

## ESTUDO NUMÉRICO DO CONFORTO TÉRMICO EM ARRANJO DE EDIFICAÇÕES COM USO DO OPENFOAM

### NUMERICAL STUDY OF THERMAL COMFORT IN BUILDING ARRANGEMENTS USING OPENFOAM

Raul C. A. Soares<sup>a</sup>, Paulo U. Silva<sup>b</sup> e Gustavo Bono<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Laboratório de Engenharia Computacional, Universidade Federal de Pernambuco - CAA, Av. Marielle Franco, s/n, km 59, Caruaru, Brasil, rcandradesoares@gmail.com, bonogustavo@gmail.com

<sup>b</sup>Departamento de Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Avenida Presidente Antônio Carlos, 6627, CEP 31270-901, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil, pauloulisses@ufmg.br

Palavras-chave: Conforto térmico, CFD, OpenFOAM, Vento.

**Resumo.** O Brasil é um país de clima predominantemente quente, portanto, métodos de obtenção de ventilação natural devem ser considerados como meio de se obter conforto térmico de ambientes. Este trabalho, tem como proposta investigar a ventilação natural e conforto térmico de arranjos de edificações, fazendo uso da Mecânica dos Fluidos Computacional. Para isso será utilizado o software OpenFOAM, utilizando-se do modelo de turbulência  $k - \epsilon$  padrão. Foi avaliado um modelo 3D de um projeto típico de residência do programa *Minha casa, Minha Vida*, inserida em um arranjo de edificações, simulando assim, um conjunto habitacional. O método *Elevated Air Speed Comfort Zone* (ASHRAE, 2017) foi considerado para a determinação da ocorrência ou não de conforto térmico. Foram resolvidos os campos de velocidade, pressão e temperatura, sendo possível observar que alguns cômodos obtiveram desconforto térmico causado pelo excesso de velocidade de vento, principalmente na casa a barlavento. As casas a sota-vento apresentaram a maioria dos ambientes dentro das faixas ideais de conforto térmico.

**Keywords:** Thermal comfort, CFD, OpenFOAM, Wind.

**Abstract.** Brazil is a country with a predominantly hot climate, therefore, methods of obtaining natural ventilation should be considered as a means of achieving thermal comfort in environments. This work aims to investigate natural ventilation and thermal comfort in building arrangements, using Computational Fluid Mechanics. For this, the OpenFOAM software will be used, using the standard  $k - \epsilon$  turbulence model. A 3D model of a typical residential project from the *Minha Casa, Minha Vida* program was evaluated, inserted into a building arrangement, thus simulating a housing complex. The *Elevated Air Speed Comfort Zone* method (ASHRAE, 2017) was considered to determine whether or not thermal comfort occurred. The velocity, pressure and temperature fields were resolved, and it was possible to observe that some rooms experienced thermal discomfort caused by excessive wind speed, mainly in the windward house. The leeward houses presented most of the environments within the ideal thermal comfort ranges.

## 1 INTRODUÇÃO

O Brasil é um país de clima tropical em que a maior parte do seu território possui um clima quente, dessa forma, a necessidade de utilização de ar-condicionado e outros meios mecânicos de ventilação ou condicionamento de ar é uma realidade, elevando assim, o consumo de energia residencial. Segundo a nota técnica da Empresa de Pesquisas Energéticas 030/2018 (EPE, 2018), os meios artificiais de condicionamento de ar são responsáveis por cerca de 14% do consumo energético das residências no Brasil, e de acordo com o estudo do plano decenal de expansão de energia (EPE, 2020) a demanda de consumo de energia elétrica em residências deve crescer a uma média de 3,8% ao ano, fazendo que o consumo médio por casa passe dos atuais 162 kWh/mês para 197 kWh/mês em 2030.

Dessa forma, a ventilação natural apresenta-se como um meio de se obter conforto térmico sem aumento direto no consumo de energia, possibilitando, inclusive, um decréscimo no consumo médio energético residencial, por evitar ou diminuir a utilização de ar-condicionado ou ventiladores por exemplo.

Além disso, com o desenvolvimento urbano, observou-se que as pessoas tendem a ficar a maior parte do seu tempo em ambientes fechados, o que reforça a preocupação de se obter edificações que tenham nos seus projetos, estudos relacionados à ventilação e conforto térmico, inclusive em ambientes de trabalho (Frontczak et al., 2011).

A pandemia causada pela doença do coronavírus (COVID-19) trouxe uma preocupação ainda maior com as questões relacionadas à ventilação natural. Ambientes fechados tornam-se locais de rápida transmissão do COVID-19 (Aviv et al., 2021). Nos últimos anos estudos vêm sendo realizados a fim de entender como mecanismos de ventilação podem contribuir para uma diminuição do contágio (Schibuola e Tambani, 2021; Berry et al., 2021).

Sistemas de climatização puramente mecânicos, também conhecidos como *Heating, Ventilation and Air Conditioning* (HVAC), podem aumentar as taxas de infecção pelo coronavírus (Zheng et al., 2021) devido a problemas de projeto ou operação inadequados. A inclusão de sistemas naturais de ventilação ao HVAC já existente, além de terem o potencial de diminuir a probabilidade de contágio podem reduzir o consumo energético com climatização em até 45% (Aviv et al., 2021).

Portanto, a ventilação natural como meio de obtenção de conforto térmico, traz vantagens tanto ao tornar o ambiente mais saudável, quanto ao diminuir o consumo energético, visto que evita a utilização de meios artificiais.

## 2 METODOLOGIA

Para estudar o escoamento ao redor das residências emprega-se a Dinâmica de Fluidos Computacional (DFC). Simulações por DFC são amplamente utilizadas em trabalhos com temas semelhantes, sendo eficientes em seus resultados, principalmente pelo seu baixo custo se comparado com métodos que necessitam de construção de modelos físicos (Sakiyama et al., 2020). O *software* de processamento utilizado foi o OpenFOAM versão 2017.2.

O modelo de turbulência utilizado foi o *Reynolds-Averaged Navier-Stokes* padrão (RANS  $k-\epsilon$ ), que é amplamente utilizado para estudos de ventilação cruzada e em meios urbanos (Blocken, 2018; Sakiyama et al., 2020) possuindo tempos de processamento reduzidos, possibilitando assim, a análise de domínios mais complexos que demandam maiores quantidades de volumes.

## 2.1 Elevated Air Speed Comfort Zone

Para definir os critérios de conforto térmico, foi utilizado método *Elevated Air Speed Comfort Zone* proposto pela ASHRAE (2017). Através da metodologia define-se um gráfico onde se localizam as faixas de conforto térmico para várias situações, conforme Figura 1.

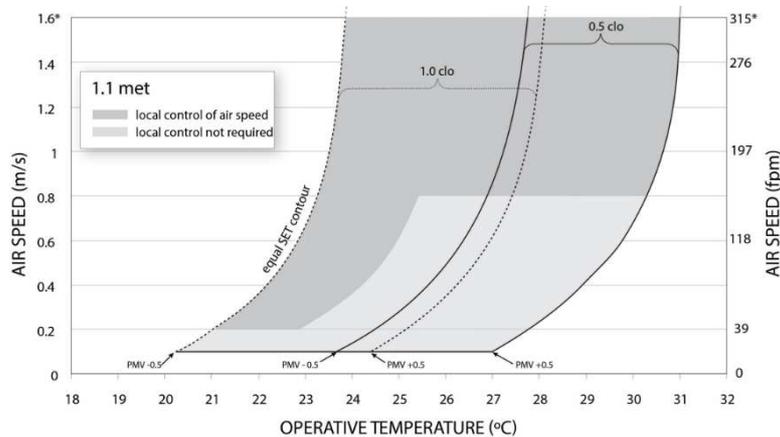


Figura 1: Zonas de conforto térmico (ASHRAE, 2017).

Para o caso do presente trabalho, considerou-se o *clo* como sendo 0.5, o que representa conjuntos de roupas leves, como camiseta, shorts ou saias, sandálias e roupas íntimas masculinas e femininas. Para caracterizar o metabolismo e vestimenta considera-se um edifício residencial, não possuindo cargas de trabalho que demandem esforço físico, nem vestimentas que causem grande isolamento térmico. Considerou-se, também, que o ambiente não possui controle da velocidade do ar, sendo o gráfico dessa forma resumido a apenas a parte cinza claro entre as faixas de *clo* 0.5 (ver Figura 1). Para mais informações a respeito dos índices *clo* e *met*, como também a respeito do gráfico, consultar ASHRAE Standard 55 (2017).

## 2.2 Descrição do caso analisado

Consiste em um modelo representativo de habitações de interesse social, ver Figura 2, para a faixa de renda de até dois salários mínimos (Triana, Lamberts e Sassi, 2015). A residência possui 4 cômodos: dois quartos, sala e cozinha conjugados e banheiro. Esse modelo de habitação também foi estudado por Eli et al. (2021).

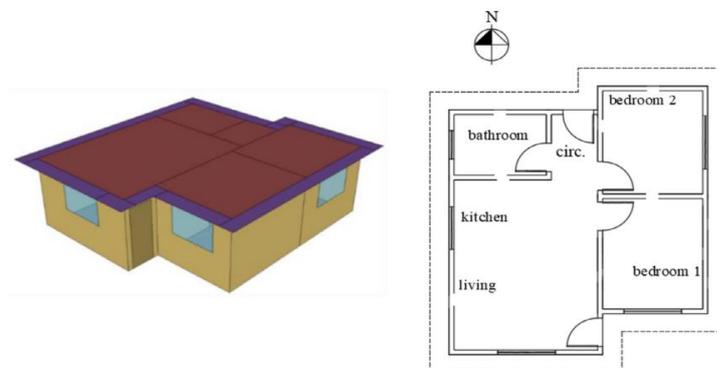


Figura 2: Geometria da habitação de interesse social, (Eli et al., 2021).

Para a definição das variáveis de temperatura ambiente e umidade relativa do ar, considerou-se que o conjunto habitacional se localiza na cidade de Caruaru, estado de Pernambuco (Brasil).

Para a obtenção das informações bioclimáticas da cidade utilizou-se a plataforma do *projeteee* (Projetando Edificações Energeticamente Eficientes), que agrupa informações climáticas de mais de 400 cidades do Brasil. A plataforma pode ser acessada online através do site: <http://www.mme.gov.br/projeteee/>.

A partir da plataforma, considerou-se o mês com a maior temperatura média, sendo esse mês o de janeiro, tendo uma temperatura ambiente média de 25°C, e uma umidade relativa de 66,75%, sendo esses os valores das variáveis utilizadas nas simulações e ajuste do gráfico de zonas de conforto, respectivamente.

Foi simulado um conjunto habitacional com 9 edificações, sendo uma delas a casa em análise. As outras oito edificações são modelos simplificados, sem aberturas e sem o beiral da laje, ver Figuras 3 e 4. A casa foi localizada na faixa central do conjunto, e posicionada em três localizações diferentes, na 1ª posição (barlavento), 2ª posição (central) e 3ª posição (sotavento), sendo dessa forma um total de três simulações.

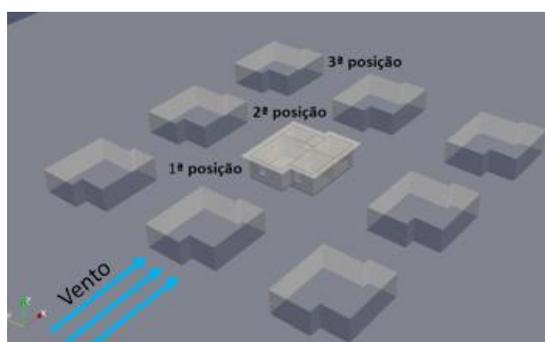


Figura 3: Posicionamento das residências no conjunto habitacional.

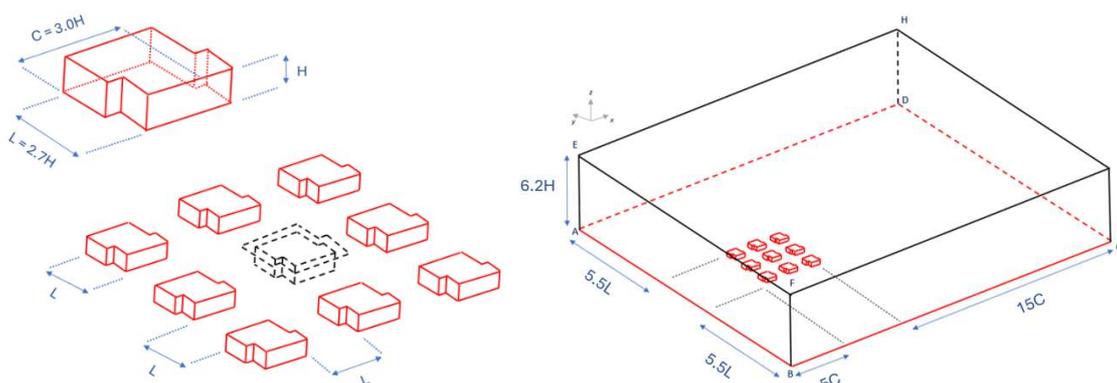


Figura 4: Dimensões, espaçamento e domínio computacional.

A temperatura ambiente foi considerada em 25°C (298,15K), para as superfícies externas da residência e solo prescreve-se 45°C (318,15K), a superfície interna das paredes foi mantida a temperatura ambiente. Para a simulação foram consideradas as janelas como sendo de correr (abertura máxima de 50%) e todas abertas, porta frontal fechada e porta dos fundos aberta. A porta do banheiro foi considerada fechada e a sua janela aberta (sendo considerada tipo basculante com 100% de abertura máxima). Para mais detalhes sobre domínio e condições de contorno consultar Soares (2023).

Prescreve-se o perfil de velocidade na entrada do domínio,  $u = u(z)$ , segundo a lei

logarítmica proposta por Richards e Hoxey (1993), conforme Eq. (1):

$$u(z) = \frac{u_{ABL}}{k} \ln\left(\frac{z_0 + z}{z_0}\right) \quad (1)$$

onde,  $u(z)$  é velocidade do vento em função da altura,  $z$  é a altura em relação ao solo,  $u_{ABL}$  é a velocidade de fricção,  $z_0$  é a altura rugosa e  $k$  é a constante de von Kármán, comumente adota-se 0.42.

A energia cinética e a taxa de dissipação aplicadas na entrada do domínio, são definidas conforme as equações (2) e (3). Considera-se para as características do fluido os seguintes valores: número de Prandtl  $Pr = 0,71$ , número de Prandtl turbulento  $Pr_t = 0,85$  e viscosidade cinemática  $\nu = 0,000015 \frac{m^2}{s}$ .

$$k(z) = 0,33[u(H)]^2 \exp^{-0,32\left(\frac{z}{H}\right)} \quad (2)$$

$$\varepsilon(z) = \frac{(u_{ABL})^3}{k(z + z_0)} \quad (3)$$

### 3 VALIDAÇÃO

Para validação do *software* foi simulado um caso proposto por Karava, Stathopoulos e Athienitis (2011). O modelo é um paralelepípedo com duas aberturas, conforme mostra-se na Figura 5. Foram consideradas 3 malhas, sendo M1 = 390.316 volumes; M2 = 649.098 volumes e M3 = 1.179.789 volumes. Na Tabela 1, apresenta-se os valores de vazão adimensional obtida para as três malhas, junto com os resultados experimentais obtidos por Tominaga e Blocken (2015) e numéricos de Hooff, Blocken e Tominaga (2017) e Nascimento e Bono (2022). Em função dos resultados obtidos, adota-se a malha M3 para as próximas análises.

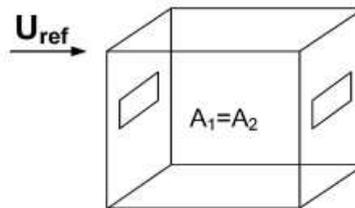


Figura 5: Geometria utilizada para validação (Karava et al., 2011).

Malhas	Vazão adimensional ( $Q / (u_H A_{(abertura)})$ )	Erro (%)
Exp.	0.500	-
Hooff $k - \varepsilon$	0,483	3,5
Nascimento e Bono $k - \varepsilon$	0,485	3,0
Presente estudo (M3)	0,475	5,1
Presente estudo (M2)	0,471	5,8
Presente estudo (M1)	0,459	8,2

Tabela 1: Vazão adimensional na abertura de entrada.

Na Figura 6, apresentam-se os perfis da componente  $u$  da velocidade para os valores  $x/D$  constante, localizados no interior da edificação.

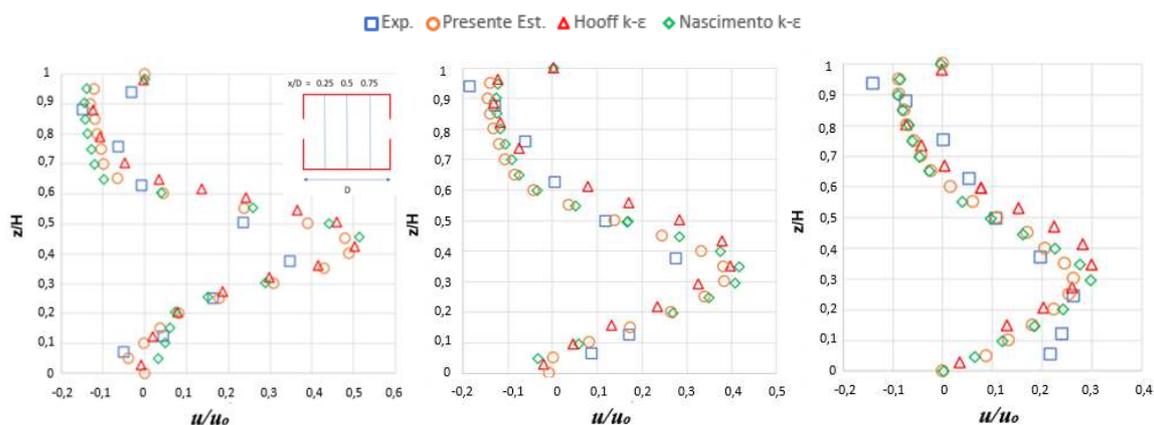


Figura 6: Perfil de velocidade ( $u$ ) -  $x/D = 0.25$ ;  $x/D = 0.50$ ;  $x/D = 0.75$ .

Percebe-se, uma boa concordância entre os resultados obtidos quando comparados com outros trabalhos, inclusive experimentais. Indicando que o modelo de turbulência e o *software* utilizado são adequados para solucionar o tipo de problema proposto.

#### 4 RESULTADOS

Na Figura 7, mostra-se a nomenclatura utilizada dos quatro cômodos e quatro janelas, e a malha utilizada em um dos casos. Na Figura 8, apresentam-se as distribuições de velocidade (m/s), temperatura (K) e coeficientes de pressão (adimensional) no plano  $z = 0.5H$  para as três posições da residência. Observa-se que a componente da velocidade em  $y$  é positiva na janela  $J_3$  para a posição 1, ou seja, o escoamento tem o sentido de dentro para fora, já na posição 2, a componente  $y$  é negativa, portanto, muda o sentido do escoamento. Nas proximidades da janela  $J_3$  a pressão interna (cômodo  $C_1$ ) é consideravelmente maior em comparação com a pressão na parte externa da edificação, dessa forma existe um escoamento das maiores pressões para as menores pressões. O contrário se observa na posição 2, sendo a pressão externa e próxima à janela  $J_3$  ligeiramente maior em comparação com a pressão interna, fazendo, dessa forma, com que o escoamento seja de fora para dentro.

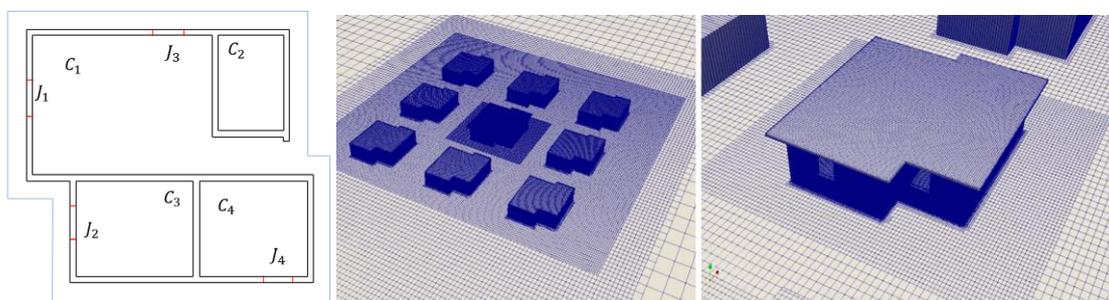


Figura 7: Cômodos  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$ ,  $C_4$ , e janelas  $J_1$ ,  $J_2$ ,  $J_3$ ,  $J_4$ , e malha utilizada para a casa na posição 2.

Na Tabela 2, mostra-se um resumo das temperaturas médias internas para as três posições da casa inserida no conjunto habitacional.

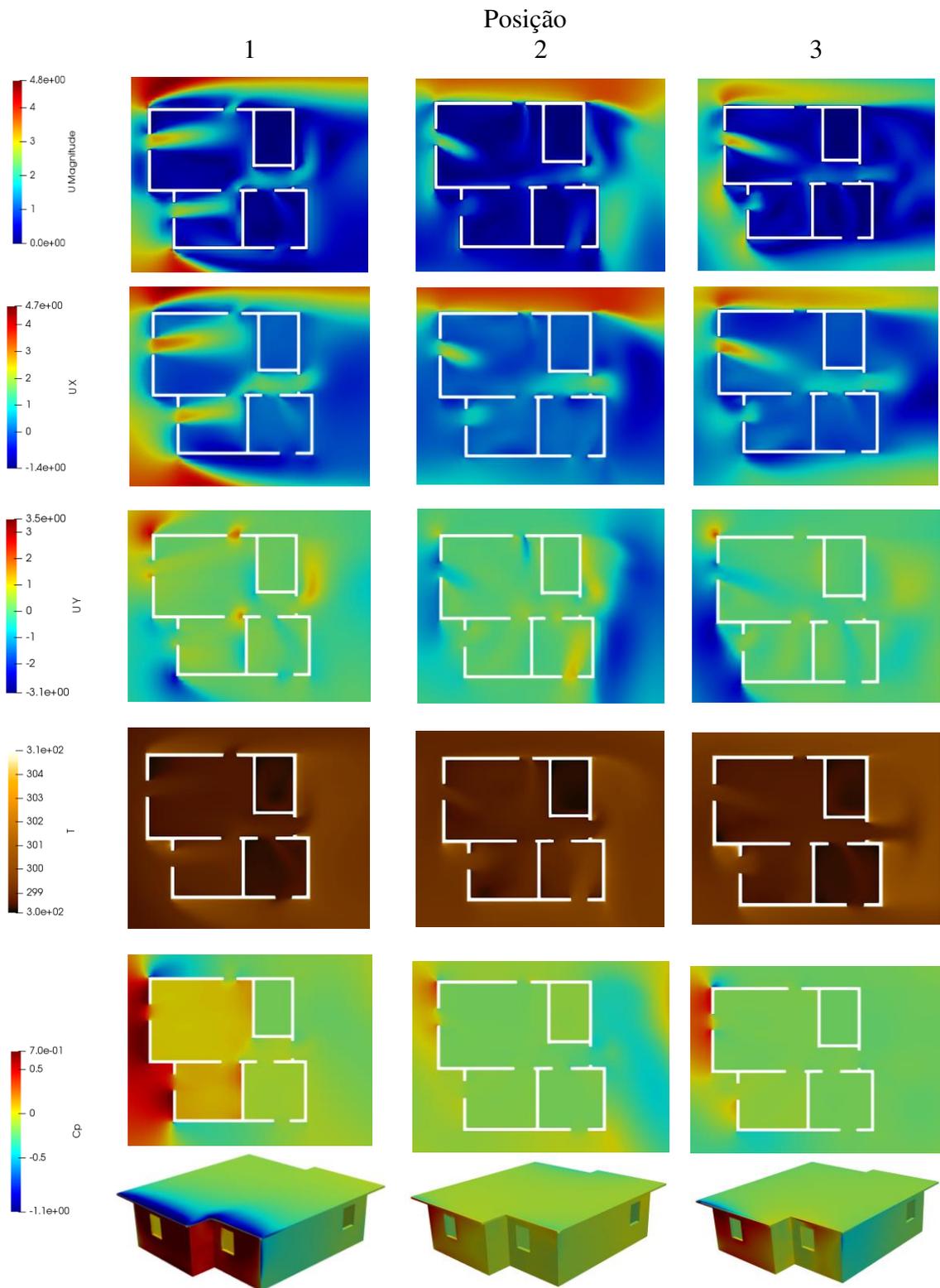


Figura 8: Velocidades (magnitude, x, y), temperatura e pressão para as três posições.

Casa e Posição	$C_1$	$C_2$	$C_3$	$C_4$
Casa – Pos. 1	299,1K (26°C)	298,3K (25,2°C)	299,5K (26,4°C)	298,5K (25,4°C)
Casa – Pos. 2	299,3K (26,2°C)	298,3K (25,2°C)	299,1K (26°C)	299,3K (26,2°C)
Casa – Pos. 3	299,3K (26,2°C)	298,4K (25,3°C)	299,6K (26,5°C)	298,6K (25,5°C)

Tabela 2: Temperaturas médias internas.

Nas Figuras de 9 a 11, é mostrado os gráficos de zona de conforto térmico para cada cômodo da residência em função da posição.

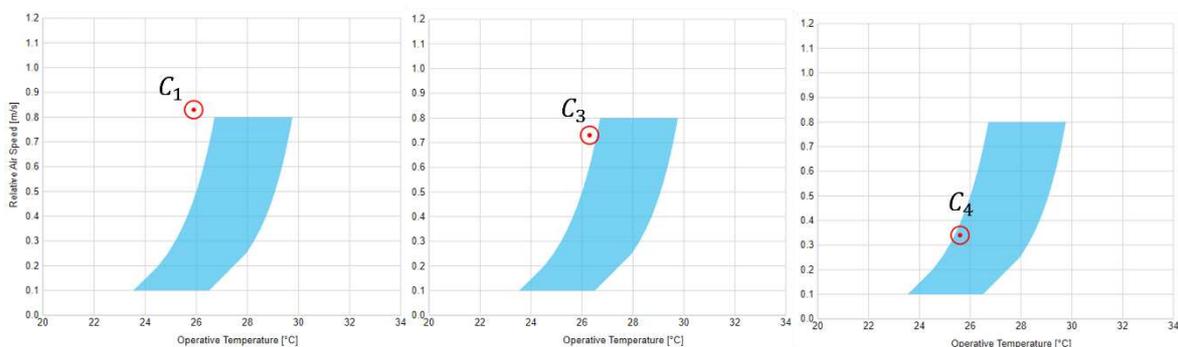


Figura 9: Zonas de conforto térmico para a casa na posição 1.

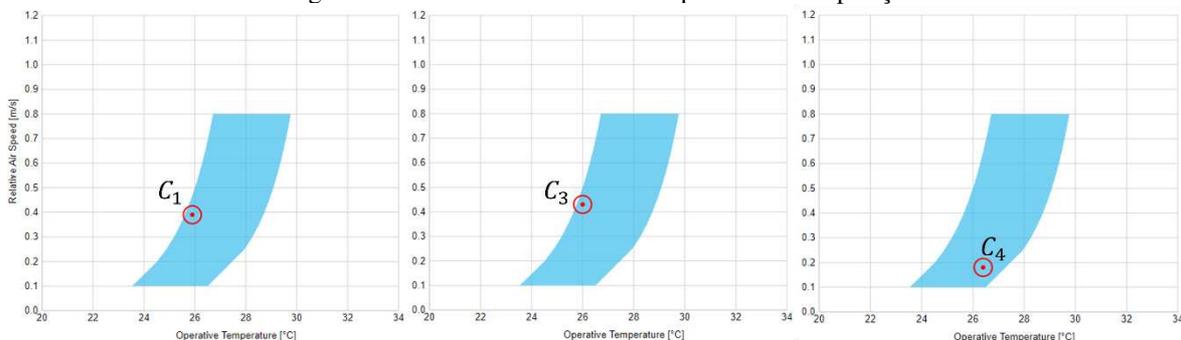


Figura 10: Zonas de conforto térmico para a casa na posição 2.

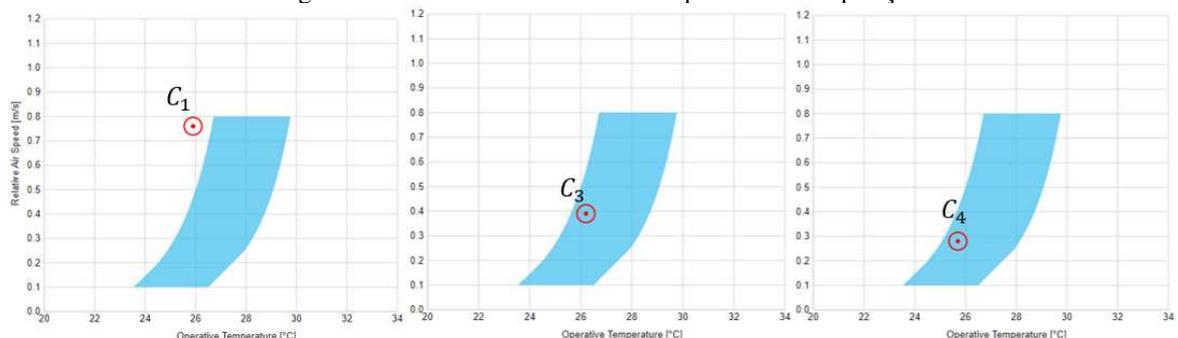


Figura 11: Zonas de conforto térmico para a casa na posição 3.

A casa na posição 1 apresentou os cômodos  $C_1$  e  $C_3$  com desconforto térmico, sendo necessária vestimenta de maior *clo* para o cômodo  $C_3$  e controle de velocidade além de vestimentas de maior índice *clo* para o cômodo  $C_1$ . Na posição 2, todos os cômodos ficaram dentro da faixa de conforto térmico para as vestimentas consideradas (*clo* 0.5). Na posição 3,

observa-se que o cômodo  $C_1$ , assim como no caso da posição 1 e casa isolada, teve desconforto térmico, porém para esse caso, apenas a alteração do tipo de vestimenta seria necessária, sem a necessidade de controle de velocidade

## 5 CONCLUSÕES

Em razão da necessidade de se estudar o conforto térmico em ambientes urbanos, foi analisado nesse trabalho um modelo típico de edificações a fim de analisar e entender como o arranjo delas podem influenciar no conforto térmico, utilizando-se de uma simulação acoplada de fluido e transferência de calor.

Para o caso do conjunto habitacional, a primeira residência apresentou desconforto térmico nos primeiros cômodos, sendo necessário vestimentas de maior *clo* para o cômodo  $C_3$  e maior *clo* e controle de velocidade para o cômodo  $C_1$ . Por sua vez, a residência na posição 2 e 3, apresentaram a maioria dos cômodos na zona de conforto térmico, tendo apenas o cômodo  $C_1$ , da posição 3, desconforto térmico, sendo apenas necessário vestimentas de maior *clo* para se enquadrar na faixa de conforto.

O emprego do OpenFOAM mostrou-se adequado para a análise de ventilação natural e conforto térmico ainda na fase de projeto, sendo ideal para detectar problemas e propor modificações a fim de se obter um melhor conforto térmico e qualidade de ar.

## REFERÊNCIAS

- ASHRAE Standard 55, Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. 2017.
- Aviv, D., Chen, K.W., Teitelbaum, E., Sheppard, D., Pantelic, J., Rysanek, A., e Meggers, F., A fresh (air) look at ventilation for COVID-19: Estimating the global energy savings potential of coupling natural ventilation with novel radiant cooling strategies. *Applied Energy*, Elsevier, volume 295:1 – 13, 2021.
- Berry, G., Parsons, A., Morgan, M., Rickert, J., e Cho, H., A review of methods to reduce the probability of the airborne spread of COVID-19 in ventilation systems and enclosed spaces. *Environmental Research*, Elsevier, volume 203:1 – 12, 2021.
- Blocken, B., LES over RANS in building simulation for outdoor and indoor applications: a foregone conclusion? *Building Simulation*, volume 11: 821-870, 2018.
- Eli, L. G., Krelling, A. F., Olinger, A. P., e Lamberts, R., Thermal performance of residential building with mixed-mode and passive cooling strategies: The Brazilian context. *Energy & Buildings*, Elsevier, volume 244, 2021.
- EPE – Empresa de Pesquisa Energética. Nota Técnica EPE 030/2018: Uso de Ar Condicionado no Setor Residencial Brasileiro. Rio de Janeiro, 2018.
- EPE – Empresa de Pesquisa Energética. Estudos do Plano Decenal de Expansão de Energia 2030. Rio de Janeiro, 2020.
- Frontczak, M., Schiavon S., Goins, J., Arens, E., Zhang, H., e Wargocki, P., Quantitative relationships between occupant satisfaction and satisfaction aspects of indoor environmental quality and building design. *International Journal of Indoor Environment and Health, Indoor air*, Dinamarca, volume 22:119 – 131, 2011.
- Hooff, T.V., Blocken, B., e Tominaga, Y., On the accuracy of CFD simulations of cross-ventilation flows for a generic isolated building: Comparison of RANS, LES and experiments. *Building and Environment*, volume 114:148 - 165, 2017.
- Karava, P., Stathopoulos, T., e Athienitis, A.K., Airflow assessment in cross-ventilated

- buildings with operable façade elements. *Building and Environment*, volume 46:266-279, 2011.
- Nascimento, A.V., e Bono, G., Numerical simulation of wind-driven ventilation of a three-generic low-rise building in various geometrical configurations. *Ambiente Construído*, Porto Alegre, volume 22:269-288, 2022.
- Projetando Edificações Energeticamente Eficientes, disponível em <http://www.mme.gov.br/projeteee/>.
- Richards, P.J., e Hoxey, R.P., Appropriate boundary conditions for computational wind engineering models using the k- $\epsilon$  turbulence model. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, volume 46 e 47: 145-153, 1993.
- Sakiyama, N.R.M., Carlo, J.C., Frick, J., e Garrecht, H., Perspectives of naturally ventilated buildings: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, volume 130, 2020.
- Schibuola, L., e Tambani, C., High energy efficiency ventilation to limit COVID-19 contagion in school environments. *Energy and Buildings*, Elsevier, volume 240: 1 – 14, 2021.
- Soares, R.C.A., Estudo numérico da ventilação natural e conforto térmico em arranjos de edificações. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco, 2023.
- Tominaga, Y., e Blocken, B., Wind tunnel experiments on cross-ventilation flow of a generic building with contaminant dispersion in unsheltered and sheltered conditions. *Building and Environment*, volume 92:452-461, 2015.
- Triana, M. A., Lamberts, R., e Sassi, P., Characterisation of representative building typologies for social housing projects in Brazil and its energy performance. *Energy Policy*. Elsevier, volume: 87: 524 – 541, 2015.
- Zheng, W., Hu, J., Wang, Z., Li j., Fu, Z., Li, H., Jurasz, J., Chou, S. K., e Yan, J., COVID-19 Impact on Operation and Energy Consumption of Heating, Ventilation and Air-Conditioning (HVAC) Systems. *Advances in Applied Energy*, Elsevier, volume 3:1 – 25, 2021.