



ANÁLISE DE EFEITOS DO TRANSIENTE TÉRMICO DO SOLO NO COMPORTAMENTO TÉRMICO DE AMBIENTES

Gerson H. dos Santos

Pontifícia Universidade Católica do Paraná (CCET/LAS – Laboratório de Automação e Sistemas)
Rua Imaculada Conceição, 1155
Curitiba-PR, 80.215-901, Brasil
ghsantos@rla01.pucpr.br

Nathan Mendes

Pontifícia Universidade Católica do Paraná (PUCPR/CCET)
Rua Imaculada Conceição, 1155
Curitiba-PR, 80.215-901, Brasil
nmendes@ccet.pucpr.br

Resumo: Neste trabalho, aperfeiçoou-se um modelo para o transporte puro de calor por condução através do solo, analisando a sua influência em um ambiente não climatizado. A difusão de calor através dos envoltórios e do solo, no presente modelo, é calculada pela lei de Fourier através do método das diferenças finitas. Para o solo, consideram-se duas abordagens. Em uma primeira análise, adota-se um modelo unidimensional, comparando-o então com o bidimensional. O ambiente também é submetido a cargas de convecção, radiação, 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.

Palavras-chave: simulação de ambientes, análise do transiente térmico do solo.

1. INTRODUÇÃO

Através de dados da Secretaria de Energia do Estado de São Paulo, estima-se que o consumo de energia elétrica nas edificações brasileiras representa mais de um terço do total nacional. O emprego de padrões arquitetônicos adequados, a especificação de produtos e materiais energeticamente eficientes e a adequação de critérios e projetos racionais podem reduzir em até 60% o consumo energético das edificações, (www.energia.sp.gov.br).

Como este problema atinge praticamente o mundo todo, foram desenvolvidos vários programas computacionais – destacando-se os códigos BLAST (1977), DOE-1 (1978), NBSLD (1974), TRNSYS (1975), DOMUS (2001) – para simular o comportamento termoenergético de edificações. No entanto, estes códigos apresentam várias simplificações no que diz respeito a transferência de calor através do piso e do solo nas edificações.

Estudos experimentais durante os anos 40, concluíram que o calor perdido através do piso das edificações é proporcional ao comprimento do seu perímetro. Porém em estudos mais recentes (Bahnfleth, 1989), observa-se que a área e o seu formato também devem ser levados em conta.

Em ASHRAE (1997) ainda recomenda-se uma formulação onde a quantidade de calor transferido pelo piso é proporcional ao perímetro da edificação, a diferença entre a temperatura externa e interna e a um fator que depende do clima da região e o tipo da construção.

Neste contexto, simulações envolvendo métodos computacionais como volumes finitos, estão cada vez sendo mais empregados. Em Adjali (1999) através de um modelo tri-dimensional, utilizando volumes finitos, fez-se uma análise de sensibilidade da condutividade do solo, nas distorções entre os resultados experimentais e os simulados. Analisou-se também neste trabalho a influência da neve e chuva na distorções destas temperaturas. Verificou-se principalmente, que um modelo puramente condutivo pode ser capaz de oferecer resultados bastante próximos quando comparados com os dados experimentais.

Atualmente, novas técnicas de simulação podem ser encontradas. Em Zoras (2001) utiliza-se uma combinação de fatores de resposta estrutural para a solução numérica tri-dimensional da equação da condução de calor.

Neste trabalho, a difusão de calor no solo e no envoltório é calculada pela lei de Fourier, considerando o transporte puro de calor por condução, utilizando diferenças finitas. Para o solo adotou-se primeiramente um modelo unidimensional, impondo um fluxo de calor nulo para a condição de contorno a uma profundidade de 4 m. Em comparação é formulado um modelo bidimensional, onde a radiação solar é imposta como condição de contorno para a superfície superior externa do solo.

O ambiente como tratado por Mendes e Santos (2000) foi submetido a cargas de convecção, radiação, insolação, infiltração e ganhos internos, adotando-se uma formulação do tipo global tanto para a temperatura como para a massa de vapor d'água. Mostra-se na seqüência do trabalho a influência da respiração de ocupantes na geração de umidade dentro do ambiente.

2. MODELO MATEMÁTICO

Para a modelagem do solo e piso, utilizou-se o método das diferenças finitas com uma abordagem totalmente implícita, aplicando-se a lei de Fourier pura, como:

$$rc \frac{\partial T}{\partial t} = I \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + I \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \quad (1)$$

Para a condição de contorno no modelo unidimensional, adotou-se um fluxo de calor nulo a uma profundidade de 4m, assumindo que:

$$\left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)_{y=L} = 0 \quad (2)$$

onde:

L = profundidade do solo (m);
 T = temperatura (°C).

Para a superfície do piso interna ao ambiente, considerou-se a convecção e a radiação entre as superfícies. Logo, a condição de contorno para o lado interno ($y=0$) é escrita como:

$$\left(I \frac{\partial T}{\partial y} \right)_{y=0} = h_{\text{int}} (T_{\text{int}} - T_{y=0}) + \sum_{i=1}^n f_f \mathbf{e} \mathbf{q} (T_{\text{viz}}^4 - T_{y=0}^4) \quad (3)$$

onde:

I = condutividade térmica (W/mK);

h_{int} = coeficiente de convecção interna (W/m^2K);
 T_{int} = temperatura interna do ambiente ($^{\circ}C$);
 $T_{y=0}$ = temperatura da superfície do solo interna ao ambiente ($^{\circ}C$);
 f_f = fator de forma da superfície em relação ao envoltório;
 e = emissividade da superfície;
 q = constante de Stefan-Boltzmann ($5,6697 \cdot 10^{-8} W / m^2 K^4$);
 T_{viz} = temperatura das faces das paredes vizinhas (K).
 n = nº de superfícies

Utilizaram-se 21 nós no modelo unidimensional, distribuídos em uma malha não uniforme, considerando as faces do volume de controle situadas no meio da distância entre os pontos nodais.

No modelo bidimensional, considerou-se também um fluxo de calor nulo para a condição de contorno para o lado inferior (4 m de profundidade) e laterais do solo. Em um domínio estendendo-se a uma distância de 2,5 m da edificação, utilizou-se através da Eq. (4) uma condição de contorno onde a superfície do solo foi submetida a cargas de convecção e radiação solar. No interior da edificação, conforme ao modelo unidimensional, o piso também foi submetido a cargas de convecção e de radiação de onda longa das outras superfícies. Neste modelo utilizaram-se 6969 nós distribuídos em uma malha não-uniforme.

$$-\left(1 \frac{\partial T}{\partial y}\right)_{y=0} = h_{ext}(T_{ext} - T_{y=0}) + a q_r \quad (4)$$

onde:

h_{ext} = coeficiente de convecção externa (W/m^2K);
 T_{ext} = temperatura externa ao ambiente ($^{\circ}C$);
 $T_{y=0}$ = temperatura da superfície do solo externa ao ambiente ($^{\circ}C$);
 a = absorvidade do solo;
 q_r = radiação direta solar (W/m^2).

No envoltório, o fluxo de calor que atravessa a superfície de controle da edificação foi calculado pela lei de Newton de resfriamento, enquanto que as temperaturas internas das superfícies, foram calculadas pela lei de Fourier.

Na formulação global para o cálculo da umidade interna da edificação, o fluxo de massa de água proveniente da respiração de indivíduos foi calculado através de formulação apresentada em ASHRAE (1993):

$$\dot{m}_{resp} = \dot{m}_{a,resp} (0,0277 + 0,000065T_{int} - 0,80W_{int}) \quad (5)$$

sendo: $\dot{m}_{a,resp} = K_{res} M$.

onde:

$\dot{m}_{a,resp}$ = fluxo de massa de ar seco através da respiração (kg/s);
 K_{res} = constante de proporcionalidade ($2,58 kg \cdot m^2 / MJ$);
 M = geração de calor metabólico devido a atividade física do indivíduo (MW/m^2).
 T_{int} = temperatura interna do ambiente ($^{\circ}C$);
 W_{int} = umidade absoluta interna do ambiente (kg de água / kg de ar seco);

3. PROCEDIMENTOS DE SIMULAÇÃO

Elaborou-se um código em linguagem C, para a análise do comportamento térmico de um ambiente. Subdividiu-se a parede do envoltório (Figura 1) em três materiais (reboco, tijolo e reboco), onde não considerou-se nenhuma resistência de contato entre as camadas, como apresentado em Mendes e Santos (2000).

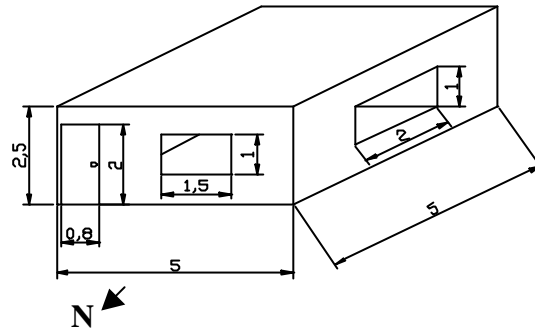


Figura 1. Dimensões do ambiente utilizado para a simulação (m).

Discretizou-se a equação da conservação de energia para cada nó do envoltório do ambiente apresentado na Fig. (1), através do método das diferenças finitas, utilizando uma malha uniforme e um esquema totalmente implícito, tratado em Patankar (1980).

No estudo do transiente térmico do solo e piso (Figura 2), tanto 1D quanto 2D, a malha utilizada foi não uniforme, subdividida em uma camada de 0,02 m de madeira, 0,35 m de cimento e 3,75 m de solo, com propriedades termofísicas obtidas em Incropera (1992), consideradas constantes.

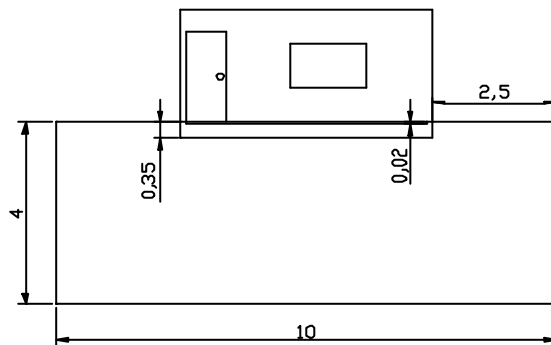


Figura 2. Dimensões do domínio do solo e do piso utilizado na simulação (m).

O clima externo foi representado pelas equações 6, 7 e 8 para temperatura, umidade relativa e radiação solar, respectivamente. Considerou-se a variação senoidal da temperatura durante o dia entre 15 ° C e 25° C e da umidade externa entre 50 % e 70 %. Admitiu-se a variação da radiação total (direta mais difusa) com valores entre 6 e 18 horas, com pico as meio-dia.

$$T_{ext} = 20 + 5 \operatorname{sen}\left(p + \frac{pt}{43200}\right) \quad (6)$$

$$f_{ext} = 0.60 - 0.10 \operatorname{sen}\left(p + \frac{pt}{43200}\right) \quad (7)$$

$$q_{r,total} = 400 \operatorname{sen} \left(\frac{3}{2} p + \frac{pt}{43200} \right) \quad (8)$$

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Validação do Modelo Bidimensional

Obteve-se uma validação do modelo bidimensional através da comparação com a formulação analítica apresentada por Incropera (1992). Considerou-se uma superfície retangular com três superfícies mantidas a uma temperatura $T_1=10^\circ\text{C}$, enquanto que o quarto lado, superior, se mantinha a uma outra temperatura constante $T_2=20^\circ\text{C}$.

Devido a ausência de correlações analíticas na literatura para o regime transiente bidimensional, considerou-se a superfície em regime permanente, compararam-se os resultados numéricos com os valores obtidos através da equação (9), obtendo-se satisfatória concordância, como indica a Fig. (3).

$$q(x, y) = \frac{2}{p} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1} + 1}{n} \operatorname{sen} \frac{np\pi x}{L} \frac{\operatorname{senh}(npy/L)}{\operatorname{senh}(npW/L)} \quad (9)$$

onde:

$$q = \frac{T - T_1}{T_2 - T_1}$$

T = temperatura da superfície para qualquer x e y.

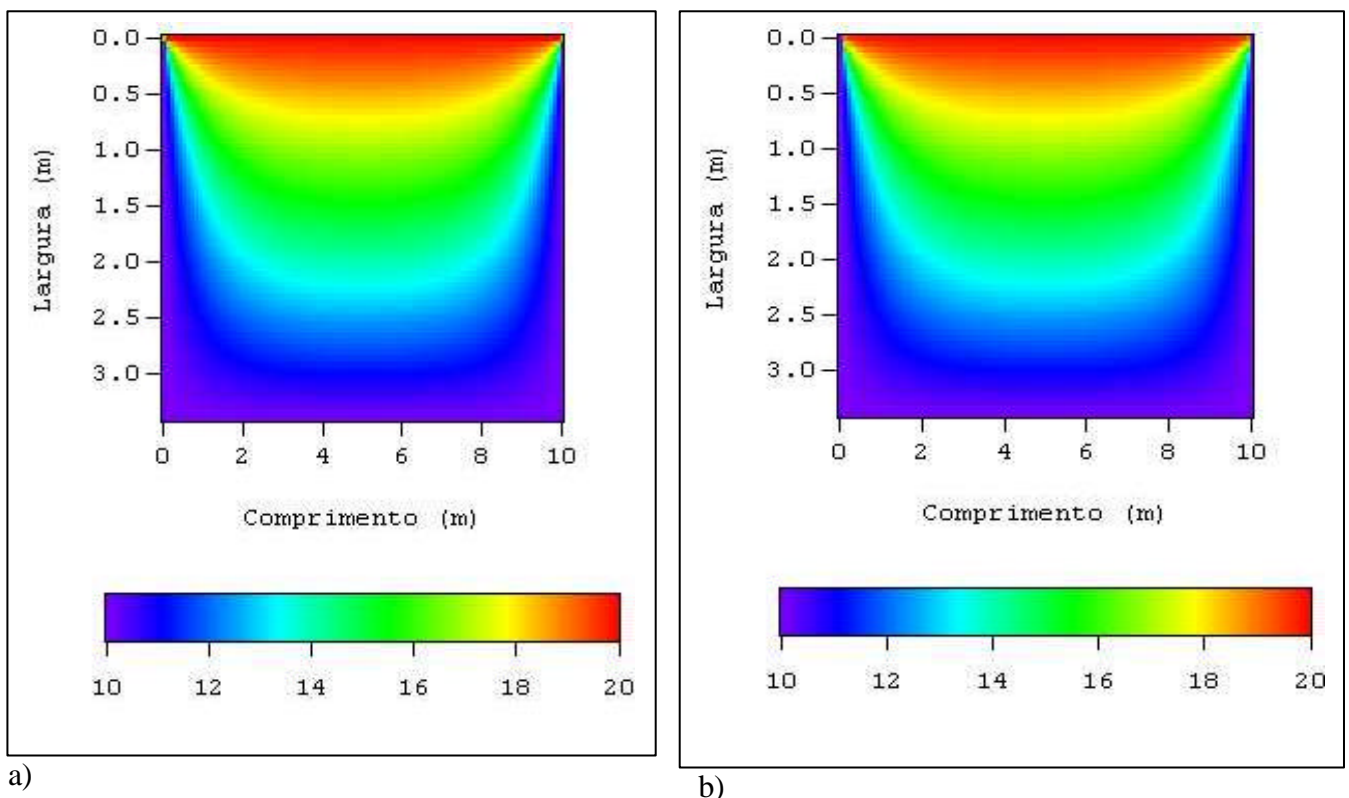


Figura 3. Gradientes de Temperatura. a)Modelo Numérico. b)Modelo Analítico.

4.2 Comparação entre os Resultados Obtidos com Modelo 1-D e 2-D

Observou-se no gráfico da Fig. (4), a variação da temperatura interna do ambiente durante um período de 48 horas. Para a elaboração do gráfico, submeteu-se o código computacional a um

período de pré-simulação de 30 dias, evitando os efeitos das condições iniciais imposta ao programa, como observado no gráfico.

Verificou-se na Fig. (4) uma diferença de aproximadamente 2 graus na temperatura interna do ambiente durante o período diurno e uma variação média de 15 % entre os fluxos de calor proveniente do solo e piso da edificação, neste mesmo período, quando analisados em 1 e 2D. Esta diferença pode ser explicada pelo alto gradiente de temperatura que estende-se ao longo do perímetro da edificação, como observado por Bahnfleth (1989).

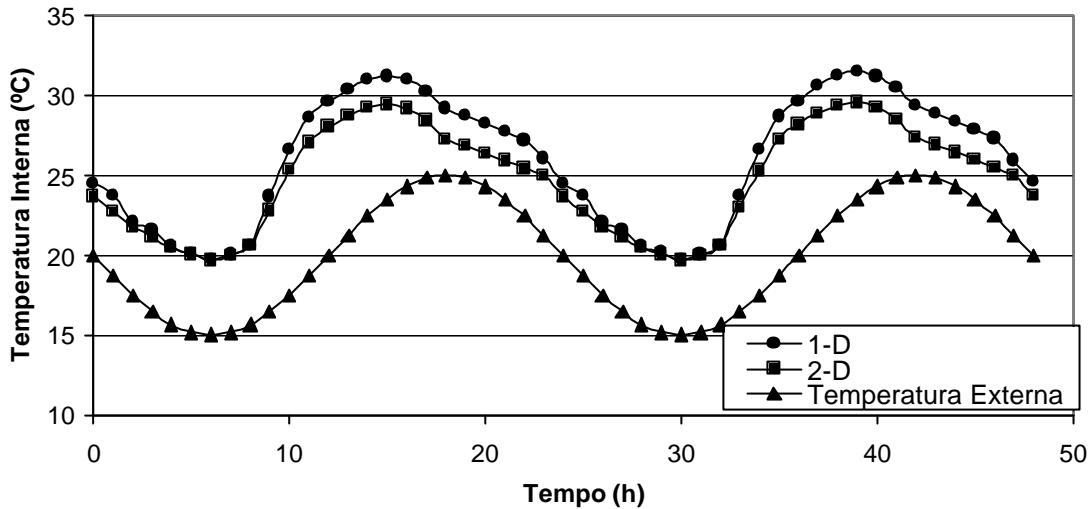


Figura 4. Temperatura interna do ambiente em um período de 72 horas.

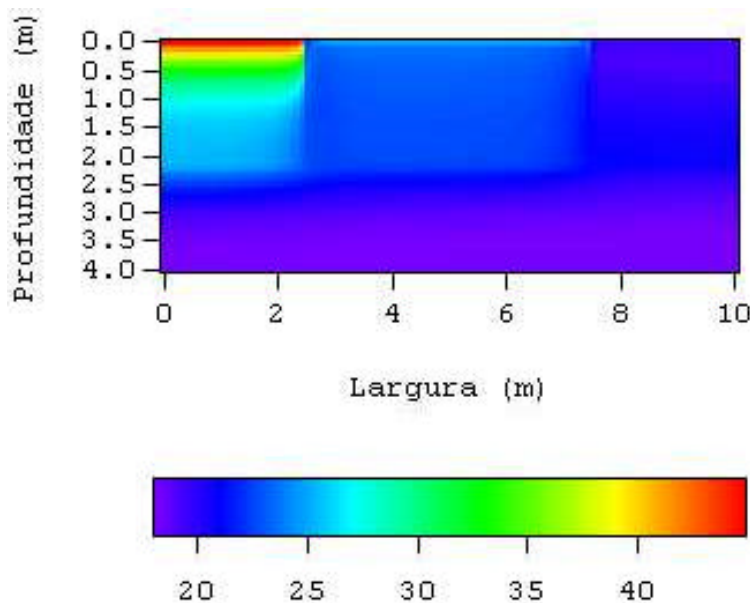


Figura 5. Gradiente de temperatura do solo e piso às 12 horas.

Notou-se na Fig. (5), o gradiente da temperatura no solo ao meio-dia. As altas temperaturas obtidas no lado esquerdo da figura devem-se a radiação concentrada até o meio dia no lado leste da edificação. Verificou-se na figura que o gradiente se concentra na linha do perímetro da edificação, e não propriamente no sentido vertical do solo como é tratada na transferência de calor em uma dimensão.

4.3 Efeitos da Respiração de Ocupantes na Variação da Umidade Relativa

Na Fig. (6) analisou-se a influência da respiração de pessoas na geração de umidade no interior da edificação, submetida a uma vazão média de 1 l/s de infiltração, obtida em Kuehn (1998). Observou-se um aumento considerável na quantidade de umidade do ambiente com o aumento de pessoas em seu interior, ocasionando um período de condensação da umidade devido ao baixo valor de vazão de infiltração.

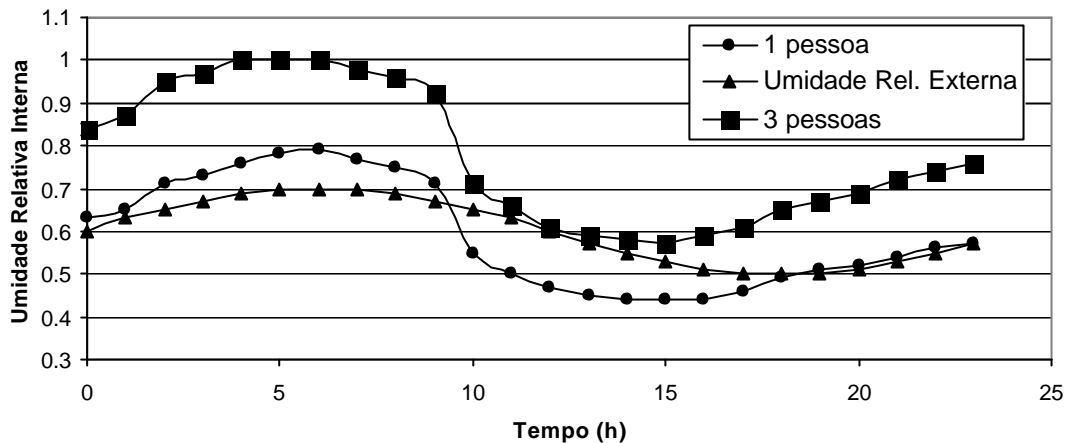


Figura 6. Umidade relativa interna do ambiente (solo 1-D) em um período de 24 horas.

5. CONCLUSÃO

Descreveu-se um modelo para o transporte puro de calor por condução através do solo e do piso de uma edificação e analisou-se a sua influência em um ambiente não climatizado.

Apresentou-se uma diferença significativa na temperatura do ambiente, quando tratou-se a transferência de calor pelo solo e piso em 1 e 2-D. Tais diferenças podem ser explicadas pelo alto gradiente de temperatura que se estende através do perímetro da edificação. Influência das dimensões e condições de contorno adotados podem influenciar nos resultados obtidos, tornando-se necessário um estudo mais elaborado.

No caso da geração de umidade, observou-se períodos de condensação com o aumento devido ao aumento do número de pessoas e a baixa vazão de infiltração.

Pretende-se, nos próximos trabalhos, analisar a condução em 3-D acoplada com o transporte de umidade em solos e integrar esses modelos com o programa DOMUS (Mendes et al., 2001) de simulação higrótérmica de ambientes.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CAPES, CNPq e Fundação Araucária pelo suporte financeiro.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Adjali M.H., Davies M., Littler J., A Numerical Simulation of Measured Transient Temperatures in the Walls, Floor and Surrounding Soil of a Buried Structure. *International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow*, Vol. 9 N° 4, 1999, pp. 405-422
- ASHRAE – American Society of Heating Refrigeration and Air-Conditioning Engineering - Handbook-Fundamentals, 1993 e 1997, Atlanta: ASHRAE.
- Bahnfleth W. P. Three-Dimensional Modelling of Slab-on-Grade Heat Transfer, *Building Simulation Conference – IBPSA 89*, p. 133-138.
- Kuehn T. H., *Thermal Environmental Engineering*, 3rd ed., 1998, Prentice Hall.

- Incropera F.P., Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa, 3º ed., 1992.
- Mendes N. e Santos G.H., Análise de Transiente Higrotérmico de Ambientes Não-Climatizados, VIII Encontro Nacional de Ciências Térmicas - ENCIT 2000, Porto Alegre, 2000.
- Mendes N., Oliveira R. C., Santos G., 2001, DOMUS 1.0: A Brazilian PC Program for Building Simulation, International Building Performance Simulation Association Conference – IBPSA '01, p. 83-89, Rio de Janeiro, Brazil.
- Patankar S.V., Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, 1980.
- Zoras S., Davies M., Wrobel L. C., Earth-Contact Heat Transfer: A Novel Simulation Technique. 7th REHVA World Congress – CLIMA 2000, Napoli, 2001.

ANALYSIS OF NON- STEADY STATE EFFECTS OF GROUND HEAT TRANSFER ON BUILDING THERMAL PERFORMANCE.

Gerson H. dos Santos

Pontifical Catholic University of Paraná – PUC/CCET
Curitiba – PR – 80215-901 – Brazil
ghsantos@rla01.pucpr.br

Nathan Mendes

Pontifical Catholic University of Paraná – PUC/CCET
Curitiba – PR – 80215-901 – Brazil
nmendes@ccet.pucpr.br

***Abstract.** In this work, we describe a model for the pure conduction heat transfer through the ground and its influence on room air temperature. The heat diffusion through the building envelope and the ground is calculated by Fourier's law with the finite difference method. Two approaches are considered. First, a 1-D model for the ground is adopted and then it is compared against a 2-D one. A lumped approach for the room is considered, which is externally submitted to convection, solar radiation, long-wave radiation and infiltration. Internally, interchange long-wave radiation and convection are considered. People, equipment and lighting are also considered as internal energy gain. Influence of people breath on room air humidity is also analysed.*

***Keywords.** Building thermal simulation, ground heat transfer.*