

ESTUDO COMPARATIVO DE VÁRIOS MODELOS DE FECHAMENTO PARA AS METODOLOGIAS RANS, LES E DES NA ANÁLISE DE VENTILAÇÃO NATURAL

COMPARATIVE STUDY OF SEVERAL CLOSURE MODELS FOR RANS, LES AND DES METHODOLOGIES IN NATURAL VENTILATION ANALYSIS

Alice C. Almeida; João Arthur V. de Sousa; Matheus L. Vasconcelos e Gustavo Bono

Laboratório de Engenharia Computacional (LECOM), Programa de Pós-Graduação Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Pernambuco, Av. Marielle Franco s/n – KM 59 – Nova PE, CEP 50104-900, Caruaru, Pernambuco, Brasil, alice.costaa@ufpe.br, joaoarthur.sousa@ufpe.br, matheus.lafayette@ufpe.br, gustavo.bono@ufpe.br

Palavras-chave: Ventilação natural, OpenFOAM, CFD.

Resumo. No Brasil, país de clima preponderantemente tropical, a obtenção do conforto térmico em habitações através da ventilação natural é uma estratégia de cunho social. Os sistemas passivos de ventilação variam em função do clima local, do tipo de edificação, em função da topologia e dos efeitos de vizinhança. Com o objetivo de prever os fluxos de ar e, conseqüentemente, do condicionamento interno em modelos habitacionais, utilizou-se o software de código aberto OpenFOAM. Foi simulado o escoamento em torno de um modelo de habitação genérica isolado empregando oito modelos de turbulência para a análise das principais variáveis. Para as simulações com a metodologia RANS foram empregados os modelos de fechamento Standart $k - \varepsilon$ (SKE), Renormalization Group $k - \varepsilon$ (RNG), Realizable $k - \varepsilon$ (RLZ), Shear Stress Transport $k - \omega$ (SST) e Spalart-Allmaras (S-A), enquanto para a metodologia LES adotou-se o modelo de sub-malha de Smagorinsky. Por fim, para metodologia DES consideram-se os modelos SA-DDES e SA-IDDES. Os resultados permitem comparar e analisar como as diferentes metodologias e modelos de turbulência influenciam as principais variáveis no caso de ventilação natural por diferença de pressão.

Keywords: Natural ventilation, OpenFOAM, CFD.

Abstract. In Brazil, a country with a predominantly tropical climate, obtaining thermal comfort in homes through natural ventilation is a social strategy. Passive ventilation systems vary depending on the local climate, building type, topology and neighborhood effects. In order to predict the air flows and, consequently, the internal conditioning in housing models, the open source software OpenFOAM was used. The flow around an isolated generic housing model was simulated using eight turbulence models for the analysis of the main variables. For the simulations with the RANS methodology, the closing models Standard $k - \varepsilon$ (SKE), Renormalization Group $k - \varepsilon$ (RNG), Realizable $k - \varepsilon$ (RLZ), Shear Stress Transport $k - \omega$ (SST) and Spalart- Allmaras (S-A), while for the LES methodology the Smagorinsky sub-mesh model was adopted. Finally, for the DES methodology, the SA-DDES and SA-IDDES models are considered. The results allow us to compare and analyze how the different methodologies and turbulence models influence the main variables in the case of natural ventilation by pressure difference.

1 INTRODUÇÃO

Brasil, país com extensão continental, localiza-se geograficamente entre dois trópicos situando-se na zona intertropical do planeta, o que caracteriza a sua diversidade em climas (LAMBERTS et al. 2014). Grande parte de sua extensão territorial compreende um clima quente e seco, característico da região nordeste. Atrelado aos aspectos climáticos do país, o estudo de alternativas de obtenção de conforto térmico em edificações vem sendo cada vez mais explorado entre estudiosos, com o intuito de se obter uma eficiência energética através do uso do condicionamento térmico passivo.

Prever o desempenho da ventilação é fornecer as informações sobre os parâmetros de ar antes da construção da edificação demanda o uso de ferramentas adequadas. Chen (2009), apresenta as principais ferramentas utilizadas para descrever o desempenho da ventilação natural sendo elas classificadas nos seguintes modelos: analíticos, empíricos, experimentais em pequena escala e em escala real, de rede multizona, zonais e de Dinâmica dos Fluidos Computacionais (CFD).

A simulação de modelos de edificações em diferentes circunstâncias é fundamental para o estudo da ventilação natural, demonstrando o desempenho das edificações antes mesmo de suas construções. Estimar o desempenho da ventilação é fundamental para o planejamento construtivo, prevendo problemas e testando soluções. Essa análise de desempenho relaciona-se a um dos principais problemas no campo da Engenharia do Vento Computacional. Neste trabalho, busca-se analisar a dinâmica do escoamento em uma edificação considerando a ventilação cruzada através de simulações 2D com CFD. Para o estudo, consideram-se os modelos de turbulência $k-\varepsilon$ padrão, $k-\omega$ SST, Spalart-Allmaras (AS), Renormalization Group $k-\varepsilon$ (RNG), Realizable $k-\varepsilon$ (RLZ), Large Eddy Simulation – LES, SA-DDES e SA-IDDES. Objetivando examinar como os diferentes modelos de turbulência influenciam os principais parâmetros e a topologia do escoamento.

2 METODOLOGIA

Empregou-se a ferramenta de distribuição livre e gratuita, OpenFoam (do inglês *Open Source Field Operation and Manipulation*), escrita em linguagem C++ e desenvolvido para resolução de problemas que envolvem campos tensoriais com funcionalidades de pré e pós-processamento. Para a modelagem do escoamento turbulento empregam-se as metodologias baseadas nas equações médias de Reynolds (*Reynolds-averaged Navier-Stokes* – RANS), de Simulação de Grande Escala (*Large Eddy Simulation* – LES) e o modelo híbrido RANS/LES (*Detached Eddy Simulation* – DES).

No modelo DES, aproveitam-se as vantagens da metodologia RANS nas regiões parietais (camada limite) e nas regiões de escoamento cisalhante livre as grandes escalas são resolvidas através de LES. Para as simulações com a metodologia RANS foram empregados os modelos de fechamento Standart $k-\varepsilon$ (SKE), Renormalization Group $k-\varepsilon$ (RNG), Realizable $k-\varepsilon$ (RLZ), Shear Stress Transport $k-\omega$ (SST) e Spalart-Allmaras (S-A), enquanto para a metodologia LES adotou-se o modelo de sub-malha de Smagorinsky. Por fim, para metodologia DES consideram-se os modelos Spalart-Allmaras Delayed Detached Eddy Simulation (SA-DDES) e Spalart-Allmaras Improved Delayed Detached Eddy Simulation (SA-IDDES).

No Quadro 1 são apresentados os solucionadores, os regimes de escoamento e a referência adotada para cada modelo de fechamento empregado na pesquisa. Para o estudo comparativo, adota-se o modelo de edificação denominado como caso E1 no estudo experimental desenvolvido por Karava, Stathopoulos e Athienitis (2011). Simula-se o escoamento bidimensional ao redor da edificação genérica a qual apresenta duas aberturas de mesmo tamanho, uma na face a barlavento e outra a sotavento, conforme mostrado na Figura 1. As dimensões do modelo de edificação são

0,2 x 0,16 m² (D x H). As paredes e teto da unidade habitacional têm espessura de 0,02H. Para o domínio computacional seguiu-se as diretrizes de melhor prática de Franke et al. (2007), Tominaga et. al. (2008) e Blocken (2015), adotando-se uma distância de 15H à jusante da edificação e 6H de altura. Conforme empregado por Hoof, Blocken e Tominaga (2017), adota-se um espaçamento mínimo entre o início do domínio e o modelo a ser estudado de 3H para minimizar o crescimento da camada limite. As dimensões totais do domínio são 3,08 x 0,95 m². Na Figura 1, mostra-se o domínio computacional bem como a geometria da edificação.

Metodologia	Modelos de Fechamento	Solver	Regime	Referência
RANS	SKE	SimpleFoam	Estacionário	Launder e Spalding (1974)
	RNG			Yakhot et al. (1992)
	RLZ			Shih et al. (1995)
	SST			Menter e Esch (2001)
	AS			Spalart e Allmaras (1994)
LES	Smagorinsky	PisoFoam	Transiente	Smagorinsky (1963)
DES	SA – DDES	PimpleFoam		Spalart et al. (2006)
	SA – IDDES			Gritskevich et al. (2012)

Quadro 1: Detalhamento dos modelos de fechamento empregados

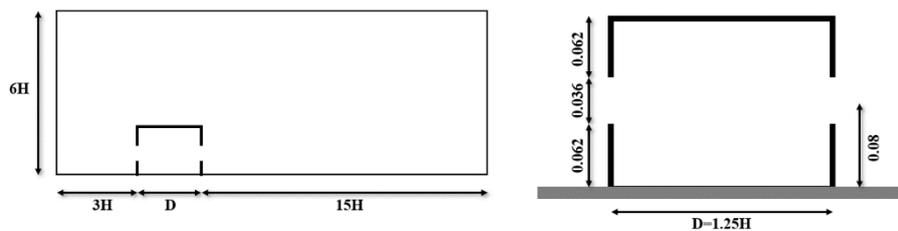


Figura 1: Domínio Computacional 2D.

A discretização espacial do domínio foi realizada com o software de código aberto Salomé, versão 9.3. A malha de elementos hexaédricos apresenta uma maior concentração de elementos próximos à edificação e suas aberturas (Fig. 2). A discretização empregada no estudo resulta de uma análise de sensibilidade de malha usando três diferentes malhas: uma grosseira (M1), uma básica (M2) e uma mais refinada (M3). Os resultados da análise de sensibilidade de malha são apresentados na seção 3.1.

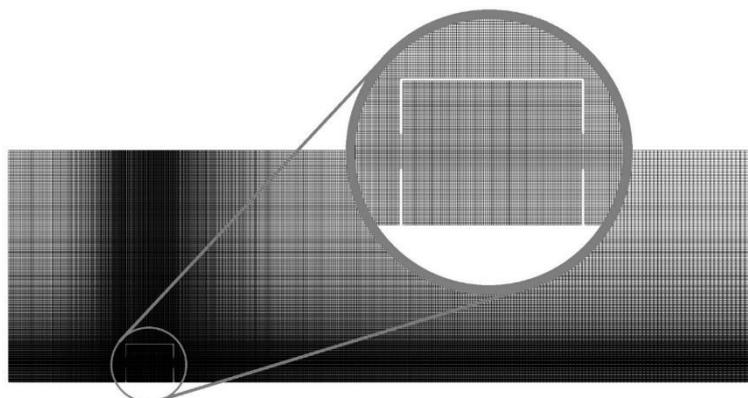


Figura 2: Discretização do domínio correspondente à malha M3.

Na etapa de análise e comparação dos resultados entre os modelos de turbulência, examinou-se os principais parâmetros do escoamento e a vazão na abertura da edificação. Também, apresenta-se a componente da velocidade em três cortes verticais no interior da edificação, determinou-se o ângulo de inclinação do jato na abertura, seu perfil, bem como a propagação e espalhamento do mesmo. Ainda em relação à variável velocidade, coletou-se os dados em um corte horizontal na altura do eixo das aberturas. Devido ao tipo de modelagem empregada no presente estudo (bidimensional) não foi possível comparar com os resultados do ensaio experimental 3D (Karava, Stathopoulos e Athienitis, 2011). Os efeitos tridimensionais tem uma forte influência nas principais variáveis do problema.

2.1 Condições de Contorno

As condições iniciais e condições de contorno relacionadas ao escoamento do vento são inseridas diretamente dentro dos diretórios de cada simulação através de arquivos de texto. O perfil de velocidade de entrada foi prescrito usando a lei logarítmica, sendo dada pela equação (1). Conforme Richards e Hoxey (1993), o modelo é bastante eficiente para representar as condições ABL (*Atmospheric Boundary Layer*) levando em consideração a influência da rugosidade da superfície terrestre sobre o escoamento.:

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

Sendo u_{ABL} a velocidade de fricção ABL, em metros por segundo, κ a constante de von Karman (0,42), z a altura em relação ao solo e z_0 a altura rugosa (0,0009 m). O valor correspondente de u^*_{ABL} é 0,348 m/s para a velocidade de referência no topo da edificação ($U_H = 4,3$ m/s). O número de Reynolds em função da velocidade de referência na altura da edificação (H) é igual a 45.000.

Emprega-se uma função de parede na energia cinética turbulenta k nomeada no OpenFOAM como `kqRWallFunction`. Para a energia cinética turbulenta ε , aplica-se a função de parede nomeada como `epsilonWallFunction` e, para a dissipação de turbulência específica w , adota-se a função `omegaWallFunction`. Para a viscosidade turbulenta μ_t utiliza-se uma função de parede baseada na rugosidade (`nutkRoughWallFunction`), onde adota-se a altura rugosa k_s como zero, ver Cebeci e Bradshaw (1997). Para as simulações realizadas com a metodologia RANS, o regime de escoamento adotado foi permanente e o solucionador empregado foi o *simpleFoam*, no qual as equações são resolvidas sem o uso de derivadas temporais. Adota-se um número total de 10.000 iterações para todas as simulações que utilizaram o *simpleFoam*. Por sua vez, as simulações LES e DES, devido à sua natureza, foram realizadas em regime transiente. Adotando-se nesses casos um incremento de tempo Δt de 0,00021 s e um tempo físico total de 20 s.

2.2 Modelagem Numérica

Conforme as práticas adotadas por Nascimento e Bono (2022), todos os esquemas de discretização utilizados são de segunda ordem. Nas simulações com escoamento em regime transiente, para a discretização da derivada temporal, utiliza-se o esquema de Crank-Nicolson. Para discretização dos termos difusivos faz-se uso do esquema Linear, e para os termos advectivos, que precisam de maior estabilidade numérica, faz-se uso do esquema Upwind de Segunda Ordem. Para resolver os sistemas lineares das equações acopladas, adota-se o solver GAMG (do inglês *generalised geometric-algebraic multi-grid*) para as equações de pressão e o solver smooth com esquema Gauss-Seidel para as equações de velocidade e das variáveis de turbulência.

3 RESULTADOS

3.1 Estudo de Refinamento de Malha

Inicialmente, foi realizado uma análise de sensibilidade de malha com o modelo SKE. Foram empregadas três malhas (grosseira, básica e refinada), denominadas M1, M2 e M3, sendo compostas por 30.524, 60.210 e 120.501 volumes de controle, respectivamente. Na Figura 3, mostra-se a distribuição da componente da velocidade média na direção x adimensionalizada (U_x/U_H) ao longo de três linhas verticais localizadas dentro da edificação, (A) $x/D = 0,125$, (B) $x/D = 0,5$ e (C) $x/D = 0,875$. Observa-se que os resultados obtidos com as malhas M2 e M3 são muito próximos enquanto a malha M1 apresenta algumas discrepâncias com relação aos resultados das malhas mais refinadas principalmente nas regiões de alta velocidade (valores positivas e negativas). No presente estudo, adota-se a malha M3, uma vez que as malhas M2 e M3 convergem para resultados muito próximos. Foi descartada a possibilidade de utilizar uma malha ainda mais refinada, uma vez que tal medida levaria apenas a um maior custo computacional sem produzir melhoras significativa nos resultados com as metodologias RANS. A mesma malha foi adotada para as metodologias DES e LES, entretanto, para satisfazer a condição de y^+ deveria ser considerada uma malha mais refinada nas proximidades das paredes. Como o presente trabalho tem como principal objetivo comparar as soluções de vários modelos de turbulência, adota-se a mesma malha para todas as metodologias. Futuros estudo pretendem comparar as soluções considerando malhas mais refinadas para os casos DES e LES.

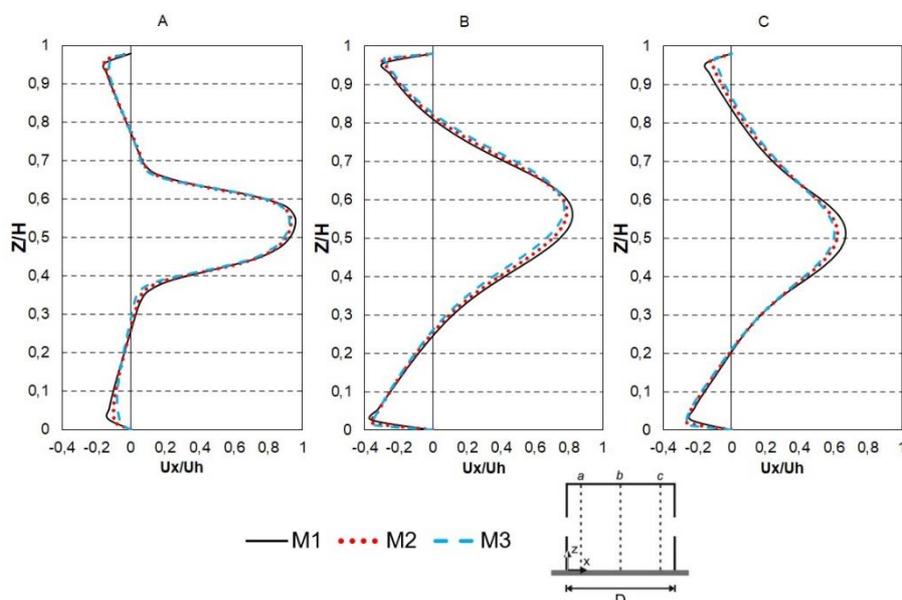


Figura 3 – Distribuição de velocidade adimensionalizada para as malhas M1, M2 e M3 ao longo três linhas verticais dentro da edificação.

3.2 Simulações

Na Figura 4, mostra-se uma comparação da distribuição da componente da velocidade na direção x adimensionalizada (U_x/U_H) para as oito metodologias de modelagem da turbulência estudados. Analisam-se os resultados para as mesmas três linhas verticais consideradas no estudo de refinamento da malha. As principais observações são:

- Nas três linhas verticais analisadas percebe-se que o máximo valor de U_x/U_H tem variação significativa: no corte A de $0,9 \leq U_x/U_H \leq 1,3$, no corte B de $0,8 \leq U_x/U_H \leq 1,3$ e no corte C de $0,6 \leq U_x/U_H \leq 1,1$. Em todos os casos, o modelo SST apresentou os maiores valores de velocidade máxima.
- No corte A, observa-se que a posição vertical do máximo valor de U_x/U_H é praticamente a mesma, aproximadamente $z/H = 0,55$, para todos os modelos de turbulência, com exceção do LES. Esse comportamento também se observa no corte C, entretanto, para uma altura levemente menor, em torno de $z/H = 0,5$. No corte B, por outro lado, não se percebe nenhuma tendência, já que a posição vertical do valor máximo de U_x/U_H varia entre 0,45 (LES) e 0,6 (SKE).
- Independentemente do corte, a modelagem LES sempre apresenta a máxima velocidade nos menores valores de z/H , enquanto o modelo SKE apresenta os maiores valores.
- Os modelos SA e SA-IDDES apresentam perfis de velocidade praticamente idênticos nos três cortes. O modelo RNG também apresenta uma boa semelhança com os mesmos. Nota-se ainda que o SKE e o RLZ têm comportamento bastante semelhante, com o RLZ sempre apresentando valores maiores. Por sua vez, os modelos LES e SA-DDES mostram perfis de velocidade próximos, entretanto, com diferenças significativas com relação aos demais modelos.
- No corte A, pode-se perceber facilmente que a topologia do escoamento interno obtida com os modelos LES e SA-DDES varia significativamente com relação aos outros modelos.

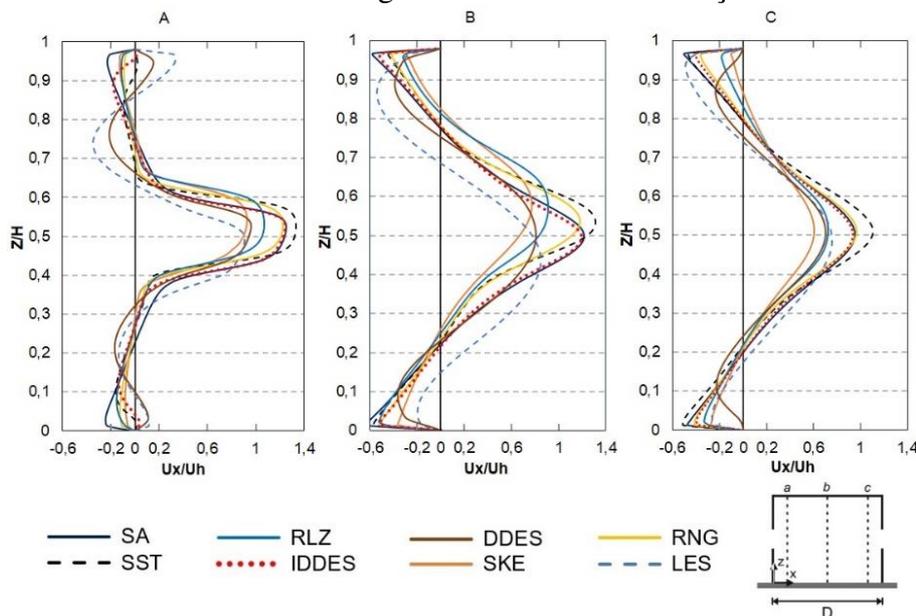


Figura 4 – Comparação da velocidade média adimensional na direção x (U_x/U_H) para diferentes modelos de turbulência ao longo três linhas verticais dentro da edificação. (A) $x/D = 0,125$; (B) $x/D = 0,5$; (C) $x/D = 0,875$.

Na Figura 5, apresenta-se a distribuição da velocidade média adimensional ($|V|/U_H$), bem como a meia-largura do jato ($\delta_{0,5}$), visualizada com pontos brancos, para cada modelo de turbulência em ambos os lados da linha central do jato ($\delta_{0,5;superior}$ e $\delta_{0,5;inferior}$). Também, calcula-se o valor de $(\delta_{0,5;superior} + \delta_{0,5;inferior})/H_0$ em $x/D = 0,6$, sendo H_0 a altura da abertura de entrada. Conforme Hoof, Blocken e Tominaga (2017), a meia largura do jato $\delta_{0,5}$ é definida como a distância linear vertical entre a magnitude da velocidade máxima local do jato ($|V|_{MAX}$) e o local onde a magnitude da

velocidade é igual à metade dessa velocidade máxima, ou seja, $0.5|V|_{MAX}$. Analisando as figuras, podem-se fazer as seguintes observações:

- Com relação à direção do jato na abertura de entrada, é possível dividir os modelos em três grupos. O primeiro deles, composto pelos modelos SA, SA-IDDES, SA-DDES, RNG e SST, apresentam um jato de entrada com uma trajetória aproximadamente horizontal. No segundo grupo, os modelos SKE e RLZ trazem um jato de entrada com uma trajetória ascendente. Por fim, o terceiro grupo, formado apenas pelo modelo LES mostra um jato com direção descendente.
- A metodologia LES produz o maior espalhamento do jato, sendo o valor do parâmetro $(\delta_{0,5;superior} + \delta_{0,5;inferior})/H_0$ igual a 1,61, seguido pelo SA-DDES (1,56), SKE (1,51) e RLZ (1,46).
- Em concordância com os dados mostrados na Figura 3, a maior velocidade do jato na abertura de entrada foi obtida pelo modelo SST, seguido pelos modelos SA, SA-IDDES e RNG. Cabe ressaltar que esses quatro modelos apresentaram os menores espalhamentos do jato.
- No interior da edificação, o modelo LES é o único que apresenta regiões de alta velocidade fora da zona efetiva do jato.
- O jato na abertura de saída não está bem definido somente nos modelos SA-DDES e LES em comparação com os demais modelos estudados.

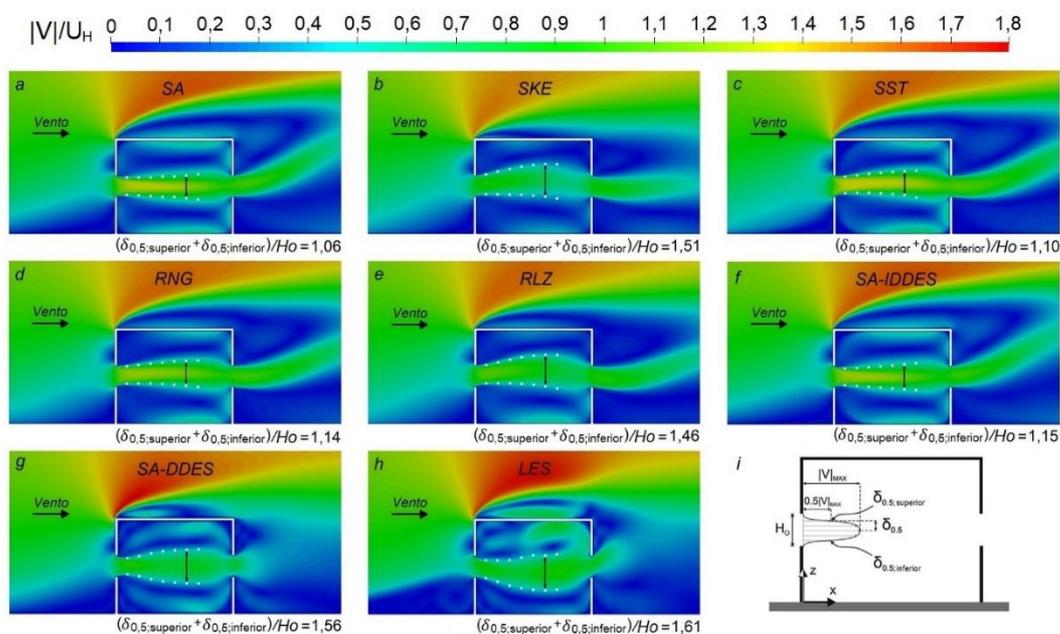


Figura 5 – Distribuição da velocidade média adimensional ($|V|/U_H$) obtida com os oito modelos de turbulência. (i) representação esquemática da locação da velocidade máxima do jato. Os pontos brancos indicam a locação das meia-larguras do jato $\delta_{0,5;superior}$ e $\delta_{0,5;inferior}$.

A variação da componente da velocidade na direção x (U_x/U_H) ao longo da linha média entre as duas aberturas, $z/D = 0,50$, apresenta-se na Figura 6(a). Os resultados permitem separar os modelos em dois grandes grupos, os modelos da metodologia RANS, SST, RNG, SA e o modelo híbrido SA-IDDES, mostram maiores valores de velocidade em comparação com os outros modelos, com U_x/U_H quase que inteiramente acima de 1,0. Tal informação corrobora o mostrado

na Figura 5, a qual demonstra que esses quatro modelos são os que apresentam menor espalhamento do jato de entrada devido à maior velocidade. O segundo grupo, formado pelos demais modelos apresenta valores de U_x/U_H inteiramente abaixo de 1,0, com exceção do RLZ que ultrapassa esse valor em $0,05 \leq x/D \leq 0,25$. Observa-se que o modelo LES e o híbrido SA-DDES apresentam oscilações no valor da velocidade devido à complexa topologia do escoamento no interior da edificação.

Na Figura 6(c), apresentam-se os valores da vazão adimensionalizada para cada um dos modelos de turbulência analisados. Os resultados variam entre 0,682 (LES) e 0,97 (SST). Os dados são consistentes com as informações apresentadas anteriormente, uma vez que os modelos SST e LES foram dos modelos com maior e menor velocidade, respectivamente. Mais uma vez é possível notar que o SA e SA-IDDES apresentam resultados muito semelhantes, bem como o LES e o SA-DDES.

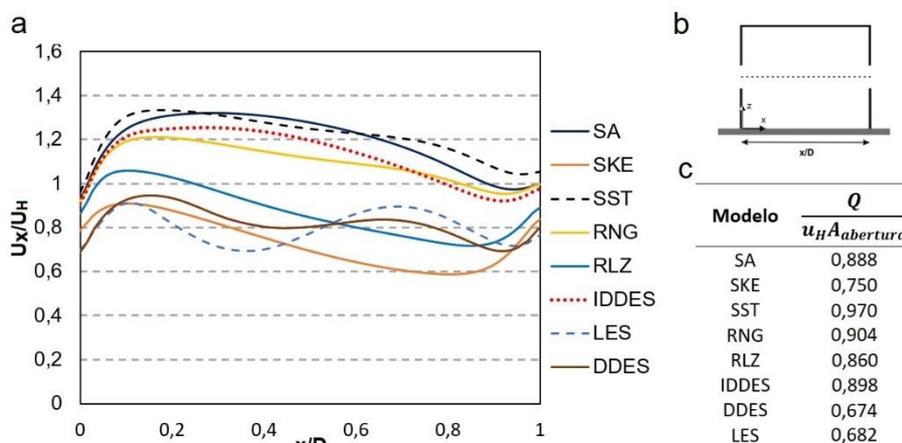


Figura 6 – (a) Velocidade adimensionalizada na direção x (U_x/U_H) ao longo de uma linha horizontal ($z/H = 0,5$). (b) Representação esquemática da linha horizontal. (c) Vazões adimensionalizadas.

Por fim, na Figura 7 apresenta-se a distribuição de pressão nas proximidades do modelo analisado. Observa-se o mesmo comportamento em todos os modelos no que diz respeito à sobrepressão na parte superior da fachada frontal e drástica redução após a separação do escoamento. Os modelos LES e SA-DDES são os únicos que apresentam uma região de pressão negativa mais intensa, no topo da edificação. O modelo LES apresenta maior pressão dentro da edificação, tendo apenas uma região de baixa pressão devido à intensidade do vórtice contrarrotativo superior. Os modelos SA, SST, RNG e SA-IDDES apresentam distribuição de pressão muito semelhantes, enquanto o SKE e RLZ diferem destes e apresentam distribuições de pressão parecidas entre si.

4 CONCLUSÕES

No presente trabalho, foram apresentados resultados comparativos da aplicação das metodologias RANS, LES e DES ao problema de ventilação cruzada em um modelo genérico de edificação, com o objetivo de avaliar o desempenho e eficiência das metodologias de modelagem da turbulência em capturar os principais parâmetros e física do problema. Foram analisados cinco modelos de fechamento da turbulência baseados na metodologia RANS, um modelo LES e dois modelos híbridos, onde seus resultados foram apresentados e comparados para análise. Comparam-se as distribuições de campos médios de velocidade e pressão, o valor da vazão, a topologia do escoamento, além da direção, espalhamento, trajetória e ângulo do jato na abertura

de entrada.

Dentre os modelos analisados, o SST apresenta os maiores valores de velocidade e pressão e sempre mostra concordância com o modelo RNG em termos da distribuição de pressão e topografia do escoamento, de direção, trajetória e ângulo do jato. Essa mesma semelhança desses parâmetros também é observada entre os modelos SKE e RLZ e entre o SA e o SA-IDDES. O modelo SA-DDES possui direção, trajetória e ângulo do jato análogos aos modelos SA e SA-IDDES, enquanto o perfil de velocidade, e espalhamento do jato mostra semelhança com o modelo LES. A metodologia de Grandes Escalas (LES) apresenta um perfil com menor velocidade quando comparado aos demais modelos, além de uma topografia de escoamento mais complexa em quantidade e forma dos vórtices, um maior ângulo do jato, e maior valor de pressão no interior da edificação.

Os maiores valores de velocidade adimensionalizada estão relacionados com os modelos que apresentam os menores espalhamentos do jato, o que caracteriza uma trajetória mais horizontal. Este fato, é reforçado quando se avalia o ângulo do jato na abertura de entrada, obtendo um valor de inclinação de 5.7° para o modelo SST (maior velocidade) em comparação a $11,62^\circ$ de inclinação para o modelo LES (menor velocidade).

Em função dos resultados apresentados, pode-se observar que a metodologia RANS difere do LES, e os modelos híbridos se aproximam mais do RANS do que o modelo LES.

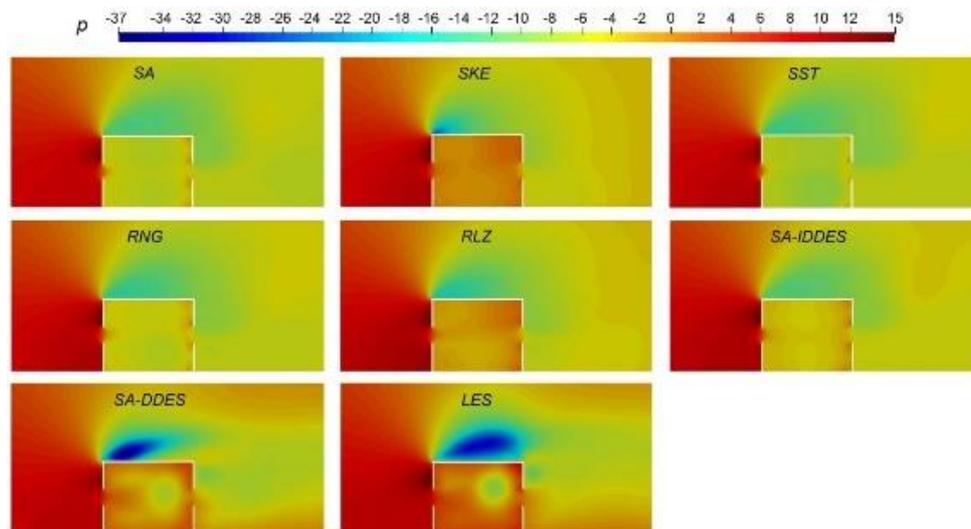


Figura 7 – Distribuição de pressão em torno da edificação.

5 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco (FACEPE) pelo apoio financeiro prestado através das bolsas de Mestrado, bem como ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa de Iniciação Científica.

REFERÊNCIAS

Blocken B. Computational Fluid Dynamics for urban physics: importance, scales, possibilities, limitations and ten tips and tricks towards accurate and reliable simulations, *Build. Environ.* v. 91, p. 219-245, 2015.

- Cebeci, T., Bradshaw, P. Momentum Transfer in Boundary Layers. *Hamisphere Publishing Corporation*, 1977.
- Chen, Q. Ventilation Performance Prediction for Buildings: a method overview and recent applications. *Building and Environment*, v. 44, n. 4, p. 848-858, abr. 2009.
- Franke J., Hellsten A., Schlünzen H., Carissimo B. Best Practice Guideline for the CFD Simulation of Flows in the Urban Environment, COST Office Brussels, 2007. ISBN 3-00-018312-4.
- Gritskevich, M.S., Garbaruk, A. V. Schütze, J., Menter, F. R. Development of DDES and IDDES Formulations for the k-w Shear Stress Transport Model. *Flow, Turbulence and Combustion*, v. 88, p. 431-449, 2012.
- Hooff, T. V., Blocken, B., 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*, v. 114, p. 148-165, 2017.
- Karava, P., Stathopoulos, T., Athienitis, A. K. Airflow assessment in cross ventilated buildings with operable façade elements. *Building and Environment*, v. 46, p. 266-279, 2011.
- Lamberts, R., Dutra, L., Pereira, F. O. R. Eficiência energética na arquitetura. São Paulo, 2014.
- Launder, B. E., Spalding, D. B. The numerical computation of turbulent flows. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, v. 3, n. 2, p. 269-289, 1974.
- Menter, F., Esch, T. Elements of Industrial Heat Transfer Predictions. Uberlandia, Brazil, 2001.
- Nascimento, A. V., Bono, G. Numerical simulation of wind-driven ventilation of a three-generic low-rise building in various geometrical configurations. *Ambiente Construído*, Porto Alegre, v. 22, n. 2, p. 269-288, abr./jun. 2022.
- Richards, P. J., Hoxey, R. P. Appropriate boundary conditions for computational wind engineering models using the k- ϵ turbulence model. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, v. 46 e 47, p. 145-153, 1993.
- Shih, T. H., Liou, W.W. Shabbir, A., Yang, Z., Zhu, J. A new k-e eddy viscosity model for high Reynolds number turbulent flows. *Computers and Fluids*, v. 24, p. 227-238, 1995.
- Smagorinsky, J. General Circulation Experiments with the Primitive Equations. I. The Basic Experiment. *Monthly Weather Review*, v. 91, n. 3, p. 99-164, 1963.
- Spalart, P. R., Allmaras, S. R. A One-Equation Turbulence Model for Aerodynamic Flows. *Recherche Aérospatiale*, v. 1, p. 5-21, 1994.
- Spalart, P. R., Deck, S., Shur, M. L., Squires, M. K., Strelets, M. K., Travin, A. A new version of Detached-eddy Simulation, Resistant to Ambiguous Grid Densities. *Theoretical and Computational Fluid Dynamics*. v. 20, p. 191-195, 2006.
- Tominaga Y., Mochida A., Yoshie R., Kataoka H., Nozu T., Yoshikawa M., Shirasawa T., AIJ guidelines for practical applications of CFD to pedestrian wind environment around buildings, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* v. 96, p. 1749 – 1761, 2008.
- Yakhot, V., Orszag, S. A., Thangam, S., Speziale, C. G. Development of Turbulence Models for Shear Flows by a Double Expansion technique. *Physics of Fluids A Fluid Dynamics*, v. 4, 1992.