APLICAÇÃO DE DIFERENTES MODELOS DE TRANSFERÊNCIA DE MASSA NO ENERGYPLUS

Júlia May Vendrami (1); Martin Ordenes Mizgier (2)
(1) Mestranda do Programa de Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo, juliamvendrami@gmail.com, Universidade Federal de Santa Catarina, Laboratório de Conforto Ambiental, Florianópolis-SC, Tel: (48) 9965-88079
(2) Doutor, professor do Departamento de Arquitetura e Urbanismo, martin.ordenes@ufsc.br, Universidade Federal de Santa Catarina, Laboratório de Conforto Ambiental, Florianópolis-SC

RESUMO
Os modelos de simulações de edificações têm melhorado ao longo dos anos, porém a avaliação da transferência de massa e da umidade no interior das edificações ainda apresenta desafios, como a falta de dados dos materiais. No EnergyPlus existem modelos de balanço térmico e higrotérmico, que consideram ou não a transferência de massa, entre eles o CTF (*Conduction Transfer Function)*, modelo básico do EnergyPlus; EMPD (*Effective Moisture Penetration Depth*) e HAMT *(Combined Heat and Moisture Transfer*), sendo que os dois últimos levam em consideração as propriedades higrotérmicas dos materiais e são considerados adequados para prever a umidade relativa interna e o primeiro não. Este estudo tem como objetivo comparar os resultados obtidos com o uso de diferentes modelos de transferência de calor e massa e com diferentes níveis de renovação do ar, na simulação de uma edificação residencial utilizando o software EnergyPlus 9.3.0, avaliando as diferenças em um clima com alta umidade relativa, na cidade de Florianópolis-SC. Para isso, uma edificação residencial foi modelada e simulada com os diferentes modelos de transferência de calor e massa: CTF, chamado de Referência, EMPD e HAMT. As simulações tiveram como parâmetro a variação da infiltração de ar, sendo considerado 0,3 trocas de ar por hora, 1 troca de ar por hora e 5 trocas de ar por hora. Observou-se que os modelos apresentam maior variação na umidade relativa quanto menor for a taxa de infiltração de ar, aproximando-se mais quando há mais trocas de ar no ambiente. Os resultados de umidade relativa do ar apresentaram grandes diferenças, chegando a 41 pontos percentuais. O modelo HAMT apresentou valores de umidade relativa média anual até 3% maiores que a referência e mais estáveis ao longo do ano do que a referência. O modelo EMPD apresentou valores de umidade relativa média anual até 2% mais baixos que a referência e maior variação dos valores de umidade do que a referência. Os resultados obtidos demonstram a diferença entre os valores utilizando diferentes algoritmos e diferentes taxas de infiltração de ar.

Palavras-chave: simulação computacional de edificações, HAMT, EMPD, Umidade.

ABSTRACT
Building simulation models have improved over the years, but the assessment of mass and moisture transfer inside buildings still presents challenges, such as the lack of material data. In EnergyPlus there are thermal and hygrothermal balance models, which consider mass transfer or not, among them the CTF (Conduction Transfer Function), the basic model of EnergyPlus; EMPD (Effective Moisture Penetration Depth) and HAMT (Combined Heat and Moisture Transfer), the latter two taking into account the hygrothermal properties of the materials and are considered suitable for predicting the internal relative humidity and the first not. This study aims to compare the results obtained with the use of different models of heat and mass transfer and with different levels of air renewal, in the simulation of a residential building using the EnergyPlus 9.3.0 software, evaluating the differences in a climate with high relative humidity, city of Florianópolis-SC. For this, a residential building was modeled and simulated with the different models of heat and mass transfer: CTF, called Reference, EMPD and HAMT. The simulations had as parameter the variation of air infiltration, being considered 0.3 air changes per hour, 1 air change per hour and 5 air changes per hour. It was observed that the models show greater variation in relative humidity the lower the rate of air infiltration, getting closer when there are more air changes in the environment. The results of relative air humidity differences differ, reaching 41 percentage points. The HAMT model presented average annual relative humidity values up to 3% higher than the reference and more stable throughout the year than

the reference. The EMPD model presented mean annual relative humidity values up to 2% lower than the reference and greater variation in the humidity values than the reference. The results obtained demonstrate the difference between the values using different algorithms and different infiltration rates.

Keywords: building simulation, HAMT, EMPD, Humidity.

1. INTRODUÇÃO

Desde os anos 70, com a crise causada pelo choque nos preços do Petróleo e o consequente aumento da preocupação com conservação de energia, os modelos de simulações de edificações têm melhorado com o avanço dos métodos computacionais, procurado levar em consideração a complexidade dos fenômenos físicos envolvidos na avaliação energética de edificações e tentado reduzir a distância entre os resultados das simulações e a realidade (GOFFART et al., 2017). Porém, por mais que os modelos sejam capazes de representar adequadamente a realidade para a maioria dos usos, a avaliação da transferência de massa e da umidade no interior das edificações ainda apresenta desafios, entre eles a falta de dados de umidade de materiais específicos.

O termo transferência de massa é empregado aqui para descrever o movimento relativo de fluidos na envoltória das edificações. O movimento de fluidos pode ocorrer por diferença de gradientes de concentração, de forma análoga à transferência de calor por condução, que é causada por gradientes de temperatura; também pode ocorrer por convecção, de forma análoga à transferência de calor por convecção (INCROPERA et al., 2000). Quando se utiliza o EnergyPlus para simulação, existem modelos de balanço térmico e higrotérmico, que consideram ou não a transferência de massa.

O CTF (do inglês: *Conduction Transfer Function*) é o modelo básico do EnergyPlus para calcular a transferência de calor pelos componentes da edificação, mas sem considerar a transferência de massa. Ele relaciona o fluxo de calor em uma superfície de um elemento com uma série de temperaturas em ambos os lados através de uma equação. A similaridade entre os termos mais significativos da equação possibilita que estes sejam substituídos por termos de histórico de fluxo de calor. A nova solução contém elementos que são chamados de funções de transferência de condução (CTFs).

Assim, com uma equação linear, com coeficientes constantes e relativamente simples, pode-se calcular a transferência de calor por um elemento. Os coeficientes são constantes e só precisam ser determinados uma vez para cada elemento construtivo. O modelo é válido para qualquer superfície e não requer armazenamento de informações para além das próprias equações e um número limitado de termos de temperatura e fluxo de calor. As propriedades necessárias de caracterização dos materiais para uso deste modelo estão na Tabela 1.

O CTF tem algumas limitações. O modelo não é adequado para prever a umidade interna da edificação nem o conforto térmico. Também não irá prever adequadamente o consumo de energia quando a umidade está sendo controlada. Por fim, o modelo não é adequado para análise do teor de umidade em componentes construtivos específicos e os problemas potenciais associados a isso, como a formação de mofo (WOODS et al., 2018).

O EMPD (do inglês: *Effective Moisture Penetration Depth*) é um modelo simplificado de transferência de massa, criado para simular aproximadamente a absorção e perda de umidade na envoltória da edificação, calculando seu efeito no teor de umidade de cada zona. São criadas duas camadas fictícias no material, cada uma com teor de umidade uniforme: uma camada superficial, com resposta mais rápida às mudanças de umidade, e uma camada profunda, que com uma resposta mais lenta permite a simulação do acúmulo de umidade e amortecimento do seu transporte (*moisture buffering*, em inglês). O modelo calcula a transferência de umidade entre o ar e a camada superficial e entre a camada superficial e profunda. Isso afeta principalmente a umidade interna da zona, mas também impacta na temperatura.

Diferentemente do CTF, o EMPD é capaz de prever adequadamente a umidade interna dos ambientes e o consumo de energia quando há controle de umidade. Para isso, os dados de entrada devem ser apropriados (WOODS et al., 2018).

Para a maioria dos materiais de construção, a isoterma de absorção pode ser definida pela Equação 1 (KERESTECIOGLU, 1988). É esta equação que o EMPD utiliza. A isoterma de absorção é uma curva na qual o teor de umidade do material é dado em função da umidade relativa, quando se conhece os quatro coeficientes *a, b, c* e *d*.

$$u = a\phi^b + c\phi^d \qquad \text{Equação 1}$$

Onde:
u é o teor de umidade [kg/kg].
a, b, c e d são coeficientes adimensionais da equação;
ϕ é a umidade relativa [kg/kg].

O HAMT (do inglês: *Combined Heat and Moisture Transfer*) é um algoritmo unidimensional que utiliza análise por elementos finitos para simular o transporte e armazenamento de calor e umidade em componentes construtivos, simultaneamente dos ambientes externos para os internos e vice versa. O HAMT

fornece perfis de temperatura e umidade através das paredes e ajuda a identificar superfícies com alta umidade superficial.

O funcionamento do modelo é baseado nas equações de conservação de calor e massa definidas por Künzel (1995). Cada superfície é dividida segundo os materiais que a constituem e cada camada de um único material é dividida em até 10 células com diferentes espessuras, que são mais finas quando estão próximas aos limites externos, onde espera-se que a maioria das mudanças ocorra. Para determinar a temperatura e a umidade relativa do próximo intervalo de tempo, o programa calcula de forma iterativa o balanço de calor e massa, até atingir a convergência. Desta forma, o HAMT exige significativamente mais capacidade computacional que os outros dois modelos analisados, sendo recomendado para uso avançado e em pesquisas. Todas as propriedades dos materiais necessárias para o HAMT estão descritas na Tabela 1.

Pode-se observar que enquanto no EMPD a isoterma de absorção é definida pelos coeficientes da equação que descreve a curva para cada material, no modelo HAMT a mesma isoterma é descrita a partir de dados experimentais que são os pontos que definem a curva. Assim, para determinados valores de umidade relativa (entre 0 e 1), há um teor de umidade equivalente.

Enquanto o CTF não é adequado para prever a umidade interna das edificações, os modelos EMPD e HAMT garantem cálculos rigorosos do teor de umidade, porém os resultados só serão precisos em relação à realidade se os dados de entrada forem adequados. As propriedades higrotérmicas de materiais específicos são informações escassas na literatura (GOFFART et al., 2015). Os três modelos estão igualmente disponíveis para uso no EnergyPlus, que é um software gratuito.

Além disso, Roels et al. (2004) analisaram os resultados de 14 laboratórios que determinaram a isoterma de absorção e a permeabilidade ao vapor de uma mesma amostra. Mesmo com todos os experimentos sendo realizados de acordo com a normas adequadas, os resultados apresentaram diferenças inaceitáveis para os autores. As curvas de absorção encontradas só possuem uma boa concordância enquanto a umidade estiver abaixo de 80%, quanto maior a umidade, maior a diferença entre as curvas. Por isso, a incerteza dos dados de medição pode diminuir a confiabilidade dos resultados, ainda mais se considerarmos uma cidade como Florianópolis, na qual a média de umidade relativa do ar é maior do que 80%. Mesmo assim, é justamente nestas condições que se torna mais importante a avaliação de umidade nas edificações.

Cascione et al. (2019) avaliam que a melhora dos métodos de avaliação da umidade nas edificações passa pela identificação dos principais fatores que influenciam na umidade, sendo infiltração e ventilação os mais importantes.

2. OBJETIVO

O estudo tem como objetivo comparar os resultados obtidos com o uso de diferentes modelos de transferência de calor e massa e com diferentes níveis de renovação do ar, na simulação de uma edificação residencial utilizando o software EnergyPlus 9.3.0, avaliando as diferenças em um clima com alta umidade relativa, na cidade de Florianópolis-SC.

3. MÉTODO

O método consiste na simulação de uma edificação utilizando diferentes algoritmos de balanço térmico e de massa, com diferentes níveis de renovação do ar e posterior análise dos resultados obtidos. Os parâmetros adotados são descritos a seguir.

3.1. Clima

O arquivo climático utilizado é referente à cidade de Florianópolis-SC, em formato TMY e com dados horários de 2004 a 2018 (Lawrie e Drury, 2019). A cidade de Florianópolis faz parte da Zona Bioclimática 3 (ABNT, 2005) e segundo dados dos arquivos climáticos da cidade, a umidade relativa do ar mantém-se entre 80% e 90% durante a maior parte do ano. O clima subtropical úmido de Florianópolis, com ocorrência frequente de elevada umidade relativa do ar e grande variação de temperatura, é interessante para a pesquisa proposta.

3.2. Geometria do modelo

Este estudo analisa uma residência unifamiliar térrea de dois quartos e um banheiro, com área de 59,57m². As zonas térmicas foram modeladas conforme ambientes da edificação, totalizando quatro zonas. Na Figura 1 pode ser observada a planta baixa com distribuição dos ambientes e na Figura 2 a representação volumétrica da modelagem feita no EnergyPlus. A edificação possui altura de 3m, área de janela entre 15% e

25% da área do piso de cada ambiente e um beiral de 80cm, formando uma proteção solar ao redor de todas as fachadas e um sombreamento das aberturas, conforme recomendações na NBR15220 para a Zona Bioclimática 3 (ABNT, 2005).

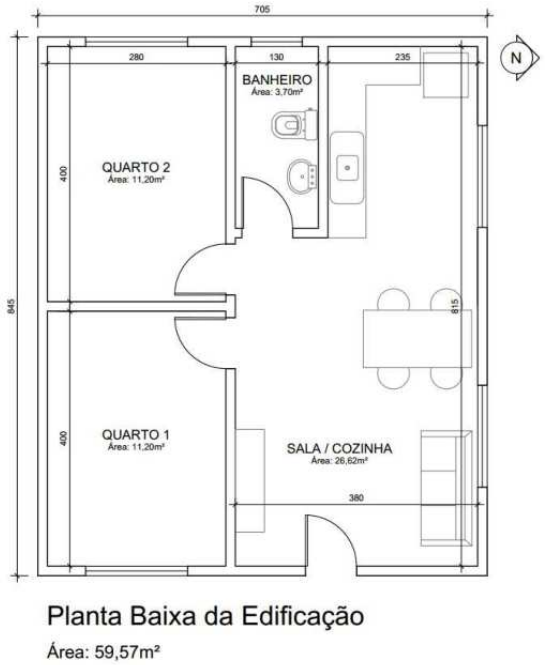


Figura 1- Planta baixa da edificação utilizada no estudo.

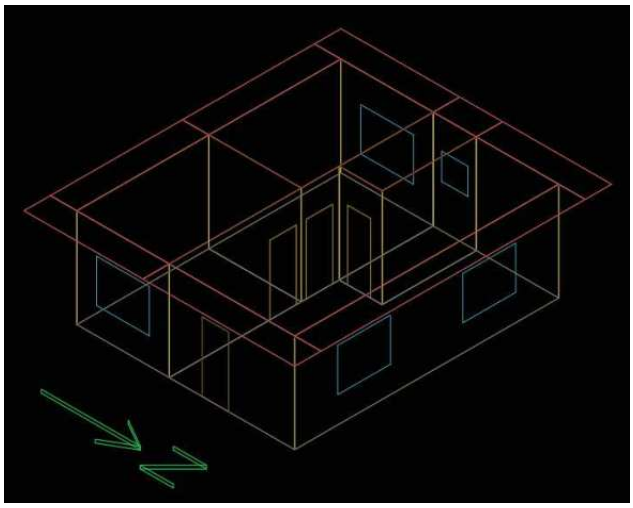


Figura 2 - Perspectiva da edificação modelada.

3.3. Propriedades dos materiais

As características dos materiais utilizados foram definidas conforme a biblioteca de materiais do EnergyPlus e o Anexo 24 da Agência Internacional de Energia (KUMARAN, 1996), de forma a suprir as necessidades de caracterização dos três algoritmos utilizados. A cobertura e o piso da edificação são de concreto, com espessura de 10cm, as paredes são de tijolo cerâmico com 15cm, nas janelas é utilizado vidro transparente 3mm, e nas portas, madeira com 3cm. Os dados necessários para cada um dos modelos e os valores adotados podem ser vistos na Tabela 1.

Para o HAMT, é necessário inserir no modelo dados de cinco curvas para cada um dos materiais. São elas: isoterma de absorção de umidade, curva de coeficientes de transporte de líquidos para sucção e redistribuição, curva de fatores de resistência à difusão de vapor e curva de condutividade térmica. A necessidade de tais informações está indicada na Tabela 1, porém optou-se por não explicitar seus valores no presente trabalho, pois tratam-se de valores que definem curvas, sendo compostas por um conjunto de 4 a 26 valores cada uma delas.

Neste estudo foram usados dados genéricos de materiais que foram caracterizados em laboratórios internacionais, esses dados talvez não sejam compatíveis com os materiais usualmente utilizados no Brasil, principalmente quando trata-se de materiais com maior porosidade e maior variabilidade, como os tijolos cerâmicos. Porém, para as análises que são feitas, as características estão adequadamente determinadas. Recomenda-se que para estudos que necessitam de resultados mais precisos, sejam feitos ensaios nos materiais para determinar as suas propriedades específicas.

3.4. Temperatura do solo

Os valores de temperatura média mensal do arquivo climático foram diminuídos em 2ºC e inseridos no objeto *GroundTemperature*. Outros métodos não se mostraram compatíveis com o modelo HAMT. Por isso este método foi empregado em todas as simulações.

3.5. Situações analisadas

Como a proposta é analisar a diferença entre os modelos de transferência de calor e massa, optou-se por modelar um caso básico, como se a edificação tivesse sido construída e deixada fechada, sem uso. Por isso, não foram adicionadas ao modelo cargas térmicas causadas por pessoas, equipamentos ou iluminação; as

janelas permanecem fechadas, somente com infiltração pelas frestas; não há nenhum tipo de controle de temperatura.

Tabela 1 - Propriedades dos materiais utilizados na simulação.

Propriedades dos materiais	Concreto			Madeira			Cerâmica		
	CTF	EMPD	HAMT	CTF	EMPD	HAMT	CTF	EMPD	HAMT
Espessura [m]		0,1			0,03			0,15	
Condutividade [W/(m.K)]		1,6			0,09			0,09	
Densidade [kg/m³]		2300			455			1600	
Calor específico [J/(kg.K)]		850			1500			920	
Absortância térmica [adimensional]		0,9			0,9			0,9	
Absortância solar [adimensional]		0,7			0,7			0,7	
Absortância visível [adimensional]		0,7			0,7			0,7	
Fator de resistência à difusão de vapor de água do material [adimensional]	-	6,6	-	-	150	-	-	19,59	-
Coeficiente a da equação que define a isoterma de absorção de umidade [adimensional]	-	0,045	-	-	0,204	-	-	0,014	-
Coeficiente b da equação que define a isoterma de absorção de umidade [adimensional]	-	0,352	-	-	2.32	-	-	9,64	-
Coeficiente c da equação que define a isoterma de absorção de umidade [adimensional]	-	0,0859	-	-	0,4300	-	-	0,0246	-
Coeficiente d da equação que define a isoterma de absorção de umidade [adimensional]	-	14,8	-	-	72,0	-	-	0,67	-
Espessura da camada superficial [m]	-	0,008	-	-	0,0011	-	-	0,017	-
Espessura da camada profunda [m]	-	0,03	-	-	0,004	-	-	0,06	-
Espessura da camada de revestimento (se houver) [m]	-	0	-	-	0	-	-	0	-
Fator de resistência à difusão de vapor de água da camada de revestimento (se houver) [adimensional]	-	0	-	-	0	-	-	0	-
Porosidade [m³/m³]	-	-	0,76	-	-	0,73	-	-	0,313
Teor inicial de umidade [kg/kg]	-	-	0,01	-	-	0,05	-	-	0,001
Isoterma de absorção de umidade [kg/m³] em função da umidade relativa [adimensional]	-	-	X	-	-	X	-	-	X
Curva de coeficientes de transporte de líquidos [m²/s] em função do teor de umidade [kg/m³], para sucção	-	-	X	-	-	X	-	-	X
Curva de coeficientes de transporte de líquidos [m²/s] em função do teor de umidade [kg/m³], para redistribuição	-	-	X	-	-	X	-	-	X
Curva de fatores de resistência à difusão de vapor de água em função da umidade relativa [adimensionais]	-	-	X	-	-	X	-	-	X
Curva de condutividade térmica [W/(m.K)] em função do teor de umidade [kg/m³]	-	-	X	-	-	X	-	-	X

Fontes: Documentação do EnergyPlus (DOE, 2020). Anexo 24 da Agência Internacional de Energia (KUMARAN, 1996).

A edificação foi simulada com os diferentes modelos: CTF, chamado de Referência, EMPD e HAMT. O CTF foi utilizado mesmo sendo um modelo que não considera umidade, pois ele é o modelo padrão do EnergyPlus. Com isso, objetiva-se evidenciar as diferenças de valores entre uma modelagem sem considerações específicas sobre umidade e os modelos que consideram a umidade.

Todas as simulações utilizam o mesmo arquivo climático e foram feitas definindo-se como parâmetro a variação de infiltração de ar nas zonas, considerando-se 0,3 trocas de ar por hora, 1 troca de ar por hora e 5 trocas de ar por hora. Optou-se por analisar os dados referentes ao ambiente sala e cozinha, as tabelas e gráficos dos resultados se referem a esta zona térmica. As simulações dos modelos CTF e EMPD demoraram entre 40 e 55 segundos cada, enquanto as simulações utilizando modelo HAMT levaram cerca de 15 minutos

cada, demonstrando que uma das diferenças para o usuário na escolha de um dos modelos é o tempo de simulação, que é significativamente mais elevado para o HAMT.

4. RESULTADOS

A análise será feita a partir dos resultados do ano todo e em seguida será analisada uma semana específica com grandes variações entre os resultados dos modelos.

4.1. Dados anuais

A partir da análise das médias anuais de umidade e temperatura para os três modelos e para diferentes taxas de infiltração (Tabela 2) e da análise das diferenças máximas obtidas entre os modelos (Tabela 3), é possível inferir alguns pontos.

As diferenças entre os valores de umidade relativa do ar são consideráveis. Nas médias anuais, pode-se perceber que o modelo HAMT conduz a resultados com umidade relativa mais alta do que a referência, enquanto o EMPD conduz a resultados com umidade relativa mais baixa do que a referência.

A diferença entre os resultados é inversamente proporcional ao número de trocas de ar por hora. Ou seja, quanto maior a troca de ar, mais os resultados de aproximam, como é possível observar na Tabela 2, na qual para 5 trocas de ar por hora, todos os modelos apresentam umidade relativa anual média entre 77% e 78%, mas se mantém a tendência de umidades mais altas no HAMT e mais baixas no EMPD.

Algo análogo pode ser inferido dos dados da Tabela 3. A diferença máxima entre os modelos é aproximadamente entre 33 e 41 pontos percentuais no ambiente mais vedado (0,3 trocas de ar por hora) e entre aproximadamente 11 e 14 pontos percentuais no ambiente menos vedado (5 trocas de ar por hora), mostrando que com o aumento da infiltração, os resultados dos modelos se aproximam.

Além disso, nas diferenças máximas entre os modelos com 0,3 trocas de ar por hora, percebe-se que apesar da diferença entre a referência e os modelos de transferência de massa chegarem a 40 pontos percentuais, o que é esperado, já que a referência não calcularia adequadamente a temperatura interna; entre os dois modelos que consideram a transferência de massa, as diferenças também são expressivas, chegando a 32 pontos percentuais. Neste ponto com diferença máxima, que ocorre dia 7/10 às 17h, o EMPD resulta em um valor de umidade relativa do ar interno do ambiente de 49% e o HAMT resulta em um valor de 82%.

Se, por exemplo, o objetivo desse estudo fosse analisar a incidência de mofo com o ambiente fechado (com 0,3 trocas de ar por hora) e considerássemos que a probabilidade de formação de mofo aumenta quando a umidade relativa do ambiente está acima de 80%; utilizando o modelo básico de simulação do EnergyPlus obteríamos o resultado de que em 4049 das 8760 horas do ano o ambiente estaria com umidade acima de 80%. Utilizando o modelo HAMT, obteríamos o resultado de que em 3035 horas do ano o ambiente estaria com umidade acima de 80%, a diferença é de mais de 25%. Isso mostra a importância da escolha adequada de modelo no EnergyPlus. Já que a documentação do software informa que o CTF (Referência) é inadequado para análises de umidade e que o HAMT é o modelo que representa melhor a física da transferência de massa, consideramos que o HAMT apresenta resultados mais precisos.

A diferença entre os valores obtidos de temperatura não é significativa. Mas o modelo HAMT resultou em temperaturas ligeiramente mais baixas do que a referência e o modelo EMPD conduziu a resultados ligeiramente mais altos. A maior diferença obtida nos dados horários foi de 1,49 °C, entre os modelos HAMT e EMPD.

Tabela 2 - Umidade e temperatura anual média nos casos analisados.

	Umidade relativa do ar anual média [%]			**Temperatura anual média [°C]**		
	Infiltração [trocas de ar por hora]			**Infiltração [trocas de ar por hora]**		
	0,3	1	5	0,3	1	5
Exterior	81,63			21,07		
Referência	75,48	75.96	77,86	22,57	22,42	21,92
EMPD	73,91	74,69	77,30	22,59	22,43	21,94
HAMT	76,10	76,01	77,90	22,54	22,39	21,90

Tabela 3 – Diferenças máximas entre os resultados de umidade e temperatura obtidos.

	Umidade [pontos percentuais]			Temperatura [°C]		
	Infiltração [trocas de ar por hora]			Infiltração [trocas de ar por hora]		
	0,3	1	5	0,3	1	5
Referência e EMPD	41,01	33,68	14,26	1,25	0,31	0,25
Referência e HAMT	40,52	27,30	11,14	1,41	1,39	1,10
EMPD e HAMT	32,75	24,70	11,66	1,48	1,49	1,20

4.2 Semana escolhida

As Figuras 3, 4 e 5 mostram os resultados de umidade relativa do ar para uma semana do mês de dezembro, sem chuva e com umidade do ar externo média de 72%. A semana apresenta altas temperaturas, porém com umidade relativa mais baixa. Os resultados dos modelos apresentaram bastante variação nesta semana. São apresentados três gráficos, um para cada valor de infiltração.

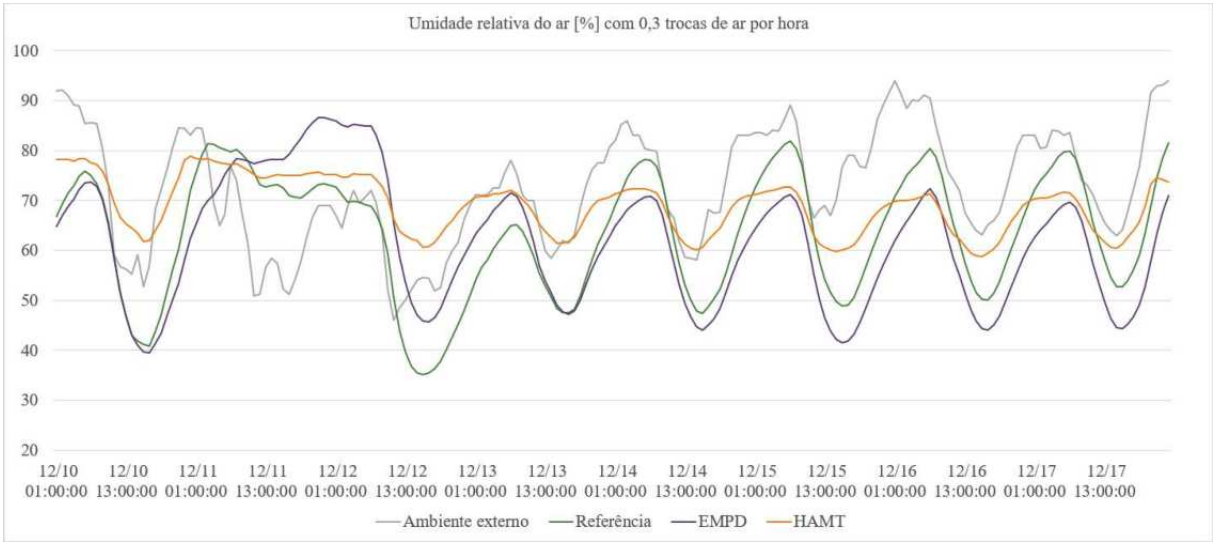


Figura 3 – Umidade relativa do ar [%] com 0,3 trocas de ar por hora.

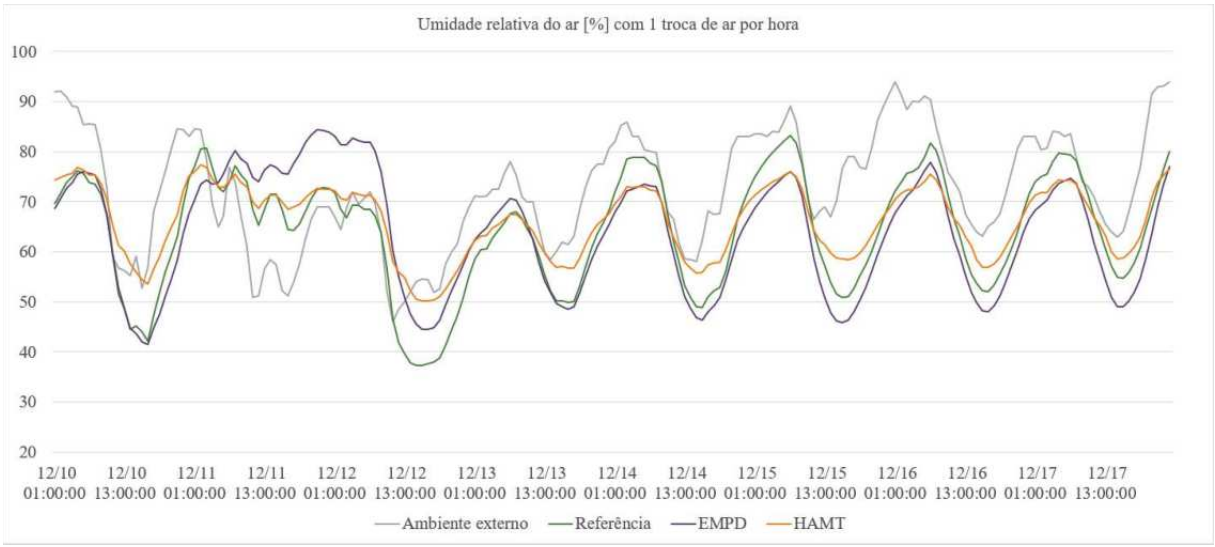


Figura 4 - Umidade relativa do ar [%] com 1 troca de ar por hora.

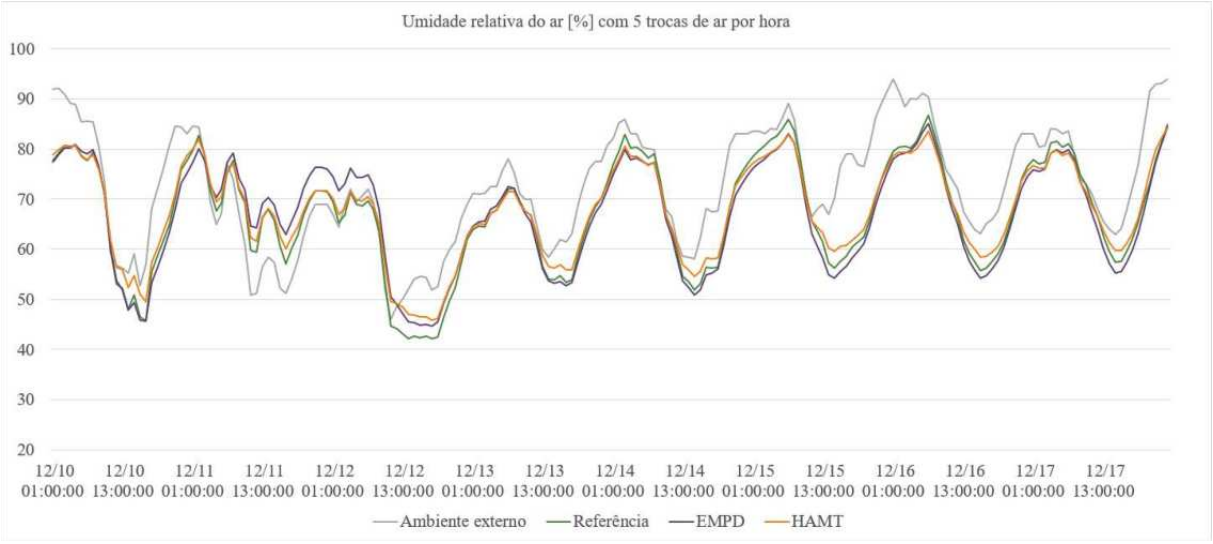


Figura 5 - Umidade relativa do ar [%] com 5 trocas de ar por hora.

É perceptível que com o aumento da infiltração, as curvas se aproximam. Além disso a curva do modelo HAMT, em laranja, é mais estável, apresenta menor variação entre as umidades máximas e mínimas. A estabilidade é mais visível na Figura 3, na qual os valores para o HAMT variaram entre 59% e 79%, enquanto a referência variou entre 35% e 82% de umidade relativa e o EMPD entre 40% e 87%. Mas a tendência se mantém nos outros gráficos e é observada no restante dos dados anuais também.

Nesta semana analisada, a maior diferença entre os modelos foi de 27 pontos percentuais entre o HAMT e a referência. Na Figura 3, no dia 12/12 às 15h, enquanto a referência indica uma umidade relativa do ar de 35%, o HAMT indica 62%.

5. CONCLUSÕES

Observou-se que os modelos apresentam maior variação na umidade relativa quanto menor for a taxa de infiltração de ar, aproximando-se mais quando há mais trocas de ar no ambiente. Os resultados de temperatura apresentaram pequenas variações, que também diminuíram com o aumento das trocas de ar. Mas os resultados de umidade relativa do ar apresentaram grandes diferenças, chegando a 41 pontos percentuais. O modelo HAMT apresentou temperaturas ligeiramente mais altas, valores de umidade relativa média anual até 3% mais altos do que a referência e mais estáveis ao longo do ano do que a referência. O modelo EMPD apresentou temperaturas ligeiramente mais baixas, valores de umidade relativa média anual até 2% mais baixos do que a referência e maior variação dos valores de umidade do que a referência.

Conforme a documentação do EnergyPlus, o CTF não é adequado para análises que envolvam umidade. Porém, o CTF apresentou resultados intermediários, entre o HAMT e o EMPD. Como o modelo HAMT representa melhor a física da transferência de massa, acreditamos que os resultados deste modelo são mais acurados. Isso pode indicar que o modelo EMPD, mesmo sendo indicado para análises envolvendo umidade, gera resultados imprecisos. O estudo mostra que podem ser obtidos resultados bastante diferentes quando se utiliza um modelo inadequado para determinada finalidade. Por exemplo o CTF para análise de umidade. Desta forma, os resultados obtidos demonstram a importância de compreender e utilizar corretamente os diferentes modelos de transferência de calor e massa disponíveis no EnergyPlus de acordo com o objetivo de cada simulação.

Da mesma forma, é importante determinar com cuidado os parâmetros dos modelos de simulação. São necessários mais estudos para que cada vez mais dados sobre os materiais estejam disponíveis e para que as simulações sejam cada vez mais precisas, principalmente as que tem a umidade como um parâmetro importante.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS**. NBR 15220-3**: Desempenho térmico de edificações – Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e estratégias de condicionamento térmico passivo para habitações de interesse social. Rio de Janeiro, 2005.

CASCIONE, Valeria et al. A review of moisture buffering capacity: From laboratory testing to full-scale measurement. **Construction and Building Materials**, v. 200, p. 333-343, 2019.

DOE - Department of Energy U.S. EnergyPlus Documentation. Engineering Reference. 2020.

_____. EnergyPlus v.9-3-0 2020.

GOFFART, J., RABOUILLE, M. and MENDES, N. Uncertainty and sensitivity analysis applied to hygrothermal simulation of a brick building in a hot and humid climate. **Journal of Building Performance Simulation**, p.1-21. 2015.

INCROPERA, Frank P.; DEWITT, David P.; BERGMAN, Theodore L. **Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa** . Grupo Gen-LTC, 2000.

KERESTECIOGLU, Alp et al. **Theoretical and computational investigation of algorithms for simultaneous heat and moisture transport in buildings: Task 2 final report.** Florida Solar Energy Center, Cape Canaveral (USA), 1988.

KUMARAN, M. Iea annex 24 final report, vol. 3, task 3: Material properties. **IEA, Acco Leuven, Leuven**. 1996.

KÜNZEL, H. **Simultaneous heat and moisture transport in building components. One-and twodimensional calculation using simple parameters.** Verlag Stuttgart: Fraunhofer Institute of Building Physics, 65 p. 1995.

LAWRIE, Linda K, DRURY Crawley. Development of Global Typical Meteorological Years (TMYx), 2019. Disponível em: http://climate.onebuilding.org/. Acessado em: 12 de fevereiro de 2021.

ROELS, Staf et al. Reliability of material data measurements for hygroscopic buffering. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 53, n. 23-24, p. 5355-5363, 2010.

WOODS, Jason; WINKLER, Jon. Effective moisture penetration depth model for residential buildings: Sensitivity analysis and guidance on model inputs. **Energy and Buildings**, v. 165, p. 216-232, 2018.