



XIENCAC
ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO
NO AMBIENTE CONSTRUIDO

VII ELACAC
ENCONTRO LATINO AMERICANO DE CONFORTO
NO AMBIENTE CONSTRUIDO

Búzios - RJ - 2011

VALIDAÇÃO DE SIMULAÇÕES COMBINADAS USANDO PROGRAMAS DE SIMULAÇÃO DE ENERGIA DO EDIFÍCIO E PROGRAMAS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR, AR E UMIDADE EM COMPONENTES CONSTRUTIVOS

Daniel Cóstola (1); Bert Blocken (2); Jan L.M. Hensen (3)

(1) PhD, Pós doutorando do Departamento de Arquitetura, Edificação e Planejamento, D.Costola@tue.nl, Eindhoven University of Technology, Building Physics & Systems group, Eindhoven

(2) PhD, Professor do Departamento de Arquitetura, Edificação e Planejamento, B.Blocken@tue.nl Eindhoven University of Technology, Building Physics & Systems Group, Eindhoven

(3) PhD, Professor do Departamento de Arquitetura, Edificação e Planejamento, J.Hensen@tue.nl Eindhoven University of Technology, Building Physics & Systems Group, Eindhoven

RESUMO

Desempenho higrotérmico dos edifícios tem sido estudado usando uma variedade de programas de computador, os quais consideram determinados domínios geométricos (exterior, envelope e interior) e físicos (calor, ar e umidade). Estes programas podem ser classificados em três principais grupos: programas de simulação de energia do edifício (BES), transferência de calor, ar e umidade em componentes construtivos (BEHAM) e dinâmica de fluidos computacional (CFD). A falta de integração entre esses programas constitui uma importante fonte de incerteza em simulações do desempenho higrotérmico do edifício. Trabalhos recentes apresentaram mecanismos para a simulação combinada de programas BES e BEHAM. Na simulação combinada, os programas são executados em paralelo, trocando informações durante o curso da simulação, de forma a aprimorar a qualidade de ambas as simulações. O presente artigo apresenta a validação inicial de simulações combinadas usando BES e BEHAM, utilizando os programas ESP-r e HAMFEM. A validação é realizada através da comparação com soluções analíticas, comparação com resultados de outros modelos e com resultados experimentais. Simulações combinadas usando BES e BEHAM demonstram grande melhoria na qualidade dos resultados, em particular com relação ao cálculo da umidade relativa no interior do edifício.

Palavras-chave: BES, BEHAM, simulação combinada, simulação acoplada, desempenho higrotérmico.

ABSTRACT

Heat, air and moisture (HAM) performance of buildings has been studied in the past using a variety of computer models, which are focused on specific geometrical and physical domains. These programs can be classified in three main types: building energy simulation (BES), building element heat, air and moisture simulation (BEHAM) and computational fluid dynamics (CFD). The lack of integration between these programs constitutes a major source of uncertainty in whole-building HAM simulations. This paper presents the initial validation of a generic framework for two-way coupling of two of these program types: BES and BEHAM. The BES program ESP-r and the BEHAM program HAMFEM are used to demonstrate the implementation of this generic framework. Validation is carried out through comparison with analytical solutions, inter-model comparison and experimental results, where the BES-BEHAM coupled simulations demonstrate major improvements in the accuracy of results when compared to stand-alone simulations, particularly concerning the prediction of moisture content in the indoor air.

Keywords: BES, BEHAM, external coupling, co-simulation, heat-air-moisture performance.

1. INTRODUÇÃO

O desempenho higrotérmico dos edifícios tem sido estudado usando uma variedade de programas de computador, os quais consideram determinados domínios geométricos (exterior, envelope e interior) e físicos (calor, ar e umidade). Estes programas podem ser classificados em três tipos principais: simulação de energia do edifício (BES), transferência de calor, ar e umidade em componentes construtivos (BEHAM) e dinâmica de fluidos computacional (CFD). A falta de integração entre esses programas constituem uma importante fonte de incerteza em simulações do desempenho higrotérmico do edifício (CÓSTOLA et al, 2009).

Programas de BES, tais como Energy Plus, EDSL-TAS, IEV-VE e ESP-r, tem como foco o cálculo da transferência de calor no edifício, de forma a obter as temperaturas no interior do edifício e o consumo de energia necessário para o condicionamento térmico dos mesmos. Estes programas usualmente não apresentam modelos de transferência de umidade nos componentes construtivos, e conseqüentemente não são apropriados para a análise de edifícios ou indicadores de desempenho nos quais a umidade atua como um fator importante da análise (CÓSTOLA et al, 2009).

Programas de BEHAM, tais como WUFI, HAMFEM, CHAMPS, DELPHIN e UMIDUS, tem como foco a transferência de calor e umidade em componentes construtivos. Tais programas são capazes de calcular com precisão a distribuição de temperatura e umidade nos componentes do envelope edifício, contudo, os resultados são restritos a um único componente do envelope. Programas de BEHAM também apresentam grandes deficiências com relação às condições de contorno no interior do edifício, as quais podem ser em grande parte calculadas por programas de BES (CÓSTOLA et al, 2009).

Programas de BES e BEHAM são usualmente desenvolvidos separadamente, e diversas iniciativas tem sido feitas no sentido de expandir as capacidades de programas BES e BEHAM, como por exemplo o desenvolvimento do programa PowerDomus. Tais esforços são importantes para o aprimoramento das simulações higrotérmicas do edifício, contudo eles envolvem grandes investimentos no desenvolvimento de códigos, sua verificação e validação. Como alternativa a esta abordagem, trabalhos recentes apresentam mecanismos para combinar as capacidades de programas de BES e BEHAM já existentes, de forma a utilizar o conhecimento e o trabalho embutidos nestes programas (CÓSTOLA et al, 2009; CÓSTOLA, 2011).

Mecanismos para a simulação combinada usando programas BES e BEHAM foram apresentados por Cóstola et al. (2009) e Cóstola (2011). Contudo, a validação de tais mecanismos é essencial para que os mesmo sejam empregados na solução de problemas de projeto ou no desenvolvimento de pesquisas sobre desempenho higrotérmico.

2. OBJETIVO

O objetivo deste artigo é apresentar a validação do procedimento para simulações combinadas usando programas de BES e BEHAM, implementada usando os programas ESP-r e HAMFEM (CÓSTOLA et al, 2009). Para tanto, as próximas 3 seções deste artigo apresentam exercícios de validação em ordem crescente de complexidade. Em cada seção, uma breve descrição do problema abordado no exercício é apresentada, seguida dos métodos empregados nas simulações e dos resultados obtidos para o exercício.

3. SOLUÇÃO ANALÍTICA DO BALANÇO DE UMIDADE EM CONDIÇÕES ISOTÉRMICAS

3.1. Definição do problema

O primeiro passo para a validação da simulação combinada usando BES e BEHAM foi a comparação com duas soluções analíticas para transferência de umidade em condições isotérmicas, formuladas por Thomas Bednar e Hagentoft Carl-Eric (Woloszyn e Rode 2008). Figura 1 mostra informações sobre o edifício e dados de entrada utilizados na solução do balanço de umidade na sala, fornecendo a variação da umidade relativa do ar no recinto em função do tempo. A umidade é liberada na sala de acordo com o perfil na Figura 2 e é removida do recinto por uma taxa fixa de renovação de ar de 0,5 trocas por hora. Aqui, utilizou-se apenas a solução para o enésimo dia, quando o problema atinge regime estacionário. Soluções analíticas estão disponíveis em dois cenários: um sem abatimento da variação diária de umidade devido à presença de materiais higroscópicos (superfícies impermeáveis) e outro com materiais higroscópicos

(apenas as superfícies externas são impermeáveis). No caso sem materiais higroscópicos, os resultados obtidos utilizando apenas o programa ESP-r e aqueles obtidos com a simulação combinada usando BES e BEHAM são idênticos (para um intervalo de tempo de 1 minuto), portanto, apenas os resultados do programa ESP-r são relatados. Para o caso com materiais higroscópicos, tanto os resultados obtidos utilizando apenas o programa ESP-r quanto aqueles obtidos com a simulação combinada usando BES e BEHAM são relatados.

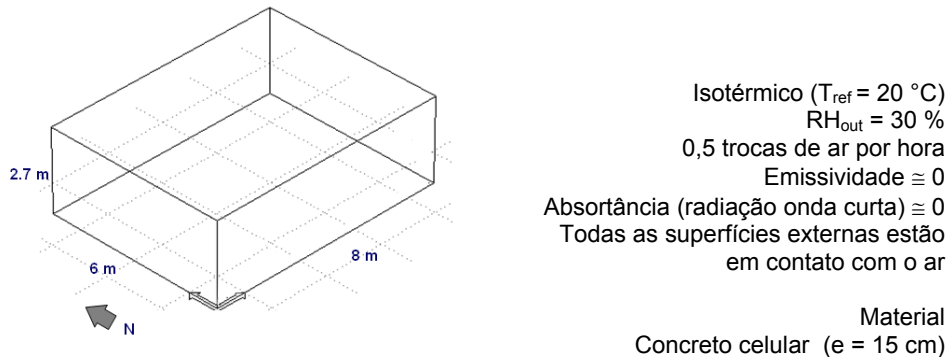


Figura 1 . Edifício e dados de entrada utilizados nas soluções analíticas em condições isotérmicas

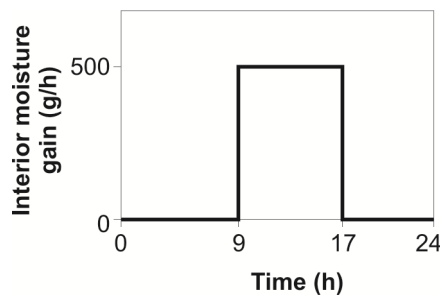


Figura.2 . Perfil de umidade liberada no recinto

3.2. Resultados

Figura 3 mostra o resultado para o caso sem abatimento da variação de umidade devido à presença de materiais higroscópicos, no qual nota-se que o programa ESP-r reproduz a solução analítica. Os resultados mostram um aumento contínuo na umidade relativa durante o período com liberação de umidade na sala (das 9:00 às 17:00), levando a um máximo de cerca de 73% de umidade relativa e, depois disso, a umidade relativa na sala começa a diminuir até atingir o equilíbrio com as condições externas, com umidade relativa de 30%. Figura 4 mostra os resultados para o caso com abatimento da variação de umidade devido à

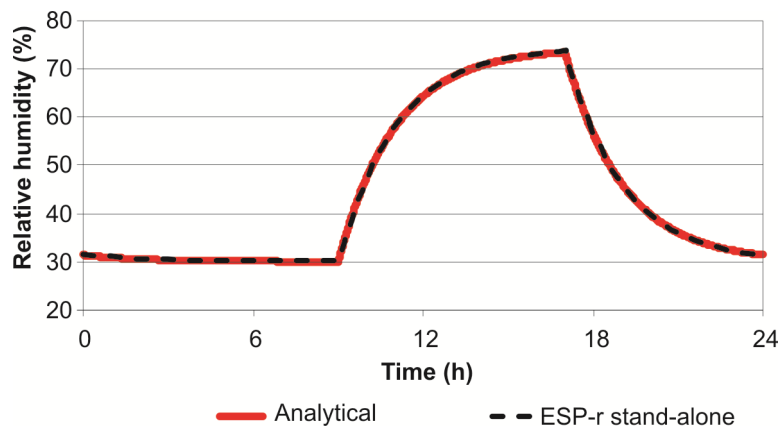


Figura.3 . Umidade relativa do ar num recinto sem materiais higroscópicos

presença de materiais higroscópicos, onde uma boa concordância é observada entre a solução analítica e a simulação combinada usando BES e BEHAM. Resultados do programa ESP-r não levam em conta a presença de materiais higroscópicos e, conseqüentemente, apresentam grandes desvios em relação à solução analítica. Cabe notar que o abatimento na variação de umidade neste problema é significativo, reduzindo a variação diária na umidade relativa de cerca de 43% para menos de 10%, ou seja, um abatimento de aproximadamente 75% na variação diária. Isso significa que o ESP-r superestima a amplitude da variação diária de umidade por um fator igual a 4.

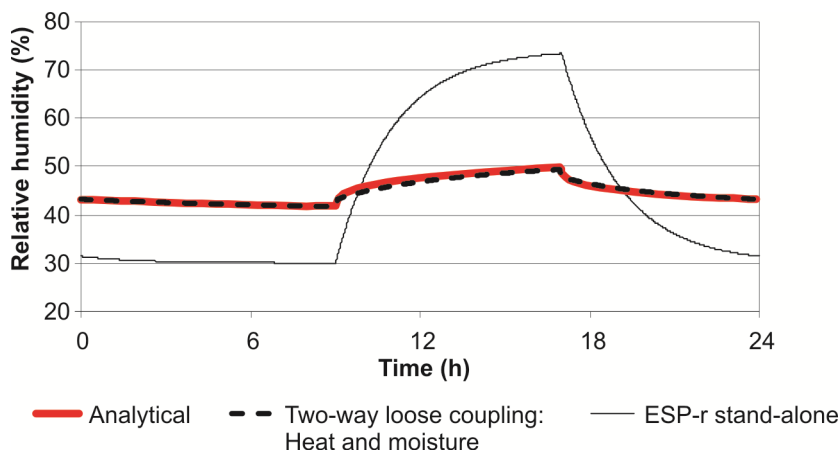


Figura 4 . Umidade relativa do ar num recinto com materiais higroscópicos

4. COMPARAÇÃO ENTRE MODELOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR E UMIDADE NOS DOMÍNIOS SÓLIDO E FLUIDO EM UM RECINTO CÚBICO

4.1. Definição do problema

Soluções analíticas para problemas de transferência combinada de calor e umidade no edifício não são conhecidas. No entanto, é possível utilizar programas de simulação numérica amplamente validados e de alta resolução para obter soluções aproximadas para uma variedade de casos simplificados, ou mesmo de problemas complexos (Neymark e Judkoff 2008). Tais soluções aproximadas podem ser utilizadas no processo de validação de outros modelos, representando uma etapa intermediária entre simples soluções analíticas e complexos experimentos em edifícios reais. O exercício apresentado nesta seção faz uso de tal abordagem, apresentando os resultados obtidos com um modelo validado de transferência de calor e umidade implementado no programa de dinâmica dos fluidos computacional (CFD) FLUENT (Steehan et al. 2009). Tal modelo, denominado CFD-HAM, foi utilizado para resolver um problema relativamente simples de transferência conjugada de calor e umidade nos domínios sólidos e líquidos. O problema sob análise é a propagação de calor e umidade em um pequeno cubo submetido a uma variação em uma das fronteiras sólidas, como representado esquematicamente na Figura 5. O problema é inicializado com todos os elementos a 30 °C e 30% de umidade relativa. Uma das fronteiras sólidas é mantida nesta condição, enquanto a fronteira oposta é submetida a um aumento de 30 °C para 50 °C. As demais superfícies são adiabáticas. O interior do cubo é preenchido de ar e todas as paredes são compostas de tijolo com uma espessura de 8 cm. Resultados descrevem a variação de temperatura e umidade absoluta para as primeiras quatro horas após a mudança na temperatura da fronteira sólida. Resultados foram comparados tanto para o estado médio do ar interior quanto para o estado médio da superfície interna da parede onde o aumento de temperatura é aplicado. Por se tratar de um problema de convecção livre, este problema é particularmente sensível aos coeficientes de trocas de calor e de massa por convecção, que são geralmente identificados como uma importante fonte de incerteza em simulação do desempenho do edifício. Por esta razão, tanto a simulação com o programa ESP-r quanto a simulação combinada usando BES e BEHAM utilizaram coeficientes especificamente determinados para este problema, obtido com base em simulações CFD validadas e disponíveis na literatura (MIRSADEGHI et al. 2008).

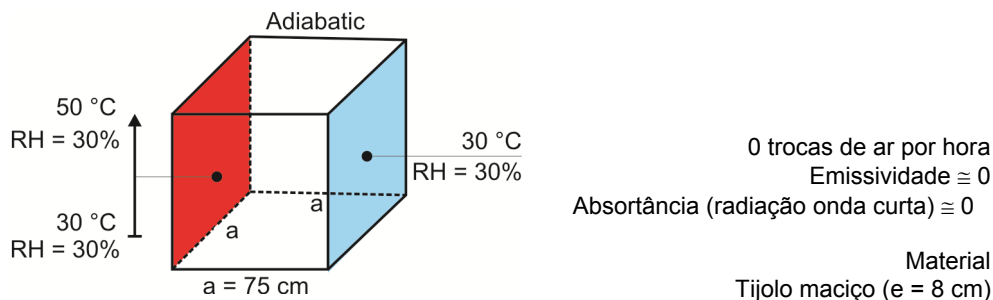
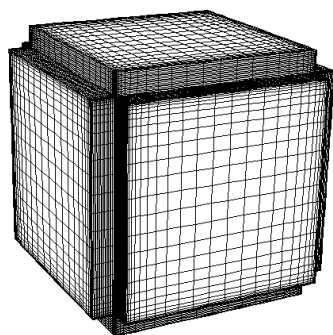


Figura 5 . Esquema do recinto e das condições de contorno utilizados na comparação entre os resultados das simulações com o modelo CFD-HAM e das simulações combinadas usando BES e BEHAM

4.2 Configuração das simulações de CFD-HAM

As simulações CFD-HAM foram realizadas utilizando o software comercial FLUENT, acrescido de um modelo de transferência de calor e umidade em sólidos (BEHAM), programado usando a linguagem de programação do programa FLUENT (UDFs) (STEEMAN et al. 2009). O programa FLUENT é responsável pelo cálculo do domínio fluido e pela solução das equações de transporte definido no modelo BEHAM. Este modelo descreve a transferência de calor e umidade em 3D, em todo o domínio (líquido e todos os elementos sólidos). A Figura 6 mostra a malha e as principais configurações utilizadas nas simulações de CFD-HAM, as quais refletem as melhores práticas em simulações de CFD seguidas neste trabalho. O movimento de ar no interior da câmara simulado de acordo com estas configurações foi previamente validado com resultados experimentais (MIRSADEGHI et al. 2008).



Modelo de turbulência: $k-\omega$
 Interface sólido-fluido: *Low-Reynolds modelling*
 Independência dos resultados em relação a malha adotada
 $y^+ < 1$
 Critério de convergência: 10^{-6}

Simulação transiente
 Time step: 0.5 s

Transferência de calor e massa calculada usando um modelo desenvolvido com UDFs (user-defined functions)

Figura 6 . Malha e principais configurações das simulações CFD-HAM

4.3 Resultados

A Figura 7 mostra resultados de umidade absoluta e temperatura em um plano transversal ao cubo, obtidos utilizando CFD-HAM, após simulação relativa a um período de quatro horas. Ambos os resultados mostram um comportamento em conformidade com as expectativas. É possível ver a propagação de calor e umidade na parede esquerda, e seus efeitos no volume de ar e na parede superior. O volume de ar mostra uma distribuição bastante uniforme na umidade, com uma média em torno $9e-3$ (kg de vapor por kg de ar seco). A temperatura varia em torno de 5°C no domínio do fluido, com uma média em torno de 33°C , embora uma pequena zona com elevada temperatura do ar seja visível na parte superior da parede quente. Figura 8 mostra a evolução da umidade média do ar e da superfície interna da parede quente, onde uma boa concordância pode ser observada entre os resultados CFD-HAM e simulação combinada usando BES e BEHAM. Figura 9 apresenta os resultados de temperatura, que também mostram uma concordância muito boa. Conforme descrito anteriormente, esses resultados são altamente afetados por coeficientes convectivos de transferência de calor e, portanto, o uso de CFD em combinação com simulações combinadas usando BES e BEHAM é aconselhável, e deve ser estudado no futuro.

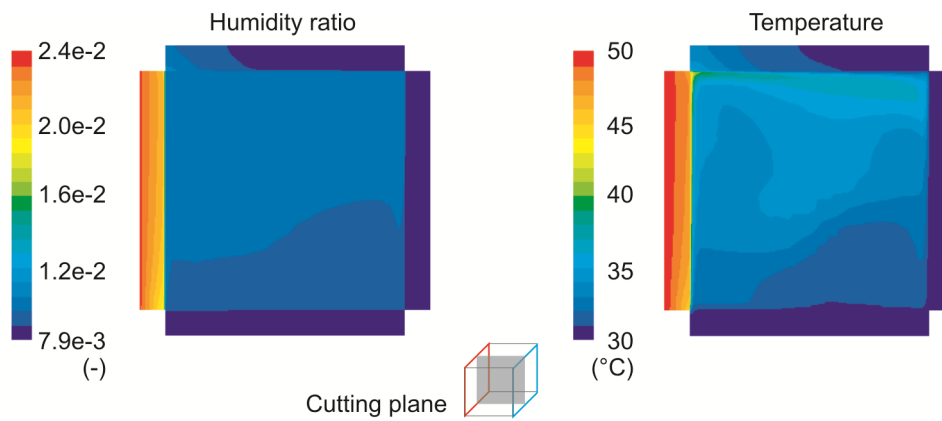


Figura 7 . Resultados de umidade e temperatura da simulação usando CFD-HAM

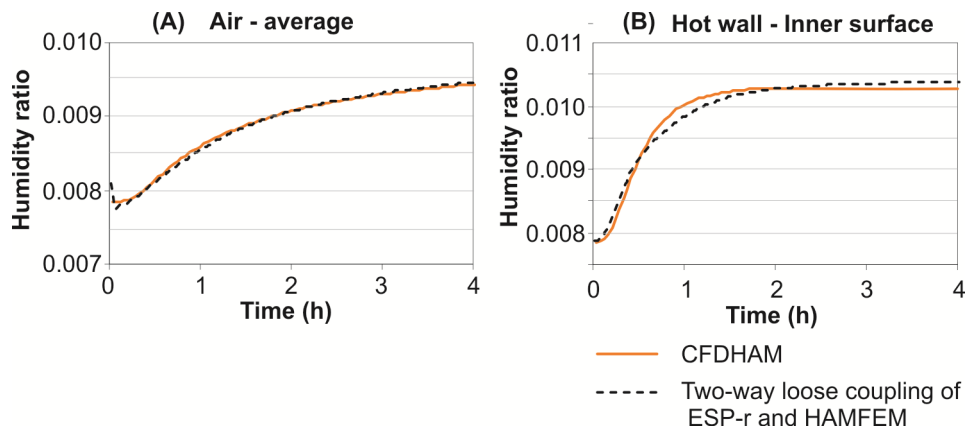


Figura 8 . Resultados de umidade em função do tempo

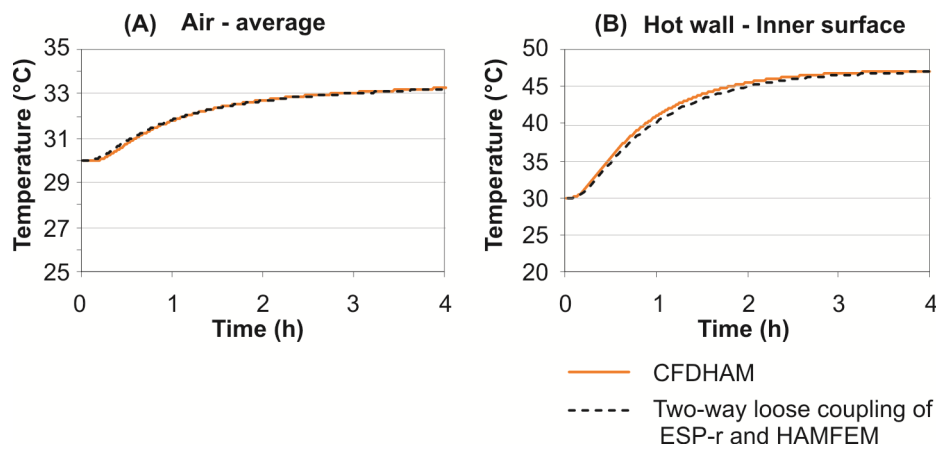
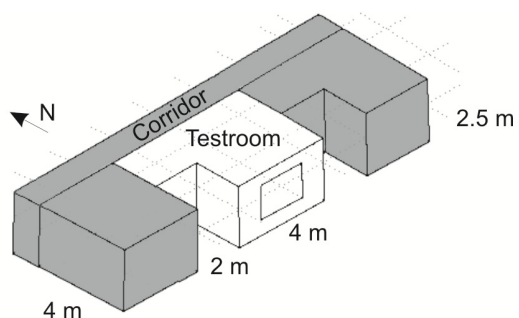


Figura 9 . Resultados de temperatura em função do tempo

5. EXPERIMENTOS EM UMA SALA COM MATERIAL HIGROSCÓPICO

5.1. Definição do problema

O terceiro exercício de validação apresentado neste artigo investiga as variações de umidade relativa em salas experimentais em Holzkirchen, Alemanha (ver Figura 10 e 11) onde uma série de medidas foi realizada durante um projeto organizado pela Agência Internacional de Energia (IEA) (Woloszyn e Rode 2008). Este exercício utiliza apenas o conjunto de medidas em que o acabamento interior da sala é composto de materiais higroscópicos (gesso e acabamento em pintura). A janela é totalmente coberta por um revestimento externo, a fim de evitar qualquer ganho devido à radiação solar. Na descrição dos experimentos, não há informações disponíveis sobre o corredor de acesso da sala de experimental, e a sala é descrita como termicamente independente do corredor. Também não há informações sobre as incertezas de medição.



Local: Holzkirchen, Alemanha
 Fator solar do vidro: 0
 Set-point do sistema de aquecimento: 20 °C
 Capacidade do sistema de aquecimento = 1kW
 0,5 trocas de ar por hora
 Acabamento interno: gesso e pintura

Figura 10 . Sala experimental em Holzkirchen, Alemanha

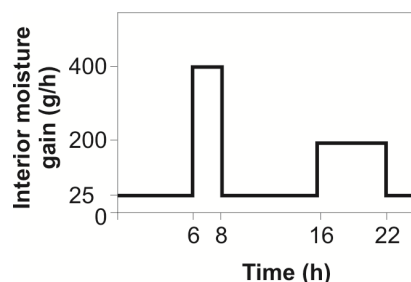


Figura 11 . Fontes de umidade no interior da sala experimental

5.2 Resultados

A Figura 12 mostra a variação da umidade relativa, durante um período de 17 dias. Medições e resultados da simulação combinada usando BES e BEHAM estão em boa concordância na maioria das horas. Diferenças entre as medições e as previsões também são plotadas na Figura 12, e é possível ver que pequenos atrasos nas previsões levam a discrepâncias de até 10% na umidade relativa. No entanto, essas discrepâncias são restritas a apenas uma ou duas horas por dia e estão relacionadas a um pequeno atraso nos resultados da simulação em relação aos resultados experimentais. Os valores mínimo e máximo, bem como a amplitude diária calculada pela simulação combinada usando BES e BEHAM são bastante próximos dos resultados experimentais. Os resultados apresentados na Figura 13 são baseados em uma calibração preliminar do teor de umidade inicial das paredes, feita com base nos primeiros dois dias de medição. O teor de umidade inicial das paredes não foi descrito nos relatórios sobre o experimento, no entanto, testes com as simulações combinadas usando BES e BEHAM demonstraram que este parâmetro é muito importante para a solução deste problema. As discrepâncias entre as soluções calculadas por diversos pesquisadores participantes do projeto da IEA e apresentadas por Woloszyn e Rode (2008) são consistentes com as variações observadas durante a calibração do grau de umidade inicial. Participantes do projeto da IEA não tiveram acesso prévio aos resultados experimentais, portanto, diferente do presente artigo, eles não puderam calibrar suas simulações. Outros dados de entrada que eram candidatos potenciais para a calibração, tais como os coeficientes de transferência de calor e massa por convecção, não foram modificados para esta simulação em particular. Figura 13 mostra resultados de dois dias extraídos da Figura 12, a fim de permitir uma comparação mais detalhada entre as simulações realizadas apenas com o programa ESP-r e as simulações combinadas usando BES e BEHAM. Na figura, as diferenças entre previsões e medições também são apresentadas. Os resultados do ESP-r reproduzem a comportamento geral das medições, contudo, ESP-r superestima de maneira consistente a amplitude das variações diárias na umidade relativa. A relação entre a amplitude diária medidas (m) e a amplitude calculada pelo ESP-r (P) é em média de 0,62. Esta relação mostra uma discordância muito maior do que a razão entre amplitudes diárias medida (m) e as amplitudes calculadas utilizando simulações combinadas usando BES e BEHAM (p), que é em média de 1,1, ou seja, muito próximo da unidade. Pode-se concluir que a utilização de simulações combinadas usando BES e BEHAM aprimora de maneira significativa o cálculo da umidade relativa no ar no interior do edifício.

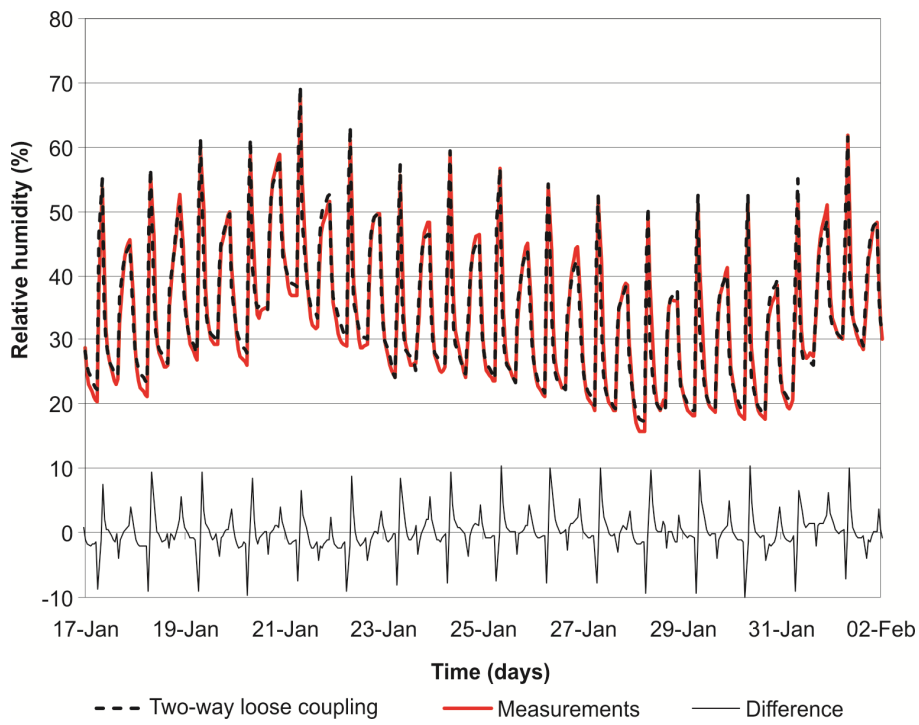


Figura 12 . Variação na umidade relativa (17 dias)

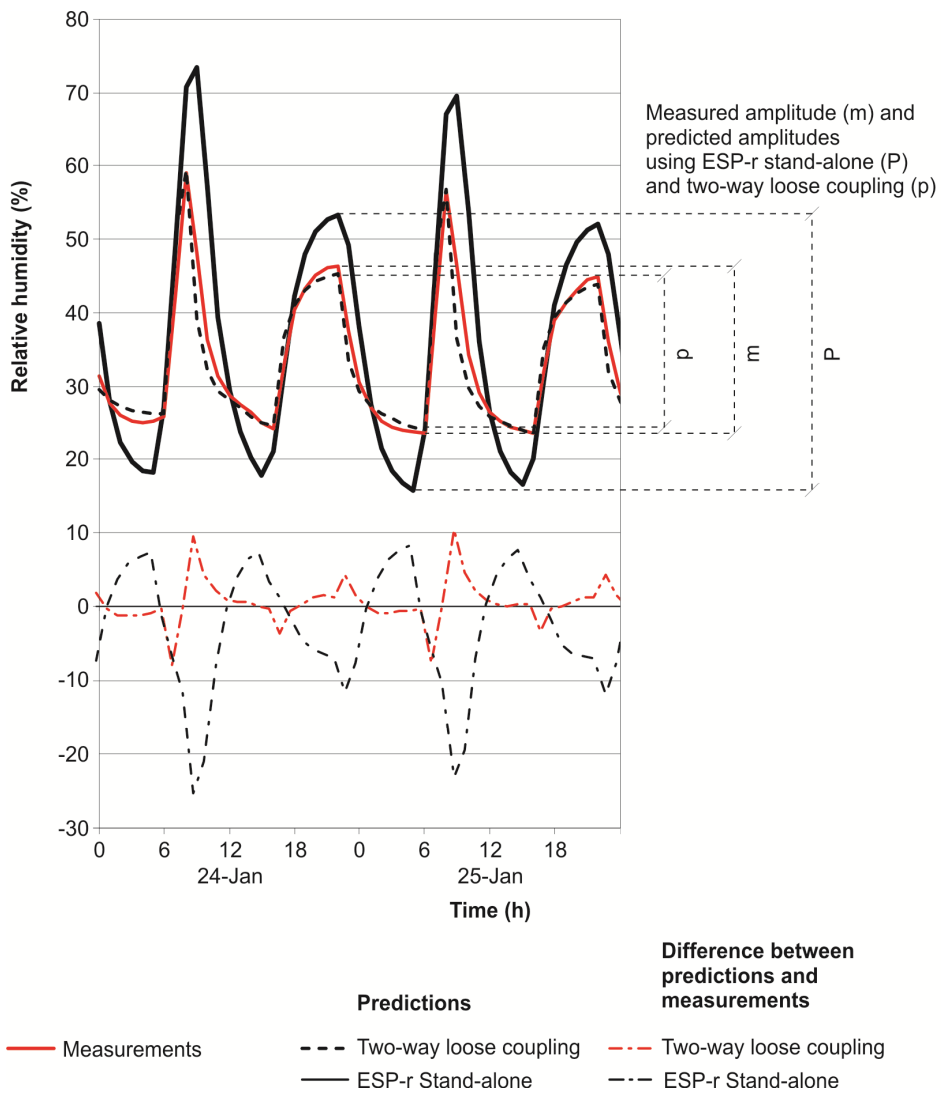


Figura 14 . Variação na umidade relativa (2 dias)

6. CONCLUSÕES

O presente artigo apresenta resultados iniciais da validação de simulações combinadas usando BES e BEHAM para o cálculo do desempenho higrotérmico do edifício. Com base nos dados apresentados neste artigo é possível traçar as seguintes conclusões:

- Simulações combinadas usando BES e BEHAM aprimoram de maneira significativa a qualidade dos resultados, em especial com relação ao cálculo de umidade no interior do edifício,
- Para os casos estudados, o uso de simulações combinadas usando BES e BEHAM não acarreta em grandes diferenças nas temperaturas calculadas,
- O uso de simulações de BES, tais como as do programa ESP-r, leva a resultados de amplitude diária de umidade do ar no interior do recinto muito acima dos resultados observados tanto em soluções analíticas quanto em experimentos.

Futuros trabalhos devem se concentrar na aplicação de simulações combinadas usando BES e BEHAM para a solução de problemas realísticos de desempenho do edifício.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Cóstola, D., Blocken, B., Hensen, J. L. M. 2009. **External coupling of BES and HAM programs for whole building simulation**. In P.A. Strachan, N.J. Kelly, M. Kummert (Eds.), 11th International Building Performance Simulation Conference, 27-30 July 2009, Glasgow, Scotland. (pp. 316-323). Glasgow, Scotland: IBPSA.
- Cóstola, D. **External coupling of building energy simulation and building element heat, air and moisture simulation**. Tese de doutorado, Universidade Técnica de Eindhoven, Países Baixos, 2011.
- Mirsadeghi, M., Blocken, B., Hensen, J. L. M., **Validation of external BES-CFD coupling by inter-model comparison**, Anais da 29th AIVC Conference, Kyoto, 2008.
- Judkoff, R. and J., Neymark (1995). **International Energy Agency building energy simulation test (BESTEST) and diagnostic method**. Report NREL/TP-472-6231. Golden, NREL.
- Steeman, H.-J., **Modelling of local hygrothermal interaction between airflow and porous materials for building applications**, tese de doutorado, Universiteit Gent, 2009.
- Woloszyn, M., Rode, C., **IEA ECBCS Annex 41 Final report - Modelling principles and common exercises**, s.l, 2008.

AGRADECIMENTOS

Esta pesquisa foi financiada pelo governo de Flandres, Bélgica, por meio do “Institute for the Promotion of Innovation by Science and Technology in Flanders”, como parte do projeto SBO- IWT 050154 “Heat, Air and Moisture Performance Engineering: a whole building approach”. Este apoio é altamente apreciado.