

O PROGRAMA UMIDUS 2.1 E A REDUÇÃO DE TEMPO DE CPU EM SIMULAÇÕES DE LONGOS PERÍODOS

Nathan Mendes – nmendes@ccet.pucpr.br

Pontifícia Universidade Católica do Paraná (PUCPR/CCET),

Laboratórios de Sistemas Térmicos (LST)

Curitiba-PR, 80.215-901, Brasil

Roberto Lamberts – lamberts@ecv.ufsc.br

Paulo C. Philippi – philippi@lmpt.ufsc.br

Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC/CTC)

Laboratório de Eficiência Energética de Edificações (LabEEE) e Laboratório de Meios Porosos e Propriedades Termofísicas de Edificações (LMPT)

Florianópolis-SC, 88.040-900, Brasil

***Resumo.** Este artigo apresenta o programa UMIDUS 2.1 que foi desenvolvido para modelar transferência combinada de calor e umidade em meio poroso, a fim de analisar performance higrotérmica de elementos construtivos quando sujeitos a qualquer tipo de condições climáticas. Os modelos do UMIDUS permitem prever perfis de umidade e temperatura em elementos porosos de edificações para qualquer passo de tempo e calcular fluxos de calor e massa. Apresenta-se ainda, uma nova aptidão do UMIDUS 2.1 que trata-se de acelerar simulações através de flexibilidade de entrada de parâmetros no quadro Warm-up da janela de simulação, permitindo a redução do tempo de simulação mantendo a precisão de cálculo.*

***Palavras-chave:** Processos de transferência de calor e umidade, Software de simulação, UMIDUS, Meios porosos*

1. INTRODUÇÃO

O cálculo de consumo de energia em construções via software de simulação normalmente assume que calor é transferido através do envoltório puramente por condução. No entanto, grande parte do material empregado em construção é poroso, contendo ar e água em suas diferentes fases. Dessa forma, paredes estão sujeitas a gradientes de temperatura e de umidade, e a transferência de calor e massa ocorre simultaneamente e de forma interdependente. Normalmente, a dinâmica para o campo de umidade é muito menor que para a temperatura, retardando o correto estabelecimento dos perfis, exigindo, portanto, uma análise mais cautelosa na hora de arbitrar condições iniciais para conteúdo de umidade em função do clima e do período de simulação.

Diversos pesquisadores desenvolveram modelos para o estudo do transporte de calor e umidade em construções. Kerestecioglu e Gu (1989) investigaram o fenômeno usando a teoria da evaporação-condensação no estado pendular (estágio de fluxo de líquido insaturado). A aplicação desta teoria é limitada a baixos conteúdos de umidade. Burch e Thomas (1991) desenvolveram um modelo computacional, MOIST, usando o método de diferenças finitas para estimar a transferência de calor e massa através de paredes compostas sob condições não isotérmicas. A condutividade térmica é normalmente considerada constante e o calor latente, devido à mudança de fase dentro da parede, foi desprezado. Esse programa também é limitado a baixo conteúdo de umidade.

Entretanto, nenhum desses pesquisadores considerou o problema de tempo de simulação. Assim, desenvolveu-se esse software *UMIDUS* para modelar transferência combinada de calor e umidade em elementos construtivos porosos, evitando limitações como conteúdo de umidade baixo, tempo de computação longo e baixa precisão. Os fenômenos de difusão e capilaridade são ambos levados em conta, ou seja, a transferência através do material de água nas fases de vapor e líquida pode ser analisada para qualquer tipo de clima. O modelo prediz perfis de umidade e temperatura em paredes compostas ou telhados para qualquer passo de tempo e calcula transferência de calor e massa. Arquivos de entrada contendo dados horários fornecem informações sobre as condições no ambiente interno e externo à parede. Uma biblioteca de propriedades de materiais também está disponível. A orientação e inclinação da parede são considerados e coeficientes convectivos de troca de calor no exterior da parede são calculados a cada hora através de dados da velocidade do vento.

UMIDUS 2.1 foi construído em C++ Builder, uma linguagem orientada a objetos, para ser um software de fácil uso, rápido e preciso. O programa pode ser executado nos sistemas operacionais Windows 95, 98 e NT. A interface consiste de uma série de janelas nas quais pode-se informar os dados de entrada relevantes e conferir os resultados. O usuário pode alternar entre aplicações enquanto as simulações do *UMIDUS* estão sendo executadas e diversos projetos do *UMIDUS* podem estar abertos e sendo executados simultaneamente. Projetos do *UMIDUS* com todas as suas informações de entrada e resultados podem ser gravados e recuperados.

Recentemente, o programa *UMIDUS* foi convidado a fazer parte do diretório (http://www.eren.doe.gov/buildings/tools_directory/software/umidus.htm) do Departamento de Energia Americano (DOE), onde encontram-se programas de simulação termoenergética de edificações, mundialmente reconhecidos.

A versão 2.1 do *UMIDUS* difere da 2.0, por permitir a escolha de diferentes passos de tempo tanto para o período de *warm-up* como para a simulação propriamente dita, conforme será discutido adiante.

2. MODELOS DO *UMIDUS*

As equações diferenciais parciais governantes para a solução dos campos de temperatura e de umidade foram derivadas da conservação de massa e fluxo de energia em um volume elementar de material poroso e são resolvidas simultaneamente. As forças motrizes do transporte convectivo são gradientes de temperatura e de umidade. Assim, a modelação da transferência acoplada de calor e massa consiste em resolver simultaneamente a equação da conservação da energia,

$$\rho_0 c_m(T, \theta) \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda(T, \theta) \frac{\partial T}{\partial x} \right) + L(T) \rho_1 \frac{\partial}{\partial x} \left(D_{Tv}(T, \theta) \frac{\partial T}{\partial x} \right) + L(T) \rho_1 \frac{\partial}{\partial x} \left(D_{\theta v}(T, \theta) \frac{\partial \theta}{\partial x} \right), \quad (1)$$

e a equação da conservação da massa,

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_T(T, \theta) \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(D_\theta(T, \theta) \frac{\partial \theta}{\partial x} \right), \quad (2)$$

onde, os coeficientes de transporte de massa podem ser escritos como:

$$\begin{aligned} D_T &= D_{Tv} + D_{Tl} \\ D_\theta &= D_{\theta v} + D_{\theta l} \end{aligned},$$

onde T representa a temperatura, θ o conteúdo de umidade, L , o calor latente, ρ_0 , a massa específica do meio seco e c_m o calor específico médio, levando-se em conta a presença da água nas fases líquida e vapor. O coeficiente de transferência de calor é a condutividade térmica (λ) e os coeficientes de transporte de vapor são $D_{Tv}(T, \theta)$ e $D_{\theta v}(T, \theta)$ e os de líquido $D_{Tl}(T, \theta)$ e $D_{\theta l}(T, \theta)$.

As condições de contorno na superfície externa representam os fenômenos térmicos de radiação solar, convecção de calor e massa, e mudança de fase. Internamente, a parede é exposta à convecção de calor e massa e mudança de fase.

Para reduzir o tempo de CPU e no caso de haver falta de dados, foram derivados 6 submodelos a partir da equação de conservação de energia. As simplificações são feitas progressivamente no que se diz primeiramente a omissão da mudança de fase interna e a consideração de coeficientes de transporte constantes.

A Tabela 1 compara o tempo médio de execução para os diferentes submodelos em relação ao submodelo 0 (mais completo).

Tabela 1: Porcentagem do tempo de execução em relação ao modelo mais completo.

Submodelo	0	1	2	3	4	5
Tempo (%)	100	16	88	65	38	0

Os submodelos do *UMIDUS* são solucionados por uma abordagem de volumes finitos que usa um esquema de solução implícita completa com acoplamento entre as equações de conservação. Usando o método de Patankar (1980) com malha uniformemente espaçada e um algoritmo para resolução de matrizes tridiagonais genérico (Mendes, 1997), o código soluciona as distribuições de conteúdo de temperatura e umidade simultaneamente a cada passo de tempo.

A radiação solar incidente em uma parede com uma determinada orientação é calculada usando a equação dada no manual da ASHRAE de 1993. Os ângulos solares de altitude e azimute estão incluídos no arquivo climático. O albedo e a absorvidade solar são definidos pelo usuário.

Os coeficientes de transferência de calor e massa em ambas superfícies, externa e interna, podem ser calculados pelo *UMIDUS* a cada hora ou definidos como constantes pelo usuário. O coeficiente de transferência de calor por convecção externa é calculado usando dados da velocidade do vento do arquivo de clima externo. O algoritmo usado é o proposto por Yazdanian e Klems (1994). O coeficiente de convecção interna pode ser escolhido como fixo, ou calculado usando convecção natural ou forçada, de acordo com Alamdari e Hammond (Clarke, 1985). Se o coeficiente de convecção forçada for calculado, o usuário deve entrar com a velocidade do ar, em m/s, na superfície interna da parede. Os coeficientes de convecção por transferência de massa são calculados usando a relação de Lewis.

3. DADOS CLIMÁTICOS DO *UMIDUS* 2.1

As condições no lado externo do elemento construtivo são definidas pelo arquivo climático externo. Arquivos climáticos para 14 cidades brasileiras estão disponíveis. Cada arquivo contém dados horários de temperatura de bulbo seco, umidade relativa, radiação solar difusa e direta, velocidade e direção do vento em um ano típico. A esses arquivos é dada a terminação UMI, e estão em formato de texto separados por espaços. A fonte dos dados para esses arquivos climáticos são os arquivos TRY com radiação solar calculada pelo programa de simulação DOE 2.1-E. Dados climáticos horários podem ser visualizados nas cartas psicrométricas do *UMIDUS*.

Por outro lado, as condições no lado interno do elemento podem ser definidas de dois modos: Um arquivo de condições internas anual pode ser usado para definir as condições horárias de temperatura e umidade relativa. *UMIDUS* inclui 3 arquivos de condições internas, com ganhos internos de 0, 10 e 30 W/m², respectivamente, para cada uma das 14 cidades brasileiras. Esses arquivos foram gerados usando o programa de simulação de construção TRNSYS. Alternativamente, os valores de temperatura e umidade relativa no interior podem ser fixados como valores constantes e informados pelo usuário.

Essas condições climáticas em cada lado da parede são definidas na janela *Weather* como mostrado na Figura 1.

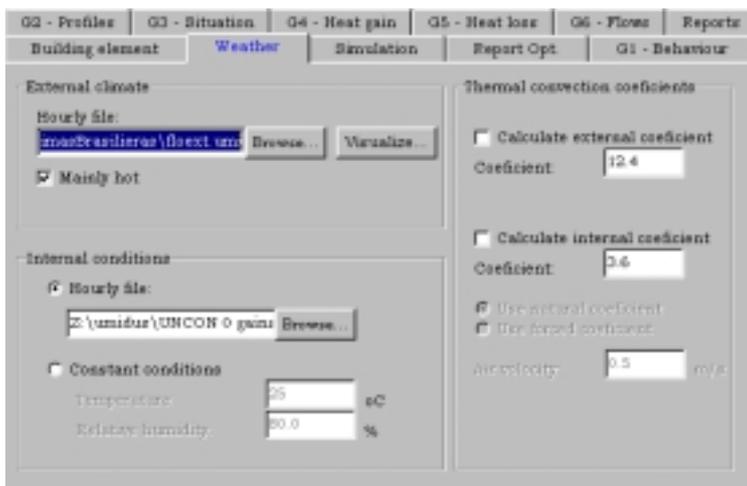


Figura 1: Janela Weather.

4. ENTRADA DE DADOS NO *UMIDUS 2.1*

Mostra-se, nesta seção, as diferentes janelas para entrada no *UMIDUS 2.1*, definindo materiais que compõem o elemento poroso a ser analisado, sua posição, atmosferas climáticas circundantes e detalhes de simulação.

Na Figura 2 - janela *Construction Element* – são inseridas as informações concernentes às propriedades higrótérmicas e geométricas do elemento poroso.

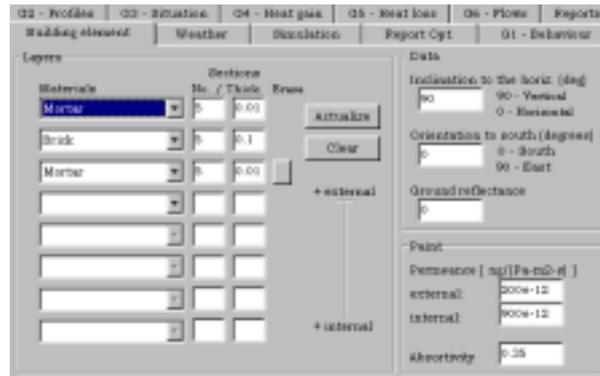


Figura 2: Janela *Construction Element*

Cada camada do elemento é inserida como uma linha em uma tabela. O elemento pode ter um máximo de 8 camadas. O usuário define o material de cada camada do menu *pull-down*. Existem 29 materiais a escolher.

Uma característica muito útil do *UMIDUS* é a visualização das propriedades dos materiais. Na janela *Visualise Material* do *UMIDUS*, Figura 3, os coeficientes de transporte de umidade, condutividades e isotermas de adsorção de até 8 materiais podem ser apresentados graficamente em função do conteúdo de umidade, permitindo comparações entre as propriedades de diferentes materiais.

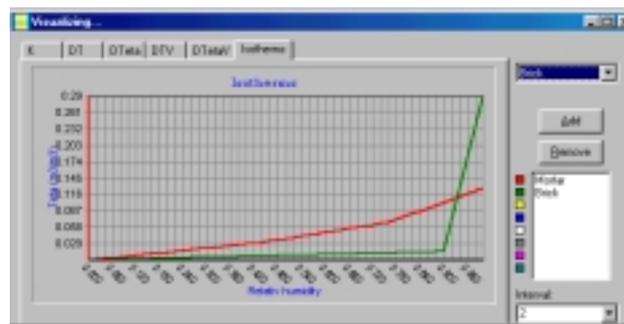


Figura 3: Janela de visualização dos dados de propriedades

Os detalhes da simulação a ser executada são inseridos na janela *Simulation*, Figura 4. O usuário informa o dia, mês e hora em que a simulação deve começar e terminar. O passo de tempo, critério de convergência e o número máximo de iterações permitidas também são requeridos.

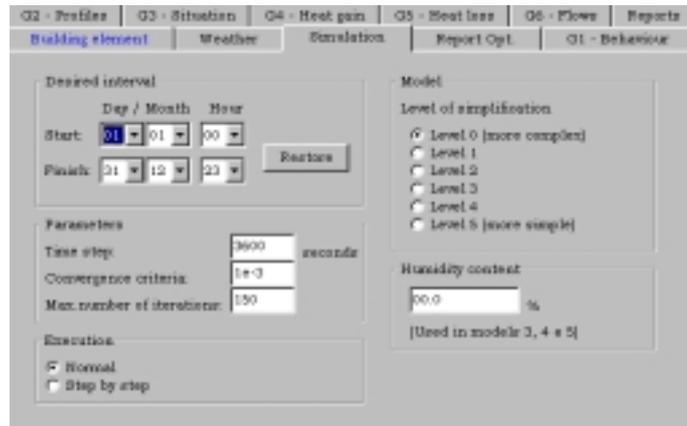


Figura 4: Janela *Simulation* – *UMIDUS* versão 2.0

Essa janela da Fig. 4 foi substituída pela janela da Fig. 5, na versão 2.1 do *UMIDUS*. Nessa versão, o usuário pode definir no quadro *Warm-up*, o período para ajuste das condições iniciais adotadas para os campos de temperatura e de conteúdo de umidade com seleção de passos de tempo de até 24h. Isso é importante, pois a dinâmica da umidade em meios porosos é extremamente lenta e, dependendo da configuração e dos materiais componentes do elemento poroso, do conteúdo de umidade inicial e das condições de contorno, esse período pode ser superior a 3 anos. Ainda nesse quadro *warm-up*, define-se o período de ajuste fino. Esse período é simulado com o mesmo passo de tempo definido no quadro *parameters* e serve para ajustar os perfis de conteúdo de umidade e de temperatura de forma mais precisa para o verdadeiro início da simulação.

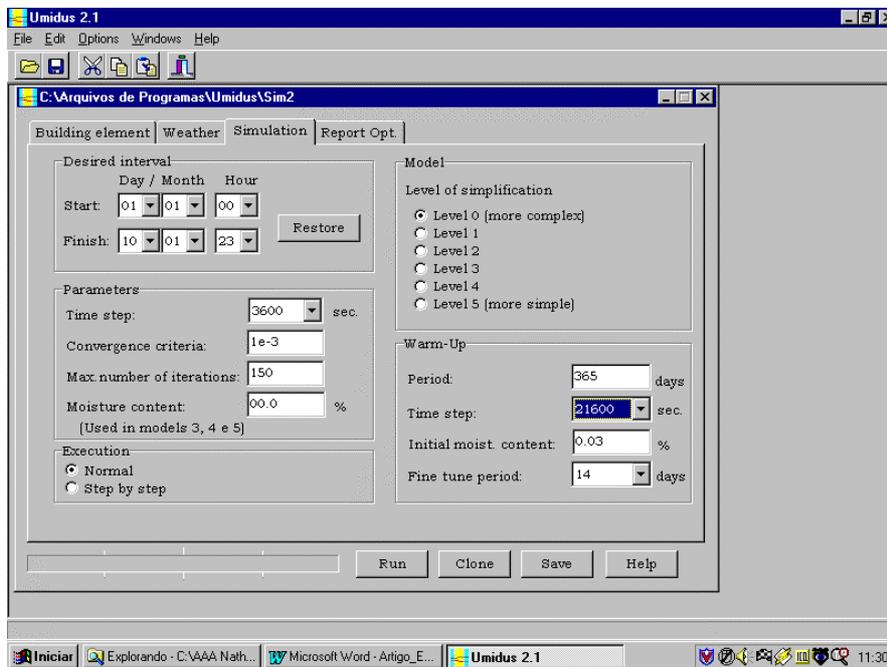


Figura 5: Janela *Simulation* – *UMIDUS* 2.1

5. RESULTADOS GERADOS PELO *UMIDUS 2.1*

UMIDUS gera perfis de temperatura, conteúdo de umidade e fluxos de calor e massa dentro e através da parede. O período de tempo nos quais esses resultados são necessários é informado pelo usuário.

Os resultados de simulações no *UMIDUS* são apresentados na forma de 6 gráficos. O gráfico *Behaviour*, Fig. 6, mostra o valor médio mensal de temperatura e conteúdo de umidade no nodo central do elemento.

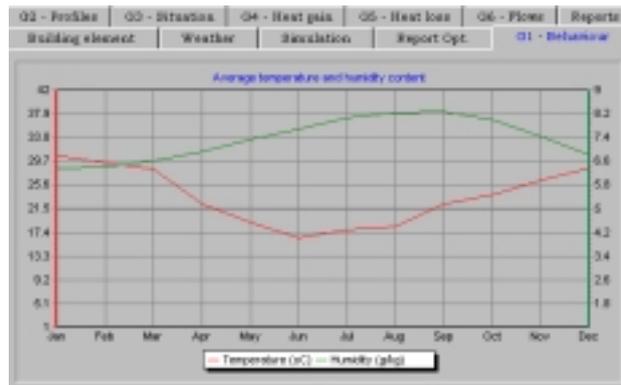


Figura 6: Gráfico de saída 1: *Behaviour*

O gráfico *Profiles*, apresentado na Fig. 7, mostra os perfis de temperatura e conteúdo de umidade em uma hora, dia e mês específico, selecionados na janela de opções de relatórios, na seção de dados de entradas. O usuário seleciona a hora a ser mostrada, destacando uma data da lista à esquerda da janela.

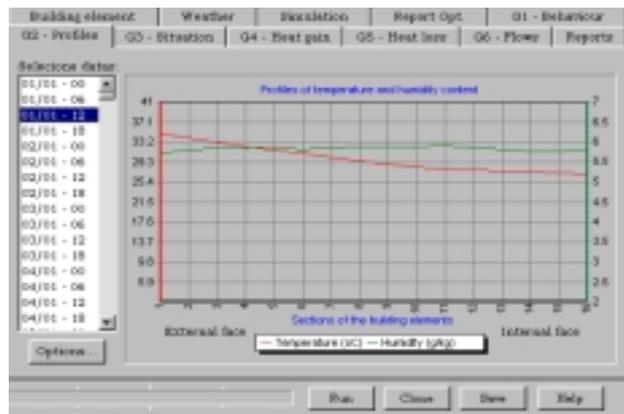


Figura 7: Gráfico de saída 2: *Profiles*

O eixo x é dividido no número de nós no elemento construtivo, e a temperatura e conteúdo de umidade em cada nó é exibida. A escala de temperatura é à esquerda, a escala de conteúdo de umidade à direita.

O gráfico *Situation*, Fig. 8, exhibe temperaturas e conteúdos de umidade nas faces externa e interna do elemento construtivo e no nodo central

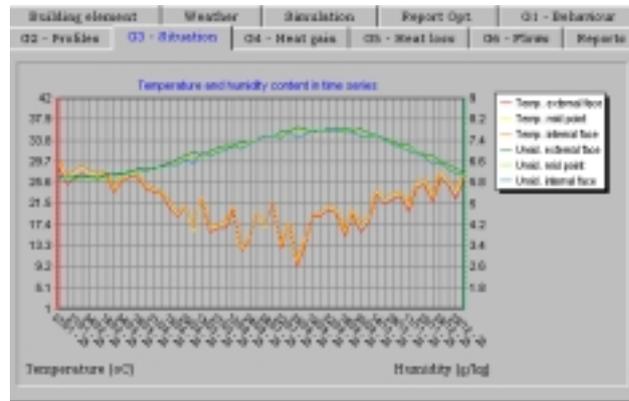


Figura 8: Gráfico de saída 3: *Situation*

Os gráficos *Heat Gains* e *Heat Loss* (Fig. 9 – Apenas o ganho está mostrado nessa figura), mostram o fluxo mensal de calor através do elemento construtivo do exterior para o interior (fluxo de calor positivo) e o fluxo mensal de calor através do elemento construtivo do interior para o exterior (fluxo de calor negativo). As porcentagens de ganho ou perda de calor devido ao calor latente também são apresentadas.

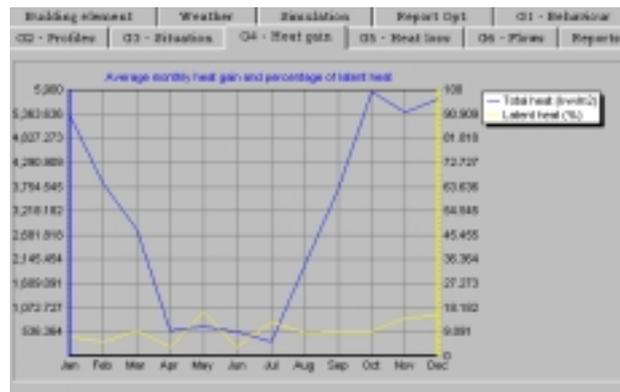


Figura 9: Gráfico de saída 4: *Heat Gain*

Apresenta-se na Tabela 2, resultados de simulação para um elemento poroso vertical composto de 10 cm de tijolo e 2 cm de argamassa em cada face do tijolo em um recinto de um prédio não-condicionado na cidade de Fortaleza-CE em termos de fluxo de calor, conteúdo de umidade e temperatura no centro da parede. O subscrito p representa o fluxo de calor indo de fora para dentro e vice-versa para o subscrito n.

Nota-se pela Tab. 2 que o fluxo de calor tanto sensível como latente passa, na maior parte do tempo, de fora para dentro, uma vez que Fortaleza é uma cidade predominantemente quente e que o conteúdo de umidade é alto durante o inverno já que a diferença de concentração de vapor entre a superfície da parede e o ar é mais baixa devido principalmente à redução de temperatura.

Tabela 2: Fluxos de calor integrados no mês (Q), conteúdo de umidade médio da parede (θ) e temperatura no centro da parede (T) na cidade de Fortaleza

Mês	$Q_{s,p}$	$Q_{s,n}$	$Q_{l,p}$	$Q_{l,n}$	θ	T
Jan	2.072	-0.139	0.198	-0.024	5.07	32.93
Fev	1.764	-0.125	0.132	-0.039	5.14	32.88
Mar	1.985	-0.104	0.094	-0.058	5.38	31.48
Abr	1.350	-0.102	0.054	-0.068	5.89	29.95
Mai	0.865	-0.543	0.045	-0.080	6.34	28.64
Jun	0.249	-1.597	0.052	-0.079	6.78	26.92
Jul	0.281	-1.379	0.055	-0.060	7.00	26.89
Ago	0.238	-1.896	0.126	-0.009	7.02	27.28
Set	0.365	-0.678	0.146	-0.008	6.78	29.05
Out	1.057	-0.098	0.297	-0.001	6.23	31.27
Nov	2.009	-0.070	0.296	-0.005	5.56	32.72
Dez	1.834	-0.157	0.213	-0.019	5.23	33.60

6. DISCUSSÕES

Apresentou-se, neste artigo, a nova aptidão do *UMIDUS* 2.1 que permite escolher o passo de tempo tanto para simulação como para o período denominado *warm-up* na nova janela *Simulation*. Esse período de *warm-up* serve como tempo para adequação das condições iniciais tanto para o perfil de conteúdo de umidade como para o de temperatura, e é dividido em duas partes. A primeira parte, trata-se de um ajuste para simulações de longo período onde pode-se usar passos de tempo da ordem de até 24h, enquanto a segunda parte, trata-se de um ajuste do tipo sintonia fina que também pode ser definido pelo usuário, porém com passo de tempo igual ao da simulação.

Para estudo anual de comportamento higrotérmico de uma parede de tijolo na cidade de Belém (quente/úmido) com passo de tempo de 3600s, obteve-se um tempo de simulação reduzido da ordem de 40% e com erros inferiores a 1% nos valores médios de conteúdo de umidade e de temperatura. Isso deve-se a utilização de passos de tempo de 24h e a robustez do módulo solucionador do *UMIDUS* que permite simulações com altos passos de tempo por resolver de forma simultânea as equações governantes do problema.

7. CONCLUSÕES

Os modelos apresentados aqui para o *UMIDUS* permitem facilmente avaliar a performance higrotérmica de elementos construtivos através do cálculo simultâneo de transferência de calor e massa.

A inserção do quadro *Warm-up* na janela de simulação, mostrou-se extremamente útil, permitindo a redução do tempo de simulação e mantendo a precisão de cálculos. Em simulação anual de elementos porosos de grande geometria, com um grande número de poros pequenos, é

extremamente importante a utilização de valores altos para o passo de tempo, pois em muitos casos, esse período de adequação de condições iniciais ao problema pode ser superior a 3 anos.

O próximo passo com o *UMIDUS* (versão 2.2) será a inclusão de rotinas de cálculo, desenvolvidas por Mendes (1997) em sua tese de doutoramento, que permitam a determinação de todos os coeficientes de transporte de massa e de calor a partir de dados básicos tais como distribuição de tamanho de poros, isoterma de adsorção e condutividade térmica para o meio seco.

Concluindo, *UMIDUS 2.1* é um *software* amigável, que pode ser usado para o estudo de comportamento higrotérmico de elementos porosos de edificações, auxiliando arquitetos e engenheiros em tomada de decisões que envolvam aspectos como consumo de energia, conforto térmico, degradação de materiais e de fatores associados a saúde, como a presença e a geração de mofo.

REFERÊNCIAS

ASHRAE, 1993, Handbook-Fundamentals. Atlanta, USA.

Burch D.M. and Thomas W.C., 1991, "An Analysis of Moisture Accumulation in Wood Frame Wall Subjected to Winter Climate", NISTIR 4674, Gaithersburg, MD: National Institute of Standards and Technology.

Clarke, J.A. , 1985, Energy Simulation in Building Design, Adam Hilger Ltd, USA.

Kerestecioglu A. and Gu L. , 1989, "Incorporation of the Effective Penetration Depth Theory into TRNSYS", Draft Report, Florida Solar Energy Center, Cape Canaveral, Florida, USA.

Mendes N., 1997, "Modelos para Previsão da Transferência de Calor e de Umidade em Elementos Porosos de Edificações", Tese de Doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, Florianópolis.

Mendes N., Ridley I., Lamberts R., Philippi P.C. and Budag K., 1999, Umidus: A PC program for the Prediction of Heat and Mass Transfer in Porous Building Elements, International Conference on Building Performance Simulation (IBPSA '99), Japan.

Patankar S.V. , 1981, Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, McGraw-Hill.

Yazdanian M. and Klems J.H. , 1994, "Measurement of the Exterior Convective Film Coefficient for Windows in Low-Rise Buildings", ASHRAE Transactions 100(1), USA.

THE UMIDUS PROGRAM RELEASE 2.1 AND THE CPU TIME REDUCTION FOR LONG TERM SIMULATIONS

Resumo. *This paper presents the Umidus program r2.1 which has been developed to model coupled heat and moisture transfer within porous media, in order to analyze hygrothermal performance of building elements when subjected to any kind of climate conditions. The model predicts moisture and temperature profiles within multi-layer building elements for any time step and calculates heat and mass transfer. We also present the new Umidus 2.1 capability, allowing to speed-up simulations with no loss in accuracy of temperature and moisture content profile determination.*

Keywords: *Processes of heat and moisture transfer, Simulation software, UMIDUS, Porous Media*