



SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DA UMIDADE: ESTUDO DO DESEMPENHO TÉRMICO DE UMA EDIFICAÇÃO

Michele Soares Netto¹ - michelenetto@live.com

Cesar Antonio Oropesa Avellaneda¹ - cesaravellaneda@gmail.com

Ruth da Silva Brum² - ruthdasilvabrum@gmail.com

Joseane da Silva Porto³ - joseaneclmd@gmail.com

Taís Pereira da Silva² - cagetawi@gmail.com

¹Universidade Federal de Pelotas, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia dos Materiais - Pelotas, RS Brazil

²Universidade Federal de Pelotas, Programa de Pós-Graduação em Modelagem Matemática - Pelotas, RS Brazil

³Universidade Federal de Pelotas, Instituto de Física e Matemática - Pelotas, RS Brazil

Resumo. Nas últimas décadas existe uma grande busca por tecnologias que possam auxiliar no conforto térmico de edificações com o objetivo de obter recomendações para o projeto de diferentes dispositivos empregados no aproveitamento de fontes renováveis de energia e reaproveitamento energético. Neste trabalho buscou-se implementar um modelo computacional que represente condições realísticas de operação de trocadores de calor solo-ar em uma edificação. Usou-se o software EnergyPlus, com o objetivo de avaliar os resultados encontrados para a umidade e temperatura do ar da edificação. Foi criado um arquivo meteorológico para a simulação desta pesquisa. Os resultados são apresentados para dois dias típicos de projeto, um no verão e outro no inverno, afim de comparar o comportamento da edificação em diferentes climas. Observa-se que as temperaturas atingem seus máximos na mesma, ou em próximas, horas do dia tanto no inverno como no verão. A umidade da zona tem uma menor fração de vapor d'água no verão, enquanto que no inverno esse valor chega próximo a 100%. Os resultados são positivos, mostrando que este tipo de simulação pode ser utilizado como uma ferramenta capaz de fornecer e mostrar variáveis importantes nos ambientes das edificações, servindo como um recurso para pesquisadores e profissionais que exigem dados climáticos em sua análise do desempenho do edifício.

Palavras-chave: Simulação computacional, Desempenho térmico, Umidade relativa, Trocador de calor solo-ar (TCSA)

1. INTRODUÇÃO

Busca-se uma temperatura agradável nas edificações, tanto nos dias mais frios, quanto em dias mais quentes. O indivíduo que estiver no ambiente precisa de conforto térmico, pois a

falta deste pode prejudicar algumas atividades a serem desenvolvidas, como relaxar, trabalhar, estudar. O conforto térmico é atingido quando o ocupante não está sentindo nem calor e nem frio. Definido pela ASHRAE (2017), conforto térmico é a condição mental que mostra satisfação com o ambiente térmico externo e é definida subjetivamente, onde seus padrões são especificados por meio da combinação de fatores do ambiente interno e pessoais, garantindo condições aceitáveis para os ocupantes do local, em sua maioria.

O uso da ventilação natural pode ser uma estratégia eficaz de projeto para se atingir bons níveis de conforto térmico nas edificações, Cândido *et al.* (2010). A ventilação natural corresponde na trajetória do fluxo de ar no interior dos ambientes resultante do diferencial de pressão gerado em suas superfícies.

Os materiais utilizados na construção da edificação também contribuem significativamente para o aumento do conforto térmico, por isso a fase de escolha de materiais em uma edificação é de suma importância. Os materiais de construção têm propriedades que em meio a porosidade, podem absorver ou liberar o vapor de água no ar, Bénard *et al.* (2005). A temperatura do ar do ambiente e a umidade relativa afetam o conforto do usuário, a qualidade do ar, o desempenho de aquecimento e também a durabilidade do material de construção.

A edificação em estudo foi construída com materiais existentes na região e materiais reaproveitados, vindos de demolições de outras obras. Construída para estudos experimentais, a edificação se localiza na cidade de Viamão/RS, é chamada de casa Ventura descrita no trabalho de Vaz *et al.* (2011).

O desenvolvimento de sistemas de condicionamento de ar se preocupa em otimizar o espaço necessário para a instalação e a eficiência energética, visando reduzir custos. Uma edificação se torna mais eficiente de modo energético quando apresenta as condições ambientais melhores ou mesmas para seus ocupantes, com um menor consumo de energia (Lamberts *et al.*, 2014).

A análise do desempenho térmico é fundamental para auxiliar em uma melhor escolha dos materiais utilizados na construção. De forma que, seja qual for o padrão da edificação, possa ser construída com a temperatura adequada dos ambientes, independente de temperaturas externas, conseguindo atender as necessidades do cliente e do local da construção.

A simulação computacional é uma ferramenta para prever o comportamento do edifício em projeto (Westphal, 2007). Tornando-se uma alternativa amplamente utilizada para avaliar o desempenho térmico de um edifício, visando o seu aperfeiçoamento ou o aumento da sua confiabilidade.

O software *EnergyPlus* é um simulador térmico computacional de edificações mundialmente conhecido, normalmente é aplicado para avaliar o comportamento térmico de edificações. Ele estima as condições de contorno e é baseado em métodos numéricos buscando fornecer soluções aproximadas para um modelo real (EnergyPlus, 2021). O modelo básico do *EnergyPlus* calcula a condução de calor transiente através da camada de material homogêneo com superfícies de propriedades térmicas constantes, Goffart *et al.* (2017); Strand (1995).

Simuladores computacionais também podem ser usados para gerar dados climáticos internos. A simulação de uma edificação é desenvolvida para prever a clima no interior da edificação para diferentes condições climáticas, características de construção e comportamentos dos usuários, Crawley *et al.* (2008). Estas ferramentas produzem resultados aplicáveis a um modelo em um local específico, mas podem ser útil para analisar o desempenho de edificações em geral, utilizando o arquivo climático da cidade em que a mesma se localiza.

As temperaturas do ar e do solo seguem padrões periódicos de mudança de fase ao longo do ano, dispositivos como os trocadores de calor terra-ar (TCSAs) aproveitam esse fenômeno usando dutos enterrados, onde o ar é soprado para usar o solo como fonte de calor ou sumidouro

(Nóbrega *et al.*, 2020). Desta forma, o ar na saída dos dutos é aquecido no inverno e resfriado no verão. Além do que, o TCSA utiliza ventiladores de potência baixa, reduzindo assim a energia consumida na edificação.

Estudos desenvolvidos nos últimos anos mostrou alto potencial térmico para instalações de TCSAs (Vaz, 2011; Vaz *et al.* 2011 e 2014), estimado também por modelos desenvolvidos em (Brum, 2013; Brum *et al.*, 2012 e 2013). Trabalhos recentes visaram maximizar seu uso em pequenos espaços (Nunes *et al.*, 2015); melhorar seu desempenho usando múltiplos dutos (Rodrigues *et al.*, 2015; Ramalho *et al.*, 2018; Brum, 2016; Brum *et al.*, 2016b e 2019); analisar seus parâmetros construtivos (Brum *et al.*, 2016a). Trabalho realizado por Estrada *et al.* (2018) apresenta a eficiência dos TCSAs em várias regiões do Brasil, demonstrando que climas tropicais também se mostram uma boa opção para a instalação de TCSAs. No trabalho de Brum *et al.* (2019a e 2019b) apresentou resultados do uso de múltiplos dutos. Trabalhos mais recentes de Nóbrega *et al.* (2020) e Domingues *et al.* (2021) mostra modelos analíticos para TCSA na cidade de Pelotas e Rio Grande, as duas localizadas no Sul do Rio Grande do Sul.

Sendo assim, a novidade deste estudo é o desenvolvimento de um modelo mais realístico de um trocador de calor solo ar acoplado em uma edificação. Buscando avaliar a temperatura do ar e umidade dentro e fora desta edificação. Através de simulações computacionais, usando o software *EnergyPlus*, busca-se avaliar os resultados encontrados para a umidade e temperatura do ar de uma edificação, utilizando um arquivo meteorológico criado para esta pesquisa.

2. DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

O arquivo climático usado para a simulação foi da cidade de Viamão, latitude de $-30,04^\circ$ e longitude de $-51,91^\circ$, compreendeu um período anual, do ano de 2007. Este arquivo climático anual foi criado em 2020 para esta pesquisa, com base na reanálise obtendo os dados climáticos através da ERA5 pertencente ao ECMWF (*European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*). O arquivo de entrada usado no *EnergyPlus* contém os seguintes parâmetros: temperatura do bulbo seco, precipitação, umidade relativa, pressão atmosférica, temperatura do ponto de orvalho, direção do vento e velocidade do vento. E a umidade relativa foi calculada utilizando a temperatura do ar e a temperatura do ponto de orvalho, pois a ERA5 não disponibiliza este parâmetro de forma direta.

O estudo foi realizado considerando o clima da cidade de Viamão/RS, onde o modelo do domínio computacional foi desenvolvido com os dados da Casa Ventura, e para esta análise definiu-se essa edificação como residencial, contando com quatro ambientes, com área construída de $40,70 \text{ m}^2$ e um pé direito de $3,05 \text{ m}$. Foram modelados os sistemas construtivos, o uso e a iluminação de acordo com o Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais (RTQ-R), que é a normativa de eficiência energética para edifícios residenciais.

As paredes externas da edificação tem $0,2 \text{ m}$ de espessura, construídas com pedra de grês, rebocadas com $0,03 \text{ m}$ de argamassa. Já as paredes internas tem $0,1 \text{ m}$ de espessura, construídas de tijolos furados, rebocadas dos dois lados com argamassa, com $0,03 \text{ m}$ de espessura cada lado. As portas são de $0,04 \text{ m}$ de madeira de compensado, cuja parte superior é envidraçada com vidro simples; e as janelas fixas de vidro simples de $0,005 \text{ m}$. A cobertura é formada por $0,05 \text{ m}$ de solo argiloso, com as estruturas de madeira de $0,2 \text{ m}$ de diâmetro. O contrapiso tem $0,05 \text{ m}$ de espessura de concreto.

A Fig. 1 detalha a planta baixa mostrando os quatro ambientes, identificados pelo software de zona térmica.

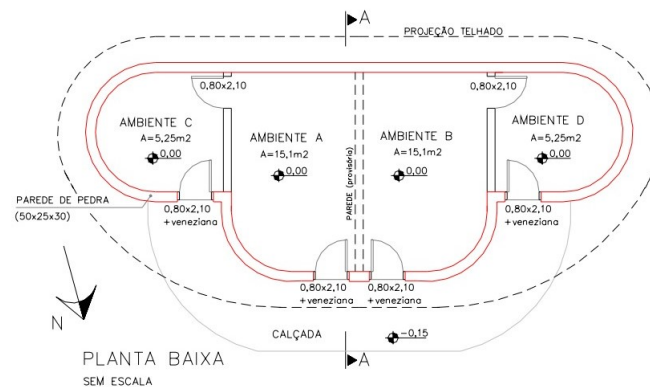


Figura 1- Planta baixa da casa Ventura.

A geometria real, na Figura 2(a) passou por simplificações ao implementar o domínio computacional, onde as paredes e a cobertura foram criadas utilizando polígonos simples. A Fig. 2(b) apresenta o domínio computacional utilizando o software *SketchUp*, com o *plugin* da *OpenStudio* instalado.

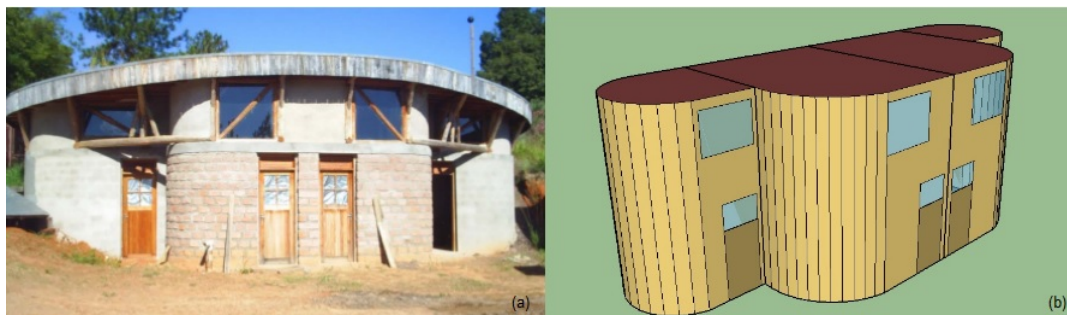


Figura 2- Modelagem da edificação.

Para esta pesquisa, foram realizadas duas simulações, da edificação ventilada naturalmente e utilizando o TCSA. Na simulação da ventilação natural, as trocas de ar foram consideradas 24 horas por dia, adotou-se como base o roteiro para edifícios naturalmente ventilados para configurar os objetos do grupo *Airflow Network* do software *EnergyPlus*. Na simulação do TCSA, configurado no objeto *Zone Earth Tube*, foi utilizado o TCSA somente no ambiente A da edificação. De acordo com Vaz (2011), o ambiente A tem a taxa de renovação de ar ao longo do ano, durante todo o período em 1,6 vezes o volume do ambiente por hora.

3. MODELAGEM MATEMÁTICA E COMPUTACIONAL

O objeto *Airflow Network* possibilita simular fluxos de ar de várias zonas impulsionados pelo vento e também por um sistema de ventilação de ar forçado. O modelo também pode simular o calor e a umidade de ganhos ou perdas do próprio sistema de distribuição de ar, como a canalização por exemplo.

Após definir os parâmetros básicos de execução para o cálculo do fluxo de ar é calculado pelo software os coeficientes de pressão do vento. É especificado o controle de ventilação aplicado em todas as janelas e portas internas e externas que podem ser abertas em cada ambiente.

3.1 Cálculo do balanço de umidade do ar

A rede de fluxo de ar do *EnergyPlus* consiste em um conjunto de nós ligados por componentes de fluxo de ar. É um modelo de fluxo de ar simplificado, comparado com modelos detalhados, como os usados em modelos de dinâmica de fluidos computacional (CFD).

O valor da umidade relativa na saída dos dados representa a umidade relativa do ar para cada zona. Ela depende da temperatura do ar da zona, da taxa da umidade do ar da zona e da pressão para cálculo.

Conforme o manual *Engineering Reference* (EnergyPlus, 2021), a equação do balanço de massa de ar, ou seja, o equilíbrio de umidade do ar na zona é:

$$\begin{aligned} \rho_{air} V_z C_W \frac{dW_z}{dt} = & \sum_{i=1}^{N_{sl}} k g_{mass_{schedload}} + \sum_{i=1}^{N_{surfaces}} A_i h_{mi} \rho_{air_z} (W_{surfs_i} - W_z^t) + \\ & + \sum_{i=1}^{N_{zones}} \dot{m}_i (W_{zi} - W_z^t) + \dot{m}_{inf} (W_\infty - W_z^t) + \dot{m}_{sys} (W_{sup} - W_z^t), \end{aligned} \quad (1)$$

onde C_W é o multiplicador de capacidade de umidade, $\rho_{air} V_z C_W \frac{dW_z}{dt}$ é a mudança na taxa de umidade da zona, $\sum_{i=1}^{N_{sl}} k g_{mass_{schedload}}$ é a soma das cargas internas, $\sum_{i=1}^{N_{surfaces}} A_i h_{mi} \rho_{air_z} (W_{surfs_i} - W_z^t)$ é o fluxo de ar vindo das superfícies da zona, $\sum_{i=1}^{N_{zones}} \dot{m}_i (W_{zi} - W_z^t)$ é o fluxo de ar devido à mistura de ar entre as zonas, $\dot{m}_{inf} (W_\infty - W_z^t)$ é o fluxo de ar devido à infiltração, $\dot{m}_{sys} (W_{sup} - W_z^t)$ é o fluxo de ar no sistema de climatização.

A aproximação da derivada da terceira ordem é apresentada através da derivada de primeira ordem da série de Taylor, usada no cálculo da temperatura do ar da zona, estabelecida por:

$$\left. \frac{dW_z}{dt} \right|_t \approx \frac{\left(\frac{11}{6} W_z^t - 3 W_z^{t-\delta t} + \frac{3}{2} W_z^{t-2\delta t} - \frac{1}{3} W_z^{t-3\delta t} \right)}{\delta t} + O(\delta t^3). \quad (2)$$

Logo, a derivada é substituída no balanço de massa, e os termos com a taxa de umidade, demonstrado na Eq. (1), são dispostos no lado direito da equação.

$$\begin{aligned} & \frac{\rho_{air} V_z C_W}{\delta t} \left(\frac{11}{6} \right) W_z^t + \sum_{i=1}^{N_{surfaces}} A_i h_{mi} \rho_{air_z} W_z^t + \sum_{i=1}^{N_{zones}} \dot{m}_i W_z^t + \dot{m}_{inf} W_z^t + \dot{m}_{sys} W_z^t = \\ & = \sum_{i=1}^{N_{sl}} k g_{mass_{schedload}} + \sum_{i=1}^{N_{surfaces}} A_i h_{mi} \rho_{air_z} W_{surfs_i} + \sum_{i=1}^{N_{zones}} \dot{m}_i W_{zi} + \dot{m}_{inf} W_\infty + \\ & + \dot{m}_{sys} W_{sup} - \frac{\rho_{air} V_z C_W}{\delta t} \left(- 3 W_z^{t-\delta t} + \frac{3}{2} W_z^{t-2\delta t} - \frac{1}{2} W_z^{t-3\delta t} \right). \end{aligned} \quad (3)$$

A Eq. (3) é a básica do balanço de massa do ar, que será resolvida de duas maneiras diferentes pelo software, para fazer os ajustes de cálculo devido às transferências de vapor de água entre zonas, utilizando o método de cálculo de previsão-correção.

Para o caso de previsão de umidade, resolvido de forma analítica, tem-se:

$$\begin{aligned}
 PredictedSystemLoad[kg_{water}/sec] = & \left[\sum_{i=1}^{N_{surfaces}} A_i h_{mi} \rho_{air_z} + \sum_{i=1}^{N_{zones}} \dot{m}_i W_{zi} + \right. \\
 & \left. + \dot{m}_{inf} \right] \times \left[W_{SetPoint}^t - W_z^{t-\delta t} \times \exp \left(- \frac{\sum_{i=1}^{N_{surfaces}} A_i h_{mi} \rho_{air_z} + \sum_{i=1}^{N_{zones}} \dot{m}_i W_{zi}}{\rho_{air} V_z C_W} \delta t + \right. \right. \\
 & \left. \left. + \frac{\dot{m}_{inf}}{\rho_{air} V_z C_W} \delta t \right) \right] + \left[1 - \exp \left(- \frac{\sum_{i=1}^{N_{surfaces}} A_i h_{mi} \rho_{air_z} + \sum_{i=1}^{N_{zones}} \dot{m}_i + \dot{m}_{inf}}{\rho_{air} V_z C_W} \delta t \right) \right]^{-1} - \\
 & - \left(\sum_{i=1}^{N_{sl}} kg_{mass_{schedload}} + \sum_{i=1}^{N_{surfaces}} A_i h_{mi} \rho_{air_z} W_{surf_{s_i}} + \sum_{i=1}^{N_{zones}} \dot{m}_i W_{zi} + \dot{m}_{inf} W_{\infty} \right). \quad (4)
 \end{aligned}$$

Na previsão da simulação os fluxos de massa de ar do sistema não são conhecidos; logo, a resposta do sistema é aproximada. A carga de umidade prevista do sistema de ar é usada na simulação do sistema para obter os melhores resultados possíveis. Os componentes de simulação do sistema que possuem controle de umidade tentarão atender a essa carga de umidade prevista.

A equação do balanço de massa de ar da umidade corrigida é resolvida analiticamente, obtendo:

$$\begin{aligned}
 W_z^t = & \left[W_z^{t-\delta t} - \frac{\sum_{i=1}^{N_{sl}} kg_{mass_{schedload}} + \sum_{i=1}^{N_{surfaces}} A_i h_{mi} \rho_{air_z} W_{surf_{s_i}}}{\sum_{i=1}^{N_{surfaces}} A_i h_{mi} \rho_{air_z} + \sum_{i=1}^{N_{zones}} \dot{m}_i + \dot{m}_{inf} + \dot{m}_{sys}} + \right. \\
 & \left. + \frac{\sum_{i=1}^{N_{zones}} \dot{m}_i W_{zi} + \dot{m}_{inf} W_{\infty} + \dot{m}_{sys} W_{sup}}{\sum_{i=1}^{N_{surfaces}} A_i h_{mi} \rho_{air_z} + \sum_{i=1}^{N_{zones}} \dot{m}_i + \dot{m}_{inf} + \dot{m}_{sys}} \right] \times \\
 & \times \exp \left(- \frac{\sum_{i=1}^{N_{surfaces}} A_i h_{mi} \rho_{air_z} + \sum_{i=1}^{N_{zones}} \dot{m}_i + \dot{m}_{inf} + \dot{m}_{sys}}{\rho_{air} V_z C_W} \delta t \right) + \\
 & + \frac{\sum_{i=1}^{N_{sl}} kg_{mass_{schedload}} + \sum_{i=1}^{N_{surfaces}} A_i h_{mi} \rho_{air_z} W_{surf_{s_i}}}{\sum_{i=1}^{N_{surfaces}} A_i h_{mi} \rho_{air_z} + \sum_{i=1}^{N_{zones}} \dot{m}_i + \dot{m}_{inf} + \dot{m}_{sys}} + \\
 & + \frac{\sum_{i=1}^{N_{zones}} \dot{m}_i W_{zi} + \dot{m}_{inf} W_{\infty} + \dot{m}_{sys} W_{sup}}{\sum_{i=1}^{N_{surfaces}} A_i h_{mi} \rho_{air_z} + \sum_{i=1}^{N_{zones}} \dot{m}_i + \dot{m}_{inf} + \dot{m}_{sys}}. \quad (5)
 \end{aligned}$$

Através das equações descritas realizadas pelo software *EnergyPlus* foram obtidos os resultados das simulações apresentados a seguir.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O calor externo é aquele que atravessa para outro ambiente na forma de calor sensível ou latente, podendo ocorrer através das superfícies externas ou internas, e pelo ar de renovação do

ambiente. O armazenamento de calor na edificação é quando o pico de ganho não coincide com o máximo de carga térmica e nem com a máxima temperatura diária na zona térmica.

Conforme a Ashrae (2017), a temperatura média do ar é de 24,5° C, a temperatura operativa entre 23,5 ° C e 27,5° C e a umidade relativa entre 65% e 35% no verão, enquanto que para o inverno, a temperatura média do ar possivelmente é de 22° C, a temperatura operativa entre 20,5° C e 24,5° C e umidade relativa entre 60% e 30%.

A temperatura média do ar da zona térmica equivale a temperatura interna do ambiente, buscando o conforto térmico, este parâmetro foi configurado no software *EnergyPlus* e fixado em 24° C, que é a temperatura que se busca durante todo o período de ocupação da zona térmica em estudo, chamada de temperatura do *setpoint*.

De acordo com o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), por não ter os dados da cidade de Viamão/RS para o ano de 2007, utilizou-se como referência a estação meteorológica localizada em Porto Alegre/RS a 17 km de distância de Viamão, mostrado na Tabela 1 as temperaturas e umidades destas cidades para os dias de verão, e para o inverno na Tabela 2.

Tabela 1- Temperatura e umidade médias externas do dia 21 de janeiro (ano: 2007)

	Temperatura		Umidade	
	Porto Alegre/RS	Viamão/RS	Porto Alegre/RS	Viamão/RS
21/janeiro	22,0 ° C	21,4° C	67,0%	72,5%
21/julho	14,0 ° C	12,3° C	77,0%	84,0%

Sendo assim, observa-se proximidade nas médias diárias destas variáveis entre as duas cidades.

Para esta pesquisa, serão apresentados os resultados das simulações em um dia de projeto no verão e no inverno, utilizando o arquivo climático da cidade de Viamão no ano de 2007. A Fig. 3(a) mostra as temperaturas diárias do ar externo e da edificação no dia 21 de janeiro, onde a temperatura externa atingiu o pico de 24,2°C às 19 horas e no ambiente interno da edificação sob ventilação natural (VN) o pico foi de 22,6°C às 23 horas, utilizando o TCSA encontrou-se uma redução de 2,7% na temperatura do ar interno. Já no inverno, dia 21 de julho, na Fig. 3(b) nota-se que a temperatura interna atinge a menor temperatura de 12,0° C às 11 horas e no ar exterior a temperatura nesse horário era de 6,7°C às 18 horas, utilizando o TCSA encontrou-se uma redução de 21,7%. Analisando o conforto adaptativo destes dias típicos de diferentes estações, inverno e verão, observa-se que o TCSA não é favorável para esta região durante o inverno, pois a temperatura se reduz ao utilizá-lo, não tem vantagens em relação à VN.

Observa-se que a condição de temperatura média do ar para obter o conforto térmico do ambiente é atingida durante o verão. Esta curva indica que as temperaturas internas do ambiente são semelhantes comparadas com as temperaturas externas ao ambiente. Isso se deve pelo fato de que apenas as trocas por radiação não são suficientes para retirar o calor do ambiente. Pelo conforto adaptativo, não foi encontrado conforto na edificação em nenhuma das situações analisadas no inverno, no verão foi encontrado um conforto de 9,09% em ambas as simulações.

A umidade relativa do ar externo do local e da zona são apresentadas em porcentagem. A umidade relativa da zona é uma variável de saída representada pelos cálculos apresentados anteriormente, ela depende da temperatura do ar da zona, da taxa de umidade do ar da zona e da pressão barométrica externa.

A Fig. 4(a) mostra que para o dia de verão do ano de 2007 a umidade diária do ar de

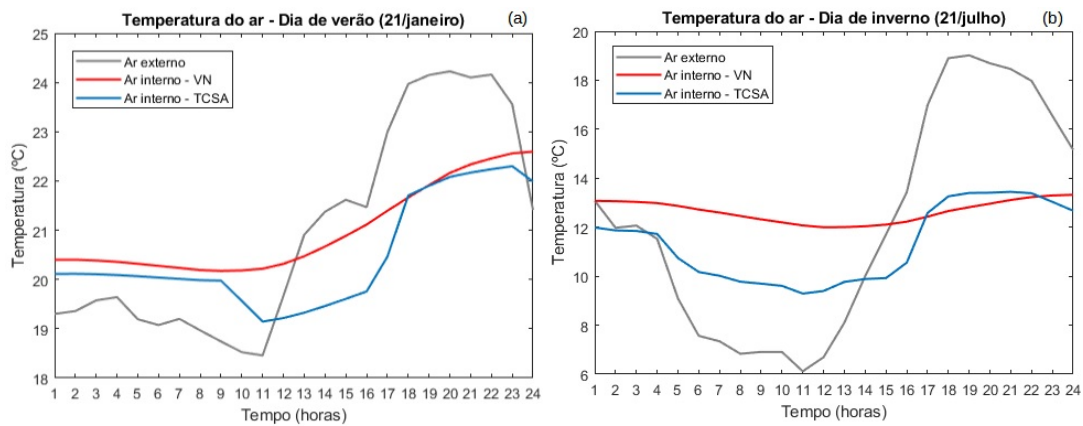


Figura 3- Gráfico de temperatura no dia de projeto no (a) verão e (b) inverno.

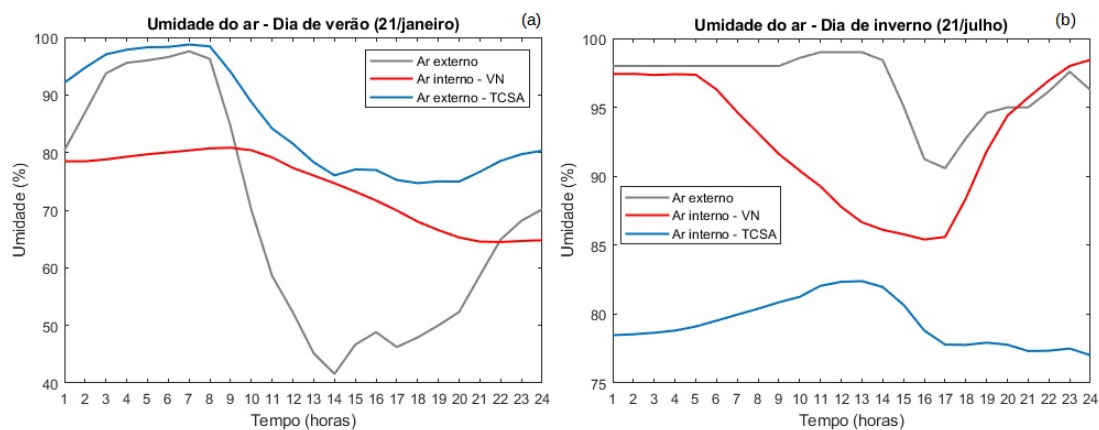


Figura 4- Gráfico de umidade no dia de projeto no a) verão e b) inverno.

Viamão varia entre 41,6% e 97,6%, e no ambiente interno da edificação sob condições de VN entre 64,4% e 80,8%, na simulação utilizando o TCSA teve um aumento de 14% na umidade da edificação. No inverno, Fig. 4(b), temos a variação de umidade do ar externa entre 90,6% e 99,0%, e no ambiente interno da edificação da VN entre 85,1% e 98,4%, utilizando o TCSA a umidade máxima diminui 22,0%.

A temperatura média do ar da zona atinge valores mais elevados durante o verão, sendo assim, uma menor fração de vapor d'água permanece no ar. Já durante o inverno observa-se valores altos de porcentagem, muitas vezes próximos a 100% de umidade do ar na edificação.

Foi feita a simulação da edificação com condicionamento de ar artificial, o ar condicionado, encontrando o consumo energético de 51,58 Wh, comparando consumo do TCSA, durante o verão este consumo aumentou em 28% e 42% no inverno.

5. CONCLUSÕES

Neste estudo, foi modelado o clima interno da edificação, existem muitos fatores que afetam as variáveis internas do ar, principalmente a temperatura e a umidade relativa.

A simulação realizada no software *EnergyPlus* gerou diversos dados climáticos internos,

onde investigou-se os fenômenos termofísicos envolvidos nas simulações. Os resultados obtidos representados graficamente mostram que são considerados coerentes quando comparados a trabalhos realizados utilizando outros softwares de simulação computacional, e toleram ser aplicados em todo tipo de edificação, podendo ser de grande utilidade na estimativa de condições climáticas internas baseadas nas condições externas da localização da edificação.

Dos recursos que podem ser utilizados para melhorar a baixa umidade que causa o desconforto, os autores sugerem modificações nos materiais de construção utilizados na casa, como modificar cores dos elementos; e também na geometria da casa, aumentando o tamanho das janelas para maior fluxo de entrada e saída de ar.

A edificação em estudo foi construída utilizando materiais que tenham bom desempenho, gerando bom conforto térmico, pois não causa sensação de frio caso a temperatura externa estiver muito baixa. A temperatura foi reduzida no verão utilizando o TCSA, sendo positivo o seu uso neste dia típico. A região onde a edificação se localiza, sul do Brasil, pode ter condições externas mais frias em relação a outras regiões do país, o ideal seria realizar esta comparação em outras cidades.

Em relação a umidade algumas vezes se encontra próxima de 100%, principalmente no inverno, significando que o ar interno está saturado, bastante úmido, pois a quantidade de água presente no ar está quase em quantidade máxima. A umidade relativa do ar diminui no inverno em relação a ventilação natural da edificação, outro fator positivo do uso deste.

Portanto, os resultados deste estudo são positivos, mostrando que este tipo de simulação pode ser utilizada como uma ferramenta capaz de fornecer e mostrar variáveis nos ambientes das edificações com base na localização e o tipo de construção, servindo como um recurso para pesquisadores e profissionais que exigem dados climáticos em sua análise do desempenho do edifício.

Agradecimentos

Michele Soares Netto agradece sua bolsa de pesquisa, à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e à Universidade Federal de Pelotas (UFPel).

Referências

- ASHRAE Handbook Fundamentals, Chapter 8 Thermal Comfort. American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers, Atlanta, 2017.
- Bénard, J.; Eymard, R.; Nicolas, X.; Chavant, C. (2005), Boiling in Porous Media: Model and Simulations. *Transport in Porous Media*, vol. 60, p. 1-315.
- Brum, R. da S.; Labat, M.; Lorente, S. (2019) Improving the performances of earth air heat exchangers through Constructal design. *International Journal of Energy Research*, v. 1, p. 4835.
- Brum, R. S.; Rodrigues, M. K.; Ramalho, J. V. A.; Rocha, L. A. O.; Isoldi, L. A.; Santos E. D.; (2016) On the Design of Two EAHE Assemblies with Four Ducts, *Defect and Diffusion Forum*, 372, pp 31-39.
- Brum, R. da S.; Ramalho, J. V. A.; Rodrigues, M. K.; Rocha, L. A. O.; Isoldi, L. A.; Santos, E. D.; (2019) Design evaluation of Earth-Air Heat Exchangers with multiple ducts, *Renewable Energy*, 135, pp. 1371-1385.
- Brum, R. da S., Rocha, L. A.O., Vaz, J., Santos, E. D., Isoldi, L.A. (2012) Development of Simplified Numerical Model for Evaluation of the Influence of Soil-Air Heat Exchanger Installation Depth Over Its Thermal Potential. *International Journal of Advanced Renewable Energy Research*, 1, pp. 505-514, 2012.
- Brum, R. da S., (2013), "*Modelagem Computacional de Trocadores de Calor Solo-Ar*". Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande.
- Brum, R. da S.; Vaz, J.; Rocha, L. A. O.; Santos, E. D. dos, Isoldi, L. A.; A new computational modeling to predict the behavior of Earth-Air Heat Exchangers, *Energy and Buildings*, 64, pp. 395–402, 2013.

- Brum, R. S., (2016), "Teoria Construtal e Desempenho Térmico de Trocadores de Calor Solo-Ar", Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Brum, R. S.; Ramalho, J. V. A.; Rocha, L. A. O.; Isoldi, L. A.; Santos E. D., (2016) Transient Models to Analyze the Influence of the Air Velocity and Ducts Diameter on the Performance of Earth-Air Heat Exchangers, International Journal of Fluid Mechanics Research, 43 (5-6), p. 503-520, 2016.
- Cândido, C.; Dear, R. J.; Lamberts, R.; Bittencourt, L. (2010), Air movement acceptability limits and thermal comfort in Brazil's hot humid climate zone. Building and environment, vol. 45, n. 1, p. 222-229.
- Crawley, D.B; Hand, J.W.; Kummert, M. (2008), Contrasting the capabilities of building energy performance simulation programs. Building and Environment, vol. 43, n. 4, p. 661-673.
- Domingues, A. M. B.; Nóbrega, E. S. B.; Ramalho, J. V. A.; Brum, R. da S.; Quadros, R. S. (2021) Parameter analysis of Earth-air heat exchangers over multi-layered soils in South Brazil. Geothermics, v. 93.
- EnergyPlus. (2017), EnergyPlus Engineering Reference, EnergyPlus Version 8.7., The Board of Trustees of the University of Illinois and the Regent of the University of California through the Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley.
- EnergyPlus. (2017), EnergyPlus Input and Output Reference, EnergyPlus Version 8.7., The Board of Trustees of the University of Illinois and the Regent of the University of California through the Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley.
- Goffart, J.; Rabouille, M.; Mendes, N. (2017), Uncertainty and sensitivity analysis applied to hygrothermal simulation of a brick building in a hot and humid climate. Journal of Building Performance Simulation, vol. 10, n. 1, p. 37-57.
- Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (INMETRO). (2012), Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais (RTQ-R). Eletrobrás.
- Lamberts, R.; Dutra, L.; Pereira, F. O. R. (2014), "Eficiência Energética na Arquitetura". Eletrobrás.
- Nóbrega, E. S. B.; Brum, R. da S.; Ramalho, J. V. de A.; Quadros, R. S. (2020) A first study on earth-air heat exchanger in Pelotas. Revista Mundi Engenharia, Tecnologia e Gestão, v. 5, p. 1-15.
- Strand, R. K. (1995), "Heat source transfer functions and their application to low temperature radiant heating systems", Tese de PHD, University of Illinois at Urbana-Champaign, Champaign.
- Vaz, J.; Sattler, M.A.; Dos Santos, E.D.; Isoldi, L.A. (2011), Experimental and Numerical Analysis of an Earth-Air Heat Exchanger. Energy and Buildings, vol. 43, n. 9, p. 2476-2482.
- Westphal, F. S. (2007), "Análise de incertezas e de sensibilidade aplicadas à simulação de desempenho energético de edificações comerciais". Tese de Doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

COMPUTATIONAL HUMIDITY SIMULATION: STUDY OF THE THERMAL PERFORMANCE OF A BUILDING

Abstract. *In the last decades there is a great search for technologies that can help in the thermal comfort of buildings in order to obtain recommendations for the design of different devices used in the use of renewable energy sources and energy reuse. In this work, we sought to develop a computational model that represents realistic operating conditions of earth-air heat exchangers in a building. The EnergyPlus software was used, with the objective of evaluating the results found for the humidity and air temperature of the building. A meteorological file was created for the simulation of this research. The results are presented for two typical project days, one in summer and one in winter, in order to compare the behavior of the building in different climates. It is observed that the temperatures reach their maximum in the same, or in close, hours of the day in both winter and summer. The humidity of the zone has a smaller fraction of water vapor in the summer, while in the winter this value is close to 100%. The results are positive, showing that this type of simulation can be used as a tool capable of providing and showing important variables in building environments, serving as a resource for researchers and professionals who require climatic data in their analysis of building performance.*

Palavras-chave: *Computer simulation, Thermal performance, Relative humidity, Earth-to-air heat exchanger (EAHE)*