ESTUDO QUALITATIVO DA VENTILAÇÃO NATURAL EM AMBIENTES INTERNOS: UMA ANÁLISE COMPARATIVA DO APLICATIVO DE *SMARTPHONE WINDTUNNEL* CFD E CFD (ANSYS)

Maria Isabel P. Custódio (1); Fernando da S. Almeida (2); Roseana M. Ribeiro (3); Ricardo César Rodrigues (4); Juliana O. Batista (5)

(1) Arquiteta e Urbanista, Mestranda do Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo - PPU/UEM-UEL, custodio.mariaip@gmail.com, Universidade Estadual de Maringá;
(2) Arquiteto e Urbanista, Mestrando do Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo - Pós-ARQ/UFSC, fernandosilvaalmeida@hotmail.com, Universidade Federal de Santa Catarina;
(3) Arquiteta e Urbanista, Mestranda do Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo - Pós-ARQ/UFSC, roseana_mr@hotmail.com, Universidade Federal de Santa Catarina;
(4) Arquiteto e Urbanista, Mestrando do Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo - PPU/UEM-UEL, rcrodrigues.arq2@gmail.com, Universidade Estadual de Londrina;
(5) Doutora em Engenheira Civil, Professora do Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, juliana.batista@fau.ufal.br, Universidade Federal de Alagoas.

RESUMO

A ventilação natural é considerada uma estratégia eficiente para controle do conforto térmico humano, assim como para redução do consumo energético de edificações. Entretanto, para eficácia dessa técnica, é importante compreender o fluxo de ar e as características de transferência de calor nas fases iniciais de projeto. Dentre as ferramentas para avaliação da ventilação natural, tem-se o *software* de Dinâmica dos Fluidos Computacional (*Computational Fluid Dynamic* - CFD). Contudo, esta ferramenta é complexa e possui alto custo, o que dificulta a sua incorporação no ensino da concepção projetual. Dessa maneira, o objetivo deste trabalho é avaliar o aplicativo de *smartphone Wind Tunnel* CFD, como ferramenta simplificada para estudo da ventilação natural a partir de análise qualitativa da distribuição do ar em ambientes internos através da comparação dos resultados visuais com o *software* CFD. Os resultados obtidos demonstraram correspondência entre a distribuição dos fluxos de ar simulados pelas ferramentas, verificados a partir da análise de similaridade da imagem com o auxílio de um software de código aberto. Assim, o dispositivo pode ser considerado uma ferramenta útil, acessível, intuitiva e didática para análises simplificadas do fluxo de ar em ambientes internos. Além disso, possui grande potencial tanto para uso no meio acadêmico quanto na área profissional, em especial nas etapas iniciais de projeto. Salienta-se que o *Wind Tunnel* CFD possui limitações, dessa forma é indicado o uso cauteloso da ferramenta.
Palavras-chave: ventilação natural, projeto arquitetônico, *wind tunnel* CFD, dinâmica dos fluidos computacionais.

ABSTRACT

Natural ventilation is considered an efficient strategy to control human thermal comfort and reduce buildings' energy consumption. However, it is essential to understand the airflow and the heat transfer characteristics in the initial design phases for this technique's effectiveness. One of the well-known tools for assessing natural ventilation is the Computational Fluid Dynamic (CFD) software. Nevertheless, this tool is complex and has a high cost, making it challenging to incorporate it into project design teaching. Thus, this work aims to evaluate Wind Tunnel CFD's smartphone application as a simplified tool for studying natural ventilation from a qualitative analysis of indoor air distribution by comparing the visual results with the CFD software. The results obtained showed a correspondence between the distribution of the air flows simulated by both tools, which was verified from the analysis of similarity of the image with the aid of an algorithm developed for this information technology. Thus, the device can be considered a useful, accessible, intuitive and didactic tool for simplified analysis of the flow of indoor environments. In addition, it has great potential both for use in academia and in the professional area, especially in the initial stages of the project. It should be noted that the Wind Tunnel CFD has limitations, so the cautious use of the tool is indicated.
Keywords: natural ventilation, architectural design, wind tunnel CFD, computational fluid dynamic.

1. INTRODUÇÃO

Segundo estudos da Agência Internacional de Energia (*International Energy Agency* - IEA, 2019), 36% do consumo energético no mundo está relacionado aos edifícios, o que aumenta as emissões de gases de efeito estufa. No Brasil, o setor residencial é responsável por consumir cerca de 26% de toda energia elétrica produzida no país (Balanço Energético Nacional - BEN, 2020), sendo que grande parte desta demanda é proveniente do uso de sistemas ativos para refrigeração dos edifícios (ar-condicionado, ventiladores elétricos, exaustores, trocadores de ar, dentre outros). Em pesquisa elaborada pela Empresa de Pesquisa Energética - EPE (2018), estimou-se que aposse de condicionadores de ar em residências brasileiras dobraria em menos de 17 anos, elevando o consumo energético no país.

Dessa maneira, a aplicação de estratégias bioclimáticas como a ventilação natural, inércia térmica, sombreamento, resfriamento evaporativo e outras, para resfriamento das edificações são soluções importantes para minimizar a demanda por energia. Dentre estas técnicas, a ventilação natural é bastante eficiente para o controle térmico dos espaços, minimizando significativamente o custo de energia, sendo indicada para regiões de clima temperado e de clima quente e úmido, como é o caso de grande parte do território brasileiro (FROTA; SCHIFFER, 1999; LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014; SUBHASHINI; THIRUMARAN, 2019). Tal solução passiva propicia a dissipação de calor e desconcentração de vapores, fumaça, poeiras e poluentes a partir da renovação do ar, fundamental para higiene em geral e conforto térmico humano em estações quentes (RIVERO, 1986; FROTA; SCHIFFER, 1999; BITTENCOURT; CÂNDIDO, 2008).

Segundo Subhashini e Thirumaran (2019), para a eficácia da ventilação natural é importante compreender o fluxo de ar e as características de transferência de calor dentro e ao redor das edificações. Para Almeida et al. (2020) e Fu e Han (2020), a avaliação da ventilação natural na fase inicial do projeto arquitetônico é fundamental para fornecer decisões que influenciem nos resultados de desempenho da mesma. Entretanto, comumente o arquiteto não possui clara compreensão sobre a relevância do design passivo, e muitas vezes não consegue apresentar estratégias que atendam às características climáticas locais (GUO; LIU; YUAN, 2016). Tal fenômeno pode ser explicado pela complexidade de se compreender os parâmetros físicos que envolvem a ventilação natural (OMRAMI et al., 2017).

Dentre as formas de avaliar o fluxo de ar interno, Sacht e Lukiantchuki (2017) destacam que uma das mais indicadas e precisas são as ferramentas que se baseiam na simulação numérica de processos físicos e/ou físico-químicos que possuem fluxo. O CFD usa métodos numéricos para resolver equações básicas que descrevem a conservação da massa, momento e calor nos fluidos (FAWCETT, 1991). De acordo com Martins e Da Graça (2016), essas ferramentas variam de simulações de rede de fluxo de ar (que utilizam de cálculos de Coeficiente de Pressão - Cp), até simulações tridimensionais complexas de dinâmica dos fluidos (que são capazes de produzir dados de campo de fluxo inteiro em grande escala). O CFD é uma das ferramentas mais precisas para simulação numérica de fluido, de acordo com Versteeg e Malalasekera (1995, apud TRINDADE; PEDRINI; DUARTE, 2010), os programas que utilizam CFD normalmente são estruturados em três módulos: (1) o pré-processamento, onde o usuário pode definir as características geométricas do domínio malha com suas sub-regiões, as propriedades do fluido, as condições de contorno, entre outros; (2) o módulo processador, responsável pelo cálculo do escoamento; e (3) o pós-processador, que oferece a visualização dos resultados do escoamento, com saídas gráficas e alfanuméricas.

O uso de *software* baseado em CFD teve um aumento significativo com a evolução da capacidade computacional e o desenvolvimento de novas interfaces, o que está tornando a técnica CFD muito popular (CHEN, 2004). Segundo Lukiantchuki (2014), entre os programas comerciais CFD disponíveis para estudos de ventilação natural, destacam-se o Fluent, o Flowvent, Vortex, Phoenics (CHAM) e o CFX (Ansys). O CFD possui inúmeras vantagens, tais como: (a) permitir dados em todos os pontos do domínio simultaneamente; (b) não sofrer limitações de dimensionamento (VAN HOOFF et al., 2011); (c) apresentação de resultados qualitativos que permitem avaliar a distribuição do fluxo de ar no interior da edificação; (c) divisão das simulações em domínios separados e (d) integração com programas de auxílio ao desenho arquitetônico (CAD). Por esses motivos, as ferramentas baseadas no CFD têm se consolidado como uma importante ferramenta de análise dos efeitos da ventilação natural (LUKIANTCHUKI, 2014).

No entanto, apesar das vantagens apresentadas, estes programas apresentam muitos desafios ao simular a ventilação natural, como: (a) grandes custos computacionais, de licença e pessoais, que são necessários na sua utilização (FIGUEIREDO, 2007); (b) a utilização de aproximações para prever o desempenho de edifícios, por conta da dificuldade em estabelecer condições de contorno (CHEN, 2009); (c) a dificuldade de aplicação nas etapas iniciais de projeto e (d) o desconhecimento desses programas pela grande maioria dos projetistas atuantes no Brasil. Portanto, por mais que esses programas tenham se tornado acessíveis para a pesquisa científica, o uso por parte do arquiteto ainda é dificultado (TRINDADE;

PEDRINI; DUARTE, 2010). Sendo assim, se faz necessário o desenvolvimento de pesquisas com ferramentas simplificadas que possam ser utilizadas durante as etapas iniciais de projeto.

Dentre as ferramentas simplificadas, pode-se destacar a mesa d'água, sendo uma das mais acessíveis, além de apresentar grande potencial para uso didático e prático do ensino do fluxo de ar interno (ROYAN; VAIDYA, 2020; XAVIER et al., 2020). Outras ferramentas simplificadas vêm sendo utilizadas para simular o percurso do ar em ambientes internos, como o *software* Fluxovento e o aplicativo *Wind Tunnel*, sendo este último objeto de estudo desta pesquisa. O aplicativo *Wind Tunnel* é uma ferramenta que simula túnel de vento, e apresenta duas versões, a versão *Free* e a CFD. Ambas as opções estão disponíveis para *smartphones* e *tablets* (Android ou iOS), sendo a primeira de forma gratuita (ALMEIDA et al., 2020). Assim como as demais ferramentas de simulação simplificada, a simulação no *Wind Tunnel* é apenas bidimensional. A ferramenta foi criada pela Algorizk[1] em conjunto com a Numeca Internacional[2] com o objetivo de fornecer um aplicativo educacional que apresenta resultados quantitativos bidimensionais (2D) em comparação com experimentos, CFD tridimensional (3D) ou resultados analíticos (ALGORIZK, 2018).

As duas versões do aplicativo permitem: (a) compreensão da magnitude e do ângulo de velocidade de entrada do vento; (b) a obtenção da viscosidade do fluido; (c) a compreensão da relação entre a elevação e arrasto (*lift/drag*); (d) número de Reynolds (Re) (ARAÚJO, 2017). O controle da velocidade do fluxo ocorre de forma empírica na versão gratuita, não sendo possível adicionar valores precisos. Em contrapartida a opção CFD permite mais domínio dos fenômenos físicos. Uma grande vantagem desta ferramenta é a interface intuitiva do programa que pode auxiliar no ensino e estudo da ventilação natural de maneira acessível e didática (ALMEIDA et al., 2020).

Na literatura é possível encontrar pesquisas que comparam resultados de ferramentas simplificadas com simulações de CFD. Xavier et al. (2020), analisaram ferramentas simplificadas (Fluxovento e mesa d'água) que representavam o fluxo de ar de maneira fiel, comparando os resultados com simulações de alta precisão utilizando o software de Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD) – CFX 12.0; GULARTE et al (2018), também compararam resultados obtidos em uma ferramenta simplificada (mesa d'água) com o software de Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD) – CFX 12.0, observando o impacto do tamanho da abertura e posição no desempenho do fluxo de ar em modelos genéricos. Já Almeida et al. (2020), avaliaram comparativamente resultados de simulações na mesa d'água e no aplicativo *Wind Tunnel Free*. Dentre os trabalhos apresentados, observou-se que nenhum deles verificou o fluxo de ar em ambientes internos utilizando o aplicativo *Wind Tunnel* CFD, mesmo este sendo uma ferramenta com grande potencial para estudo da ventilação natural e que possui mais controle dos fenômenos físicos que o *Wind Tunnel Free*. Dessa maneira, diante da dificuldade de incorporação de ferramentas complexas para simulação da ventilação natural no ensino simplificado do fenômeno em faculdades de arquitetura e urbanismo, assim como na aplicação desta estratégia no desenvolvimento projetual de arquitetos e urbanistas, o presente trabalho busca sanar a lacuna apresentada do potencial uso do aplicativo *Wind Tunnel* CFD, como método simplificado de auxílio e estudo do fluxo de ar em edificações.

2. OBJETIVO

Este artigo tem como objetivo avaliar o aplicativo de *smartphone Wind Tunnel* CFD, como ferramenta simplificada para estudo da ventilação natural a partir de análise qualitativa da distribuição do ar em ambientes internos através da comparação dos resultados qualitativos com o *software* CFD.

3. MATERIAIS E MÉTODO

O método apresenta quatro etapas: (1) definição dos modelos, tamanho, forma e vãos de aberturas; (2) caracterização das condicionantes usadas nas simulações no *software* comercial Icem-CFX CFD (Ansys); (3) descrição do aplicativo *Wind Tunnel* CFD, e configurações para as simulações; e (4) análise comparativa dos resultados obtidos.

3.1. Definição dos modelos

Os modelos analisados foram determinados a partir de pesquisas realizadas por Olgyay (1963) e Chavéz e Freixanet (2005), que avaliaram o fluxo de ar interno em modelos simplificados. As quatro amostras avaliadas constituem-se em um módulo quadrado com dimensões de 3 módulos x 3 módulos, sendo a figura

[1] Empresa que desenvolve aplicativos de simulação física de forma interativa (ALGORIZK, 2018).

[2] Empresa responsável pela criação de *software* CFD tridimensional (3D) de alta tecnologia (ALGORIZK, 2018).

1a, 1c e 1d formadas por 1/3 de abertura de entrada e saída de ar em relação à sua área de piso. O modelo 1 (figura 1a) apresenta aberturas de entrada e saída centralizadas em faces opostas, enquanto o modelo 3 (figura 1c) possui aberturas de entrada e saída de ar em paredes opostas locadas diagonalmente uma à outra, e no modelo 4 (figura 1d) as aberturas de entrada e saída estão localizadas em paredes adjacentes posicionadas também na diagonal. Por fim, tem-se o modelo 1 (figura 1b), que é caracterizado por conter apenas entrada de ar centralizada, sendo esta também configurada por 1/3 de abertura em relação a sua área de piso. Todas as simulações foram realizadas considerando os ventos externos com ângulo de incidência perpendicular (0°) a abertura de entrada de ar dos modelos. Xavier et al. (2020), salientam que a escolha por modelos simplificados facilita a compreensão do fenômeno da ventilação natural, podendo também ser comparado com resultados já obtidos por trabalhos referências presentes na literatura.

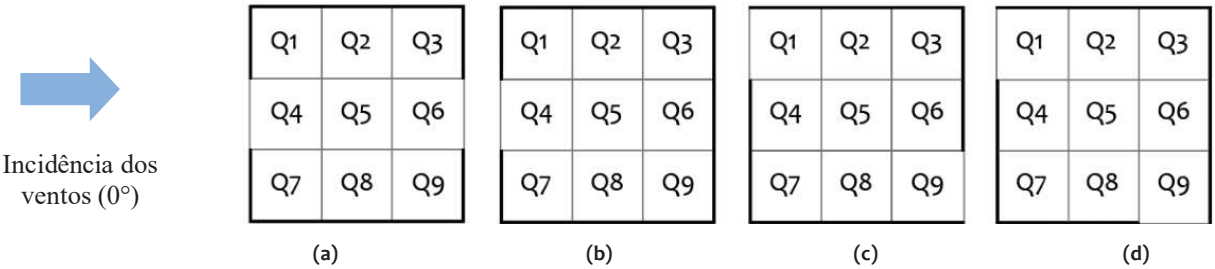


Figura 1 – Modelos selecionados, (a) modelo 1 (a), modelo 2 (b), modelo 3 (c) e modelo 4 (d) (Adaptado de Olgyay, 1963 e Chavéz e Freixanet, 2005.

3.2. Simulações CFD

Neste trabalho a confecção dos modelos e do domínio computacional foi realizada no *software* Autocad (2020), exportando-os, posteriormente, para o software comercial Icem-CFX. O domínio, é o volume do espaço para o qual o escoamento será resolvido; a dimensão do domínio deve ser tal que não se faça sentir nas fronteiras a presença do edifício (CÓSTOLA, 2006). O domínio utilizado possui formato retangular, com as seguintes dimensões: (a) largura = 82cm; (b) comprimento = 156cm, sendo o modelo localizado no centro do domínio, a fim de evitar os efeitos de borda.

Os dados de entrada para simulação no CFD são apresentados na tabela 1, que segue:

Tabela 1 – Dados de entrada das simulações CFD.

Condição	Descrição
Malha Computacional	Estrutura tetraédrica, com refinamento de 0.01 nas superfícies do edifício.
Condições de domínio	Entrada: *INLET*, saída: *OUTLET*; laterais e o teto: *WALL free slip* (sem atrito), o piso e as superfícies do edifício: *WALL no slip* (com atrito).
Regime adotado na simulação	Permanente
Modelo de transferência de calor	Isotérmica: 25ºC
Velocidade do ar	0.22 m/s: utilizada por Gularte et al. (2018) para avaliação de ferramentas simplificadas, e segundo Galvão (2016), na escala de Beaufort tal velocidade representa fumaça subindo na vertical.
Modelo de turbulência	K-epsilon: comum e estabelecido em pesquisas de ventilação natural, por isso adotou-se no presente estudo. Os parâmetros utilizados para a turbulência foram: intensidade média (5%) - o valor padrão do *software*; a *high resolution advection scheme e conservative auto timescale*.
Nível de convergência	Máximo 10^{-4}
Número de interações	Valores mínimo e máximo de 100 e 1.000, respectivamente.

As informações descritas na tabela 1 basearam-se no estudo realizado por Xavier et al. (2020), que também compararam as simulações do CFD com ferramentas simplificadas, as quais não possibilitavam a inserção de tipos de escoamentos e modelos de transferência de calor.

3.3. Simulações *Wind Tunnel* CFD

Para efetuar os testes da presente pesquisa, foram criados modelos em formato .SVG para que a precisão de desenho no aplicativo fosse alcançada. Para tanto, os modelos foram desenhados no *software* Autocad e salvos em formato PDF e posteriormente abertos no Adobe® Illustrator para serem salvos novamente, mas agora no formato permitido pelo aplicativo. Os modelos de estudo foram colocados no *Wind Tunnel* CFD por meio da conexão entre o smartphone (iphone 7 plus com 5,5 polegadas de tela) e o computador através de cabo USB.

Após essa etapa, os modelos foram abertos e ajustados no aplicativo de modo proporcional ao mesmo domínio utilizado nas simulações CFD. Para os testes da pesquisa foram utilizadas as funções e ajustes do aplicativo condizentes com o objetivo do trabalho. Dessa maneira, as configurações no *Wind Tunnel* CFD foram estabelecidas, sendo elas: campo de visualização do fluido em partículas (*particles*) em traços (*tracing*); e velocidade de 0.22 m/s. Destaca-se que o aplicativo não permite definição de modelo de turbulência assim como estabelecido no CFD, contudo, a caracterização do escoamento do fluido no aplicativo foi definido a partir do número de Reynolds, obtido através das propriedades termofísicas do ar a 300 K, o que equivale a aproximadamente 25 ºC (INCROPERA, et al. 2012), mesma temperatura utilizada nas simulações CFD para modelos de transferência de calor isotérmico. Ressalta-se que a determinação deste número foi o parâmetro utilizado para equiparar as ferramentas. Dessa forma, por meio da equação 1 pode-se obter o número de Reynolds.

Onde, Re é o número de Reynolds; ρ é a densidade do fluido (kg/m³); v representa a velocidade do fluxo (m/s); D é a dimensão linear característica; e μ a viscosidade (kg/m.s):

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu} \Rightarrow Re \frac{1{,}1614\ x\ 0{,}22\ x\ 0{,}008}{15{,}89\ x\ 10^{-6}} \Rightarrow Re = 1286{,}38 \qquad \text{(Equação 1)}$$

Nesse contexto, o valor aproximado encontrado de Re igual a 1286,38 foi empregado no aplicativo para a realização das simulações, uma vez que, como supracitado, o *Wind Tunnel* CFD não possibilita a inserção do tipo de escoamento.

3.4. Caracterização da análise comparativa

A análise qualitativa ocorreu de forma comparativa entre os resultados obtidos nas simulações, sendo realizada em duas etapas: a primeira é formada pelo uso de um *software* de código aberto para obtenção da porcentagem de diferença entre os resultados do aplicativo *Wind Tunnel* CFD e do CFD; e a segunda através de uma sobreposição dos movimentos de ar observados nas ferramentas, através de desenhos esquemáticos, com objetivo de avaliar se as porcentagens de similaridade das imagens é realmente confiável para a avaliação visual.

O código utilizado possui livre acesso para estudo, modificação e distribuição de projetos. Essas permissões são aplicadas por meio de uma licença de código aberto. Estes reduzem as barreiras para adoção e colaboração, permitindo que as pessoas divulguem e aprimorem projetos rapidamente, permitindo aos usuários o potencial de controlar sua própria computação, em relação ao código fechado (STARTING AN OPEN SOURCE PROJECT, 2020).

O software utilizado é denominado como *"imgcompare"* (IMGCOMPARE), este possui código aberto e licença do Instituto de Tecnologia de Massachusetts (*Massachusetts Institute of Technology* - MIT). Para esta pesquisa ele será utilizado no ambiente Colab do Google, que é um sistema da Google que oferece um ambiente interativo e colaborativo para desenvolvimento em Python. Dessa forma, permite que os usuários a escrevam, executem e salvem códigos em Python sem a necessidade de nenhuma instalação de programas em sua máquina local, com acesso de qualquer equipamento que possua acesso à internet e usuário que possua conta do Google (GOOGLE RESEARCH, s.d). O código foi desenvolvido pelos contribuidores *datenhahn* e *catichenor*, e calcula a diferença entre as imagens em porcentagem e verifica a igualdade com nebulosidade opcional, para tanto é necessário que as imagens possuam o mesmo formato (por exemplo, JPG com PNG). Os valores utilizados serão de similaridade de imagem, portanto quanto maior a porcentagem maior será a similaridade entre as imagens.

Como a intenção é calcular a porcentagem de diferença das imagens das simulações com o intuito de encontrar a similaridade dos resultados, ou seja, a porcentagem de igualdade entre a representação do fenômeno das duas imagens. É necessário que as imagens além de possuírem o mesmo formato, elas apresentem a mesma proporção, ou *aspect* ratio, que é a relação matemática entre as suas duas dimensões, em geral obtida pela divisão entre as medidas da largura e da altura (KONIGSBERG, 1987). Outro cuidado também é de recortar a imagem apenas na região de comparação, onde neste estudo foi determinado a região interna aos modelos.

A análise baseada na sobreposição visual dos movimentos é confeccionada modificando as imagens no *software* Adobe® *Photoshop*, onde retira-se a saturação e aumenta-se a nitidez, no caso das imagens advindas do aplicativo *Wind Tunnel* CFD, realizando inversão de cores para padronização em preto e branco, assim como padronização da proporção. Em seguida as imagens são exportadas no formato .EPS para o Adobe® *Illustrator*, onde são vetorizadas e enviadas novamente para o Adobe® *Photoshop*, sendo cada imagem dividida em nove quadrantes de mesma razão. Após a preparação das imagens, as imagens de cada ensaio são enviadas para a plataforma *Colab* com a utilização do *software "imgcompare*" onde cada ensaio é

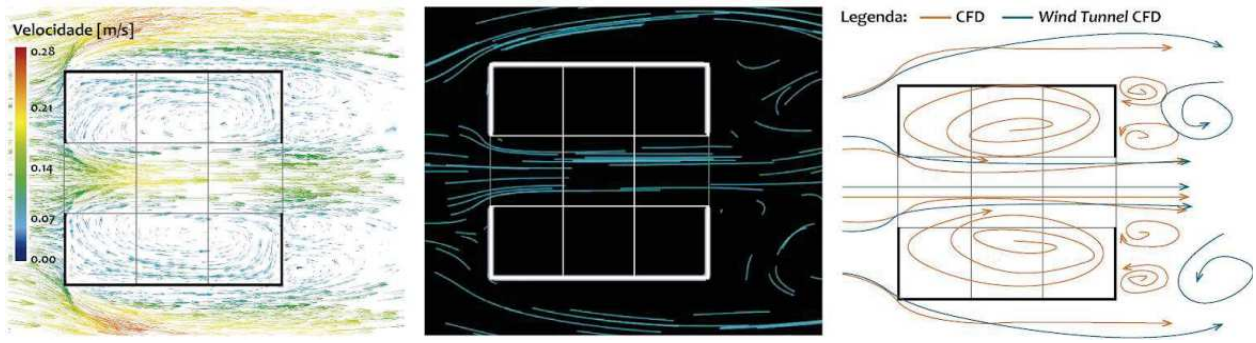
comparado, quadrante por quadrante, gerando os resultados em porcentagem de similaridade. Então é apresentado em um gráfico dividido por quadrantes e comparado com a análise visual de similaridade. Definiu-se que porcentagens abaixo de 15% apresentam visualmente baixa similaridade, porcentagens próximas e acima de 30% possuem similaridade razoável acima de 50% possuem boa similaridade.

4. RESULTADOS

A análise dos resultados ocorreu de duas maneiras em cada modelo: (1) se refere a uma análise visual da distribuição do fluxo de ar dentro dos blocos, que foi realizada por meio da sobreposição dos fluxos nas simulações no software CFD e no aplicativo Wind Tunnel CFD; (2) trata sobre a comparação de similaridade em percentual entre os fluxos nos modelos analisados através do tratamento das imagens das simulações mediante o uso do código aberto disponível na plataforma Colab do Google.

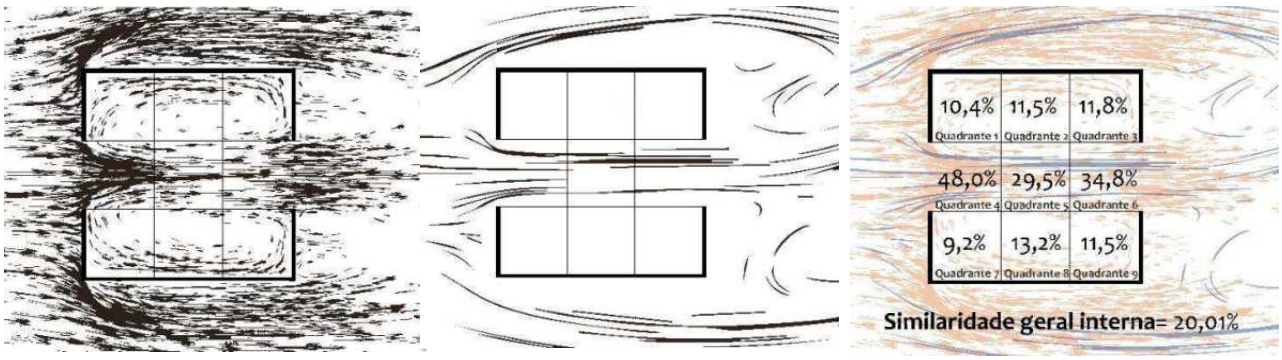
De acordo com as figuras 2 e 3 observa-se que a configuração das aberturas de entrada e saída de ar possuem dimensões iguais, estão centralizadas e situadas uma oposta à outra. Nota-se que, tanto nas simulações no CFD (figura 2a) quanto no aplicativo (figura 2b), o fluxo interno se comporta de maneira linear na área de maior velocidade e ocorrência de ar, nesse caso refere-se à parte central do modelo. Nas duas situações, é possível observar também que na face a sotavento há movimentos ondulatórios de baixa intensidade próximos à abertura de saída de ar. Contudo, verifica-se que no CFD houve recirculação de ar fora da zona central, sendo ausente esse efeito no aplicativo (ver figura 2c).

Na imagem 3c nos quadrantes 4, 5 e 6 a porcentagem de similaridade das imagens é razoável, o sugerindo que o aplicativo *Wind Tunnel* CFD consegue simular, porém não de forma totalmente eficaz, a ventilação natural em sua maior ocorrência e velocidade, contudo este não simulou as recirculações de ar notadas nas simulações no CFD nos quadrantes 1, 2, 3, 7, 8 e 9, onde a comparação apresenta uma porcentagem de similaridade incoerente, já que não há a presença do fenômeno no resultado do aplicativo. Portanto, o resultado das porcentagens sugere que o aplicativo se mostra insuficiente para representar o real efeito da ventilação natural no modelo 1, apresentando apenas o fluxo de ar em sua velocidade mais elevada, assim como na análise visual. Contudo os resultados percentuais não são suficientes para uma boa análise isolada, visto a presença de porcentagem onde não há presença do fenômeno em um dos casos.



(a) (b) (c)

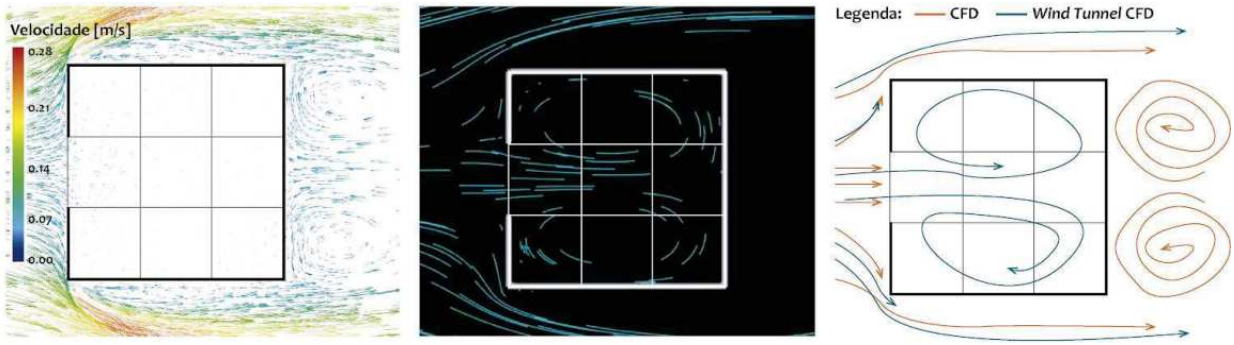
Figura 2 - Escoamento do fluido no Modelo 1 para simulações em CFD (a), testes no *Wind Tunnel* CFD (b) e sobreposição do CFD e *Wind Tunnel* (c).



(a) (b) (c)

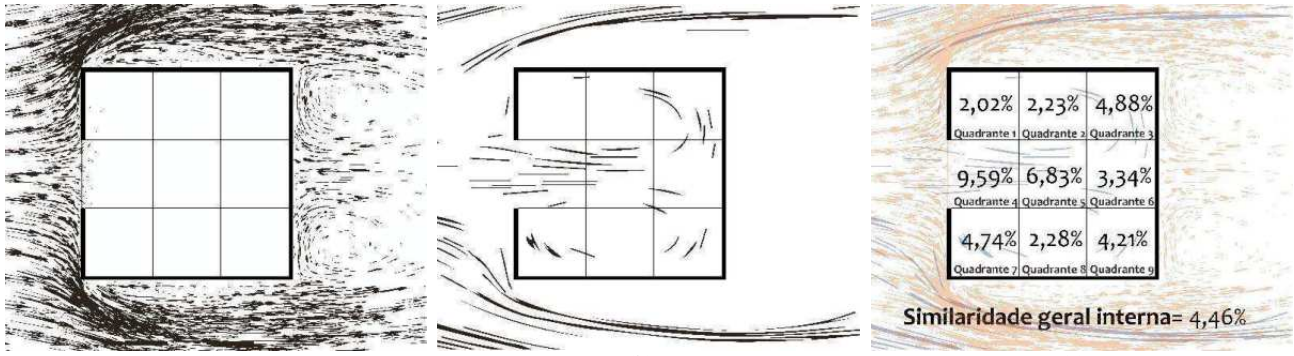
Figura 3 - Tratamento nas imagens dos resultados do Modelo 1 para simulações em CFD (a), *Wind Tunnel* CFD (b) e análise comparativa de similaridade (c).

O modelo 2 (figuras 4 e 5), apresenta apenas uma abertura na face a barlavento, e diante dessa configuração verificou-se divergências consideráveis entre as ferramentas utilizadas. Observa-se que nas simulações em CFD (figura 4a) o escoamento de ar interno é quase ausente, visto que apresenta apenas um pequeno fluxo na zona de entrada de ar, e movimentos ondulatórios na face a sotavento onde não há aberturas. Já no aplicativo (figura 4b), verificou-se alto fluxo de ar ondulatório na parte interna do modelo, e sombra de vento a sotavento. A sobreposição e diferença do escoamento do fluido pode ser averiguada na figura 4c e atestada na análise comparativa de similaridade na figura 5c. A configuração com apenas uma abertura demonstrou desempenho da ventilação natural em qualidade inferior na simulação do aplicativo *Wind Tunnel* CFD, pois o aplicativo apresentou recirculações de ar no interior do modelo que não são apresentadas no *software* CFD. Verifica-se também na figura 5c que a similaridade percentual encontrada entre a distribuição de ar interno do modelo 2 foi muito baixa, porém ainda apresenta incoerências pela não existência do fenômeno em uma das imagens. Portanto, existe uma falha do aplicativo na simulação da ventilação em ambientes onde o efeito da ventilação cruzada não ocorre e o resultado de porcentagens, apesar de apresentar porcentagens baixas, ainda se mostra incoerente.



(a) (b) (c)

Figura 4 – Escoamento do fluido no Modelo 2 para simulações em CFD (a), *Wind Tunnel* CFD (b) e sobreposição do CFD e *Wind Tunnel* (c).

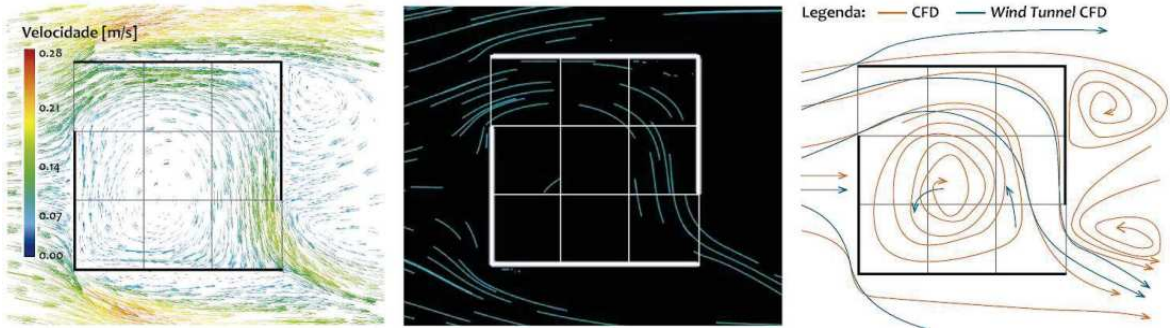


(a) (b) (c)

Figura 5 – Tratamento das imagens dos resultados Modelo 2 para simulações em CFD (a), *Wind Tunnel* CFD (b) e análise comparativa de similaridade (c).

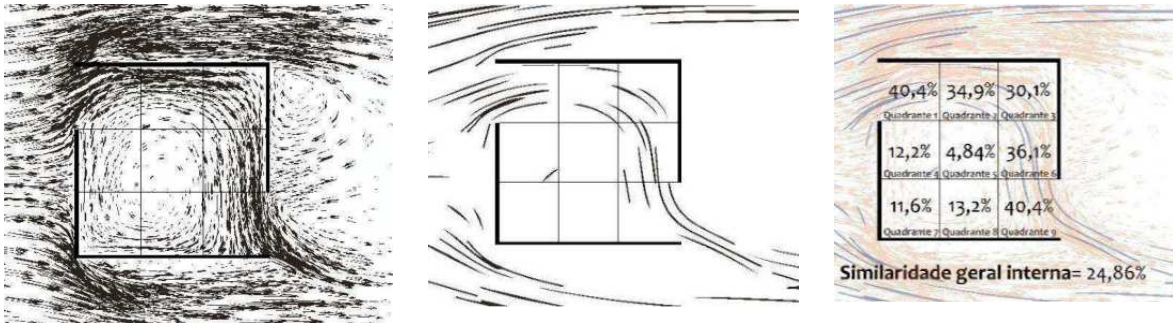
O modelo 3 (figura 6 e 7) caracteriza-se pela presença de duas aberturas opostas e situadas diagonalmente uma à outra. É notável que está praticamente ausente a recirculação de ar na parte inferior esquerda do modelo testado no aplicativo (figura 6b). Em contrapartida, observa-se a presença desse movimento de ar nas simulações no CFD (figura 6a), tanto na área interna quanto externa em sua face a sotavento.

O modelo 3 apresenta as mesmas limitações do modelo 1, onde a similaridade do fluxo entre as simulações nas diferentes ferramentas ocorre em maior expressividade nos quadrantes 1, 2, 3, 6 e 9. Além de ser notável a ausência de recirculações de ar no ambiente nos quadrantes 4, 5, 7, e 8, onde as similaridades também apresentam incoerência pela presença de porcentagem de similaridade, mesmo que baixas.



(a) (b) (c)

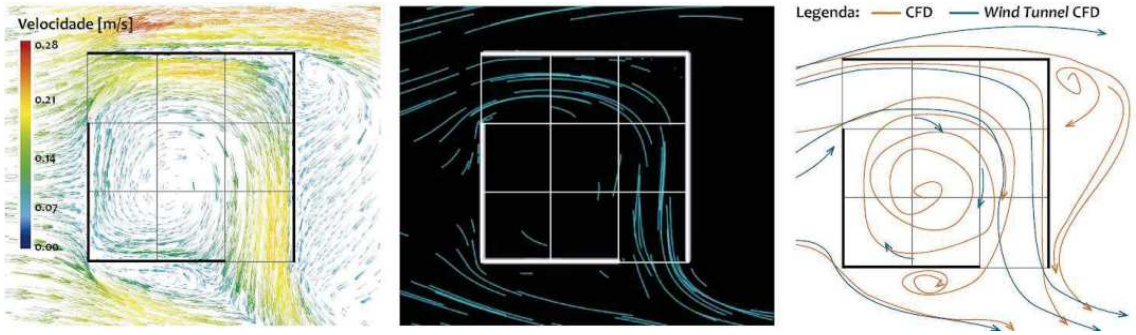
Figura 6 – Escoamento do fluido no Modelo 3 para simulações em CFD (a), *Wind Tunnel* CFD (b) e sobreposição do CFD e *Wind Tunnel* (c).



(a) (b) (c)

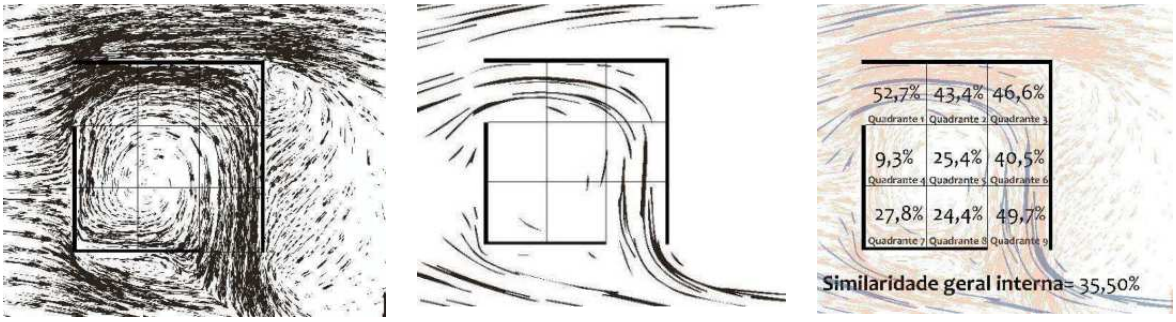
Figura 7 – Tratamento das imagens dos resultados Modelo 3 para simulações em CFD (a), *Wind Tunnel* CFD (b) e análise comparativa de similaridade (c).

O modelo 4 (figura 8 e 9), possui aberturas adjacentes e em diagonal uma à outra. Verifica-se que com essa configuração os resultados se mostram divergentes nas áreas em que ocorre recirculação de ar interna e externamente nos modelos simulados no CFD (figura 8a), caso semelhante acontece nas simulações dos modelos 1 e 3. Assim como os modelos 1 e 3, o modelo 4 apresenta de forma visual a movimentação do ar em seu percurso mais expressivo e de maior velocidade nos quadrantes 1, 2, 3, 6 e 9, contudo não mostra de maneira eficiente as recirculações nos quadrantes 4, 5, 7 e 8.



(a) (b) (c)

Figura 8 – Escoamento do fluido no Modelo 4 para simulações em CFD (a), *Wind Tunnel* CFD (b) e sobreposição do CFD e *Wind Tunnel* (c).



(a) (b) (c)

Figura 9 – Tratamento das imagens dos resultados Modelo 4 para simulações em CFD (a), *Wind Tunnel* CFD (b) e análise comparativa de similaridade (c).

5. CONCLUSÃO

Em decorrência das análises produzidas, verificou-se que o aplicativo *Wind Tunnel* CFD possui limitações para a representação fiel do fenômeno da ventilação natural. Contudo, por apresentar de forma coerente os maiores fluxos de ar, o dispositivo pode ser considerado como uma ferramenta útil, acessível, intuitiva e didática para análises simplificadas do fluxo de ar em ambientes internos. Dessa forma, nota-se que há potencial na utilização do aplicativo, tanto para uso no meio acadêmico, quanto na área profissional, em especial nas etapas iniciais de projeto.

As recirculações de ar demonstradas nas simulações no CFD nos modelos 1, 3 e 4 não estão presentes nos testes realizados no aplicativo *Wind Tunnel* CFD. Sugere-se que esse pode ser um ponto sensível do aplicativo, o que reforça a limitação da ferramenta quando comparada aos meios complexos de análise da ventilação natural como as simulações computacionais em CFD. Ressalta-se que um dos fatores que influenciam nos resultados dos testes dentro do aplicativo, além dos dados numéricos, é a escolha do campo de visualização, visto que se deve escolher aquele que mais se assemelha aos das simulações em *software* CFD, para que as comparações entre os modelos sejam equivalentes. Acrescenta-se também que ambas as ferramentas necessitam de um nível considerável de entendimento do usuário para especificação dos dados de entrada.

Outras limitações encontradas no aplicativo para estudo da ventilação natural se referem à análise bidimensional de um fenômeno tridimensional que é o fluxo de ar. Além disso, na ferramenta não é possível adicionar altura das aberturas e características do entorno imediato. Exposto isto, o uso do aplicativo deve ser realizado de maneira ponderada em virtude das limitações apresentadas.

O software "imgcompare", utilizado para obter as porcentagens de similaridade dos fenômenos, também apresentou limitações e se mostrou insuficiente para análises comparativas dos fenômenos utilizados de maneira isolada. Portanto se fez de extrema importância a análise conjunta com a comparação visual.

Diante dos resultados obtidos e das limitações encontradas no *Wind Tunnel* CFD, indica-se trabalhos futuros com a utilização de modelos mais complexos para maior avaliação do aplicativo, assim como comparações com outras ferramentas simplificadas, diferentes dados de entrada e novos meios de comparação visando compreender ainda mais os pontos sensíveis contidos no mesmo, a fim de utilizá-lo na análise qualitativa da ventilação natural em ambientes internos nas fases iniciais de projeto.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALGORIZK, **A realistic simulation. Interactive physics simulations for everyone**, 2018. Disponível em: <http://www.algorizk.com/windtunnel/overview/>. Acesso em: 13 dez. 2020.

ALMEIDA, F. S.; RIBEIRO, R. M.; SCALCO, V. A.; FOSSATI, M.; ORDENES, M. Análise do uso de aplicativo virtual para estudo da ventilação natural em ambientes internos. In: **Encontro Nacional De Tecnologia do Ambiente Construído**, 18., 2020, Porto Alegre. Anais... Porto Alegre: ANTAC, 2020.

ARAÚJO, F. A. G. de; OLIVEIRA, M. M. de; NOBRE, E. F.; PINHEIRO, A. G.; CUNHA, M. S. O estudo de dinâmica dos fluidos com o aplicativo wind tunnel. **Revista do Professor de Física**, [s.l.], v. 1, n. 2, p. 25-36, 21 dez. 2017

BITTENCOURT, L.; CÂNDIDO, C**. Introdução à Ventilação Natural**. 3. ed. Maceió: EdUFAL, 2008. p. 163.

BEN (2020), **Balanço Energético Nacional 2020**. Empresa de Pesquisa Energética, Brasília, 2020. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2020>. Acesso em: 08 dez. 2020.

CHÁVEZ, J. R. G.; FREIXANET, V. F. **Viento y Arquitectura: El viento como factor de diseño arquitectónico.** 3. Ed. México: Trillas, 2005. p. 178.

CHEN, Q. (Yan). Using computational tools to factor wind into architectural environment design. **Energy And Buildings**, [S.L.], v. 36, n. 12, p. 1197-1209, dez. 2004. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2003.10.013.

CHEN, Q. Ventilation performance prediction for buildings: a method overview and recent applications. **Building And Environment**, [S.L.], v. 44, n. 4, p. 848-858, abr. 2009. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2008.05.025.

CÓSTOLA, D. **Ventilação por ação do vento no edifício: procedimentos para qualificação**. Dissertação (Mestrado em Tecnologia da Construção) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

FAWCETT, N. S. J. Getting Started with CFD. Conference Computational fluid dynamics-tool or toy, p. 1–72, 1991.

FIGUEIREDO, C. DE. **Ventilação natural em edifícios de escritórios na cidade de São Paulo: limites e possibilidades do ponto de vista do conforto térmico**. 2007. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo.

FROTA, A. B.; SHIFFER, S. R. **Manual do Conforto Térmico**. 3 ed. São Paulo: Studio Nobel, 1999. p. 243.

FU, X.; HAN, M.. Analysis of Natural Ventilation Performance Gap between Design Stage and Actual Operation of Office **Buildings. E3S Web Of Conferences**, [S.L.], v. 172, p. 09010-09016, 2020. EDP Sciences. http://dx.doi.org/10.1051/e3sconf/202017209010.

GAO, C.F.; LEE, W.L.. Evaluating the influence of openings configuration on natural ventilation performance of residential units in Hong Kong**. Building And Environment**, [S.L.], v. 46, n. 4, p. 961-969, abr. 2011. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.10.029.

GALVÃO, W. J. F. **Fundamentos de conforto Ambiental para aplicação no projeto de arquitetura: conforto térmico, acústica arquitetônica e luminotécnica**. São Paulo: Ed. do Autor, 2016.

GOOGLE RESEARCH. Colaboratory. [s.d] disponível em < https://research.google.com/colaboratory/faq.html> Acesso em: 15 dez. 2020.

GULARTE, I.; XAVIER, A. C.; LUKIANTCHUKI, M. A.; ORDENES, M. Análise do impacto do tamanho e da posição das aberturas no fluxo de ar: ensaios na mesa d´água e simulações CFD. In: **ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO**, 17., 2018, Foz do Iguaçu. Anais do ENTAC 2018. Porto Alegre: ANTAC, 2018. p. 949-956.

GUO, W.; LIU, X.; YUAN, X. A Case Study on Optimization of Building Design Based on CFD Simulation Technology of Wind Environment. **Procedia Engineering**, [S.L.], v. 121, p. 225-231, 2015. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.1060.

IEA (2019), **Global Status Report for Buildings and Construction 2019**. International Energy Agency, Paris, 2019. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/global-status-report-for-buildings-and-construction-2019>. Acesso em 06 de janeiro de 2020.

IMGCOMPARE. Versão 2.0.1. GitHub: Jonas Hahn, Christopher Tichenor, 2020, disponível em < https://github.com/datenhahn/imgcompare> Acesso em: 08 set. 2020.

INCROPERA, F. P. [et al.]. **Fundamentos de transferência de calor e de massa. Tradução e revisão técnica de Eduardo Mach Queiroz, Fernando Luiz Pellegrini Pesso**a. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

KONIGSBERG, I. **The complete film dictionary,** 1987.

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. O. R. **Eficiência Energética na Arquitetura.** 3. ed. São Paulo: PW, 2014. p. 382.

LOVATTO, M. L. Número de Courant, CFL e Condição CFL. U. X. Engenharia de simulação computacional CFD, 2012. Disponível em: <https://uxcfd.com/2012/11/16/numero-de-courant-cfl-e-condicao-cfl/>. Acesso em: 23 dez. 2020.

LUKIANTCHUKI, M. A. **Sheds extratores e captadores de ar para indução da ventilação natural em edificações**. 2014.Tese (Doutorado em Arquitetura, Urbanismo e Tecnologia) – Instituto de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Carlos.

MARTINS, N. R.; GRAÇA, G. C. da. Validation of numerical simulation tools for wind-driven natural ventilation design. **Building Simulation**, [S.L.], v. 9, n. 1, p. 75-87, 11 set. 2015. Springer Science and Business Media LLC. http://dx.doi.org/10.1007/s12273-015-0251-6.

Nota Técnica EPE 030/2018, (2018**), Uso de Ar Condicionado no Setor Residencial Brasileiro: Perspectivas e contribuições para o avanço em eficiência energética**. Empresa de Pesquisa Energética, Brasília, 2018. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-341/NT%20EPE%20030_2018_18Dez2018.pdf>. Acesso em: 08 dez. 2020.

OLGYAY, V. ***Arquitectura y Clima***: 1. ed. Barcelona: Editorial Gustavo Gili, 2016. p. 2003.

OMRANI, S.; GARCIA-HANSEN, V.; CAPRA, B.; DROGEMULLER, R.. Natural ventilation in multi-storey buildings: design process and review of evaluation tools. Building And Environment, [S.L.], v. 116, p. 182-194, maio 2017. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.02.012.

RIVERO, R**. Arquitetura e clima: acondicionamento térmico natural**. 2. ed. rev. e ampl. Porto Alegre: D. C. Luzzatto, 1986.

ROSSI, M. M.; VALE, F. I.; SHIMOMURA, A. R. P.; CHVATAL, K. M. S. A mesa d'água como ferramenta de apoio para a caracterização de um modelo genérico a ser ensaiado em túnel de vento. Revista IPT: Tecnologia e Inovação, v. 3, n. 10, p. 70-80, abr. 2019.

ROYAN, M.; VAIDYA, P. Construction, validation and testing of a water table for natural ventilation analysis. **Energy And Buildings,** [S.L.], v. 226, p. 110356-110356, nov. 2020. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110356.

SACHT, H.; LUKIANTCHUKI, M. A. Windows Size and the Performance of Natural Ventilation. **Procedia Engineering**, [S.L.], v. 196, p. 972-979, 2017. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2017.08.038.

SUBHASHINI, S; THIRUMARAN, K. CFD simulations for examining natural ventilation in the learning spaces of an educational building with courtyards in Madurai. Building Services Engineering **Research And Technology**, [S.L.], v. 41, n. 4, p. 466-479, 9 out. 2019. SAGE Publications. http://dx.doi.org/10.1177/0143624419878798.

Starting an Open Source Project. Disponível em: <https://opensource.guide/starting-a-project/>. Acesso em: 9 dez. 2020.

TOLEDO, A.; PEREIRA, F. Potencial da Mesa D'água para a visualização Analógica da Ventilação Natural em Edifícios. In.: **ENCONTRO NACIONAL DO CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO**, 7., 2003, Curitiba. Anais [...] Curitiba: ANTAC, 2003. P. 1383-1390.

TRINDADE, S. C.; PEDRINI, A.; DUARTE, R. N. C. (2010). Métodos de aplicação da simulação computacional em edifícios naturalmente ventilados no clima quente e úmido. Ambiente Construído, 10(4), 37-58. https://doi.org/10.1590/S1678-86212010000400004.

VAN HOOFF, T.; BLOCKEN, B.; AANEN, L.; BRONSEMA, B.. A venturi-shaped roof for wind-induced natural ventilation of buildings: wind tunnel and cfd evaluation of different design configurations. **Building And Environment**, [S.L.], v. 46, n. 9, p. 1797-1807, set. 2011. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.02.009.

XAVIER, A. C. DE A.; GULARTE, I. H.; MIZGIER, M. O.; LUKIANTCHUKI, M. A. Visualização da ventilação natural em ensaios na mesa d'água comparado a simulações computacionais. **PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção**, v. 11, p. e020020, 30 set. 2020. DOI: https://doi.org/10.20396/parc.v11i0.8656954.