DINÂMICA DO ESCOAMENTO INDUZIDO POR VENTILADOR DE TETO EM AMBIENTE REAL POR ABORDAGENS NUMÉRICA E EXPERIMENTAL

Autores: João Pedro Abreu Gerra, Murilo Scheidegger Nunes, Silvio Luis Weber Junior, Werek da Silva, Leandro Marochio Fernandes

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Espírito Santo - Campus Cachoeiro de Itapemirim, Rodovia Engenheiro Fabiano Vivácqua, 1568, Morro Grande - 29311-970 - Cachoeiro de Itapemirim, murilosnunes963@gmail.com, joaopedrogerra20@gmail.com, silvio.weber75@gmail.com, wereksilva084@gmail.com, leandro.mfernandes@ifes.edu.br.

Resumo
Problemas de Mecânica dos Fluidos podem ser analisados por formulações teóricas, mas sistemas reais apresentam efeitos geométricos e transientes. Neste trabalho, investigou-se o escoamento de um ventilador de teto em uma sala da biblioteca do Ifes Campus Cachoeiro de Itapemirim por meio de abordagens numérica e experimental. A simulação foi realizada no *OpenFOAM*, utilizando uma região rotativa acoplada ao domínio estacionário por interface AMI, com rotação de 35 rad/s. Foram avaliadas malhas de aproximadamente 175 mil, 266 mil e 528 mil células, sendo observada maior proximidade entre as duas mais refinadas. A simulação permitiu analisar o desenvolvimento do escoamento e a formação de regiões de mistura e recirculação. A comparação com os dados experimentais apresentou concordância qualitativa, mas também diferenças entre os perfis de velocidade. Os resultados evidenciaram limitações relacionadas ao refinamento da malha, ao tempo de simulação e ao procedimento experimental.
Palavras-chave: Fluidodinâmica computacional. Ventilador de teto. Escoamento em ambientes internos. Interface AMI. Análise experimental.

Área do Conhecimento: Engenharias - Engenharia Mecânica.

Introdução

A análise de escoamentos em ambientes internos envolve a interação entre mecanismos de transporte, geometria do domínio e condições de operação dos dispositivos responsáveis pela movimentação do ar. Formulações teóricas baseadas em hipóteses simplificadoras permitem estabelecer relações entre as principais grandezas do escoamento, porém a presença de paredes, mobiliário e outros obstáculos introduz efeitos tridimensionais e regiões de recirculação que dificultam a representação do sistema físico por modelos simplificados.

Ventiladores de teto constituem uma aplicação desse tipo de problema, pois induzem campos de velocidade não uniformes, influenciados pela rotação, geometria do ventilador, posição no ambiente e interação com as superfícies internas (Chen et al., 2018; Liu et al., 2018; Raftery et al., 2019). Nesse contexto, a Fluidodinâmica Computacional permite complementar a análise teórica por meio da resolução numérica das equações que governam o escoamento, possibilitando representar o movimento das pás e investigar a evolução espacial e temporal do campo de velocidades.

O problema investigado teve origem em uma atividade proposta na disciplina de Mecânica dos Fluidos II e foi posteriormente desenvolvido a partir de sua aplicação a um ambiente real. A análise foi conduzida em uma sala de armários da biblioteca do Ifes Campus Cachoeiro de Itapemirim, equipada com um ventilador de teto, articulando a formulação numérica inicial, a representação computacional por CFD e medições realizadas no sistema físico.

O objetivo deste trabalho é analisar a dinâmica do escoamento induzido por um ventilador de teto em um ambiente real por meio de abordagens numérica e experimental. A modelagem computacional é realizada no *OpenFOAM*, considerando a geometria do ambiente e seus principais obstáculos internos, enquanto medições de velocidade do ar são utilizadas para comparação com os resultados numéricos. A análise busca identificar os efeitos associados à geometria do ambiente, à discretização numérica e às condições consideradas na comparação experimental.

A investigação foi desenvolvida por meio de abordagens numérica e experimental aplicadas ao escoamento induzido por um ventilador de teto instalado em uma sala de armários da biblioteca do Campus. O problema teve origem em uma atividade da disciplina de Mecânica dos Fluidos II e foi posteriormente desenvolvido a partir da representação do ambiente físico e da realização de medições no sistema real.

A abordagem computacional inicial foi formulada a partir das equações de conservação aplicáveis ao escoamento de ar. Considerando o fluido incompressível, a conservação da massa foi representada pela equação da continuidade:

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0$$

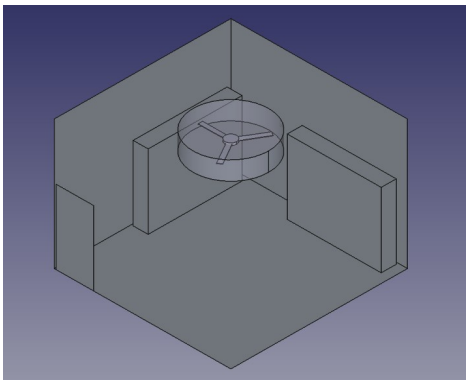
Enquanto a conservação da quantidade de movimento foi descrita pelas equações de Navier-Stokes:

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} \right) = -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{u}$$

A formulação foi complementada pelas demais equações de balanço e relações constitutivas empregadas na descrição das propriedades do fluido, incluindo a equação de estado dos gases ideais conforme as hipóteses adotadas na análise original. Essa representação estabeleceu a base física utilizada posteriormente na modelagem numérica do problema.

A simulação computacional foi desenvolvida a partir do caso *rotatingFanInRoom* disponibilizado na documentação do *OpenFOAM* (OPENFOAM, 2026), adaptada à geometria do ambiente estudado. O domínio computacional incluiu as paredes da sala, os armários, o ventilador e a porta. Os elementos geométricos foram construídos em software CAD e posteriormente exportados no formato STL para utilização na geração da malha.

Figura 1 - Geometria do domínio computacional utilizada na simulação.



Fonte: Autoria própria (2026).

O movimento das pás foi representado por uma região cilíndrica rotativa envolvendo o ventilador, enquanto o restante do domínio permaneceu estacionário. A comunicação entre as regiões móvel e estacionária foi realizada por meio de uma interface AMI, *Arbitrary Mesh Interface*, permitindo o movimento relativo entre as malhas durante a solução transiente. O escoamento foi resolvido com o *solver pimpleFoam*, empregando modelagem RAS com o modelo de turbulência k-ε. O passo de tempo foi definido com base no número de Courant, utilizado como critério para o controle da evolução temporal da solução.

A porta foi considerada fechada, reproduzindo a condição adotada durante a análise do ambiente, e foi modelada como uma parede. As paredes da sala, a porta, os armários e as demais superfícies estacionárias foram submetidos à condição de não deslizamento. Dessa forma, o domínio foi tratado como um ambiente fechado, sem entrada ou saída de massa através da porta.

A malha computacional foi inicialmente gerada com o blockMesh e posteriormente ajustada às superfícies geométricas por meio do *snappyHexMesh*. Foram construídas três malhas contendo aproximadamente 175 mil, 266 mil e 528 mil células para avaliar a sensibilidade da solução ao refinamento espacial. A qualidade das malhas foi verificada com o *checkMesh*, considerando parâmetros como razão de aspecto, ortogonalidade e *skewness.*

Metodologia

A sensibilidade ao refinamento espacial foi avaliada por meio dos perfis de velocidade obtidos ao longo de uma linha vertical posicionada abaixo do ventilador. Os valores foram extraídos no *ParaView* utilizando a ferramenta *Plot Over Line*. As três malhas foram inicialmente avaliadas em simulações com duração de 1 s. A comparação indicou maior proximidade entre os perfis obtidos com as malhas de aproximadamente 266 mil e 528 mil células, enquanto a malha de 175 mil células apresentou diferenças mais acentuadas. Em razão do custo computacional associado às malhas mais refinadas, a simulação de maior duração foi realizada com a malha de aproximadamente 175 mil células durante 5 s. Essa escolha foi considerada na análise das limitações dos resultados numéricos.

A caracterização experimental foi realizada no mesmo ambiente representado computacionalmente, mantendo a sala fechada durante as medições. A velocidade de rotação do ventilador, operando em sua condição máxima, foi determinada por meio de um tacômetro digital, sendo obtido aproximadamente 35 rad/s. As velocidades do ar foram medidas com um anemômetro digital KP-8016 ao longo de uma linha vertical localizada abaixo do ventilador. Os pontos de medição foram distribuídos em intervalos de 20 cm em relação ao piso, permitindo a construção de um perfil vertical de velocidade para comparação com os resultados numéricos.

Devido às restrições de disponibilidade da sala e à necessidade de que o ambiente permanecesse desocupado durante o procedimento experimental, as medições foram realizadas em uma única campanha conduzida em um único dia. Não foram realizadas repetições independentes em cada condição, impossibilitando a determinação da repetibilidade experimental e da dispersão estatística das medições. Essa limitação foi considerada na interpretação da comparação entre os resultados experimentais e numéricos.

O pós-processamento dos resultados computacionais foi realizado no *ParaView*, empregado na visualização dos campos de escoamento e na extração dos perfis de velocidade. O *Gnuplot* e rotinas desenvolvidas em *Python* foram utilizados na organização dos dados e na elaboração das representações gráficas empregadas nas análises.

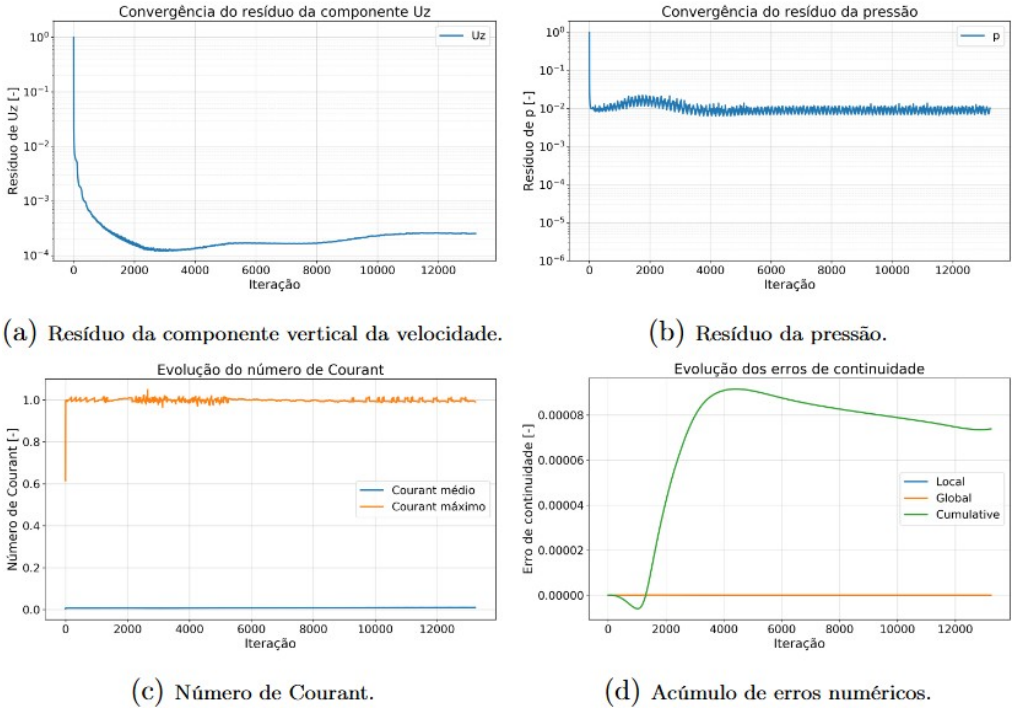
Resultados

A influência do refinamento espacial sobre a solução numérica foi inicialmente avaliada a partir dos perfis de velocidade extraídos ao longo de uma linha vertical posicionada abaixo do ventilador. Foram consideradas malhas com aproximadamente 175 mil, 266 mil e 528 mil células. As soluções obtidas com as duas malhas mais refinadas apresentaram comportamento próximo entre si, enquanto a malha de 175 mil células apresentou diferenças mais acentuadas ao longo da região analisada.

As simulações utilizadas nessa análise tiveram duração de 1 s. Para a simulação de maior duração, utilizada posteriormente na comparação com as medições experimentais, foi empregada a malha de aproximadamente 175 mil células durante 5 s. Durante a simulação final foram monitorados os resíduos da componente vertical da velocidade e da pressão, o número de Courant e o indicador de erro numérico acumulado, apresentados na Figura 2.

Os resíduos apresentaram redução inicial seguida de estabilização, enquanto o número de Courant permaneceu aproximadamente constante e próximo de 1 ao longo da simulação. O indicador de erro numérico acumulado apresentou valor máximo próximo de 0,009%.

Figura 2 - Evolução dos resíduos, número de Courant e erros numéricos durante a simulação.



(a) Resíduo da componente vertical da velocidade. (b) Resíduo da pressão.

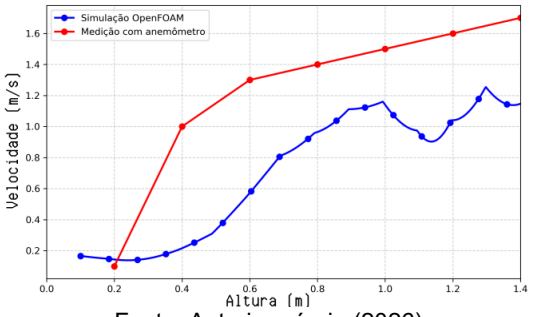
(c) Número de Courant. (d) Acúmulo de erros numéricos.

Fonte: Autoria própria (2026).

A caracterização experimental iniciou-se pela medição da velocidade angular do ventilador em sua condição normal de operação, sendo obtido aproximadamente 35 rad/s. Em seguida, foram realizadas medições da velocidade vertical do ar em diferentes alturas abaixo do ventilador. Os valores medidos foram de 0,1 m/s a 0,20 m do piso, 1,0 m/s a 0,40 m, 1,3 m/s a 0,60 m, 1,4 m/s a 0,80 m, 1,5 m/s a 1,00 m, 1,6 m/s a 1,20 m e 1,7 m/s a 1,40 m.

A comparação entre os perfis numérico e experimental é apresentada na Figura 3. O perfil obtido numericamente também apresenta aumento da velocidade nas menores alturas e até aproximadamente 1,0 m. Entretanto, os valores calculados permanecem inferiores aos experimentais em parte considerável da região analisada e apresentam oscilações que não são observadas com a mesma intensidade nas medições.

Figura 3 - Comparação entre as velocidades obtidas numericamente e experimentalmente.



Fonte: Autoria própria (2026).

A distribuição tridimensional do escoamento foi analisada por meio de linhas de corrente para os instantes de 1 a 5 s. No início da simulação, o movimento do ar permanece concentrado nas proximidades do ventilador. Com o avanço temporal, o escoamento se propaga em direção ao piso e às demais regiões do ambiente.

Discussão

O resultado do estudo de refinamento indica que a solução obtida com a malha de 175 mil células ainda apresenta sensibilidade ao refinamento espacial. A proximidade observada entre os perfis associados às malhas de 266 mil e 528 mil células sugere redução da influência do refinamento entre essas duas configurações. Dessa forma, a solução obtida com a malha mais grosseira deve ser interpretada considerando essa limitação.

A adoção da malha de 175 mil células na simulação de maior duração foi condicionada pelo custo computacional das malhas mais refinadas. Embora essa escolha tenha permitido ampliar o intervalo temporal simulado, ela limita a análise quantitativa, uma vez que a malha selecionada apresentou maior diferença em relação às demais.

O comportamento dos resíduos, do número de Courant e do indicador de erro numérico acumulado indica estabilidade do processo de solução das equações discretizadas durante o intervalo analisado. Entretanto, esses indicadores não permitem, isoladamente, avaliar a adequação física da solução. A sensibilidade ao refinamento identificada anteriormente e o tempo limitado de simulação permanecem relevantes para a interpretação dos resultados.

Os dados experimentais apresentaram aumento da velocidade medida com a aproximação da região ocupada pelo ventilador. Entretanto, a interpretação desses valores deve considerar as características do instrumento empregado e o procedimento experimental adotado. As medições foram realizadas com um anemômetro de ventoinha e em uma única campanha experimental, sem repetições independentes. Dessa forma, não foi possível avaliar a repetibilidade das medições nem determinar sua dispersão experimental.

A comparação entre os perfis numérico e experimental indica concordância apenas qualitativa em parte do perfil, principalmente quanto à tendência inicial de aumento da velocidade com a altura. As diferenças observadas não permitem afirmar concordância quantitativa entre a simulação e o experimento. Parte dessas diferenças pode estar associada à própria configuração numérica utilizada na comparação.

A simulação final foi realizada com a malha que apresentou maior sensibilidade ao refinamento e foi interrompida após 5 s. Nesse instante, o escoamento ainda se encontrava em desenvolvimento e o perfil numérico foi extraído em um único instante da solução transiente. Como a posição das pás varia continuamente, o campo de velocidade também se modifica ao longo do tempo, enquanto a interação com o piso, as paredes e os armários produz regiões de mistura e recirculação.

A medição experimental corresponde à resposta do anemômetro durante sua utilização em cada posição e, portanto, não representa necessariamente a mesma condição instantânea utilizada na extração do perfil numérico. Uma comparação quantitativa mais consistente exigiria maior intervalo de simulação e médias temporais dos campos numéricos.

As linhas de corrente evidenciam um escoamento predominantemente descendente abaixo do ventilador, seguido pelo espalhamento do ar após sua aproximação com o piso e pela formação de regiões de recirculação. Esse comportamento é compatível com observações apresentadas por Liu et al. (2018) e Chen et al. (2018), que identificaram campos de velocidade não uniformes e alterações na estrutura do escoamento decorrentes da interação do fluxo induzido por ventiladores de teto com o ambiente.

No instante de 5 s observa-se uma região de recirculação entre aproximadamente 1,0 m e 1,3 m de altura, que pode estar associada à redução local da velocidade observada no perfil numérico. Essa associação deve ser interpretada qualitativamente, pois a análise não estabelece uma relação quantitativa entre a estrutura tridimensional do escoamento e a variação do perfil de velocidade.

A evolução das linhas de corrente também mostra que, ao final dos 5 s simulados, o escoamento ainda se distribuía pelo ambiente. Portanto, o campo obtido nesse instante não deve ser interpretado como uma condição permanente ou estatisticamente estabelecida. Uma simulação de maior duração permitiria avaliar a evolução posterior da distribuição de quantidade de movimento e identificar um intervalo adequado para obtenção de médias temporais.

A formulação baseada nas equações de conservação fornece a base física para a descrição do problema, enquanto a solução numérica permite incorporar a geometria tridimensional, o movimento das pás e a interação do escoamento com as superfícies.

Em conjunto, os resultados mostram que a modelagem numérica reproduziu características observadas no ambiente, como o movimento descendente e a formação de regiões de recirculação, embora a comparação quantitativa permaneça limitada pelo refinamento da malha, pelo intervalo temporal simulado e pelas características da campanha experimental.

Conclusão

O estudo permitiu analisar a dinâmica do escoamento induzido por um ventilador de teto em um ambiente real a partir de uma formulação física baseada nas equações de conservação, de uma modelagem numérica transiente e de medições experimentais realizadas na própria sala estudada.

A análise de sensibilidade ao refinamento mostrou que as malhas de aproximadamente 266 mil e 528 mil células produziram perfis de velocidade próximos entre si, enquanto a malha de 175 mil células apresentou diferenças mais acentuadas. Por limitação de custo computacional, a simulação de maior duração foi realizada com a malha mais grosseira, o que restringe a interpretação quantitativa dos resultados obtidos.

A simulação reproduziu características do escoamento observadas no ambiente, como o movimento predominantemente descendente abaixo do ventilador e a formação de regiões de recirculação. A comparação com as medições experimentais indicou tendência semelhante em parte do perfil de velocidades, porém sem evidência suficiente para caracterizar concordância quantitativa.

As diferenças observadas estão associadas principalmente à sensibilidade ao refinamento da malha, ao intervalo temporal limitado da simulação, à utilização de um perfil numérico instantâneo e às limitações da campanha experimental. Dessa forma, os resultados devem ser interpretados como uma avaliação inicial da capacidade do modelo de representar o escoamento no ambiente estudado.

Para a continuidade do trabalho, recomenda-se utilizar malhas mais refinadas em simulações de maior duração, empregar médias temporais dos campos de velocidade e realizar campanhas experimentais com maior controle e repetição das medições. Essas modificações permitirão uma comparação quantitativa mais consistente entre a modelagem numérica e o comportamento observado no sistema físico.

Referências

CHEN, W.; LIU, S.; GAO, Y.; ZHANG, H.; ARENS, E.; ZHAO, L.; LIU, J. Experimental and numerical investigations of indoor air movement distribution with an office ceiling fan. **Building and Environment**, v. 130, p. 14-26, 2018.

LI, L.; HE, Y.; CHEN, W.; JI, Y.; FUNG, J. C. H.; LAU, A. K. H. An integrated experimental and CFD analysis of ceiling-fan-integrated air conditioning system: Indoor air quality and air velocity. **Building and Environment**, v. 258, p. 111633, 2024.

LIU, S.; LIPCZYNSKA, A.; SCHIAVON, S.; ARENS, E. Detailed experimental investigation of air speed field induced by ceiling fans. **Building and Environment**, v. 142, p. 342-360, 2018.

OPENFOAM. AMI rotating fan. **OpenFOAM Documentation**, version 2306. Disponível em: https://doc.openfoam.com/2306/examples/tutorials/incompressible/pimpleFoam/ami-rotating-fan/. Acesso em: 26 ago. 2026.

RAFTERY, P.; FIZER, J.; CHEN, W.; HE, Y.; ZHANG, H.; ARENS, E.; SCHIAVON, S.; PALIAGA, G. Ceiling fans: predicting indoor air speeds based on full scale laboratory measurements. **Building and Environment**, v. 155, p. 210-223, 2019.

SUSHANT, A. K.; YADAV, A.; DEWANGAN, O.; KHAN, P. K.; SHARMA, N. Influence of ceiling fan induced mass flow rate to create uniform temperature distribution in a closed room: A CFD investigation. **International Journal of Thermofluids**, v. 26, p. 101140, 2025.