

Otimização de sistemas HVAC para conforto térmico em ambientes acadêmicos usando fluidodinâmica computacional

Camila Oliveira dos Santos Borges^[1], Josemar Rocha Pedroso^[2], Luiz Justino da Silva Junior^[3], Nuccia Carla Arruda de Sousa^{[4]*}

^[1] camila.b2190@gmail.com, ^[2] josemar.pedroso@ufob.edu.br, ^[3] luiz.silva@ufob.edu.br. Centro Multidisciplinar de Bom Jesus da Lapa, Universidade Federal do Oeste da Bahia, (UFOB), Bom Jesus da Lapa, Bahia, Brasil

^[4] nuccia.sousa@penedo.ufal.br. Unidade Educacional Penedo, Universidade Federal de Alagoas (UFAL), Penedo, Alagoas, Brasil

* autora correspondente

Resumo

Ondas de calor, que são caracterizadas por períodos prolongados de temperaturas elevadas, prejudicam o conforto térmico e o bem-estar público. Sistemas de aquecimento, ventilação e ar condicionado (HVAC – *Heating, Ventilation, and Air Conditioning*) são comumente utilizados em edifícios para regular a temperatura, a umidade e a qualidade do ar interno, garantindo assim o conforto térmico e a eficiência energética. No entanto, ineficiências energéticas e distribuição inadequada de ar em sistemas HVAC tradicionais continuam a representar desafios significativos, especialmente em grandes áreas como auditórios universitários. Diante disso, é fundamental buscar estratégias que otimizem a eficiência térmica e energética desses sistemas. Este estudo propõe um método baseado em fluidodinâmica computacional (CFD – *Computational Fluid Dynamics*) para melhorar o desempenho de sistemas HVAC em um auditório universitário, usando o software de código aberto OpenFOAM. As simulações empregaram o modelo de turbulência *k-epsilon*, escolhido por apresentar boa sensibilidade ao gradiente de velocidade e excelente desempenho em simulações envolvendo perda de calor, no solucionador *buoyantSimpleFoam*, facilitando uma análise abrangente da distribuição de temperatura e velocidade do ar. Os resultados mostraram que o sistema existente, composto por unidades de ar condicionado do tipo *split*, mantém temperaturas entre 296 K e 300 K, levando a zonas de calor persistentes concentradas na parte esquerda do auditório. Além disso, as velocidades do ar atingiram até 0,71 m/s, excedendo os limites estabelecidos pela NBR 16401-1 para conforto térmico. Assim, o gradiente térmico de 4 K aliado a velocidades inadequadas do ar gera um desconforto térmico significativo. Os cálculos de carga térmica indicaram um sistema superdimensionado, resultando em custos operacionais elevados. Como solução, recomenda-se substituir o sistema *split* por um modelo de ar condicionado do tipo *cassete*, que proporciona uma distribuição de ar mais eficiente. Isso ocorre pela ausência de interação entre os fluxos de ar insuflados simultaneamente por aparelhos distintos, o que resulta em temperaturas mais equilibradas e, conseqüentemente, na redução do consumo de energia. Tal fato se deve à eliminação das zonas de calor que exigem equipamentos de climatização de maior potência para alcançar as temperaturas adequadas.

Palavras-chave: conforto térmico; fluidodinâmica computacional; HVAC; NBR; OpenFOAM.

Optimization of HVAC systems for thermal comfort in academic environments using computational fluid dynamics approach

Abstract

Heat waves, which are characterized by prolonged periods of high temperatures, impair thermal comfort and public well-being. Heating, Ventilation, and Air Conditioning (HVAC) systems are commonly used in buildings to regulate temperature, humidity, and indoor air quality, thereby ensuring thermal comfort and energy efficiency. However, energy inefficiencies and inadequate air distribution in traditional HVAC systems continue to pose significant challenges, especially in large areas such as university auditoriums. Given this, it is essential to seek strategies that optimize the thermal and energy efficiency of these systems. This study proposes a method based on computational

fluid dynamics (CFD) to improve the performance of HVAC systems in a university auditorium, using the open source software OpenFOAM. The simulations used the *k*-epsilon turbulence model, chosen for its good sensitivity to velocity gradients and excellent performance in simulations involving heat loss, in the buoyantSimpleFoam solver, facilitating a comprehensive analysis of the temperature and air velocity distribution. The results showed that the existing system, composed of split-type air conditioning units, maintains temperatures between 296 K and 300 K, leading to persistent heat zones concentrated in the left part of the auditorium. In addition, air velocities reached up to 0.71 m/s, exceeding the limits established by NBR 16401-1 for thermal comfort. Thus, the 4 K thermal gradient combined with inadequate air velocities generates significant thermal discomfort. Thermal load calculations indicated an oversized system, resulting in high operating costs. As a solution, it is recommended to replace the split system with a cassette-type air conditioning model, which provides more efficient air distribution. This occurs due to the absence of interaction between the air flows simultaneously blown by different devices, which results in more balanced temperatures and, consequently, reduced energy consumption. This is due to the elimination of heat zones that require higher-power air conditioning equipment to reach adequate temperatures.

Keywords: computational fluid dynamics; HVAC; NBR; OpenFOAM; thermal comfort.

1 Introdução

Informações divulgadas pela Organização Meteorológica Mundial (ONU, 2023a) indicam que, entre 2015 e 2022, as temperaturas globais atingiram recordes históricos, com 98% de probabilidade de serem superadas entre 2023 e 2027. Ondas de calor extremo apresentam consequências severas para a saúde pública e o bem-estar, como evidenciado no verão de 2022, quando mais de 60 mil pessoas faleceram na Europa devido ao calor excessivo, segundo a OMM (ONU, 2023b). Além do aumento do risco de doenças cardiovasculares e outras condições de saúde, a exposição a temperaturas elevadas reduz a eficiência física e intelectual das populações afetadas.

Um estudo recente analisou a eficiência de um protótipo de ar-condicionado utilizando módulos termoelétricos, revelando a importância das análises energética, exérgica e exergoeconômica para otimizar o desempenho desses sistemas e assegurar um aquecimento ou refrigeração mais eficaz (Leite; Santos, 2025).

Diante da recorrência desses eventos climáticos extremos e de suas graves consequências, torna-se essencial a adoção de medidas eficazes para mitigar seus impactos. A climatização artificial é amplamente utilizada; no entanto, os aparelhos do tipo *split*, por exemplo, tendem a gerar uma distribuição desigual do ar, resultando na formação de zonas de calor. Devido à baixa eficiência desse sistema, o superdimensionamento torna-se necessário, o que eleva os custos operacionais. A substituição por um sistema de ar-condicionado do tipo cassete surge como uma alternativa mais eficiente, pois proporciona uma distribuição de ar mais homogênea e melhora o desempenho energético. Nesse contexto, estudos baseados em fluidodinâmica computacional podem contribuir significativamente para essa análise.

Estudos que permitam avaliar a eficiência dos Sistemas de Aquecimento, Ventilação e Ar-Condicionado (HVAC – *Heating, Ventilation, and Air Conditioning*) é indispensável. Entre as ferramentas disponíveis para essa avaliação, a Fluidodinâmica Computacional (CFD – *Computational Fluid Dynamics*) destaca-se como uma solução prática e de baixo custo (Löhner, 2008).

A CFD utiliza as equações de Navier-Stokes para simular numericamente o comportamento de fluidos e a transferência de calor, permitindo a modelagem precisa de problemas reais (Sayma, 2009). Softwares de código aberto, como Salome¹, OpenFOAM² e Paraview³, proporcionam autonomia e confiabilidade na execução de simulações, além de evitarem os altos custos associados a licenças comerciais, viabilizando seu uso tanto em instituições de ensino quanto em ambientes empresariais. O Salome é utilizado como pré-processador que permite a geração e tratamento da geometria e da malha computacional. Na fase de processamento, o OpenFOAM atua como solucionador, sendo responsável

¹ Salome. Disponível em: <https://www.salome-platform.org>.

² OpenFOAM. Disponível em: <https://www.openfoam.com>.

³ ParaView. Disponível em: <https://www.paraview.org>.

pela resolução das equações governantes do escoamento e da transferência de calor. No pós-processamento, o ParaView é empregado para a visualização e análise dos resultados. Esse conjunto de ferramentas livres garante flexibilidade na implementação dos modelos computacionais.

O conforto térmico é essencial para garantir o bem-estar e a produtividade nos ambientes de ensino. Estudos conduzidos por Almeida, Ramos e Freitas (2016), Marçal *et al.* (2018) e Mendell e Heath (2004) demonstram que o desconforto térmico impacta diretamente o desempenho dos estudantes, comprometendo a qualidade da educação, que é um fator fundamental para o desenvolvimento social. Assim, investigar o conforto térmico em instituições educacionais torna-se indispensável.

Pesquisas recentes reforçam a importância do conforto térmico em ambientes acadêmicos para maximizar o aprendizado (Lan *et al.*, 2023; Suhaila *et al.*, 2019). Além disso, a ventilação regular, seja natural ou forçada, deve ser garantida nas salas de aula para mitigar o aumento excessivo de temperatura, especialmente em locais de clima quente e seco, como a cidade de Bom Jesus da Lapa. O uso da CFD na análise de conforto térmico em ambientes acadêmicos tem se mostrado eficaz na identificação de falhas e na verificação do desempenho operacional de sistemas de climatização (Lan *et al.*, 2023; Suhaila *et al.*, 2019). A simulação permite definir diferentes temperaturas internas e vazões de renovação para o cálculo da carga térmica, enquanto o método simplificado não oferece essa possibilidade (Medeiros *et al.* (2020).

A ISO 7730 (ISO, 2005), utilizada para avaliar a sensação térmica e o nível de insatisfação dos ocupantes, assim como normas como a NBR 16401-1 (ABNT, 2024) e a NR 17 (Brasil, 1978), estabelecem parâmetros específicos para o conforto térmico, definindo faixas recomendadas de temperatura e velocidade do ar para ambientes climatizados. No presente estudo, avalia-se a adequação do sistema HVAC às diretrizes normativas, considerando parâmetros como temperatura operativa, velocidade do ar e homogeneidade da distribuição térmica no ambiente. Esses parâmetros são comparados aos limites recomendados para conforto térmico e eficiência energética, levando em consideração o tipo de equipamento de refrigeração instalado.

A CFD permite um estudo detalhado desses parâmetros, conforme demonstrado por Turgut e Yardimci (2022) e Chen *et al.* (2023). A confiabilidade dessa abordagem foi confirmada experimentalmente por Sheng *et al.* (2022), que demonstraram a reprodutibilidade das simulações CFD.

A distribuição inadequada de ar em espaços fechados é um problema comum, que provoca a formação de zonas de calor e compromete o conforto térmico dos ocupantes. Esses desafios são particularmente críticos em localidades que sofrem mais com ondas de calor e que muitas vezes não consideram a dinâmica do fluxo de ar de forma adequada.

No contexto do ensino, observa-se uma lacuna na integração entre a CFD, disciplinas relacionadas à transferência de calor e práticas de projeto. Este estudo acrescenta ao utilizar o OpenFOAM como ferramenta de código aberto, explorando sua viabilidade acadêmica e comparando os resultados com normas regulatórias e estudos prévios baseados em softwares comerciais. Essa limitação restringe o potencial de estudantes e profissionais na utilização de simulações numéricas para otimizar sistemas de climatização. Como consequência, projetos desenvolvidos sem o devido embasamento teórico podem apresentar distribuição desigual de temperatura e consumo energético elevado.

Embora sistemas de ar-condicionado do tipo cassete sejam amplamente empregados em ambientes comerciais, há poucos estudos que avaliem sua viabilidade técnica e econômica como alternativa aos sistemas *split*. Além disso, ainda não está claro em que medida essas soluções atendem aos critérios estabelecidos pelas normativas vigentes sob condições de temperatura externa extrema. Este estudo busca preencher essa lacuna por meio de simulações CFD (OpenFOAM), análise de eficiência energética e proposição de otimizações para adequação normativa.

Diante desse cenário, este estudo propõe a aplicação da CFD, utilizando os softwares de código aberto Salome, OpenFOAM e Paraview, para analisar e otimizar o sistema de climatização de um auditório universitário localizado na cidade de Bom Jesus da Lapa. As condições de contorno da

simulação serão definidas com base em dados fornecidos pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2023).

A escolha da localidade justifica-se pelas temperaturas extremamente elevadas registradas na região, que frequentemente figuram entre as mais altas do país. Dados recentes indicam que Bom Jesus da Lapa apresentou a segunda maior temperatura registrada no estado da Bahia e figura entre as 24 cidades com os maiores registros térmicos do Brasil. A definição dessas condições visa garantir que o sistema de climatização projetado proporcione conforto térmico adequado mesmo em cenários de calor extremo.

Este artigo está estruturado da seguinte forma: a Seção 2 apresenta os materiais e métodos, detalhando três etapas de desenvolvimento: (i) Pré-processamento, que abrange a construção do domínio computacional, sua discretização e a aplicação das condições de contorno; (ii) Processamento, no qual são discutidos os conceitos fundamentais para a construção dos modelos em Fluidodinâmica Computacional (CFD); e (iii) Pós-processamento, que trata da verificação dos resultados (Seção 3). Por fim, a Seção 4 apresenta as conclusões e perspectivas para futuras pesquisas, destacando a importância da otimização dos sistemas por meio da CFD.

2 Material e métodos

A CFD emprega uma estrutura de códigos baseada em algoritmos numéricos, como o método dos volumes finitos, para discretizar as equações diferenciais parciais que governam o escoamento de fluidos e a transferência de calor. Essa abordagem constitui uma ferramenta essencial para a simulação numérica de escoamentos de fluidos, fenômenos de transferência de calor e processos relacionados, tais como convecção, difusão e interação entre fluidos e superfícies. As equações de Navier-Stokes, em conjunto com outras equações de conservação, possibilitam a modelagem e previsão do comportamento dos fluidos em diferentes condições (Maliska, 2023).

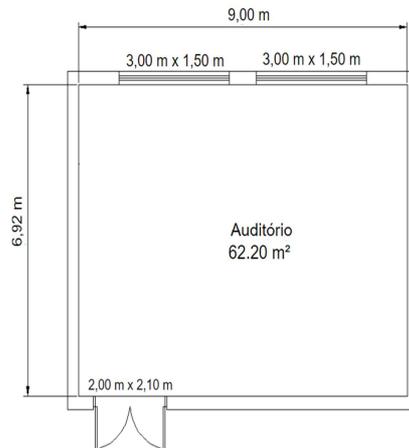
Na etapa de pré-processamento, o domínio é representado por uma geometria, a qual é discretizada em uma malha de volumes de controle. Durante o processamento, as equações governantes são convertidas em equações algébricas para cada volume de controle, e os erros resultantes, decorrentes da impossibilidade de solução exata dessas equações, são reduzidos progressivamente ao longo das iterações (Versteeg; Malalasekera, 2007). Finalmente, na fase de pós-processamento, os resultados da simulação são apresentados graficamente, permitindo a análise de variáveis como temperatura e velocidade.

Neste estudo, foram analisados os campos de temperatura e velocidade, considerando diferentes configurações de sistemas HVAC, bem como as condições de contorno e parâmetros numéricos aplicáveis.

2.1 Visão geral do caso

A Figura 1 apresenta uma visão geral do auditório climatizado utilizado como objeto de estudo neste trabalho.

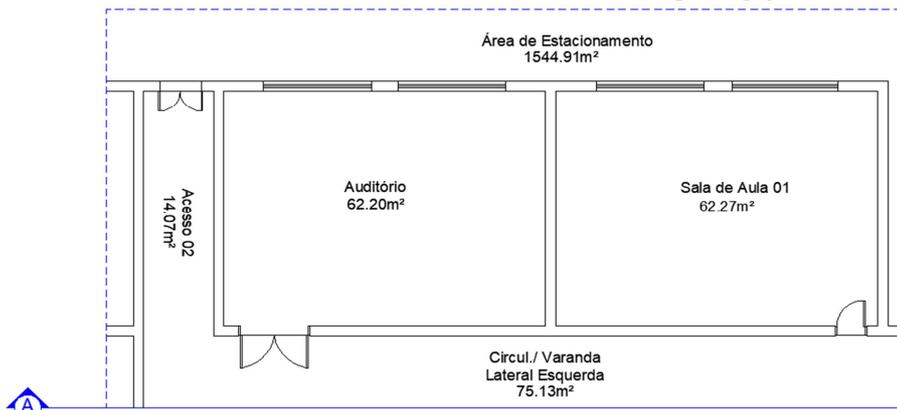
Figura 1 – Dimensões do auditório climatizado usado como estudo de caso



Fonte: elaborado pelos autores

Para compreender os limites do projeto de otimização, é essencial analisar a Figura 2, que exibe um recorte da planta baixa do edifício, permitindo a identificação da localização do auditório em relação aos demais ambientes do Campus.

Figura 2 – Recorte da planta baixa do auditório e fronteiras



Fonte: elaborado pelos autores

O sistema de climatização do auditório consiste em dois aparelhos de ar-condicionado instalados na parede paralela ao estacionamento. O *layout* atual do sistema HVAC foi determinado pela necessidade de instalação das unidades condensadoras em local adequado para dissipação do calor extraído do ambiente interno. Como as unidades condensadoras devem ser posicionadas em áreas externas, sem circulação de pessoas, a parede selecionada foi a única viável para acomodar esses equipamentos.

Entretanto, a disposição do sistema de climatização contraria as recomendações dos fabricantes, os quais recomendam que as unidades evaporadoras sejam instaladas de forma a direcionar o fluxo de ar paralelo à maior dimensão do ambiente, otimizando o desempenho (Electrolux, 2020).

Atualmente, o auditório utiliza dois aparelhos Split Teto Piso, modelo PEFI48B2NC/OUFE48B3CB da Elgin, com capacidade de 48.000 BTUs/h e vazão de 2.149 m³/h cada, projetados para ambientes de até 70 m² (Horvath, 2024).

A avaliação do desempenho do sistema de climatização é realizada conforme os critérios estabelecidos pela norma técnica ABNT NBR 16401-1 (ABNT, 2024). Esse documento especifica o cálculo da carga térmica que deve ser removida ou adicionada pelo sistema HVAC, garantindo conforto térmico adequado para os ocupantes, conforme definido na Equação 1.

$$Carga = \text{Área} \times \text{Fator de carga térmica} \quad (1)$$

Os fatores presentes na Equação 1 estão diretamente relacionados às características construtivas do ambiente, impactando a determinação da carga térmica. Esses fatores variam conforme o tipo de material empregado (paredes, janelas, telhado), a incidência solar, a taxa de ocupação do ambiente e a presença de equipamentos. A partir dessas informações, foi estimada a carga térmica, cujos detalhes estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Fator para cálculo de carga térmica considerando diferentes níveis de proteção solar e características construtivas

Fatores			
Calor recebido de:	Insolação		
	Sem proteção	Com proteção interna	Com proteção externa
Janelas ao Norte	1000	480	290
Janelas ao Nordeste	1000	400	290
Janelas ao Leste	1130	550	360
Janelas ao Sudeste	840	360	290
Janelas ao Sul	0	0	0
Janelas ao Sudoeste	1680	670	480
Janelas ao Oeste	2100	920	630
Janelas ao Noroeste	1500	630	400
Transmissão			
Vidro comum	210	210	210
Tijolo de vidro	150	150	150
Paredes externas			
	Construção leve		Construção pesada
Orientação Sul	55		42
Outras orientações	84		50
Paredes internas			
Ambiente condicionado	33		
Teto			
Em laje	315		

Em laje com isolamento	125
Entre andares	55
Sob telhado isolado	75
Sob telhado sem isolação	210
Piso	
Sem contato com o solo	55
Pessoas	
Por pessoa	630
Iluminação e aparelhos elétricos	
Em geral	4
Infiltração de ar	
Portas e vãos	630

Fonte: Norma ABNT NBR 16401-1 (2024)

Neste estudo, os aspectos construtivos do auditório estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Características construtivas e propriedades térmicas do ambiente analisado

Aspecto construtivo	Orientação	Especificação
Janelas	Norte	Vidro comum, sem proteção
Paredes externas	Norte	Construção leve
Paredes internas	–	Ambiente condicionado
Teto	–	Telhado sem isolação
Piso	–	Sem contato com o solo
Infiltração de ar	–	Portas e vãos

Fonte: dados da pesquisa

Para calcular a carga térmica a ser removida do ambiente, considerou-se que o auditório foi projetado para acomodar 30 ocupantes e que há uma carga térmica adicional de 400 W, proveniente dos equipamentos elétricos e do sistema de iluminação. A partir da substituição desses parâmetros na Equação 1, obtiveram-se os valores apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Transmissão de calor considerando diferentes fontes e fatores de ganho térmico

Forma de transmissão de calor	Fator	Calor transmitido (kJ/h)
Calor recebido pela	9,00 m ²	1000
		9.000

insolação das janelas			
Calor recebido pela transmissão das janelas	9,00 m ²	210	1.890
Calor recebido pelas paredes externas	105,7 m ²	84	8.878,8
Calor recebido pelas paredes internas	22,84 m ²	33	753,72
Calor recebido pelo teto	62,25 m ²	210	13.072,5
Calor recebido pelo piso	62,25 m ²	55	3.423,75
Calor recebido pelas portas ou vãos	0,50 m ²	630	315
Calor recebido por pessoas	30 pessoas	630	18.900
Calor recebido pelas cargas elétricas	400 W	4	1.600
Valor total de calor transferido	57.833,77 kJ/h		

Fonte: dados da pesquisa

A localização da edificação influencia diretamente as condições climáticas, impactando a demanda de carga térmica. A latitude, por exemplo, determina a quantidade de radiação solar recebida ao longo do ano, alterando a necessidade de refrigeração. Por essa razão, a norma ABNT NBR 16401 (ABNT, 2024) recomenda a inclusão de um fator geográfico no cálculo da carga térmica, conforme ilustrado no mapa da Figura 3.

Figura 3 – Fatores regionais de correção para carga térmica no Brasil



Fonte: ABNT (1983)

Para o local em estudo, o fator geográfico é 0,95 de acordo com as normas técnicas. Com base nesse coeficiente, a carga térmica total do auditório foi calculada em 54.942,08 kJ/h (equivalente a 52.075,04 BTUs/h). Considerando que a capacidade total dos aparelhos de ar-condicionado instalados

no ambiente é de 96.000 BTUs/h, observa-se que o sistema encontra-se superdimensionado. Esse sobredimensionamento pode resultar em consumo energético excessivo e em desconforto térmico devido à sobrecarga de refrigeração.

Para otimizar o sistema HVAC e aprimorar a eficiência energética do ambiente, uma alternativa seria substituir os dois aparelhos de ar-condicionado do tipo *split* piso teto por um único modelo Cassete Plus II (KP), com capacidade de 60.000 BTUs/h. As especificações desse equipamento incluem dimensões de 0,840 m de largura e altura, vazão de ar de 1.521,6 m³/h e recomendação para ambientes de até 80 m² (Elgin, 2024; Horvath, 2024).

Para otimizar o sistema HVAC e aprimorar a eficiência energética do ambiente, uma alternativa seria substituir os dois aparelhos de ar-condicionado do tipo *split* piso-teto por um único modelo Cassete Plus II (KP), com capacidade de 60.000 BTUs/h. As especificações desse equipamento incluem dimensões de 0,840 m de largura e altura, vazão de ar de 1.521,6 m³/h e recomendação para ambientes de até 80 m² (Elgin, 2024; Horvath, 2024).

É fundamental destacar que as informações anteriormente mencionadas referem-se a um modelo específico selecionado para viabilizar a modelagem de um sistema otimizado. No entanto, como há outros modelos de diferentes fabricantes com a mesma capacidade em BTU/h, as especificações apresentadas podem variar conforme o equipamento considerado.

Para avaliar se a substituição do sistema de climatização atenderia aos requisitos de conforto térmico no auditório, é fundamental considerar também outras normas regulamentadoras. A NBR 16401-1 (ABNT, 2024) estabelece diretrizes para o conforto térmico em ambientes internos, especificando parâmetros para locais destinados a atividades intelectuais. Além disso, a ISO 7730 (ISO, 2005), voltada para ambientes educacionais, também se mostra relevante para este estudo. Essas normas determinam que variáveis como temperatura e velocidade do ar são fatores essenciais para garantir o conforto térmico dos ocupantes, conforme detalhado na Tabela 4.

Tabela 4 – Parâmetros de conforto térmico segundo normas regulamentadoras

Normas regulamentadoras	Temperatura	Velocidade (m/s)
NBR 16401-1 (2024)	22,5°C a 25,5 °C (umidade relativa de 65%) 23,0°C a 26,0 °C (umidade relativa de 35%)	≤ 0,2
NBR 17.5.2.b (2018)	20,0°C a 23,0 °C	< 0,75
ISO 7730 (2005)	24,5 ± 2,5 °C no verão 22,0 ± 3,0 °C no inverno	0,21 a 0,24

Fonte: dados da pesquisa

Dessa forma, este estudo será conduzido com base nos critérios estabelecidos nas normas mencionadas, avaliando a adequação dos resultados obtidos no OpenFOAM. A análise incluirá a visualização da distribuição dos fluxos de ar insuflados pelos equipamentos do sistema HVAC, bem como o mapeamento dos campos de temperatura e velocidade, permitindo uma compreensão detalhada do comportamento térmico do ambiente. Não somente, o estudo considerará o viés do consumo energético para garantir o cumprimento das normas previamente apresentadas, mas também buscar viabilizar a redução dos custos operacionais.

2.2 Método computacional

O modelo matemático adotado neste estudo baseia-se na equação de Navier-Stokes para escoamento incompressível, representada pela Equação 2 (Versteeg; Malalasekera, 2007).

$$\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + (\vec{u} \cdot \nabla) \vec{u} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 \vec{u} + \vec{f} \quad (2)$$

Nessa equação, $\frac{\partial \vec{u}}{\partial t}$ representa a taxa de variação temporal da velocidade do fluido, enquanto $(\vec{u} \cdot \nabla) \vec{u}$ é termo de advecção, que descreve o transporte de *momentum* devido ao movimento do fluido. O termo ∇p refere-se ao gradiente de pressão, que determina a variação espacial da pressão do fluido, e $\nu \nabla^2 \vec{u}$ representa os efeitos da viscosidade do fluido, considerando uma viscosidade cinemática uniforme ν . Por fim, \vec{f} corresponde às forças externas atuantes, como a gravidade ou outras influências externas.

No contexto da CFD, a formulação assume a forma de uma equação de transporte para a variável de interesse ϕ , conforme indicado na Equação 3:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla \phi = -\nabla \cdot p + \mu(\Gamma \nabla^2 \phi) + S \quad (3)$$

Nessa equação, ϕ representa a variável de interesse, Γ é o coeficiente de difusão e S é o termo fonte. Esses elementos foram ajustados para representar as equações de conservação fundamentais para a modelagem da dinâmica dos fluidos: Conservação da Massa, Conservação da Quantidade de Movimento e Conservação da Energia.

Para a Conservação da Massa, adotam-se $\phi = 1$, $\Gamma = 0$ e $S = 0$, conforme descrito na Equação 4:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0 \quad (4)$$

onde ρ representa a densidade do fluido, \vec{u} é o vetor velocidade, $\frac{\partial \rho}{\partial t}$ denota a taxa de variação temporal da densidade, e $\nabla \cdot (\rho \vec{u})$ descreve a advecção da massa do fluido.

Para a Conservação de Quantidade de Movimento, assumem-se $\phi = \vec{u}$, $\Gamma = \mu$ e $S = \vec{f}$, resultando na Equação 5:

$$\rho \left(\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla \vec{u} \right) = -\nabla p + \mu(\nabla^2 \vec{u}) + \vec{f} \quad (5)$$

com μ sendo a viscosidade dinâmica

Para a Conservação da Energia, utilizam-se $\phi = e$, $\Gamma = k$ e $S = \mu(\nabla^2 T) + Q$, conforme a Equação 6:

$$\frac{\partial e}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{u} e) = -\nabla \cdot (k \nabla T) + \mu(\nabla^2 T) + Q \quad (6)$$

onde e é a energia interna por unidade de massa, k representa a condutividade térmica, T é a temperatura, $\mu(\nabla^2 T)$ sendo o termo relacionado à dissipação de calor devido à viscosidade do fluido e Q refere-se a fontes de calor, como reações térmicas.

Devido à complexidade dos fenômenos de escoamento, as equações de conservação não possuem solução analítica exata. Dessa forma, a discretização do domínio de estudo em Volumes de

Controle (VC) e aplicação do Método dos Volumes Finitos (MVF) foram utilizados para a resolução numérica, conforme indicado na Equação 7 (Maliska, 2023):

$$\int_A \phi dA = \int_V \left(\frac{\partial \phi}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla \phi \right) dV \quad (7)$$

Como o VC é composto por diversas faces da geometria, a integral de uma função sobre o volume foi representada pela soma das integrais sobre cada face. Desse modo, obtêm-se a Equação 8:

$$\sum_f \int_A \phi dA = \int_V \left(\frac{\partial \phi}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla \phi \right) dV \quad (8)$$

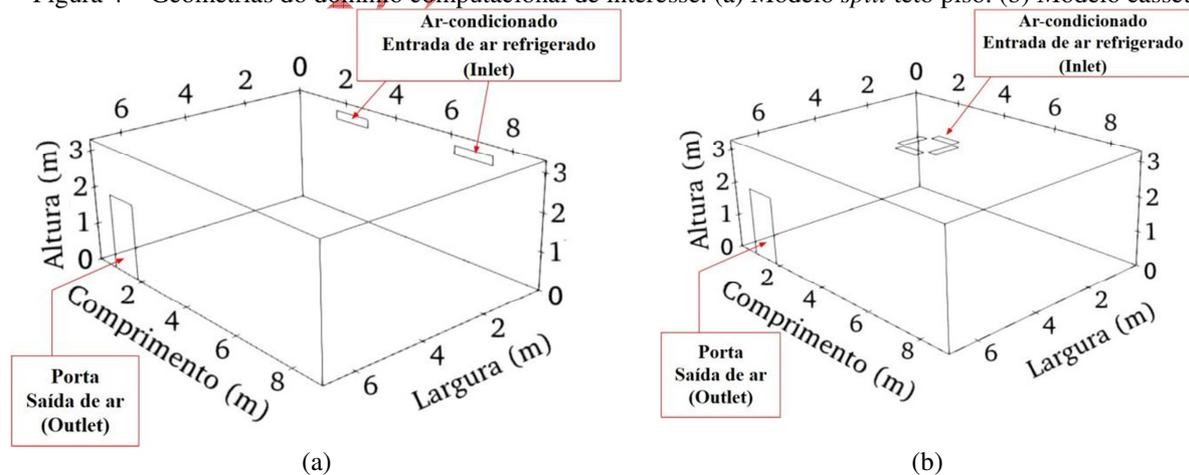
Esses termos fornecem os fundamentos para modelar o comportamento do fluido utilizando a CFD, permitindo a análise da distribuição das variáveis de interesse, como temperatura, velocidade e pressão, no domínio estudado.

Para a execução das simulações, foi utilizado um sistema computacional de alto desempenho com as seguintes configurações: processador: Intel Core i5-7300 (Quad Core), 8 GB de memória RAM DDR4, armazenamento de 1 TB (HD) e placa de vídeo NVIDIA GeForce GTX1050. O ambiente computacional foi baseado no sistema operacional Windows 10 Home e nos softwares OpenFOAM V9, SALOME e Paraview. Essas especificações possibilitaram a realização eficiente das simulações, permitindo o uso de malhas mais refinadas e modelagem de turbulência sem comprometer a precisão dos resultados.

2.3 Pré-processamento

A Figura 4a apresenta a geometria original do auditório, configurada com dois aparelhos de ar-condicionado do tipo Split Teto Piso, enquanto a Figura 4b exibe a geometria otimizada, na qual o sistema HVAC é composto por um único aparelho do tipo Cassete. As dimensões das saídas de ar e das paredes foram estabelecidas conforme os valores indicados na Figura 1.

Figura 4 – Geometrias do domínio computacional de interesse. (a) Modelo *split* teto piso. (b) Modelo cassete



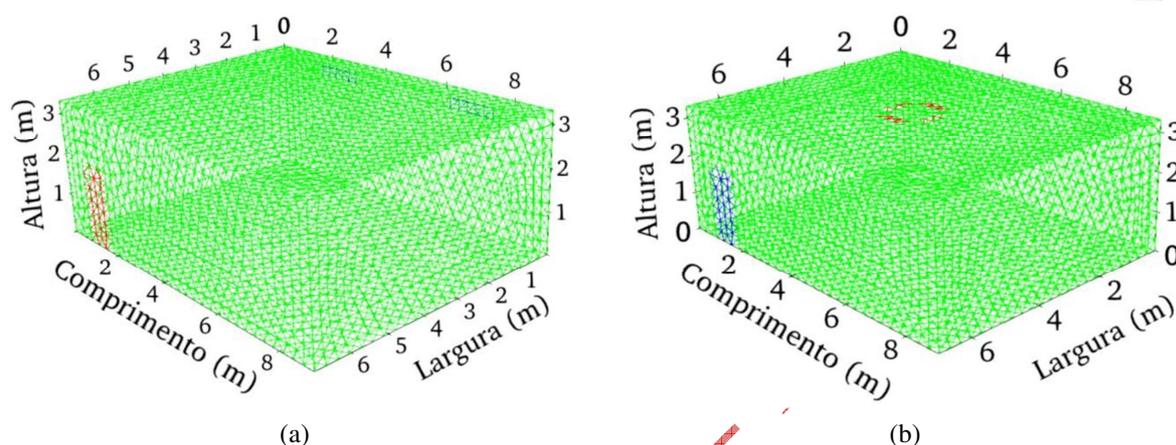
Fonte: dados da pesquisa

As dimensões das entradas de fluxo de ar frio foram definidas com base nas especificações do fabricante. Para o modelo *split* teto piso (Figura 4a), essas dimensões correspondem a 1,288 m de

largura e 0,673 m de altura. Já para o modelo Cassete (Figura 4b), as medidas são de 0,840 m de largura e 0,840 m de altura.

A discretização do domínio contínuo em subdomínios menores, denominados Volumes de Controle, foi realizada por meio do software Salome, resultando em malhas tetraédricas, conforme ilustrado na Figura 5. A escolha desse tipo de malha foi motivada pela necessidade de equilibrar precisão e desempenho computacional na modelagem do sistema. Essa abordagem visa alcançar um compromisso entre exatidão e eficiência, considerando os limites computacionais e a complexidade do modelo.

Figura 5 – Malhas do domínio computacional de interesse. (a) Modelo *split* teto piso. (b) Modelo cassete



Fonte: dados da pesquisa

A análise da qualidade da malha gerada constitui uma etapa fundamental no processo de pré-processamento. Para essa avaliação, utilizou-se a ferramenta *checkMesh*, um utilitário nativo do OpenFOAM que calcula estatísticas de qualidade da malha.

Os resultados indicaram que, para o cenário original do sistema HVAC (malha da Figura 5a), foram gerados 7.674 nós, 75.923 faces e 36.505 células, com assimetria máxima de 0,740857, volume mínimo de 0,00139144 e volume máximo de 0,0276998. No cenário otimizado (malha da Figura 5b), a malha gerada apresentou 7.466 nós, 73.662 faces e 35.401 células. A assimetria máxima de 0,73193, volume mínimo de 0,00105094 e volume máximo de 0,0277185.

As assimetrias máximas das malhas estão dentro de limites aceitáveis para garantir uma boa distribuição dos elementos. Os volumes mínimos encontrados, e os volumes máximos, asseguram uma discretização eficiente, com elementos menores nas regiões de interesse e maiores nas áreas menos críticas. Com essas configurações tem-se uma resolução adequada para a análise CFD sem comprometer a precisão dos resultados. Esses resultados foram fundamentais para validar a qualidade das malhas geradas e garantir a confiabilidade das simulações numéricas realizadas nos dois cenários analisados.

As assimetrias máximas das malhas permaneceram dentro de limites aceitáveis, garantindo uma distribuição adequada dos elementos. Os volumes mínimos e máximos identificados asseguraram uma discretização eficiente, com elementos menores nas regiões de interesse e maiores nas áreas menos críticas.

Com essas configurações, obteve-se uma resolução adequada para a análise CFD, sem comprometer a precisão dos resultados. Esses resultados foram essenciais para validar a qualidade das malhas geradas e assegurar a confiabilidade das simulações numéricas nos dois cenários analisados.

Após a verificação da qualidade das malhas, estas foram encaminhadas ao solucionador OpenFOAM, onde foram definidas as propriedades do fluido, bem como as condições iniciais e de contorno.

2.4 Processamento

O OpenFOAM disponibiliza uma ampla variedade de solucionadores, adequados para a simulação de diferentes fenômenos físicos, abrangendo distintos tipos de fluido e escoamento. Essa flexibilidade permite a seleção do solucionador mais apropriado para cada estudo específico.

No presente estudo, foi empregado o solver *buoyantSimpleFoam*, indicado para simulações de fluxos turbulentos e flutuantes de fluidos compressíveis em regime estacionário. O algoritmo SIMPLE (*Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations*) foi adotado como método semi-implícito para equações vinculadas à pressão (CFD DIRECT, 2022).

No que se refere às condições de contorno, foram consideradas propriedades físicas adaptadas ao caso em análise. No subdiretório *polyMesh*, localizado no diretório *constant*, foram especificadas as características do fluido e do ambiente. As propriedades físicas utilizadas no estudo foram obtidas a partir de referências consolidadas na literatura técnica e normas aplicáveis à modelagem de escoamentos em sistemas HVAC.

A aceleração da gravidade é valor padrão adotado para simulações na Terra $9,81 \text{ (m/s}^2\text{)}$. O peso molecular do ar foi definido conforme a composição média da atmosfera terrestre em condições normais $28,96 \text{ (g/mol)}$. As temperaturas do ar insuflado e do ambiente foram estabelecidas com base nas condições operacionais típicas de sistemas de climatização 296 K e 308 K . Os valores de capacidade térmica a volume constante (C_v) de $712 \text{ (J/kg}\cdot\text{K)}$ e a pressão constante (C_p) de $1.004,4 \text{ (J/kg}\cdot\text{K)}$ foram extraídos de tabelas termodinâmicas para o ar atmosférico, assumindo comportamento de gás ideal. A viscosidade dinâmica do ar de $1,7 \times 10^{-5} \text{ (kg/m}\cdot\text{s)}$ e o número de Prandtl de $0,7$ foram adotados a partir de valores típicos para ar em condições padrão, garantindo coerência com os modelos de transporte de calor e momento utilizados na simulação.

A aceleração da gravidade foi assumida como o valor padrão para simulações na Terra, $9,81 \text{ m/s}^2$. O peso molecular do ar foi definido conforme a composição média da atmosfera terrestre em condições normais, $28,96 \text{ g/mol}$. As temperaturas do ar insuflado e do ambiente foram estabelecidas com base nas condições operacionais típicas de sistemas de climatização, 296 K e 308 K , respectivamente. Os valores de capacidade térmica a volume constante ($C_v = 712 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$) e a pressão constante ($C_p = 1.004,4 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$) foram extraídos de tabelas termodinâmicas para o ar atmosférico, assumindo comportamento de gás ideal. A viscosidade dinâmica do ar ($1,7 \times 10^{-5} \text{ kg/m}\cdot\text{s}$) e o número de Prandtl ($0,7$) foram adotados a partir de valores típicos para o ar em condições padrão, garantindo coerência com os modelos de transporte de calor e momento utilizados na simulação.

No diretório *system*, foram definidos os parâmetros associados aos procedimentos de solução, organizados em três arquivos principais:

- *controlDict*: continha os parâmetros de controle da simulação, como tempo de execução e frequência de saída dos resultados;
- *fvSchemes*: estabelecia o sistema de discretização empregado na solução das equações;
- *fvSolution*: especificava os solucionadores das equações, as tolerâncias e outros controles do algoritmo.

Os parâmetros estabelecidos para a simulação foram os seguintes:

- Tempo inicial: 0 segundos;
- Tempo final: 2.000 segundos;
- Intervalo de tempo entre cada iteração: 1 segundo;
- Saída de dados configurada a cada 20 segundos.

Além disso, as seguintes tolerâncias para o controle residual foram estabelecidas, conforme o esquema de funcionamento do algoritmo numérico SIMPLE do OpenFOAM:

- Pressão (p_{rhg}) = 1×10^{-2} ;
- Velocidade (U) = 1×10^{-4} ;
- Energia (e) = 1×10^{-2} .

Por fim, o diretório *time* armazenou os dados relacionados aos campos específicos, incluindo valores iniciais e condições de contorno. Os parâmetros adotados estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 – Valores iniciais e condições de contorno

Parâmetro	Inlet	Outlet	fixedWalls
Velocidade (m/s)	<i>fixedValue</i> = 2 m/s	<i>zeroGradient</i>	<i>noSlip</i>
Temperatura (K)	<i>fixedValue</i> = 296 K	<i>zeroGradient</i>	<i>zeroGradient</i>
Pressão (kg/m·s ²)	<i>fixedFluxPressure</i>	<i>zeroGradient</i>	<i>calculated</i>
Pressão contribuição hidrostática (kg/m·s ²)	<i>fixedFluxPressure</i>	<i>zeroGradient</i>	<i>fixedFluxPressure</i>

Fonte: dados da pesquisa

Com base nas propriedades físicas e nas condições de contorno definidas, a simulação foi configurada para representar, com precisão, o comportamento do sistema de climatização no ambiente estudado. Desde a geração das malhas até a definição das condições físicas e de contorno, foram estabelecidas as bases para o pós-processamento, permitindo a análise e otimização do sistema HVAC, com ênfase no desempenho térmico e na eficiência energética do auditório.

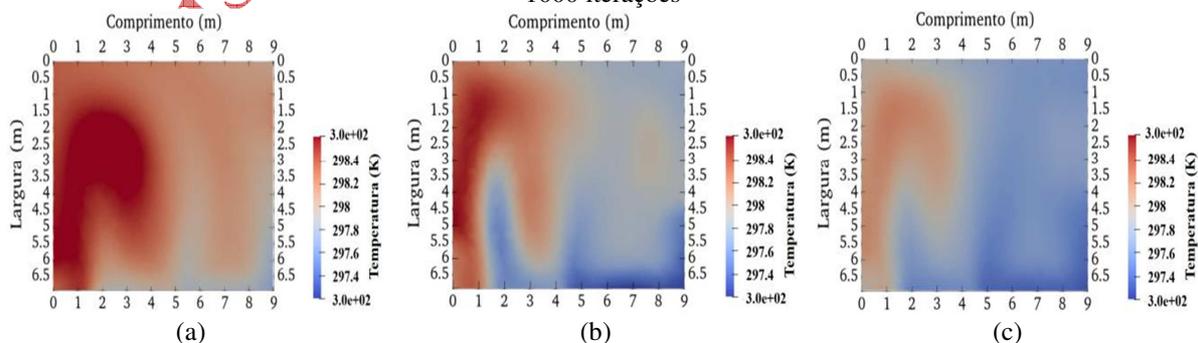
3 Resultados e discussões

Nesta seção, são apresentados os resultados obtidos na simulação do sistema de climatização do ambiente em estudo. A análise foi realizada utilizando o software ParaView, uma ferramenta de código aberto especializada no pós-processamento de dados. Esse software permite a visualização detalhada dos campos de temperatura ao longo do tempo, com uma capacidade de visualização avançada com a possibilidade corte de planos, isossuperfícies e rastreamento de partículas, facilitou a interpretação dos padrões térmicos e do comportamento do fluxo de ar no ambiente.

As figuras a seguir ilustram a distribuição térmica em diferentes iterações, comparando o desempenho do sistema HVAC original com a versão otimizada para manutenção das condições de conforto térmico.

Os resultados da simulação foram exportados para o ParaView, que oferece compatibilidade com diversos formatos de dados, incluindo aqueles gerados pelo OpenFOAM. A ampla gama de filtros disponíveis no software possibilitou uma análise aprofundada da climatização da sala, permitindo a extração de gráficos detalhados. A Figura 6 apresenta a distribuição do campo de temperatura em um fatiamento horizontal a 1,20 m de altura, destacando o comportamento térmico do ambiente climatizado pelo sistema HVAC atual. A Figura 6 refere-se à iteração.

Figura 6 – Distribuição de temperatura para o sistema HVAC original. (a) 800 iterações. (b) 900 iterações. (c) 1000 iterações



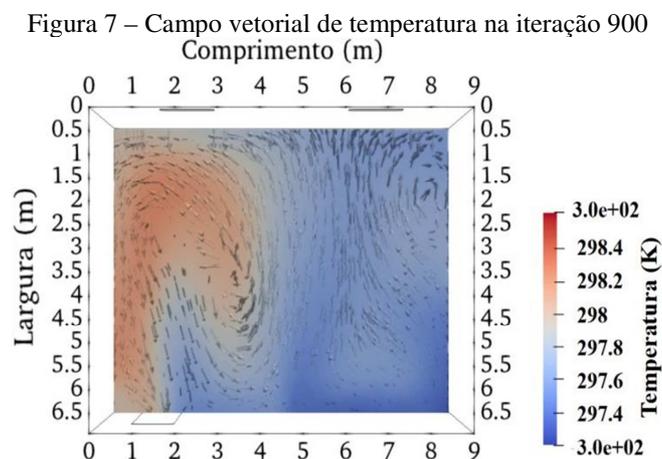
Fonte: dados da pesquisa

A Figura 6 evidencia a presença de uma zona de calor na extremidade esquerda da sala, a qual persiste ao longo das iterações. A análise das figuras indica uma distribuição térmica heterogênea no

ambiente simulado, caracterizada pela formação de gradientes térmicos. Esses gradientes são representados por regiões de maior temperatura (áreas avermelhadas) e zonas mais frias (áreas azuladas).

A avaliação do gradiente térmico na direção horizontal revela que, em determinadas regiões do auditório, como na lateral esquerda, as temperaturas atingem 300 K, enquanto na lateral direita, registram-se 296 K. Nas iterações iniciais, observa-se uma concentração de calor em pontos específicos, possivelmente influenciada pela distribuição do fluxo de ar e pela presença de fontes internas de calor. Esse comportamento térmico sugere a ocorrência de desconforto térmico localizado, tornando evidente a necessidade de ajustes na distribuição do fluxo de ar para mitigar tais variações.

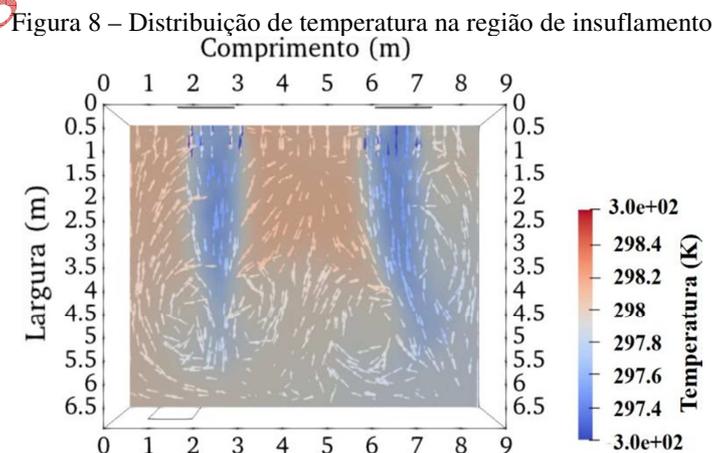
A Figura 7 ilustra essa análise ao apresentar o campo de temperatura a uma altura de 1,20 m, na iteração 900, em conjunto com o filtro *Glyph*. Essa representação vetorial permite visualizar a orientação do fluxo de ar, possibilitando a identificação de padrões que contribuem para as variações térmicas no ambiente.



Fonte: dados da pesquisa

Observam-se regiões de recirculação de ar no auditório, comprometendo a eficiência na troca de calor. Esse fenômeno resulta em uma interação limitada entre as massas de ar quente presentes no ambiente e o ar frio insuflado pelo sistema de climatização, favorecendo a formação de zonas de calor persistentes.

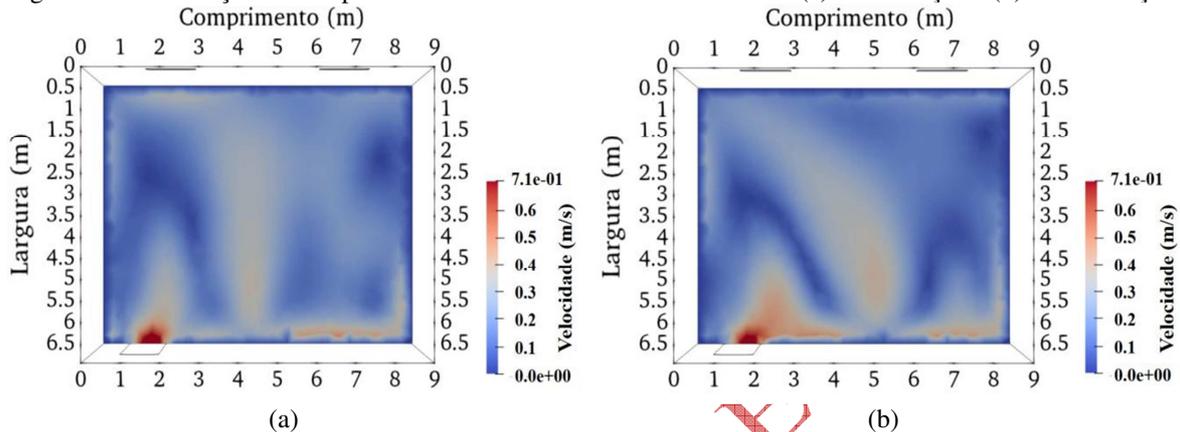
A Figura 8 apresenta o campo de temperatura na iteração 900, em um plano correspondente à altura dos pontos de insuflamento dos aparelhos de ar-condicionado. Essa configuração possibilita uma análise detalhada do comportamento do fluxo de ar na região de saída dos equipamentos.



Fonte: dados da pesquisa

A Figura 9 destaca a formação de vórtices resultantes da interação entre o fluxo de ar e a parede inferior do auditório. Esse efeito provoca o desvio do fluxo insuflado pelo equipamento localizado à direita, direcionando-o predominantemente para o mesmo lado da sala, onde são registradas as menores temperaturas. Os resultados indicam que a operação de dois equipamentos de ar-condicionado em série gera uma interação indesejada entre os vórtices formados, alterando a orientação de uma das correntes de ar frio. Esse comportamento reduz a uniformidade da climatização e compromete a eficiência global do sistema HVAC.

Figura 9 – Distribuição do campo de velocidade no sistema HVAC atual. (a) 800 iterações. (b) 1000 iterações

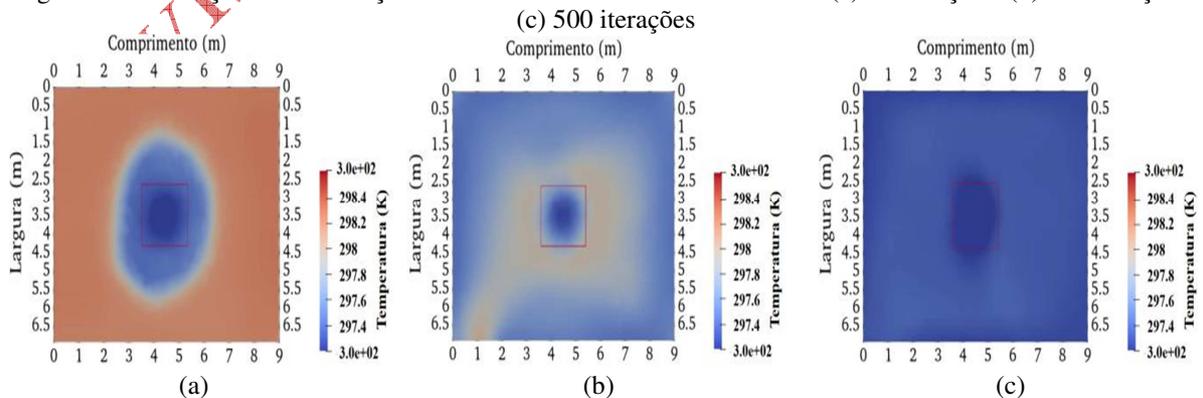


Fonte: dados da pesquisa

Adicionalmente, a Figura 9 apresenta gráficos do campo de velocidade, obtidos a partir de um fatiamento horizontal na altura de 1,20 m, ilustrando diferentes etapas da simulação. No entanto, os resultados demonstram que o sistema HVAC atual não atende aos critérios de conforto térmico estabelecidos pelas normas NBR 16401-1 (ABNT, 2024) e ISO 7730 (ISO, 2005), que determinam velocidades máximas de 0,2 m/s e 0,24 m/s, respectivamente. Esses achados indicam a necessidade de ajustes no sistema para adequação às diretrizes internacionais de conforto térmico (Frota; Schiffer, 2001; Guevara; Soriano; Mino-Rodriguez, 2021). Nessas condições, podem ocorrer sensações de desconforto térmico, como calor ou frio excessivo, além de impactos negativos na concentração e no desempenho acadêmico.

A Figura 10 apresenta a distribuição térmica do auditório climatizado pelo sistema HVAC otimizado, com gráficos gerados a partir de um fatiamento horizontal na altura de 1,20 m. A análise contempla diferentes momentos da simulação, possibilitando o acompanhamento da evolução da climatização ao longo do tempo.

Figura 10 – Evolução da distribuição térmica no sistema HVAC otimizado. (a) 80 iterações. (b) 160 iterações. (c) 500 iterações



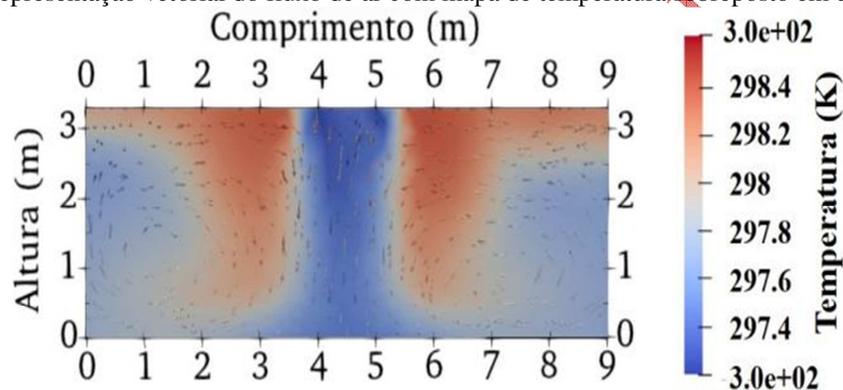
Fonte: dados da pesquisa

Na Figura 10a, observa-se o início do processo de climatização, com o fluxo de ar frio concentrado na região central do auditório. Com o avanço da simulação, a Figura 10b evidencia a propagação do ar frio em direção às paredes, enquanto as áreas intermediárias passam a ser climatizadas posteriormente. Por fim, na Figura 10c, verifica-se uma distribuição térmica mais homogênea, com temperaturas variando entre 297,2 K e 298,6 K, caracterizando um gradiente térmico reduzido em comparação ao sistema anterior.

Além da melhor uniformidade térmica, o sistema otimizado apresenta maior eficiência energética. O modelo cassete consome 60.000 BTU/h, enquanto o conjunto de aparelhos *split* teto-piso possui um consumo total de 96.000 BTU/h. Essa redução no consumo, aliada à distribuição térmica mais homogênea e a um gradiente de temperatura pouco significativo de 1,4 K, reforça a superioridade do sistema HVAC otimizado. Além disso, o sistema cassete atingiu a estabilidade térmica em 500 iterações (500 segundos), enquanto o modelo *split* teto-piso necessitou de 1000 iterações (1000 segundos). Dessa forma, o modelo otimizado reduziu em 50% o tempo de climatização do ambiente condicionado.

Para uma análise mais detalhada, a Figura 11 apresenta um fatiamento vertical de 3,5 m de largura, gerado na iteração 160, permitindo a aplicação de dois filtros do ParaView para visualizar o fluxo de ar e a distribuição de temperatura em uma seção transversal do auditório.

Figura 11 – Representação vetorial do fluxo de ar com mapa de temperatura sobreposto em um corte vertical

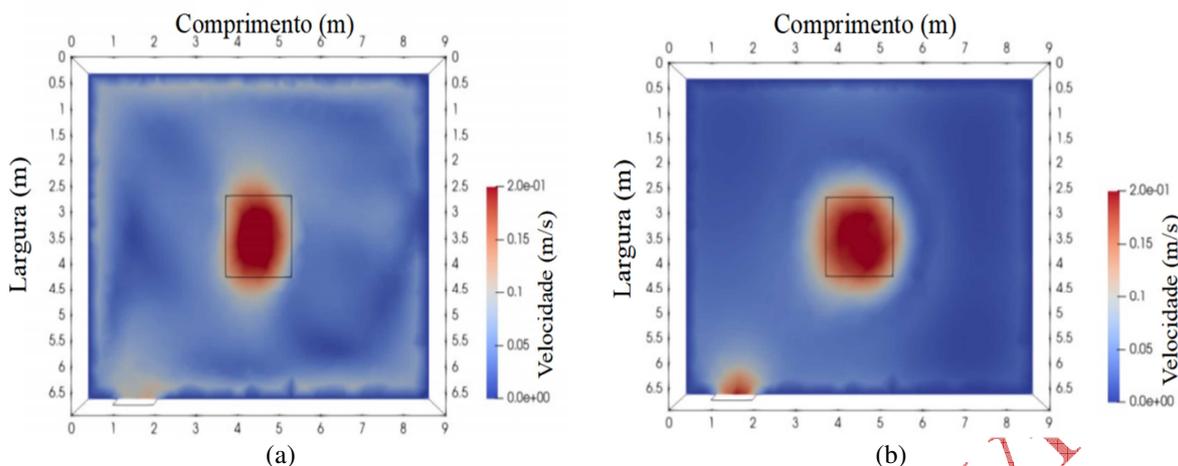


Fonte: dados da pesquisa

Conforme ilustrado na Figura 11, as correntes de ar provenientes do equipamento cassete não interferem entre si, uma vez que o ar insuflado é direcionado ao solo. Ao atingir o piso, o ar frio se distribui uniformemente e inicia um movimento ascendente ao longo das paredes, promovendo uma climatização mais eficiente do ambiente.

A Figura 12 exibe a distribuição do campo de velocidade no sistema otimizado, com um fatiamento horizontal a 1,20 m de altura.

Figura 12 – Distribuição do campo de velocidade no sistema HVAC otimizado. (a) 100 iterações. (b) 1000 iterações



Fonte: dados da pesquisa

As velocidades do ar no auditório não ultrapassam 0,2 m/s, demonstrando que, no sistema otimizado, esse parâmetro está em conformidade com as normas NR 17, NBR 16401-1 e ISO 7730. Esse resultado pode ser atribuído a dois fatores principais: (i) a influência da força gravitacional, que atua na direção oposta ao movimento ascendente do ar, reduzindo sua velocidade, e (ii) o efeito do atrito entre o fluxo de ar e o solo, que também contribui para a desaceleração. Além disso, as características do equipamento de climatização favorecem um controle adequado da velocidade do ar na altura de 1,20 m.

3.1 Validação dos parâmetros computacionais utilizados no OpenFOAM

O estudo de Wang *et al.* (2021) analisou o conforto térmico em salas de aula universitárias na China ao longo das estações do ano, com base em medições experimentais. Os autores determinaram que a faixa de temperatura aceitável varia de 21,3 a 25,4 °C no inverno, com um limite superior de 29,6 °C no verão. Comparando esses valores com os resultados obtidos por meio da simulação CFD, observou-se que o sistema HVAC atual (modelo *split*) mantém temperaturas entre 296 K e 300 K (aproximadamente 22,85 a 26,85 °C), resultando na formação de regiões de calor. Isso indica que, em alguns pontos do ambiente analisado, as temperaturas ultrapassam os limites recomendados para conforto térmico (Frota; Schiffer, 2001), reforçando a necessidade de otimização do sistema.

Para assegurar a confiabilidade da abordagem numérica empregada, os resultados obtidos neste estudo foram comparados com aqueles apresentados por Silva Junior *et al.* (2020), que utilizaram o software comercial ANSYS Fluent para simular fenômenos semelhantes no contexto da climatização de ambientes. O estudo foi conduzido no mesmo ambiente analisado na presente pesquisa, de modo que as dimensões adotadas e as especificações dos aparelhos *split* teto-piso foram idênticas às aqui empregadas. Além disso, as condições iniciais e de contorno também apresentaram grande similaridade. As distribuições de temperatura obtidas em ambos os estudos demonstraram uma forte convergência, evidenciando a coerência do modelo numérico utilizado.

No entanto, devido à maior robustez da ferramenta de pré-processamento adotada neste trabalho, o ParaView, foi possível representar graficamente os padrões de escoamento simulados com maior precisão. Ademais, a escolha do OpenFOAM como ferramenta de processamento numérico proporcionou maior flexibilidade na personalização dos modelos matemáticos, incluindo não apenas as equações de transporte, mas também a modelagem da turbulência e métodos de interpolação. Essa abordagem garantiu total transparência na implementação dos modelos e permitiu ajustes mais precisos às especificidades do problema estudado, sem incorrer em custos de licenciamento.

4 Conclusão

Os resultados deste estudo evidenciaram que o sistema preexistente, composto por dispositivos de ar-condicionado *split* teto-piso em série, induz a interação de vórtices formados pelas correntes de

ar insufladas, resultando em regiões de recirculação e formação de zonas de calor. Esse efeito foi identificado na extremidade esquerda do auditório, onde a temperatura atingiu 300 K, enquanto áreas mais bem climatizadas apresentaram valores de aproximadamente 296 K. Ademais, a velocidade do ar no sistema original alcançou 0,71 m/s, ultrapassando os limites recomendados pelas normas NBR 16401-1 (ABNT, 2024) e ISO 7730 (ISO, 2005), que estabelecem valores máximos de 0,2 m/s e 0,24 m/s, respectivamente.

Em contrapartida, a implementação do sistema otimizado, baseado em um aparelho de ar-condicionado cassete de 60.000 BTU/h, resultou em uma distribuição térmica mais uniforme (297,2 K a 298,6 K), reduzindo, assim, o gradiente de temperatura de 4 K para 1,4 K. Esse novo sistema também apresentou velocidades de fluxo inferiores a 0,2 m/s, garantindo conformidade com as normas de conforto térmico. Além da melhoria na distribuição térmica, observou-se uma redução no consumo energético, uma vez que o sistema original, composto por aparelhos Split Teto-Piso, demandava 96.000 BTU/h, enquanto o sistema otimizado utilizou 37,5% menos energia.

A aplicação de técnicas de Fluidodinâmica Computacional (CFD) mostrou-se essencial para a análise e otimização do conforto térmico no ambiente acadêmico, permitindo a identificação e correção de falhas no sistema HVAC. O uso do OpenFOAM e Paraview, ferramentas de código aberto, demonstrou ser uma abordagem eficaz, proporcionando simulações detalhadas e flexíveis. Assim, este estudo reforça a importância da CFD tanto para a eficiência energética de sistemas de climatização quanto como um recurso pedagógico para a compreensão de fenômenos térmicos e dinâmicos do ar.

Agradecimentos

Todos os autores expressam seus sinceros agradecimentos à Universidade Federal do Oeste da Bahia (UFOB) pelo apoio fornecido durante a realização deste estudo. Também agradecem à instituição pela infraestrutura disponibilizada, pelo acesso aos recursos acadêmicos e pela oportunidade de desenvolver esta pesquisa.

Conflito de interesses

Os autores declaram não haver conflito de interesses.

Nota

Este artigo é derivado de trabalho de conclusão de curso em Engenharia Mecânica do Centro Multidisciplinar de Bom Jesus da Lapa, Universidade Federal do Oeste da Bahia, (UFOB), disponível em: <https://repositorio.ufob.edu.br/handle/123456789/139>.

Editor-Chefe: Em atualização no dia 05/04/2025.

Contribuições ao artigo

BORGES, C. O. S.: Concepção ou desenho do estudo/pesquisa; Coleta, análise e/ou interpretação dos dados; elaboração e redação do manuscrito; revisão crítica, com participação intelectual significativa. **PEDROSO, J. R.:** concepção ou desenho do estudo/pesquisa. **SILVA JUNIOR, L. J.:** revisão crítica, com participação intelectual significativa; supervisão geral e coordenação do projeto ou estudo. **SOUSA, N. C. A.:** revisão crítica, com participação intelectual significativa; supervisão geral e coordenação do projeto ou estudo. Todos os autores participaram da escrita, discussão, leitura e aprovação da versão final do artigo.

Referências

ALMEIDA, R. M. S. F.; RAMOS, N. M. M.; FREITAS, V. P. Thermal comfort models and pupils' perception in free-running school buildings of a mild climate country. **Energy and Buildings**, v. 111, p. 64-75, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.09.066>.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16401-1:**

instalações de ar-condicionado de ar. Sistemas centrais e unitários. Parte 1: Projetos das instalações. Rio de Janeiro: ABNT, 2024.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 17.5**: condições ambientais de trabalho. Rio de Janeiro: ABNT; 2018.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5858**: Instalações centrais de ar condicionado para conforto: parâmetros básicos de projeto. Rio de Janeiro: ABNT, 1983.

BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. **Norma Regulamentadora nº 17**: Ergonomia. Portaria MTb nº 3.214, de 08 de junho de 1978. Disponível em: <https://www.gov.br/trabalho-e-emprego/pt-br/aceso-a-informacao/participacao-social/conselhos-e-orgaos-colegiados/comissao-tripartite-partitaria-permanente/normas-regulamentadora/normas-regulamentadoras-vigentes/norma-regulamentadora-no-17-nr-17>. Acesso em: 11 mar. 2024.

CFD DIRECT. The architects of OpenFOAM. **Notes on computational fluid dynamics**: general principles. 2022. Disponível em: <https://doc.cfd.direct/notes/cfd-general-principles/the-pimple-algorithm>. Acesso em: 10 dez. 2024.

CHEN S.; XUE, D.; LI, Q.; DU, B.; FAN, X. Thermal comfort of automobile driver based on local air conditioning vent arrangement. **International Journal of Automotive Technology**, v. 24, n. 4, p. 945-954, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12239-023-0077-7>

ELGIN. **Cassete Plus II**. Disponível em: <https://www.elgin.com.br/Produtos/Climatizacao/descontinuados-clima/cassete-plus-ii>. Acesso em: 6 dez. 2024.

ELECTROLUX. **Manual de instalações**: condicionadores de ar Maximus. São Paulo (SP): Electrolux; 2020. Disponível em: <http://conteudos.koerich.com.br/PDF/3541600.pdf>. Acesso em: 18 mar. 2025.

FROTA, A. B.; SCHIFFER, S. R. **Manual de conforto térmico**. 5. ed. São Paulo: Studio Nobel; 2001.

GUEVARA, G.; SORIANO, G.; MINO-RODRIGUEZ, I. Thermal comfort in university classrooms: an experimental study in the tropics. **Building and Environment**, v. 187, 107430, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107430>.

HORVATH. **Sistemas de ar-condicionado**. Disponível em: <https://www.horvath.com.br/ar-condicionado/produto.php?var1=266&var2=Elgin&var3=PisoTeto&var4=48000&var5=Frio&var6=20vMonof%C3%A1sico>. Acesso em: 6 dez. 2024.

ISO – INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 7730**: Ergonomics of the thermal environment. Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria. Geneva: ISO; 2005.

INMET – INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. **Onda de calor afeta grande parte do país nesta semana**. 2023. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/noticias/onda-de-calor-afeta-grande-parte-do-pa%C3%ADs-nesta-semana>. Acesso em: 06 dez. 2024.

LEITE, T. R. A.; SANTOS, C. A. C. Análise energética, exergetica e exergoeconômica de um protótipo de ar-condicionado utilizando módulos termoeletrônicos. *Revista Principia*, v. 62, 2025. DOI:

<https://doi.org/10.18265/2447-9187a2022id7758>.

LÖHNER, R. **Applied computational fluid dynamics techniques**: an introduction based on finite element methods. Hoboken: Wiley, 2008.

LAN, H; HOU, H. C.; GOU, Z.; WONG, M. S.; WANG, Z. Computer vision-based smart HVAC control system for university classroom in a subtropical climate. **Building and Environment**, v. 242, 110592, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110592>.

MEDEIROS, H. G.; RODRIGUES, G. M.; QUEIRÓZ, G.; SANTOS, L. A. O.; SOUZA, R. V. G.; VELOSO, A. C. O. Comparativo no uso da simulação computacional com método prescritivo no cálculo da carga térmica. *In*: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, v. 18, n. 1, 2020. DOI: <https://doi.org/10.46421/entac.v18i.733>.

MARÇAL, V. G.; SOUZA, H. A.; COELHO, F. F. M.; MARÇAL, C. C. S. Relevância e percepção do conforto térmico no processo de aprendizagem em sala de aula. **Boletim Técnico do Senac**, v. 44, n. 2, 2018. DOI: <https://doi.org/10.26849/bts.v44i2.693>.

MENDELL, M. J.; HEATH, G. A. Do indoor pollutants and thermal conditions in schools influence student performance? A critical review of the literature. **Indoor Air: International Journal of Indoor Environment and Health**, v. 15, p. 27-52, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2004.00320.x>.

MALISKA, C. R. **Fundamentals of computational fluid dynamics**: the finite volume method. Cham: Springer, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-031-18235-8>.

ONU – ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **Agência da ONU diz que calor extremo “está só começando” e saúde pode ser afetada**. 2023a. Disponível em: <https://news.un.org/pt/story/2023/07/1817812>. Acesso em: 28 fev. 2025.

ONU – ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **Últimos oito anos foram os mais quentes já registrados**. 2023b. Disponível em: <https://news.un.org/pt/story/2023/01/1807962>. Acesso em: 28 mai. 2025.

SAYMA, A. **Computational fluid dynamics**. Londres: Bookboon, 2021.

SHENG, S.; YAMANAKA, T.; KOBAYASHI, T.; CHOI, N.; CHOU, N. Experimental study and CFD modelling of four-bed hospital ward with all-air wall induction unit for air-conditioning. **Building and Environment**, v. 222, 109388, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109388>.

SILVA JUNIOR, L. J.; SATO, A. I.; SANTOS, I. B. S.; CRUZ, R. P. Avaliação do conforto térmico de uma sala de aula: uma aproximação CFD. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 7, p. 44227-44243, 2020. DOI: <https://doi.org/10.34117/bjdv6n7-151>.

SUHAILA, H.; SUHAIMI, I.; MOHAMED, M. A. S.; MUSTAFFA, M. T.; KARTINI, A.; ATIKAH, A. Thermal comfort study of a classroom in northern Malaysia: a CFD approach. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, v. 670, 012011, 2019. DOI: <http://doi.org/10.1088/1757-899X/670/1/012011>.

TURGUT, E.; YARDIMCI, U. The effect of air conditioning positions, air conditioning fluid speed, and temperature on thermal comfort in the truck cabin. **Journal of Mechanical Science and**

Technology, v. 36, n. 6, p. 3171-3179, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12206-022-0548-1>.

VERSTEEG, H. K.; MALALASEKERA, W. **An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method**. 2. ed. Harlow: Pearson Education; 2007.

WANG, X.; YANG, L.; GAGO, S.; ZHAO, S.; ZHAI, Y. Thermal comfort in naturally ventilated university classrooms: a seasonal field study in Xi'an, China. **Energy and Buildings**, v. 247, 111126, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111126>.

Revista Principia - Early View