

AMBIENTE PARA SIMULAÇÃO DE SISTEMAS DE CONTROLE EM EDIFICAÇÕES - PARTE 2: DESCRIÇÃO MATEMÁTICA DO CONJUNTO AMBIENTE-CLIMATIZADOR E EXEMPLO DE SIMULAÇÃO

Oliveira, G. H. C; Araújo, H. X.; Mendes, N.; Coelho, L. S.

Laboratório de Sistemas Térmicos
Laboratório de Automação e Sistemas
Rua Imaculada Conceição, 1155
Curitiba - PR, 80.215-901 – Brazil

e-mail: {gustavoc, araujo, nmendes, lscoelho}@ccet.pucpr.br

RESUMO

Neste artigo, descrevem-se os modelos matemáticos para simular uma edificação de uma zona única e um sistema de climatização. Esses modelos foram inseridos no ambiente computacional descrito em um artigo complementar. Esse ambiente é desenvolvido utilizando-se a plataforma MATLAB/Simulink para monitorar e controlar ambientes de edificações, levando-se em conta diversos fenômenos termofísicos presentes na edificação. A ferramenta de simulação contém modelos de edificações, sistemas HVAC, sensores, controladores e arquivos climáticos. O modelo matemático da edificação, para ilustração do presente trabalho, é descrito em termos de variáveis de estado que representem resultados dos balanços de energia e de massa para o ar interno do ambiente. A discretização espacial das equações diferenciais é baseada em CDS (*central difference scheme*) para a equação da transferência de calor por condução através do envoltório da edificação. Apresenta-se também a modelagem para um sistema elétrico de aquecimento de ambientes em regime transiente. Para concluir, um exemplo de simulação utilizando duas estratégias de controle (liga-desliga e lógica Fuzzy) é mostrado para ilustrar o funcionamento da estrutura do sistema de simulação e a dinâmica do sistema físico que representa a edificação. Como resultado, mostrou-se que a lógica Fuzzy pode apresentar vantagens em relação à tradicional técnica confiável liga-desliga.

ABSTRACT

In this paper, mathematical models for simulating a single-zone building with a HVAC system is described. These models were inserted in a computer environment described in a complementary paper. This computer environment is developed by using the MATLAB/Simulink platform, to calculate and control room air temperature and relative humidity, taking into account thermophysical phenomena present in building physics. The simulation tool contains models for building description, HVAC systems, sensors, controllers and weather data. In order to illustrate the present work, a building mathematical model is described in terms of state variables that represent the results obtained from the room air energy and mass balance equations. The spatial discretization of differential equations was based on a central difference scheme (CDS) for the conduction heat transfer equation applied on the building envelope. We also present an electric heating system operated by two different control strategies (on-off and Fuzzy), which are compared in order to show both the simulation system capabilities and the dynamics of the physical system that represents the building analyzed in this paper. The Fuzzy based control system has presented advantages when compared to the traditional and reliable on-off technique.

1. INTRODUÇÃO

A descrição matemática de edificações é complexa devido a muitas não linearidades e incertezas como coeficientes de transferência de calor por convecção, propriedades higrótérmicas dos materiais, clima externo, efeitos da radiação, modelos de sistemas HVAC (Heating, Ventilation and Air conditioning), presença da umidade na estrutura porosa dos elementos da edificação e perturbações imprevisíveis (pessoas, iluminação e equipamentos). Todas essas não linearidades dificultam a modelagem matemática e inserem incertezas em diferentes etapas do processo de modelagem e de simulação.

A fim de contornar algumas dessas dificuldades como a de atualização constante de modelos matemáticos mais representativos dos fenômenos físicos presentes, tem sido desenvolvido, como trabalho de cooperação entre os Laboratórios de Sistemas Térmicos (LST – www.pucpr.br/LST) e o de Automação e Sistemas (LAS – www.las.pucpr.br), o projeto de um novo ambiente computacional modular para simulação térmica de edificações e análise de estratégias de controle para sistemas de climatização. O programa, descrito em Araújo *et al.* (2003) é desenvolvido utilizando-se a plataforma MATLAB/Simulink para monitorar e controlar ambientes de edificações, levando-se em conta os diversos fenômenos presentes na física da edificação. A presente plataforma computacional contempla um grupo de equipamentos/fenômenos que podem influir na performance térmica da edificação, os quais podem ser listados como segue: i) casa ou edificação; ii) climatizador; iii) sensor iv) controlador v) clima externo e perturbações. A descrição modular, apoiada na filosofia da programação orientada a objetos, permite que as não linearidades possam ser tratadas evolutivamente, à medida que modelos e algoritmos matemáticos venham sendo desenvolvidos.

Hudson e Underwood (1999) apresentaram um modelo matemático para simulação de edificações, o qual pode ser representado, devido às suas características análogas, por um circuito elétrico resistivo e capacitivo. O modelo é julgado adequado para edificações de alta inércia térmica, pois trata-se de um modelo predominantemente capacitivo. No entanto, para edificações leves (de baixa inércia térmica) esse modelo pode ser impreciso, além de desconsiderar os ganhos decorrentes de insolação.

Athienitis *et al.* (1990) e Dion *et al.* (1991) apresentaram propostas de estudo para simulação térmica de edificações e sistemas de HVAC para analisar estratégias de controle avançado. Com respeito a ferramentas para simulações térmicas envolvendo controle de sistemas de climatização em edificações, apenas alguns trabalhos estão disponíveis na literatura.

Neste artigo, descrevem-se em detalhes os modelos matemáticos utilizados para tratar tanto da edificação como do sistema de climatização. Para concluir, um exemplo de simulação utilizando duas estratégias de controle (liga-desliga e lógica Fuzzy) é mostrado para ilustrar o funcionamento da estrutura do sistema de simulação e a dinâmica do sistema físico que representa a edificação.

O artigo está estruturado como apresentado a seguir. Na seção 2, cita-se a estruturação em blocos. Nas seções 3 e 4, descrevem-se os modelos matemáticos para edificação e sistema de climatização. Na seção 5, apresenta-se um exemplo de simulação e, finalmente, na seção 6, têm-se as conclusões.

2 - BLOCOS

Conforme apresentado em Araújo *et al.* (2003), o ambiente computacional de simulação para avaliação e análise de modelos matemáticos de sistemas térmicos e algoritmos de controle é formado por bibliotecas representando os principais elementos do sistema. Cada elemento do sistema térmico (edificação, HVAC, sensor, clima externo, controlador automático) será um módulo separado e poderá ser representado por um bloco do Simulink, facilitando a composição de sistemas mais complexos. O software tem como premissa tornar-se uma ferramenta de uso geral e, ao mesmo tempo, adaptada a aplicações avançadas.

3 - EDIFICAÇÃO

O primeiro passo é a definição da geometria da edificação e das propriedades termofísicas de todos os elementos. Em uma primeira versão, somente a geometria cartesiana foi considerada. O modelo matemático descrito abaixo é baseado nas equações de conservação de massa e de energia na forma integral para um volume de controle. Considera-se nessa formulação uma abordagem global, i.e., a temperatura é uniformemente distribuída no interior de cada zona.

Assim, para uma sala fechada por m superfícies e climatizada, em uma primeira instância, por um aquecedor elétrico, tem-se:

$$\rho_A c_A V_A \frac{dT_A(t)}{dt} = \sum_{i=1}^m h_{int} A_i [T_{n,i}(t) - T_A(t)] + h_c A_c [T_c(t) - T_A(t)] + D(t), \quad [\text{Eq. 01}]$$

onde ρ_A , c_A , V_A , $T_{n,i}(t)$, h_{int} , e A_i são respectivamente, a densidade de massa do ar, o calor específico, o volume da sala, a temperatura da n -ésima camada da parede i , o coeficiente de transferência de calor por convecção e a área da superfície i . $T_A(t)$ a temperatura do ar na sala e $T_c(t)$ a temperatura superficial do aquecedor.

A perturbação $D(t)$ inclui a troca de calor com o ar externo através de superfícies de baixa inércia térmica como portas e janelas, e o ganho de energia devido a equipamentos, iluminação e pessoas. Esse termo pode ser escrito da seguinte forma:

$$D(t) = \sum_{j=1}^m \frac{T_{eq}(t) - T_A(t)}{R_j} + q_p + q_e + q_l \quad [\text{Eq. 02}]$$

onde q_p , q_e e q_l são os ganhos internos devido à presença de pessoas, equipamentos e iluminação. A resistência térmica R da j -ésima superfície é calculada como um somatório direto das resistências térmicas condutivas e convectivas, considerando apenas superfícies planas.

Para a cada camada k dentro da parede i , pode-se obter a seguinte equação de balanço de energia:

$$\rho_{k,i} c_{k,i} V_{k,i} \frac{dT_{k,i}(t)}{dt} = K_{k+1,i} A_i [T_{k+1,i}(t) - T_{k,i}(t)] - K_{k,i} A_i [T_{k,i}(t) - T_{k-1,i}(t)] \quad [\text{Eq.03}]$$

No entanto, para a estimativa da condutância térmica K , utiliza-se a seguinte expressão:

$$K_{k,i} = \frac{1}{(L_{k-1,i} / 2) / \lambda_{k-1,i} + (L_{k,i} / 2) / \lambda_{k,i}}, \quad [\text{Eq.04}]$$

onde $L_{k,i}$ denota a espessura da camada k e $\lambda_{k,i}$, sua condutividade térmica.

A condição de contorno para a camada externa pode ser escrita como:

$$K_{1,i} (T_{2,i} - T_{1,i}) = h_{ext} (T_{1,i} - T_{eq}), \quad [\text{Eq. 05}]$$

onde T_{eq} representa a temperatura equivalente (Ar-Sol).

Para a camada interna ($k=n$) da i -ésima parede, pode-se escrever a seguinte equação de condição de contorno:

$$K_{n,i}A_i(T_{n-1,i} - T_{n,i}) = h_{int}A_i(T_{n,i}(t) - T_A(t)) + \sigma\varepsilon_c A_c F_{s,c-i} [T_{n,i}^4(t) - T_c^4(t)] + \sigma\varepsilon_i A_i \sum_{j=1}^m F_{s,j-i} [T_{n,i}^4(t) - T_{n,j}^4(t)] \quad [\text{Eq. 06}]$$

onde σ , ε e F_s são a constante de Stefan Boltzmann, emissividade e fator de forma.

No entanto, para o piso, considera-se para $k=1$, uma temperatura constante para o solo a uma profundidade de 5m e aplica-se a condição de contorno de uma temperatura imposta (condição de Dirichlet). Contudo, essa temperatura pode também ser lida do arquivo de saída do programa Solum (Santos *et al.*, 2003).

Em termos de balanço de vapor d'água, foram consideradas ventilação, infiltração e geração interna através da respiração das pessoas e equipamentos. Portanto essa fórmula pode ser escrita como:

$$\rho_A V_A \frac{dw_A}{dt} = (\dot{m}_{inf} + \dot{m}_{vent})(w_{ext} - w_A) + \dot{m}_i \quad [\text{Eq. 07}]$$

A massa de vapor d'água proveniente da respiração das pessoas é calculada como descrito em ASHRAE (1997), que leva em consideração a temperatura do ar na sala, a umidade absoluta e também a atividade física.

4. SISTEMAS HVAC

O bloco "HVAC" (Heating Ventilation and Air Conditioning) também está descrito na forma de equações de estado, assim como todo o sistema. Sistemas de aquecimento, ventilação e condicionamento de ar (HVAC) são responsáveis por uma grande quantidade de consumo de energia, principalmente em prédios comerciais. No caso de aquecedores, o bloco tem como entradas o sinal de controle e a temperatura de cada zona climatizada da edificação e tem como saída a temperatura do aquecedor. Então, a fim de fornecer algumas informações para simular edifícios termicamente condicionados, apresenta-se, em uma primeira abordagem, a formulação matemática para um aquecedor elétrico, que pode ser modelado como:

$$\rho_c c_c V_c \frac{dT_c(t)}{dt} = Q(t) - h_c A_c [T_c(t) - T_A(t)] - \sigma\varepsilon A_c \sum_{i=1}^m F_{s,c-i} [T_c^4(t) - T_{n,i}^4(t)] \quad [\text{Eq. 08}]$$

onde $Q(t)$ é a taxa de energia gerada dentro do aquecedor através do efeito Joule, ρ_c , a densidade do aquecedor, c_c , o calor específico, V_c , o volume de óleo dentro do aquecedor, h_c , coeficiente de transferência de calor por convecção entre o ar interno e o aquecedor e A_c , a área de troca de calor.

Para sistemas de condicionamento de ar, há basicamente duas abordagens. A primeira é baseada em uma correlação empírica de espaço de estados obtida através de dados experimentais para estimar a capacidade total de refrigeração (CT), a capacidade sensível de refrigeração (CS) e a eficiência energética (E.E.R. – Energy Efficiency Ratio). Cherem-Pereira e Mendes (2003) descrevem correlações matemáticas para dois diferentes condicionadores de ar de 10000 Btu/h; um com compressor alternativo e outro com compressor rotativo. Esses condicionadores de ar de expansão direta (DX) utilizam HCFC-22 (ou comercialmente denominado R-22) como fluido refrigerante e seus ciclos estão presentes na Fig.1. As correlações empíricas desenvolvidas por Cherem-Pereira e Mendes (2003) são escritas em termos de temperatura de bulbo úmido ($T_{wb,int}$) da zona e temperatura de bulbo seco do ambiente externo ($T_{db,ext}$), como mostrado pela Eq. (9):

$$CT, CS, EER = a_0 + a_1 T_{wb,int} + a_2 T_{wb,int}^2 + a_3 T_{db,ext} + a_4 T_{db,ext}^2 + a_5 T_{wb,int} T_{db,ext} \quad [\text{Eq. 09}]$$

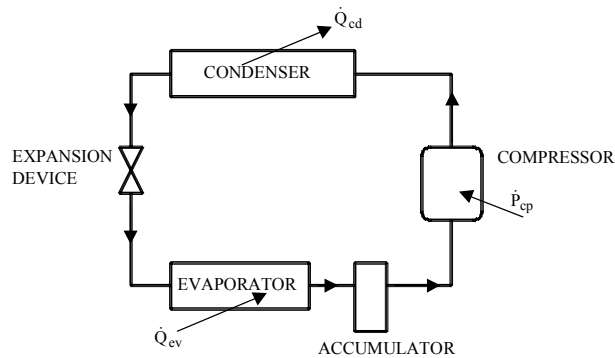


Figura 1: Ciclo de refrigeração à compressão mecânica de vapor para condicionadores de ar do tipo expansão direta (DX).

Esse modelo em regime estacionário é também usado pelo programa de simulação térmica de edificações DOE-2.0 (Winkelmann *et al.*, 1993) e recomendado pela ASHRAE (1997).

A aplicabilidade e funcionalidade desse tipo de modelo são também comprovadas pela integração com o programa de simulação de edificações DOMUS (Mendes *et al.*, 2003) já que esses condicionadores de ar de expansão direta, especialmente do tipo “janela”, são muito utilizados no Brasil.

A segunda abordagem para modelar sistemas de climatização é baseada em seu regime transiente de funcionamento, o qual consome muito mais tempo de simulação e requer muito mais dados de entrada que normalmente não são fáceis de se obter. Porém, a resposta dinâmica de componentes HVAC tem um impacto direto no consumo/demanda de energia e conforto térmico de forma que uma grande precisão pode ser necessária em alguns casos, especialmente quando diferentes estratégias de controle forem consideradas.

5. EXEMPLO DE SIMULAÇÃO

Nesta seção, o ambiente de simulação e análise do comportamento térmico de edificações é ilustrado através de um caso de controle de temperatura. Primeiramente, um ambiente de trabalho deve ser gerado conectando-se os principais blocos do sistema, isto é, uma edificação, um sistema HVAC, um controlador e dados do clima externo. O sistema é aberto para futuras implementações, portanto outras características e outros modelos serão adicionados no futuro. Assim sendo, os módulos que compõem o ambiente térmico sob análise são selecionados usando os modelos disponíveis, conforme citado anteriormente. Conforme apresentado na Figura 2, um ambiente de simulação pode ser construído a partir dos blocos selecionados e um exemplo de análise é discutido a seguir.

O desempenho em malha fechada de duas estratégias de controle (durante o intervalo de tempo de 48 horas) é comparado: o liga-desliga e a lógica fuzzy. A temperatura requerida para conforto térmico foi estipulada como sendo de 22°C. As temperaturas iniciais dos ambientes interno, externo e das paredes é de 11°C e o perfil de variação da temperatura externa é uma onda senoidal. As Figuras 3 e 4 mostram a temperatura interna obtida por cada controlador.

A Figura 3 ilustra o desempenho do controlador liga-desliga que foi selecionado de forma a ter um intervalo diferencial de 2 °C centrado no valor de conforto de 22 °C. Como era esperado, a temperatura do ambiente interno oscila bastante em torno do valor de contorno. O sistema de controle leva aproximadamente 0,46 horas para levar a temperatura da sala do estado inicial a uma faixa de temperatura aceitável. Durante a simulação (período de 48h), o consumo total de energia registrado é de 269,7 KWh e

o sistema permaneceu 37,5% do tempo total utilizando mais de 70% da potência disponível, isto é, 15 KW.

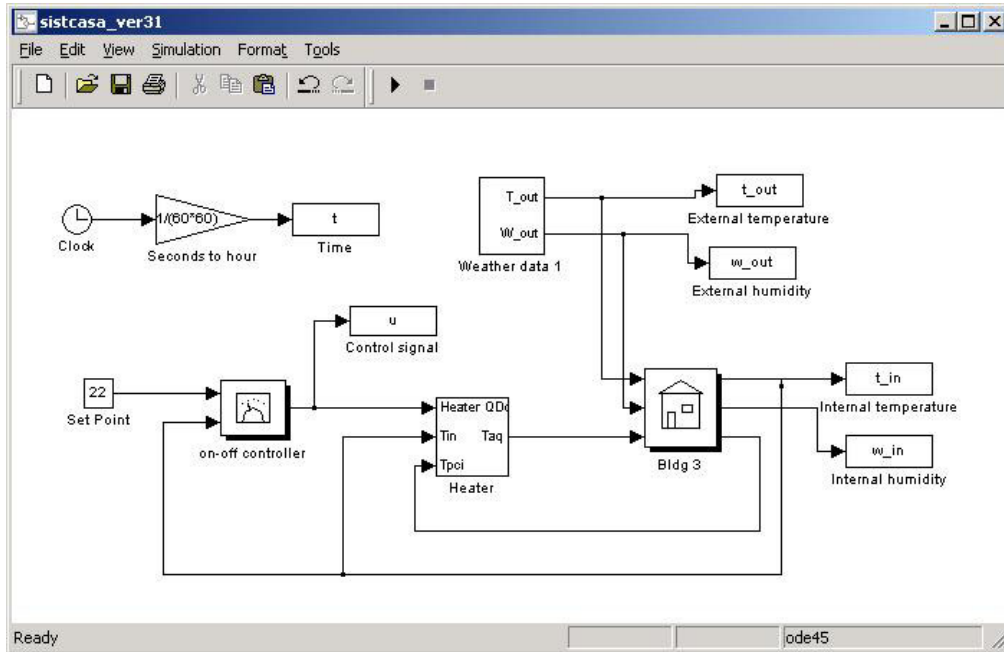


Figura 2: Representação esquemática em Simulink com os diferentes blocos necessários para a simulação.

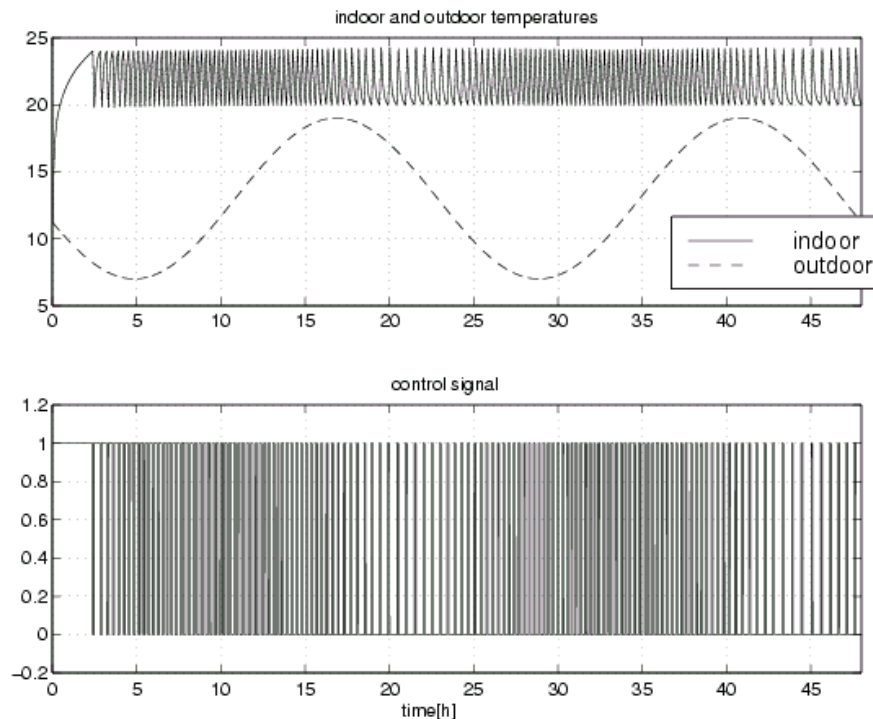


Figura 3. Controle de temperatura usando controlador liga-desliga.

A Figura 4 ilustra o desempenho de um controlador clássico de lógica fuzzy. Pode-se notar que o desempenho do controle da temperatura melhorou bastante com relação ao controlador liga-desliga. O erro no regime estacionário é zero mesmo com a presença de perturbações (representadas pela temperatura

do ambiente externo). O sistema de controle demorou 0,62 horas para levar a temperatura ambiente do estado inicial para dentro da faixa pré-especificada e, somente durante este período, o sistema permanece fora das especificações. Durante a simulação, o consumo total de energia registrado é de 284,4 KWh, *i.e.*, um aumento de 5,4% em relação ao liga-desliga. Entretanto, o sistema utiliza mais de 70% da potência disponível durante somente 8,7% do tempo total e, em regime permanente, opera consumindo menos de 40% da potência máxima. Esta redução diminui a sobrecarga do sistema elétrico de distribuição da concessionária de energia.

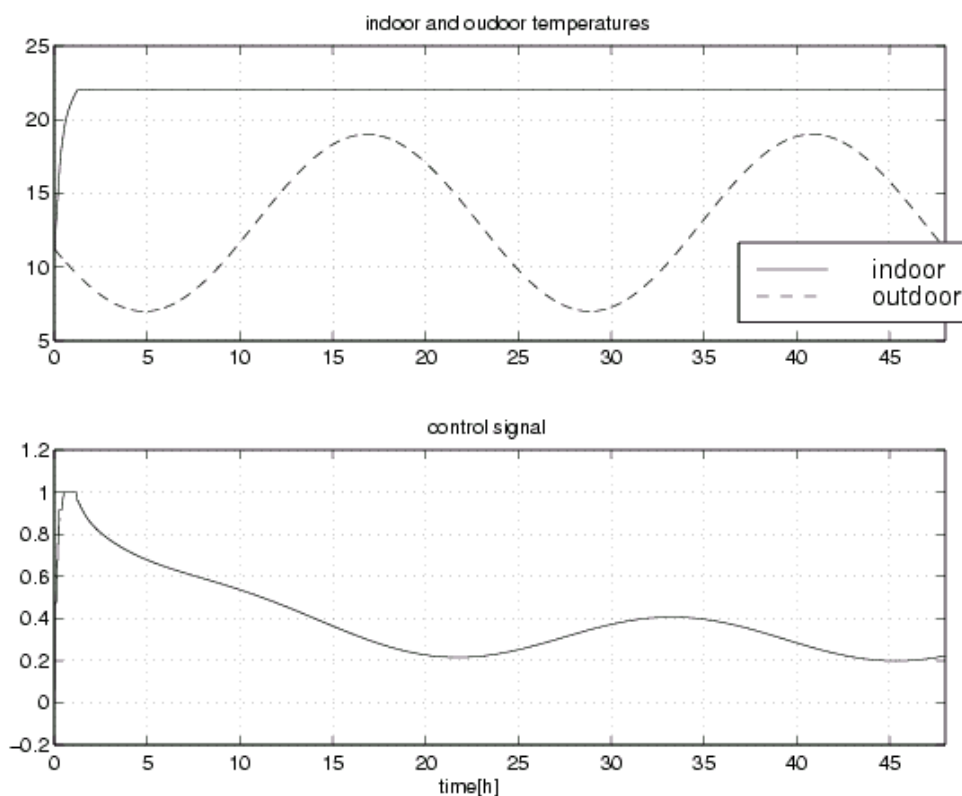


Figura 4. Controle de temperatura usando lógica fuzzy.

6. CONCLUSÕES

Este artigo apresentou a descrição matemática detalhada para representar termicamente tanto a edificação como o sistema de climatização. Estes modelos foram utilizados para o aperfeiçoamento de uma ferramenta de simulação baseada na plataforma Matlab/Simulink, como descrito em um artigo complementar (Araújo *et al.*, 2003).

Das cinco estratégias de controle descritas em Araújo *et al.* (2003), duas técnicas foram abordadas para monitoração do sistema de climatização modelado no presente artigo. As duas técnicas (liga-desliga e fuzzy) foram inseridas no ambiente computacional e comparadas em termos de consumo e demanda de energia e precisão no controle de temperatura do ambiente modelado.

Mostrou-se que a lógica fuzzy pode fornecer melhores resultados em termos de controle de temperatura para conforto térmico, ao compará-la com a técnica confiável e de baixo custo da estratégia simples do liga-desliga. Resultados mostraram uma redução no pico de energia de 40% quando o ambiente é

aquecido por um equipamento controlado por um sistema baseado em lógica fuzzy, em condições de regime estacionário.

Por outro lado, aumentou-se o consumo de energia em 5,4%, apesar do controle de temperatura ter sido precisamente atingido, mantendo a temperatura do ambiente em 22 °C como desejado.

Para trabalhos futuros, pretende-se analisar técnicas de controle para condicionadores de ar em situações de verão. Para isto, necessita-se aperfeiçoar e desenvolver modelos para esse tipo de equipamento de climatização.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq (Projeto Ref. 551461/2001-2) pelas bolsas concedidas ao grupo de pesquisa e em especial a Srta Luciane Lozano Vergueiro pela dedicação.

REFERÊNCIAS

- ARAÚJO, H. X. de; OLIVEIRA, G. H. C.; MENDES, N.; COELHO, L. S.(2003). Ambiente para Simulação de Sistemas de Controle em Edificações – Parte 1: Descrição Funcional. Anais do VII Encontro Nacional sobre Conforto no Ambiente Construído (ENCAC) e III Conferência Latino-Americana sobre Conforto e Desempenho Energético de Edificações (COTEDI).
- ASHRAE (1997). American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, Handbook of Fundamentals. Atlanta:ASHRAE.
- ATHIENITIS, A.K.; STYLIANOU, M; SHOU, J. A. (1990). Methodology for Building Thermal Dynamics Studies and Control Applications, ASHRAE Transactions - SL-90-14-4, 1990.
- DION, J.M.; DUGARD, L.; FRANCO, A.; NGUYEN MINH TRI; REY, D. (1991). MIMO Adaptive Constrains Predictive Control Case Study: An Environment Test Chamber, Automatica, Vol. 27, pp. 611-626, Great Britain.
- HUDSON, G.; UNDERWOOD, C. P. (1999). A Simple building modelling procedure for MATLAB/SIMULINK, Proceedings of the 6th International Conference on Building Performance Simulation (IBPSA '99), September, Kyoto-Japan, pp. 777-783.
- MENDES, N.; OLIVEIRA, R.C.L.F.; SANTOS, G.H. (2003). DOMUS 2.0: A whole-building hygrothermal simulation program. Eighth International Conference on Building Performance Simulation (IBPSA '03), Eindhoven, Netherlands.
- CHEREM-PEREIRA, G.C.; MENDES N. (2003). Room Air Conditioners: Determination of Empirical Correlations for Predicting Building Energy Consumption, Eighth International Conference on Building Performance Simulation (IBPSA '2003), Eindhoven, Netherlands.
- SANTOS, G.H.; FREIRE, R.Z.; MENDES, N. (2003). The Solum Program for Predicting Temperature Profiles in Soils: Usability Aspects and Sensitivity Analyses of Time Step and Grid Size, Proceedings of the 20th Passive and Low Energy Architecture (PLEA 2003) Conference, Santiago, Chile.
- User's Guide Dynamic System Simulation Software (1999). MATLAB 5.0, The MathWorks, Inc..
- WINKELMANN, F. C.; BIRDSALL, B. E.; BUHL, W. F.; ELLINGTON, K. L.; ERDEM, A. E. (1993) DOE-2 Supplement, V. I, Version 2.1E, Energy and Environment Division. Lawrence Berkeley Laboratory. University of California, Berkeley, CA.