

ANÁLISE DE TRANSIENTE HIGROTÉRMICO DE AMBIENTES NÃO-CLIMATIZADOS

Nathan Mendes – nmendes@ccet.pucpr.br

Gerson H. Santos – ghsantos@ig.com.br

Pontifícia Universidade Católica do Paraná (PUCPR/CCET),

Laboratório de Sistemas Térmicos (LST)

Rua Imaculada Conceição, 1155

Curitiba-PR, 80.215-901, Brasil

Resumo. *Descreve-se um modelo matemático aplicável a estudos de comportamento térmico de ambientes. Utilizou-se uma abordagem global para a modelagem do ambiente e multicamadas em diferenças finitas para o envoltório, teto e piso da edificação. O modelo é capacitivo de forma a permitir uma análise mais precisa em regime transiente para temperatura e umidade do ar quando o ambiente está submetido ao arquivo climático horário da cidade de Curitiba. Para avaliação de parâmetros termofísicos do modelo, escreveu-se um programa em C o qual inclui infiltração de ar, cargas de condução ganhos internos de pessoa, iluminação e equipamentos, além de radiação solar. Mostra-se, ao final, a influência do passo de tempo na temperatura e umidade internas e em perfis de temperatura no envoltório da edificação.*

Palavras-chave: *Transferência de calor e massa em edificações, Simulação térmica de ambientes, Análise de sensibilidade*

1. INTRODUÇÃO

A crise mundial de energia na década de 70 e os longos períodos de instabilidade política e de recessão econômica fizeram com que o interesse em reduzir o consumo de energia de forma racional fosse feito em larga escala pelo mundo todo. Por exemplo, só nos E.U.A., foram desenvolvidos diversos software - destacando-se os códigos BLAST (1977), DOE-1 (1978), NBSLD (1974) e TRNSYS (1975) - para simular o comportamento termoenergético de edificações e para adotar políticas racionais de conservação de energia.

No entanto, uma parte considerável dos programas existentes de simulação podem apresentar cenários discrepantes do que realmente ocorre em edificações no que concerne aos fenômenos termofísicos, devido às simplificações nos processos fluido-térmicos

presentes e aos modelos propriamente ditos. A descrição matemática para previsão da dinâmica do comportamento higrotérmico de edificações é complexa, devido às não-linearidades e interdependência dos diversos fenômenos físicos envolvidos na transferência de calor e massa. As incertezas paramétricas presentes na modelagem, os intervalos de tempo de simulação, os efeitos do clima externo, a ocupação da edificação e a temperatura do solo também contribuem para esta complexidade.

Hudson e Underwood (1999) apresentaram um modelo matemático para simulação de edificações, o qual pode ser representado, devido às suas características análogas, a 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. Esse modelo tampouco considera os ganhos decorrentes de insolação.

Alguns trabalhos na literatura (Athienitis et al., 1990 e Dion et al., 1991) abordam o problema de simulação térmica em sistemas de climatização em edificações, com o objetivo de analisar estratégias de controle avançado.

Mendes et al. (2000) elaboraram um modelo simplificado para análise de estratégias de controle em sistemas de aquecimento para edificações de baixa inércia térmica, fazendo com o que o sistema de controle analisado trabalhasse em condições mais rígidas do que as efetivamente encontradas em uma situação real.

Além das simplificações utilizadas em simulação térmica de ambientes, a grande parte dos programas utiliza passos de tempo de uma hora, pois arquivos climáticos como TRY, TMY e WYEC fornecem valores horários de temperatura de bulbo seco, umidade, velocidade do vento, radiação solar direta e difusa etc.

Neste trabalho, procurou-se aperfeiçoar os modelos e fazer um código computacional próprio para testar diferentes parâmetros geométricos, termofísicos e de simulação. A difusão de calor através de envoltórios, no presente modelo, é calculada pela lei de Fourier, considerando somente o transporte puro de calor por condução, através do método de diferenças finitas. O ambiente também é submetido a cargas de, convecção, insolação e infiltração. Como ganho interno de energia consideram-se pessoas e equipamentos e iluminação, por outro lado para massa, considera-se como ganhos a respiração de ocupantes e de equipamentos. Para o ambiente, adota-se uma formulação do tipo global tanto para temperatura como para massa de vapor d'água.

Analisa-se, ao final, a influência da escolha do passo de tempo, no comportamento higrotérmico de ambientes, em termos de perfis de temperatura do envoltório da edificação, e na temperatura e na umidade absoluta do ar no interior, haja vista que os programas usualmente utilizam passos de tempo da ordem de 1h.

2. MODELO MATEMÁTICO

O presente trabalho utiliza um modelo dinâmico para análise do comportamento higrotérmico de uma sala sem sistema de climatização. Para isto, adota-se uma formulação global tanto para temperatura como para a massa de vapor de água. A Eq. 1 descreve o balanço de energia, onde o ambiente é submetido a cargas de condução, convecção, insolação e infiltração,

$$\dot{E}_l + \dot{E}_g = \rho_{ar} c_{ar} V_a \frac{dT_{int}}{dt} \quad (1)$$

onde:

- \dot{E}_t fluxo de energia que atravessa a superfície de controle do ambiente em estudo (W)
- \dot{E}_g fluxo de energia gerado no interior do ambiente (W)
- ρ_{ar} massa específica do ar (kg/m^3)
- c_{ar} calor específico do ar ($J/kg-K$)
- V_{ar} volume do ambiente (m^3)
- T_{int} temperatura interna do ambiente ($^{\circ}C$)

Na parcela \dot{E}_t da equação da conservação de energia, consideram-se as componentes devido à transferência de calor através das paredes (condução), através de vidros (condução e radiação) e através de frestas pelos mecanismos de infiltração. O fluxo por condução de calor $\dot{Q}(t)$ que atravessa a superfície de controle da sala a ser simulada é calculado pela lei de Newton de resfriamento, como:

$$\dot{Q}(t) = hA[T_n(t) - T_{int}(t)] \quad (2)$$

onde h representa o coeficiente de troca de calor por convecção, A , a área de troca, e $T_n(t)$ a temperatura da superfície interna do envoltório da sala. Essa temperatura é obtida através de um balanço de energia, em um volume elementar dentro do material do envoltório, usando a lei de Fourier, como é apresentado pela equação abaixo:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (3)$$

Assim, a temperatura T mostrada na Eq. 3, é a temperatura para um dado volume de controle de uma determinada superfície sólida do envoltório, calculada em função das constantes termofísicas do material: massa específica (ρ), calor específico (c) e condutividade térmica (λ).

Do lado externo da sala, as paredes, laje, portas e janelas ficam expostas à radiação solar e à troca de calor por convecção. Desta forma, a condição de contorno da Eq. 3 para o lado externo ($x=0$), pode ser expressa matematicamente como:

$$-\left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x}\right)_{x=0} = h_{ext}(T_{ext} - T_{x=0}) + \alpha q_r \quad (4)$$

onde:

- $h_{ext}(T_{ext} - T_{x=0})$ troca de calor por convecção (W/m^2)
- αq_r radiação solar absorvida (W/m^2)
- λ condutividade térmica ($W/m-K$)

Do lado interno não há radiação solar e desconsidera-se a radiação entre superfícies internas, pelo fato das temperaturas das superfícies serem muito próximas e de suas

emissividades serem baixas. Logo, a condição de contorno para o lado interno ($x=L$) é escrita como:

$$\left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right)_{x=L} = h_{\text{int}} (T_{\text{int}} - T_{x=L}) \quad (5)$$

A temperatura $T_{x=L}$ da Eq. 5 equivale à temperatura do n-ésimo nó da parede, ou seja, à temperatura $T(t)$ necessária para o cálculo de $\dot{Q}(t)$ da Eq. 2.

Para o piso do ambiente, adotou-se uma condição de contorno de 1ª espécie, igualando-se $T_{x=0}$ à temperatura do solo a uma profundidade de 5m. Por outro lado, para o teto, considerou-se uma perda por radiação de onda longa (R_{OL}), de forma que a Eq. 4 assumisse a seguinte forma:

$$-\left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right)_{x=0} = h_{\text{ext}} (T_{\text{ext}} - T_{x=0}) + \alpha q_r - (\varepsilon A)_{\text{Teto}} R_{OL} \quad (6)$$

onde o termo $(\varepsilon A)_{\text{Teto}}$ representa o produto entre a emissividade do teto e a sua área.

Em ASHRAE (1993), encontra-se a formulação para o cálculo do fluxo de calor sensível e latente por infiltração. A formulação para o cálculo do fluxo de calor por insolação (radiação direta e refletida) esta conforme modelos de Szokolay (1993), ASHRAE (1993) e Stoecker e Jones (1985).

Para o balanço de massa de vapor d'água, considera-se a troca por infiltração e os ganhos como respiração de ocupantes e de geração interna de vapor, resultando na formulação global:

$$\dot{m}_{\text{inf}} (W_{\text{ext}} - W_{\text{int}}) + \dot{m}_{\text{resp}} + \dot{m}_{\text{ger_equip}} = \rho_{\text{ar}} V_a \frac{dW_{\text{int}}}{dt}, \quad (7)$$

onde:

\dot{m}_{inf}	fluxo de massa de ar por infiltração através de portas e janelas (kg/s)
W_{ext}	umidade absoluta externa (kg de água/kg de ar seco)
W_{int}	umidade absoluta interna (kg de água/kg de ar seco)
\dot{m}_{resp}	fluxo de massa de água através da respiração dos ocupantes (kg/s)
$\dot{m}_{\text{ger_equip}}$	fluxo de vapor gerado internamente (kg/s)
ρ_{ar}	massa específica do ar (kg de ar seco/s)
V_a	volume do ambiente (m^3)
W_{int}	umidade absoluta interna (kg de água/kg de ar seco)

O fluxo de massa de água proveniente da respiração de indivíduos é calculado através de formulação apresentada em ASHRAE (1993), onde leva-se em conta a temperatura do ar interno, a umidade absoluta interna, a área do corpo do indivíduo e a sua atividade física desenvolvida no ambiente em estudo.

3. PROCEDIMENTO DE SIMULAÇÃO

A análise do comportamento higrotérmico da edificação é feita através da construção de um código computacional próprio, em linguagem C, utilizando as equações do modelo apresentado na seção 2 deste artigo. Essas equações foram discretizadas pelo método de diferenças finitas adotando-se uma distribuição espacial uniforme e um esquema totalmente implícito.

Para a simulação, considerou-se um ambiente localizado na cidade de Curitiba-PR, Brasil, com 25 m^2 de área e de 2,5 m de altura, possuindo 1 janela de dimensões (1,5 x 1) m e uma porta de dimensões (0,8 x 2,10) m na fachada frontal do ambiente voltada para o norte. Inseriu-se uma segunda janela de (1,5 x 1) m na fachada voltada para o oeste. O teto considerou-se plano, formado por laje de concreto.

Para o cálculo de cargas de condução utilizando diferenças finitas, consideraram-se todas as paredes com 0.19 m de espessura e formadas por 3 camadas: argamassa, tijolo e argamassa. As janelas foram consideradas como uma camada simples de vidro e a porta como sendo de madeira maciça, enquanto o piso, formado por uma camada de madeira, concreto e solo.

Para a simulação dos ganhos de insolação, utilizaram-se os algoritmos fornecido por Szokolay (1993) para o cálculo dos ângulos altitude e azimute solar em função da hora do dia. Para as condições externas, utilizou-se o arquivo climático de Curitiba, obtido do programa UMIDUS (Mendes et al., 1999) fornecendo temperatura, umidade relativa, radiação direta e difusa hora a hora. As propriedades termofísicas estão apresentadas em um relatório a parte.

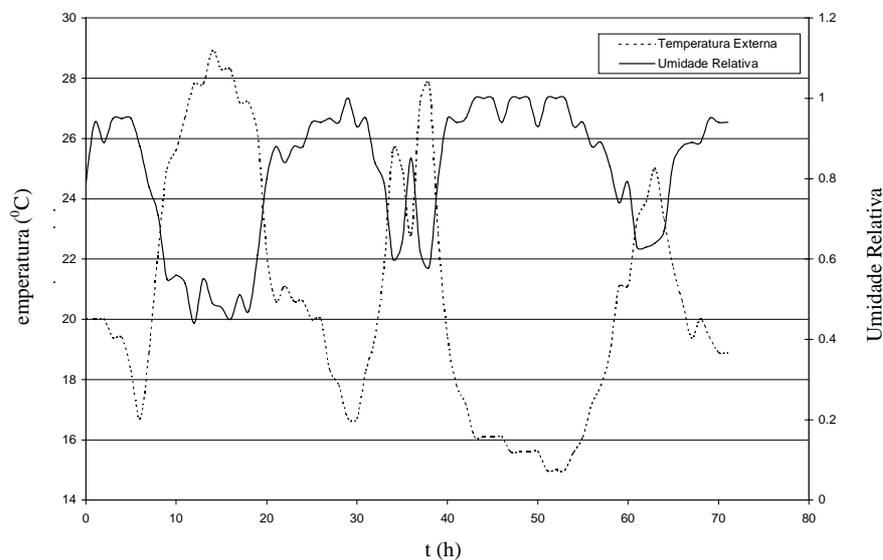


Figura 1: Variação temporal da temperatura externa e da umidade relativa para Curitiba no período de 1º a 3 de janeiro

Na Figura 1, observa-se a variação da temperatura e umidade relativa externa da cidade de Curitiba-PR, durante os três primeiros dias do mês de janeiro. Analisa-se o

comportamento oposto da umidade relativa em relação a temperatura, com valores máximos durante a noite, o que já é normalmente esperado. A Figura 2 ilustra valores de radiação total (difusa mais direta), para esse mesmo período. Neste caso, observam-se valores altos, em torno de 900 W/m^2 , ao meio-dia.

Com o objetivo de reduzir as influências das condições iniciais, o programa foi submetido a três “pré-simulações” para esses mesmos 3 primeiros dias de janeiro.

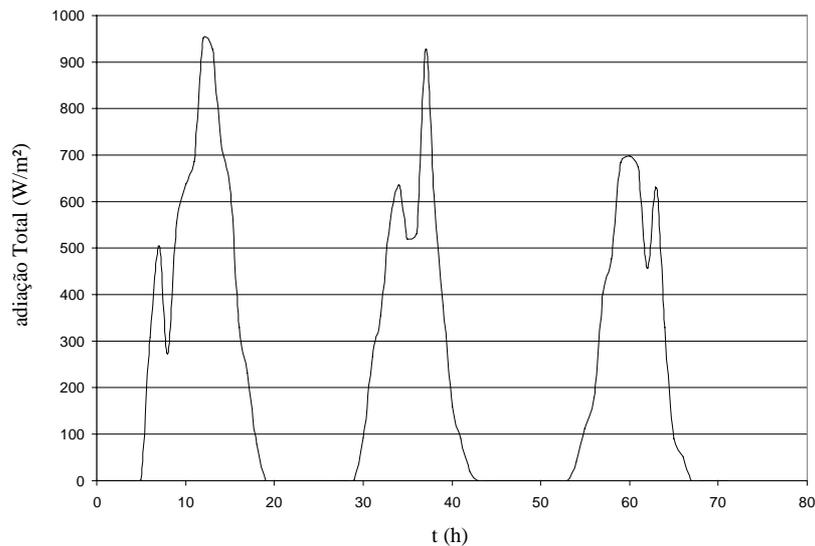


Figura 2: Variação temporal da radiação total para Curitiba no período de 1º a 3 de janeiro.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A linearização da derivada temporal da temperatura, para a solução das Eqs. 3-5 (condução de calor em regime transiente) pelo método de diferenças finitas, acarreta erros quando simula-se o comportamento térmico de edificações, pois normalmente, o intervalo de tempo desejado é de 1 ano. Assim, a maioria dos programas de simulação que utiliza tanto o método do fator de resposta como o método de diferenças finitas ou volumes finitos, adota passos de tempo de 1h.

Desta forma, analisa-se, preponderantemente nesta seção do artigo, a sensibilidade do transiente higrotérmico de ambientes ao passo de tempo de simulação.

Nas Figuras 3 e 4, observam-se as variações de temperatura interna e de umidade relativa do ambiente com os respectivos passos de tempo (dt) para a simulação. No caso da temperatura, verifica-se uma variação de até $4 \text{ }^\circ\text{C}$ para os picos de temperatura e de $2 \text{ }^\circ\text{C}$ para os valores de mínimo (vales). Para a umidade relativa, nota-se, pela Fig. 4, uma variação de até 10% .

As altas temperaturas mostradas na Fig.3, devem-se ao fato da troca de ar com o ambiente externo, ser feita apenas por infiltração pelas frestas de porta e janelas consideradas. Temperaturas ainda maiores são atingidas quando é inserida no ambiente,

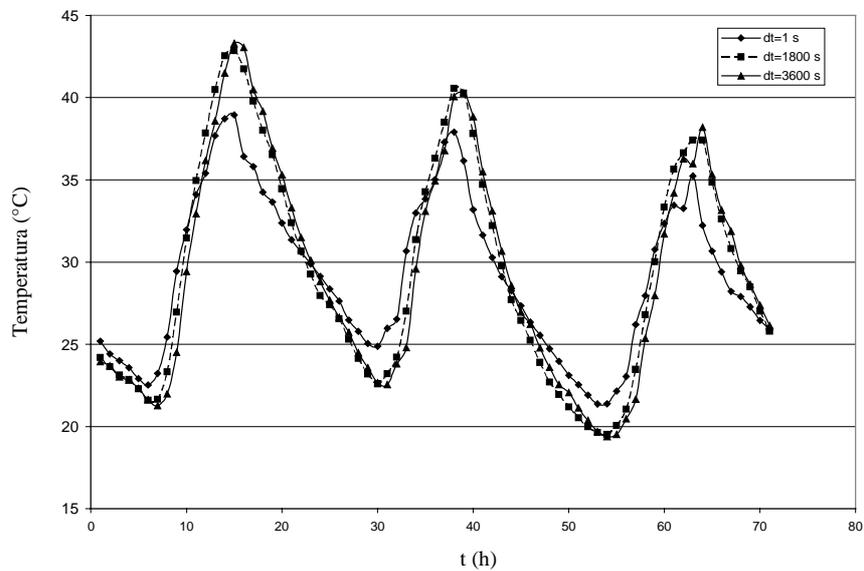


Figura 3: Variação temporal da temperatura interna do ambiente em Curitiba no período de 1° a 3 de janeiro para passos de tempo de 1, 1800 e 3600 s

uma geração de energia. Tais temperaturas são verificadas na Fig. 5, onde adotou-se uma geração interna, típica de escritórios, de 40 W/m^2 para o ambiente.

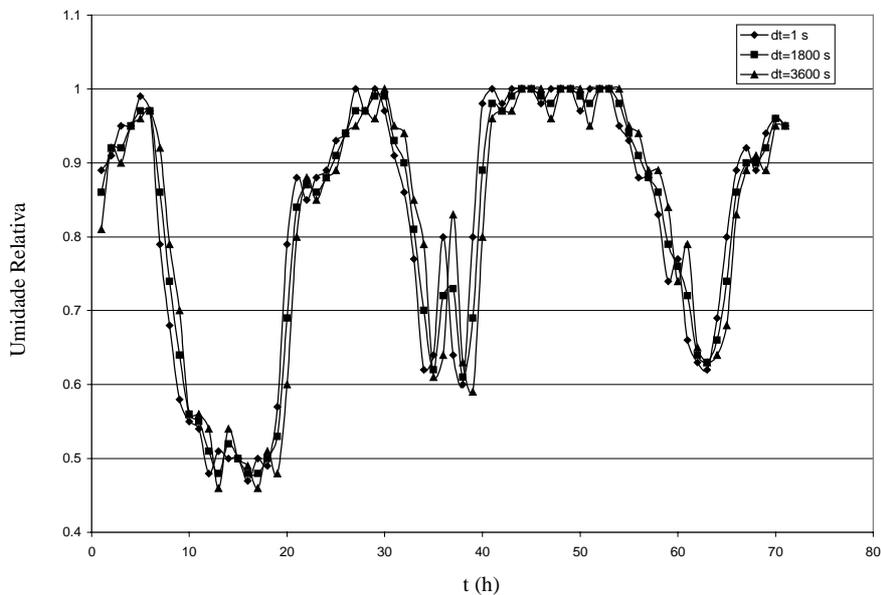


Figura 4: Variação temporal da umidade relativa interna do ambiente em Curitiba no período de 1° a 3 de janeiro para passos de tempo de 1, 1800 e 3600 s.

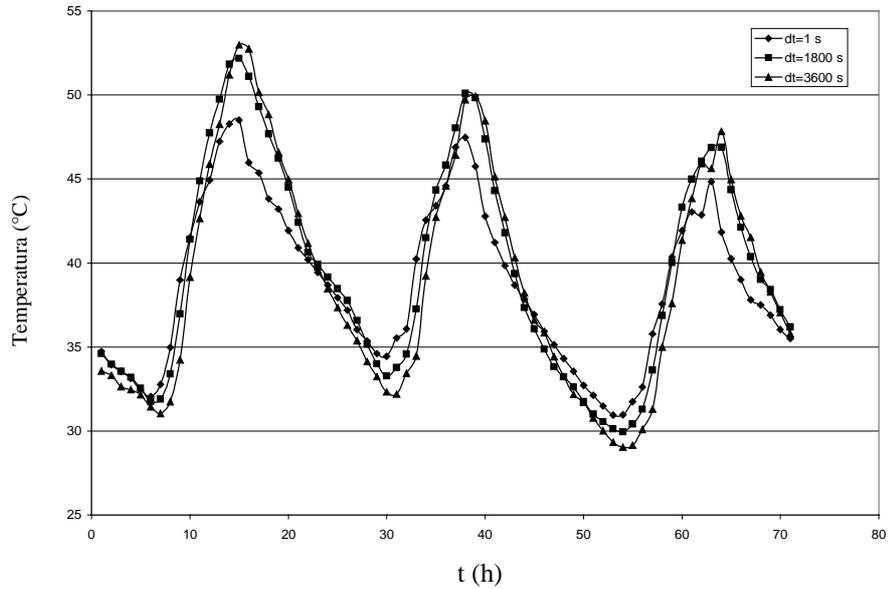


Figura 5: Variação temporal da temperatura interna do ambiente para Curitiba no período de 1º a 3 de janeiro para passos de tempo de 1, 1800 e 3600 s, com uma geração interna de energia de 1000 W.

Outro fator importante para as altas temperaturas apresentadas na Fig.3, deve-se ao fluxo de energia por radiação que atravessa as janelas, pois está sendo considerado como ganho de energia instantâneo para o ambiente. Tal efeito pode ser observado na Fig. 6, onde

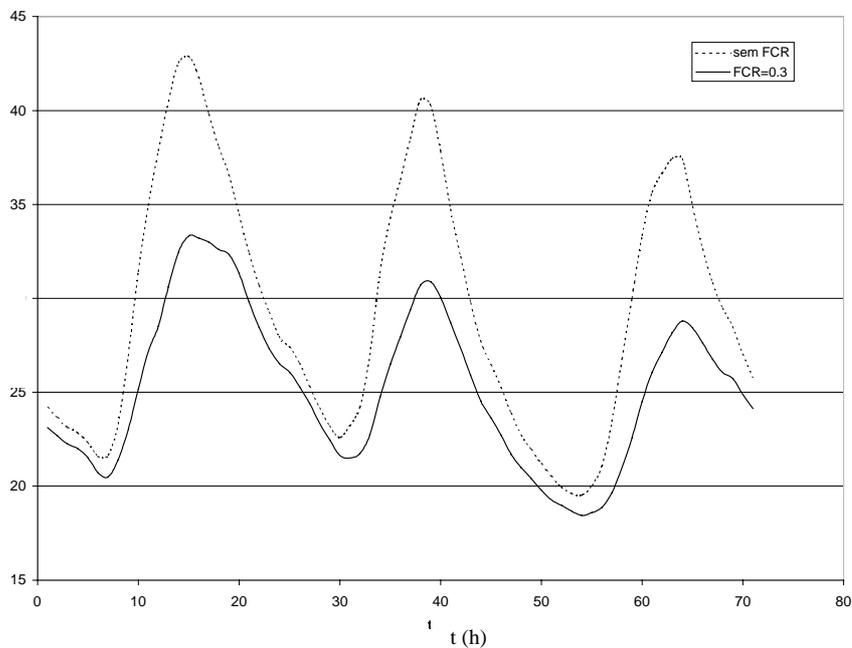


Figura 6: Efeito do fator de carga de refrigeração (FCR) na variação temporal da temperatura interna do ambiente para Curitiba no período de 1º a 3 de janeiro para um passo de tempo de 1800 segundos.

um fator de ponderação (FCR) de 30% foi adotado no ambiente. Neste caso, observa-se uma variação de temperatura de aproximadamente 10°C para os picos de temperatura.

A Fig. 7 apresenta o perfil de temperatura na parede frontal, às 15 horas no dia 3 de janeiro. Nota-se, pela Fig. 7, uma discrepância considerável entre os perfis de temperatura para passos de tempo de 1, 1800 e 3600 s, numa parede bem ensolarada (direção noroeste às 15h). Esta discrepância é responsável, em grande parte, pela diferença de temperatura encontrada nas figuras acima e na umidade relativa, pois esta é uma função da temperatura. Notou-se com este estudo que quanto maior for a incidência de energia sobre o envoltório da edificação, maior será o erro devido à adoção passos de tempo da ordem de 1h.

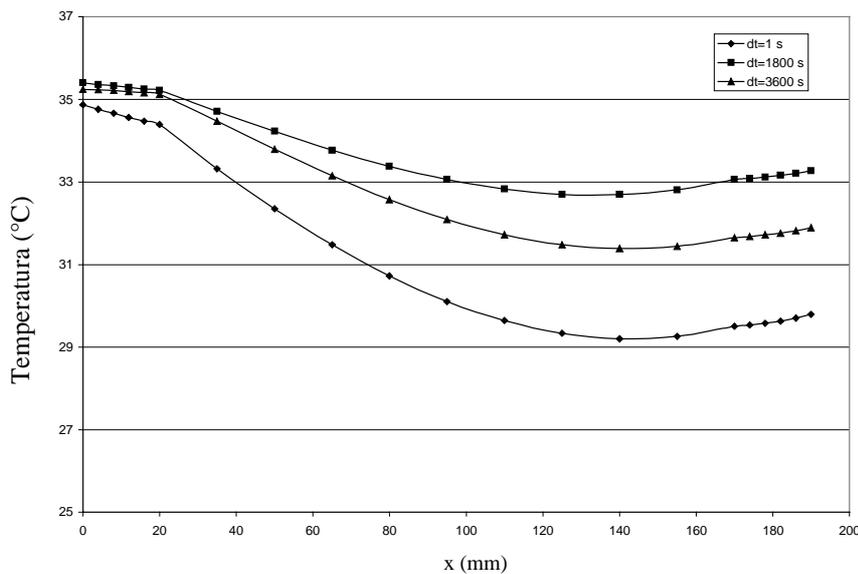


Figura 7: Perfil de temperatura na parede frontal do ambiente.

É importante ressaltar que a adoção de passos de tempo diferentes de 1h, implica em interpolações lineares dos valores lidos no arquivo climático em questão, adicionando erros à estimativa de perfis de temperatura. No entanto, isso é inevitável, pois não há arquivo de dados, até então, que forneçam dados climáticos em intervalos inferiores a 1h.

5. CONCLUSÕES

Elaborou-se um modelo matemático com um código computacional em C para descrever o comportamento higrotérmico edificações. Utilizou-se uma abordagem global para a modelagem do ambiente e multicamadas em diferenças finitas para o envoltório, teto e piso da edificação.

Mostrou-se a influência do passo de tempo nos resultados de simulação, tais como temperatura interna, perfis de temperatura e umidade relativa. Observaram-se diferenças significativas entre os valores obtidos através de diferentes passos de tempo para a simulação, evidenciando a importância dessa análise.

Para os próximos passos, pretende-se inserir no programa, rotinas de cálculo para levar em conta as trocas de calor por radiação entre as superfícies internas da edificação, permitindo a realização de simulações de ambientes com grandes assimetrias térmicas,

além de uma validação com resultados obtidos experimentalmente pelo *Lawrence Berkeley National Laboratory*.

Concluindo, este trabalho mostrou-se promissor para a simulação do comportamento termoenergético de ambientes e, conseqüentemente, para o estudo de avaliação de estratégias de redução de consumo de energia em edificações.

6. REFERÊNCIAS

- ASHRAE – American Society of Heating Refrigeration and Air-Conditioning Engineering - Handbook-Fundamentals, 1993, Atlanta: ASHRAE.
- Athienitis A.K., Stylianou M. and Shou J., 1990, A Methodology for Building Thermal Dynamics Studies and Control Applications, ASHRAE Transactions - SL-90-14-4.
- Dion J.M., Dugard L., Franco A., Nguyen Minh Tri and Rey D., 1991, MIMO Adaptive Constrains Predictive Control Case Study: An Environment Test Chamber, *Automatica*, Vol. 27, N° 4, pp. 611-626, Great Britain.
- Hudson G. and 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., Araújo H.X. e Oliveira G.H.C., 2000, O Problema do Controle de Temperatura em Aquecimento de Edificações, VIII Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído (ENTAC 2000), Abril 23-28, Salvador-Brasil.
- Mendes N., Ridley I., Lamberts R., Philppi P.C. and Budag K., 1999, UMIDUS: A PC Program for the Prediction of Heat and Moisture Transfer in Porous Building Elements, Building Simulation Conference – IBPSA 99, p. 277-283, Kyoto, Japan.
- Santos G.H. e Mendes, N., 2000, Modelos para Avaliação Térmica de Ambientes, Relatório interno do Laboratório de Sistemas Térmicos da PUCPR, Curitiba-PR.
- Stoecker W. F. e Jones J.W., 1985, *Refrigeração e Ar Condicionado*, McGraw Hill do Brasil.
- Szokolay S., 1993, Solar Geometry, PLEA – Passive and Low Energy Architecture Conference - NOTES, Department of Architecture at University of Queensland, Brisbane, Australia.

HYGROTHERMAL DYNAMIC ANALYSIS OF NON-CONDITIONED ROOMS

Abstract. *We describe a mathematical model applied to analysis of hygrothermal behavior of buildings. We use a lumped approach to model the room air temperature and humidity and a multi-layer model in finite differences for the building envelope. The capacitance model allows to study the room transient air humidity and temperature when it is submitted to the weather of the city of Curitiba-PR, Brazil. To evaluate the building performance with thermal parameters, we have written a program in C which includes air infiltration, conduction loads, internal gains of people, lights and equipment and solar radiation. In the results section, we show the influences of simulation time step on internal temperature and humidity and temperature profiles within the building envelope.*

Keywords: *Heat and mass transfer in Buildings, Building simulation, Sensitivity analysis*