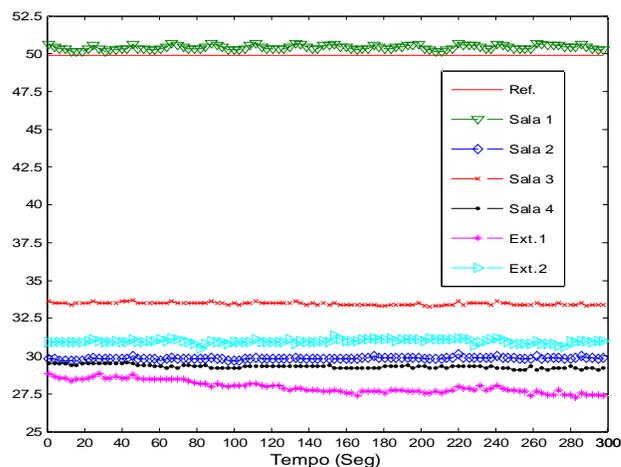


Figura 21 – Controle Fuzzy - primeira etapa.

Observando-se o resultado obtido (Figura 21) pode-se dizer que o controlador *fuzzy* assim com os controladores: proporcional e on-off; foi capaz de manter o conforto térmico do ambiente controlado dentro dos padrões pré-estabelecidos ($\pm 2^\circ\text{C}$).

Na segunda etapa do experimento são mantidos os valores dos parâmetros utilizados na primeira etapa em cada controlador (delta, setpoint, ganho proporcional).

Os resultados da segunda etapa podem ser observados nas figuras a seguir:

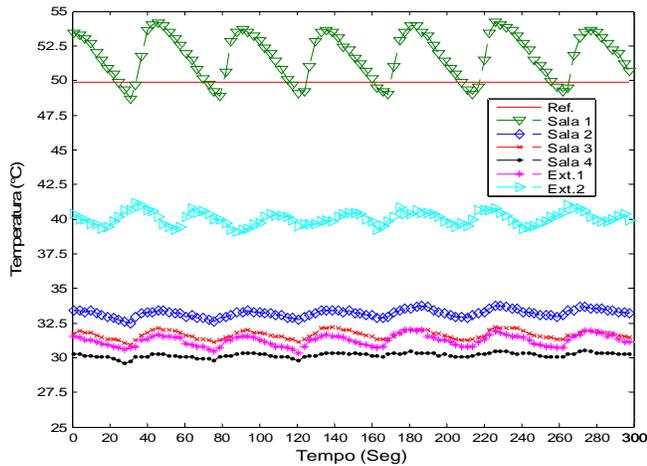


Figura 22– Controle on-off - segunda etapa.

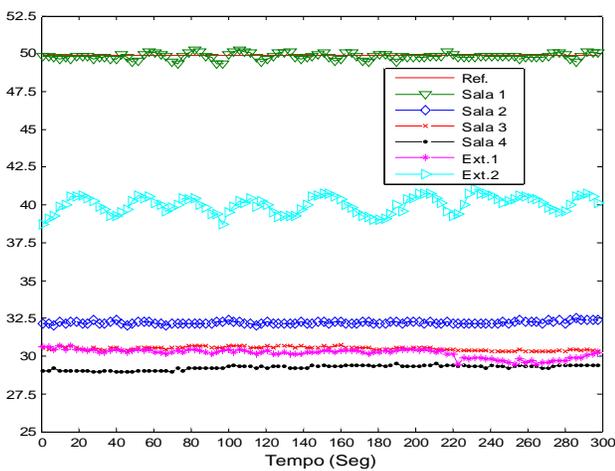


Figura 23 – Controle proporcional - segunda etapa.

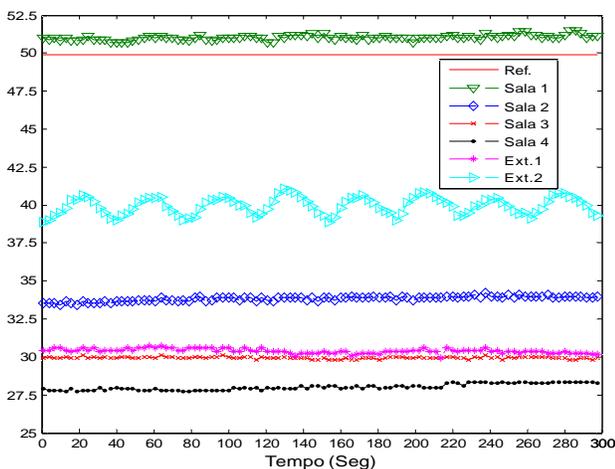


Figura 24– Controle Fuzzy - segunda etapa.

Assim como na primeira etapa, os resultados da segunda etapa foram satisfatórios em termos de controle e de manutenção dos limites de conforto térmico.

Os respectivos valores de consumo de energia aparecem na Tabela 3:

Tabela 3 – Consumo de Energia dos Controladores

Tipo de Controle	Primeira Etapa Consumo (Wh)	Segunda Etapa Consumo (Wh)
On-Off	18,9	10,8
Proporcional	14,4	9,9
Fuzzy	11,2	8,1

Observa-se através da tabela 3 que o consumo de energia em todos os tipos de controle na segunda etapa foi menor que na primeira etapa do experimento. Este fato não causa surpresa, dado que na segunda etapa os atuadores captavam uma massa de ar pré-aquecida enquanto que na primeira esta massa tinha temperatura ambiente.

Outro fator observado na tabela é a diferença do consumo de energia tanto do controlador *fuzzy* como proporcional em relação ao controle on-off. Ambos os controladores foram mais econômicos e eficientes em termos de manutenção do conforto térmico conforme já citado.

A eficiência energética do controlador *fuzzy* em relação ao controle proporcional fica evidente e também pode ser observada na tabela acima.

7 CONCLUSÕES

A automação predial inteligente pode, como mostrado neste artigo, reduzir o consumo de energia referente ao condicionamento de ar. Este representa uma parcela de 50% a 70% do consumo de energia elétrica de um prédio de escritórios.

O acionamento usual de aparelhos de ar condicionado de janela é do tipo on-off. É essencialmente um aparelho de “prateleira” – compra-se em supermercados e mão de obra pouco qualificada o instala. A preocupação é com o custo de aquisição, e não com o custo de operação.

A economia de energia pode ser obtida por um sistema especialista com um conjunto de regras *fuzzy* que permitem tratar de forma adequada a grande variação da carga térmica do ambiente climatizado ao longo de um dia. As condições climáticas externas são igualmente determinantes na demanda de energia necessária à climatização.

Este trabalho mostrou, utilizando um protótipo de automação predial que emula a incidência solar diferenciada ao longo do dia, que podemos reduzir em 25% o consumo de energia.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à empresa Landis & Gyr pelo financiamento parcial deste projeto de pesquisa (Lei de Informática) e ao CNPq pelo valioso apoio recebido. Além da contribuição dos estudantes e pesquisadores participantes do laboratório de automação, visão e sistemas inteligentes da universidade de Brasília (LAVSI).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Azevedo, F.M., Brasil, L.M. and de Oliveira, R.C.L. (2000). In: *Redes Neurais com Aplicações em Controle e em Sistemas Especialistas*. Visual Books.
- 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*. 11th IFAC INCOM, Savador/Brazil, 6 pp
- Becker, M., Oestereich, D., Hasse, H., Litz, L. (1994) *Fuzzy control for Temperature and Humidity in Refrigeration Systems* IEEE Conference on Control Applications, pp.1607-1612
- Charles, K.E. (2003) *Fanger's Thermal Comfort and Draught Models* IRC-RR-162 National Research Council Canada – Institute for Research in Construction
- Gouda, M. M., S. Danaher and C. P. Underwood (2001). *Thermal Comfort Based Fuzzy Logic Controller*. Building Serv. Eng. Rs. Technol. Vol 22(4), pp 237-253
- Haissig, Ch. (1999). In: *Adaptive Fuzzy Temperature Control for Hydronic Heating Systems*. IEEE Int. Conference on Control Applications; Hawai 582-588
- Huang, H.-Y., Yen, J.-Y., Chen, S.-L., Ou, F.-C. (2004) *Development of an Intelligent Energy Management Network for Building Automation*. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering. Vol.1, No.1, July 2004, pp.14-25
- Mauris, G., and Foulloy, L. (2002). In: *A Fuzzy Symbolic Approach to Formalize Sensory Measurements: An Application to a Comfort Sensor*. IEEE Trans. Instrumentation and Measurement Vol. 51, No.4, Aug.2002, 712-715
- Priolo, C., Sciuto, S., Sperduto, F. (2001) EDIFICIO – Efficient Design Incorporating Fundamentals Improvements for Control and Integrated Optimisation - Final Report. 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. COBENGE2004 – C. Brasileiro de Engenharia, Brasília. 6pp. In portuguese
- 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*. Building Services Engineers Rs. Tech. 24, 1, pp.35-45
- Souza, David José and Lavinia, Nicolas C. (2002). In: *Conectando o PIC – Explorando Recursos Avançados*, 1ª Ed. Editora J. J. Carol, São Paulo.
- Yonezawa, K., F. Yamada, Y. Wada and Y. Hanada (2000). *Comfort Air-conditioning Control for Building Energy-saving*. 26th IEEE Industrial Electronics Society Conference. Vol. 3. pp. 1737-1742
- Zelenovsky, Ricardo (2001). In: *Processamento de Sinais, Arquitetura e Interfaceamento com Computadores, Microcontroladores*. DC, PUC-RJ, CETUC.