XXI ENTAC – Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído
14 a 16 de outubro de 2026 | Goiânia-Brasil
DOI: https://doi.org/10.46421/entac.v21i1.8275

Avaliação da qualidade do ar em salas de aula de ensino superior em Maceió-AL

Air quality assessment in higher education classrooms in Maceió-AL

Andressa Rayanne Cavalcante Tenório
Universidade Federal de Alagoas | Maceió | Brasil | andressactenorio@gmail.com
Vanessa Stephanie Costa Félix Vieira
Universidade Federal de Alagoas | Maceió | Brasil | vanessa.vieira@fau.ufal.br
Fernando Antônio de Melo Sá Cavalcanti
Universidade Federal de Alagoas | Maceió | Brasil | fernando.antonio@fau.ufal.br

Resumo

Este estudo realiza uma avaliação comparativa das condições ambientais em duas salas de aula, destacando a relevância de uma arquitetura escolar saudável como fator determinante para o processo de ensino-aprendizagem. A pesquisa considera variáveis ambientais que influenciam diretamente a saúde, o bem-estar e o desempenho dos usuários. A metodologia foi estruturada em quatro etapas: (i) seleção dos ambientes analisados, (ii) coleta sistemática dos parâmetros ambientais, (iii) organização e tratamento estatístico dos dados e (iv) comparação dos resultados com referenciais normativos nacionais e internacionais. Os achados revelam que ambos os ambientes apresentaram não conformidades em relação aos limites estabelecidos pelas normas, ainda que por motivos distintos, evidenciando a complexidade do controle ambiental em edificações escolares localizadas em regiões de clima quente e úmido.

Palavras-chave: Arquitetura escolar. Qualidade do ar interno. Conforto térmico. Variáveis ambientais. Níveis de CO_2

Abstract

This study presents a comparative assessment of environmental conditions in two classrooms, emphasizing the importance of healthy school architecture as a key factor in the teaching–learning process. The research considers environmental variables that directly affect users' health, well-being, and performance. The methodology was structured in four stages: (i) selection of the study environments, (ii) systematic collection of environmental parameters, (iii) organization and statistical processing of the data, and (iv) comparative analysis based on national and international standards. The results show that both classrooms exhibited non-compliance with normative limits, although for different reasons, highlighting the complexity of environmental control in school buildings located in hot and humid climates.

Keywords: School architecture. Indoor air quality. Thermal comfort. Environmental variables. CO_2 levels.

DOI: https://doi.org/10.46421/entac.v21i1.8275

INTRODUÇÃO

Estima-se que os indivíduos passam cerca de 80% a 90% do tempo em ambientes fechados, onde a concentração de poluentes pode ser até cinco vezes maior do que no ar externo [1] [2] [3]. Esse cenário agrava-se em edificações seladas, que reduziram drasticamente a ventilação natural e favoreceram o acúmulo de contaminantes internos [4] [5].

Entre os diversos parâmetros ambientais que determinam a qualidade dos espaços internos, destacam-se o conforto térmico e a qualidade do ar. O conforto térmico é dependente de fatores como temperatura, umidade relativa, ventilação, vestimentas e atividade metabólica [6] [7] [8]. Salas de aula, por exemplo, quando expostas a temperaturas inadequadas ou com baixa renovação de ar, comprometem tanto a saúde física quanto o desempenho cognitivo de estudantes e professores [9] [10].

A Qualidade do ar interno (QAI), por sua vez, envolve a análise da presença de contaminantes físicos, químicos e biológicos em ambientes fechados. Poluentes como dióxido de carbono (CO_2), partículas inaláveis (PM2,5 e PM10), compostos orgânicos voláteis (COVs) e gases tóxicos podem provocar desde desconfortos leves até doenças graves de ordem respiratória, cardiovascular e neurológica [3] [5] [11].

Estudos indicam que níveis elevados de CO_2, frequentemente acima de 1.000ppm em salas de aula, estão associados à fadiga, sonolência, dificuldades de concentração e queda no desempenho acadêmico [12] [13].

A ABNT NBR-16401-3/2022 – Instalações de ar-condicionado – Sistemas centrais e unitários – Parte 3: Qualidade do ar interior, define a QAI como: "a condição do ar interior que expressa o grau de pureza do ar, incluindo aspectos físicos, químicos e biológicos que possam afetar a saúde, o conforto e o bem-estar das pessoas" [14]. No entanto, as normativas brasileiras tratam apenas de ambientes condicionados artificialmente, para ambientes naturalmente ventilado. Alguns países trazem recomendações para níveis de salas de aula ventiladas naturalmente, como por exemplo, o Reino Unido que adota 1500ppm como limite inferior recomendado [15], na Finlândia e em Portugal, este valor é 1200ppm e 1250ppm [16] [17] respectivamente, já na Dinamarca e China, este limite é 1000ppm [18].

A literatura científica aponta que os ambientes escolares insalubres contribuem para um aumento de faltas nas aulas, de risco de doenças respiratórias e queda no desempenho escolar [19] [20] [21] [22]. Assim, os estudos que avaliam a concentração de CO_2 em salas de aula se tornam primordiais para subsidiar intervenções corretivas no projeto arquitetônico e nos sistemas de ventilação, bem como para orientar políticas públicas voltadas à melhoria das condições ambientais escolares.

Estudos apontam que temperaturas internas muito elevadas ou muito baixas causam desconforto fisiológico, resultando em fadiga, irritabilidade e queda na eficiência das tarefas cognitivas [9]. Em ambientes de ensino, a falta de condições mínimas de conforto e qualidade do ar interno pode comprometer então o ensino, a aprendizagem e a saúde física e psicológica dos seus alunos [10].

Considerando que os ambientes escolares concentram elevada densidade de ocupação e permanência prolongada de crianças e adolescentes, grupo particularmente vulnerável, torna-se imperativo que os projetos arquitetônicos incorporem estratégias de ventilação, escolha de materiais de baixa emissão e sistemas de climatização adequados. Este trabalho, portanto, busca contribuir para o aprofundamento da discussão sobre a relação entre arquitetura, qualidade do ar interno e saúde, enfatizando o ambiente escolar como objeto central de estudo.

O objetivo deste trabalho é avaliar as condições da qualidade do ar em duas salas de aula, localizadas na Universidade Federal de Alagoas (UFAL), em Maceió, sendo uma com uso de ar-condicionado e outra com ventilação natural, considerando aspectos ambientais como fatores determinantes para o processo de ensino-aprendizagem, contribuindo para uma melhoria da saúde, bem-estar e rendimento dos usuários.

MÉTODO

Este trabalho foi classificado como uma pesquisa quantitativa, exploratória e descritiva pelos seguintes motivos:

- Quantitativa: a pesquisa fundamentou-se na coleta de dados numéricos, obtidos com instrumentos calibrados e tratados por métodos estatísticos, possibilitando interpretações objetivas e mensuráveis;
- Exploratória: buscou compreender e levantar informações sobre um fenômeno ainda pouco investigado no contexto específico: a qualidade do ar interno em salas de aula da UFAL;
- Descritiva: teve como objetivo principal caracterizar as condições reais dos ambientes estudados, descrevendo os parâmetros medidos e comparando-os com referenciais normativos.

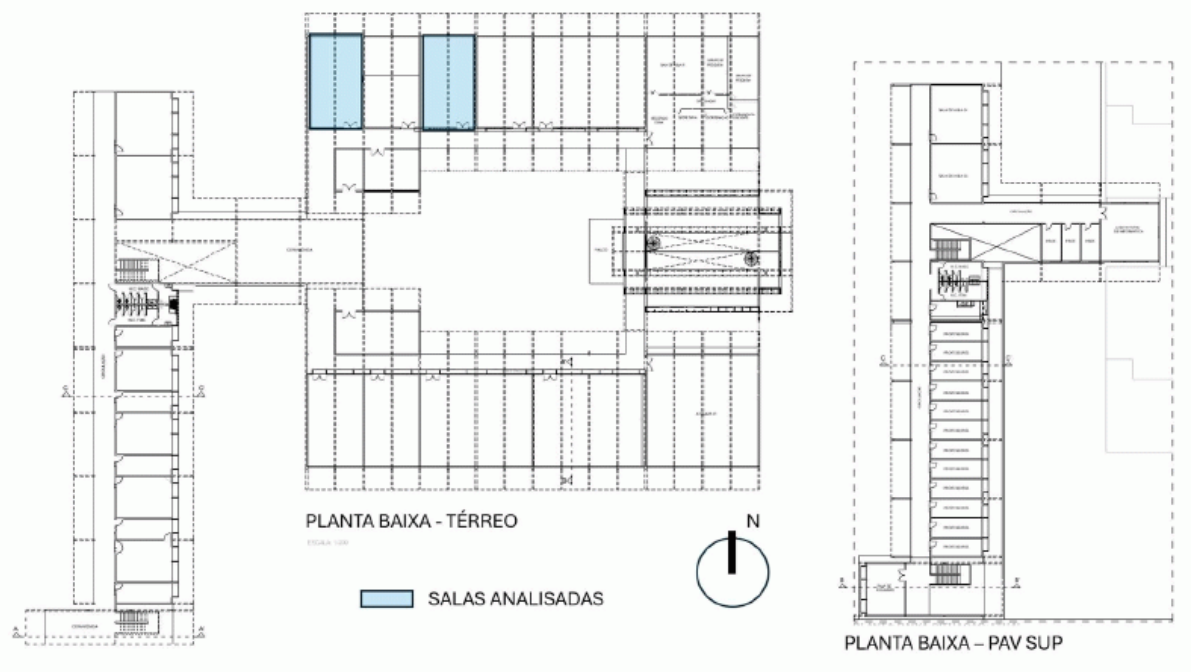
OBJETO DE ESTUDO

A pesquisa foi realizada em duas salas de aula da Universidade Federal de Alagoas, especificamente na Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da UFAL, nas salas de aulas teóricas da graduação, uma com operação de ar-condicionado e outra com ventilação natural, com mesma área de piso e operação de aberturas de forma distintas, sendo a primeira com as janelas e portas sempre fechadas e ar-condicionado sempre ligados e a segunda com ventilação natural constante.

As cargas internas são basicamente geradas pela ocupação (em média 35 alunos por turma e um docente, computador e projetor multimídia. As aberturas estão voltadas para o norte, recebendo sol principalmente no período de inverno. Estas salas estão apresentadas na Figura 1 e foram selecionadas por apresentarem características distintas de condicionamento (Figura 2).

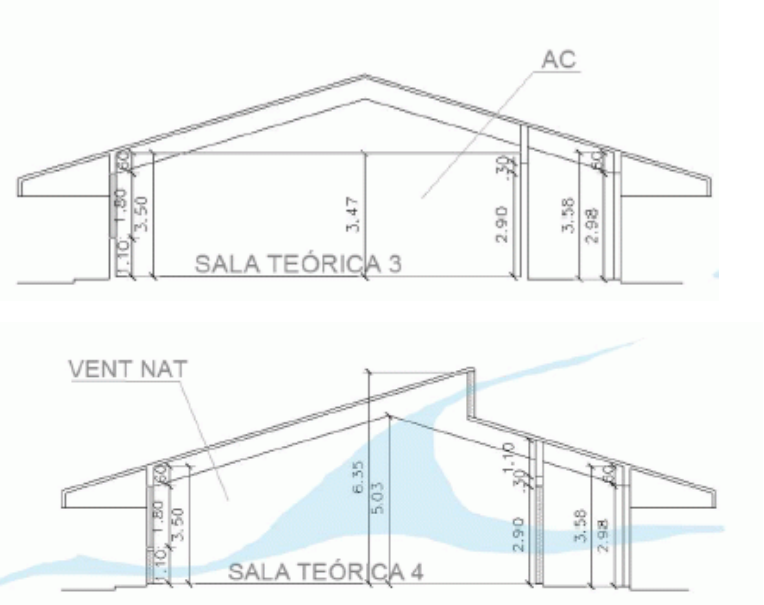
DOI: https://doi.org/10.46421/entac.v21i1.8275

Figura 1: Planta baixa da FAU/UFAL com localização das salas analisadas



Fonte: os autores.

Figura 2: Cortes das salas analisadas (sala 3 com ar-condicionado -acima e sala 4 com ventilação natural – abaixo)



Fonte: os autores.

No que diz respeito às salas de estudo e suas características, pode-se afirmar que a Sala 3 é um ambiente climatizado artificialmente (Figura 3) por meio de sistema de ar-condicionado, ligado nos períodos de ocupação, permanecendo sempre com janelas e portas fechadas e a Sala 4 trata-se de um ambiente com ventilação natural, mantido com janelas abertas durante a maior parte do tempo de utilização (Figura 4).

DOI: https://doi.org/10.46421/entac.v21i1.8275

Figura 3: Detalhes da Sala teórica 03



Fonte: os autores.

Figura 4: Detalhes da Sala teórica 04



Fonte: os autores.

COLETA DE DADOS

As medições de temperatura (°C), umidade relativa do ar (%) e concentração de dióxido de carbono (ppm) foram realizadas de forma simultânea das duas salas, no intervalo dos dias 18/08/2025 a 22/08/2025, com registros a cada 30 minutos, totalizando aproximadamente 6.000 minutos de observação em cada sala com o auxílio do sensor apresentado na Figura 5 (MODELO SR-510A) e processamento em software próprio do sensor e foram instalados a 1,50m do piso, representando a altura dos ocupantes.

Figura 5: Medidor de CO2 SR-510A



Fonte: os autores.

A interpretação dos resultados foi fundamentada em parâmetros estabelecidos por normas técnicas nacionais e internacionais e foram considerados documentos técnicos complementares, como a ASHRAE Standard 55 e a ISO 7730, que estabelecem critérios internacionais de conforto térmico com análise do PMV e PPD utilizando a ferramenta web *CBE Tool*.

A Ferramenta CBE Tool é um recurso para indivíduos que buscam melhorar a qualidade do ambiente interno, pois fornece perspectivas distintas sobre como os elementos ambientais impactam o conforto humano [23]. Esta ferramenta foi desenvolvida para realizar cálculos abrangentes de conforto térmico e produzir representações visuais que atendem às normas mais recentes da ASHRAE 55-2020 e EN 16798 [24].

RESULTADOS E DISCUSSÕES

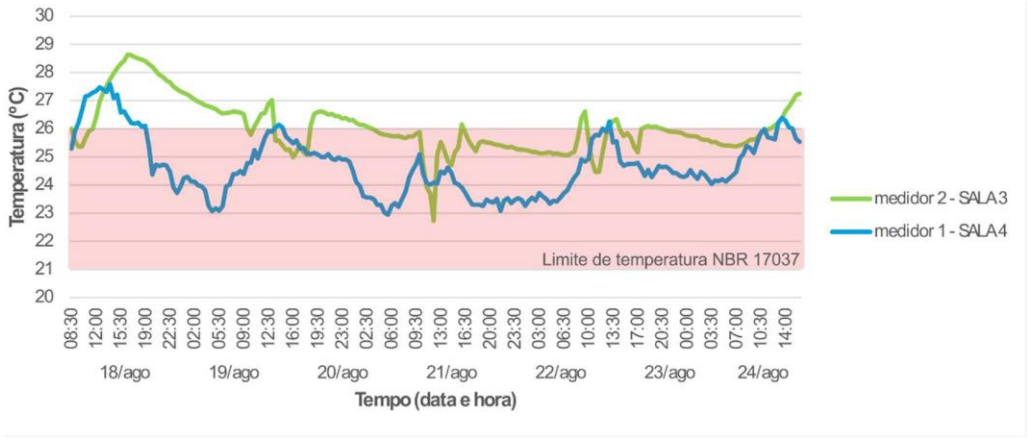
As medições realizadas geraram dados que foram inseridos em gráficos e a partir da análise destes dados e gráficos foi possível comparar a variação da temperatura e umidade relativa nas duas salas de aula (Sala 3 e Sala 4) ao longo de cinco dias consecutivos, apresentadas a seguir.

AVALIAÇÃO DA TEMPERATURA DO AR

Na sala 3, os valores de temperatura oscilaram entre um mínimo de 22,73°C e um máximo de 28,64°C, resultando em uma amplitude térmica de 5,91°C. A média aritmética foi de 26,05°C, com desvio padrão de 0,95°C, indicando que as variações em torno da média foram relativamente moderadas. Isso demonstra que, embora haja oscilações, a maior parte dos registros manteve-se próxima do valor médio.

Já na sala 4, a variação de temperatura apresentou um mínimo de 22,95°C e um máximo de 27,58°C, resultando em uma amplitude térmica de 4,63°C. A média aritmética foi de 24,70°C, com desvio padrão de 1,08°C. Nota-se que, embora a amplitude seja menor que a observada na sala 3, como o desvio padrão é superior, sugere variações mais frequentes ao longo do período monitorado. A sala 3 obteve variações menos intensas em relação à Sala 4 (Figura 6).

Figura 6: Comparativo de temperatura entre as salas analisadas



Fonte: os autores.

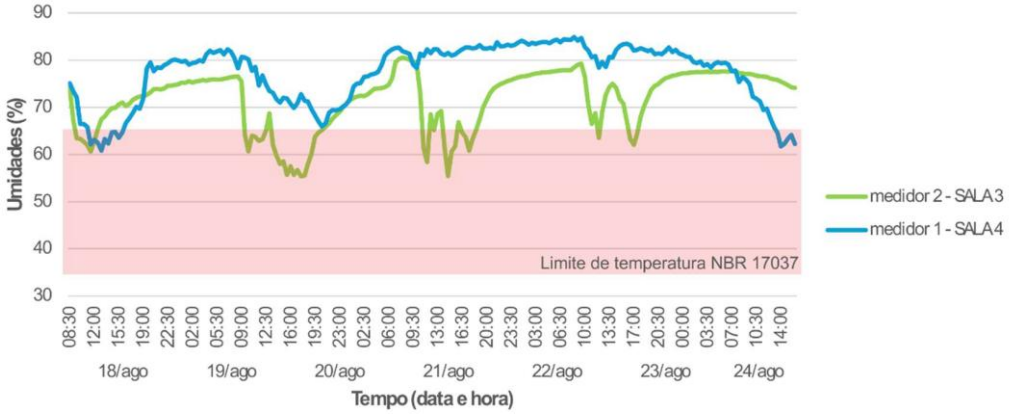
De maneira geral, os dados sugerem que a Sala 3 tende a manter um padrão mais estável de aquecimento, embora em níveis médios mais altos, enquanto a Sala 4 apresenta médias mais baixas, mas com maiores mudanças na temperatura. Essa distinção pode ter implicações diretas na percepção térmica dos ocupantes, considerando que a literatura técnica e normativa destaca a importância de se manter temperaturas internas em intervalos que reduzam tanto desconforto térmico quanto impactos na saúde e desempenho das atividades acadêmicas.

AVALIAÇÃO DA UMIDADE RELATIVA DO AR

Na sala 3, os valores de umidade relativa do ar oscilaram entre um mínimo de 55,4% e um máximo de 80,52%, a média entre os valores de umidade é de 71,63% tendo um desvio padrão de 6,30. Já a sala 4, apresentou valores de umidade relativa entre um mínimo de 60,81% e um máximo de 84,89%, com média de 77,23% e desvio padrão de 6,40.

Do ponto de vista comparativo, a Sala 3 (linha verde) apresentou uma curva com maior instabilidade, com quedas acentuadas em determinados períodos, indicando oscilações maiores na umidade (Figura 7). Essa irregularidade provavelmente está associada ao número de ocupantes e às condições do sistema de climatização. Na Sala 4 (linha azul), ainda que também existam oscilações, a curva demonstra maior estabilidade.

Figura 7: Comparativo de umidade relativa entre as salas analisadas



Fonte: os autores.

Em resumo, a Sala 4 manteve-se mais úmida e estável, enquanto a Sala 3 apresentou flutuações mais frequentes e quedas acentuadas. Isso pode refletir as diferenças que existem na exposição a fontes externas de umidade e na diferença do tipo de ventilação/climatização. De modo geral, pode-se afirmar que nenhum dos ambientes manteve um padrão ideal de umidade ao longo do período analisado.

AVALIAÇÃO DOS NÍVEIS DE DIÓXIDO DE CARBONO (CO_2)

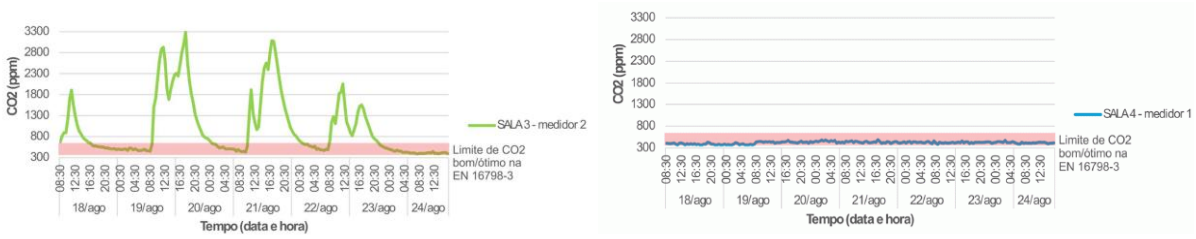
As medições de concentração de dióxido de carbono (CO_2) e os resultados (Quadro 1) evidenciaram diferenças relevantes entre os ambientes.

Quadro 1: Quadro resumo dos níveis de CO2 das salas 3 e 4

Sala 3 (com ar condicionado)		Sala 4 (com ventilação natural)	
Média	1001,9ppm	Média	420,2ppm
Mínimo	388ppm	Mínimo	370ppm
Máximo	3285ppm	Máximo	485ppm
Desvio Padrão	719,6ppm	Desvio Padrão	26,3ppm

Uma vez que a Sala 3 apresentou média de 1001,9ppm de concentração de CO_2, com valores mínimos de 388ppm e máximos de 3285ppm e muita variação de níveis (Figura 8a) (desvio-padrão de 719,6ppm), indicou então que houve durante as medições momentos de ventilação insuficiente.

Figura 8: Níveis de CO2 na sala 3 (a) e sala 4 (b)



(a) (b)

Fonte: os autores.

Já a Sala 4, que apresentou a média de 420,2ppm, valores mínimos de 370ppm, máximos de 485ppm e variação reduzida (Figura 8b) (desvio-padrão de 26,3ppm),

demonstrou estabilidade e proximidade com os níveis típicos de ar externo (aproximadamente igual a 400ppm).

Fica claro portanto que a sala 3 necessita de estratégias adicionais de ventilação (natural ou mecânica) para assegurar níveis continuamente dentro das normas, evitando assim, episódios críticos de acúmulo de CO_2. A sala 4 por sua vez, apresenta níveis de CO_2 condizentes com um ambiente de referência em qualidade do ar interno, refletindo as condições externas e evidenciando a eficácia da ventilação natural permanente.

AVALIAÇÃO DO PMV E PPD

A avaliação do PMV e PPD foi realizada a partir das médias das horas de ocupação (entre 7h30min e 18h30min) e os resultados obtidos encontram-se na Tabela 1. Para tal, foi considerada uma taxa metabólica de 1,0met e o nível de vestimenta de 0,54clo, além da velocidade do vento de 0,1m/s para os dois casos.

Tabela 1: Valores de PMV e PPD para as salas analisadas.

	Sala 3 (com ar-condicionado)		Sala 4 (com ventilação natural)	
HORA	PMV	PPD (%)	PMV	PPD (%)
07:30	0,18	6	-0,47	10
08:00	0,19	6	-0,46	9
08:30	0,2	6	-0,33	7
09:00	0,26	6	-0,22	6
09:30	0,27	6	-0,1	5
10:00	0,21	6	-0,04	5
10:30	0,12	5	0	5
11:00	0,01	5	0,1	5
11:30	-0,07	5	0,15	5
12:00	-0,05	5	0,12	5
12:30	-0,03	5	0,13	5
13:00	0,28	7	0,18	6
13:30	0,39	8	0,21	6
14:00	0,3	7	0,26	6
14:30	0,3	7	0,21	6
15:00	0,29	7	0,21	6
15:30	0,3	7	0,12	5
16:00	0,34	7	0,03	5
16:30	0,32	7	0	5
17:00	0,27	6	-0,05	5
17:30	0,24	6	-0,09	5
18:00	0,27	6	-0,13	5
18:30	0,26	6	-0,14	5

Fonte: os autores.

Observa-se que nas duas salas o PMV se manteve neutro, com baixo percentual de PPD, neste caso, pode-se dizer que a sala com ar-condicionado apresenta como vantagem a maior estabilidade térmica e a possibilidade de controle preciso da temperatura. Já a sala com ventilação natural oferece maior renovação do ar e menor consumo energético, além de proporcionar uma sensação ambiental mais dinâmica.

Contudo, está mais sujeita a variações climáticas externas e pode ter menor capacidade de manter o conforto em dias muito quentes ou muito úmidos, sendo a

única que atingiu um PPD de 10%. O quadro 1 apresenta o resumo destas análises e recomendações para melhorias destes espaços.

Quadro 1: Quadro resumo das conclusões

Aspecto	Sala 3 (com ar-condicionado)	Sala 4 (com ventilação natural
Temperatura (ºC)	Média: 26,05°C (acima do limite); picos até 28,64°C; variação moderada	Média: 24,70° C (dentro da norma); picos até 27,58° C; maior instabilidade
CO_2 (ppm)	Média: 71,63% (acima da norma, chegando a 80,52%); instabilidade acentuada	Média: 77,23% (bem acima da norma, até 84,89%); maior estabilidade
Problema principal	Média: 1001,9ppm (no limite brasileiro), mas picos de até 3285ppm (não conformidade severa; IDA 4 na norma europeia)	Média: 420,2ppm (nível externo), sem picos relevantes (IDA 1/2 – muito boa qualidade)
PMV / PPD (%)	Situação de neutralidade térmica	Situação de neutralidade térmica
Riscos identificados	Picos de temperaturas acima da norma; Umidade excessiva; Nível de CO_2 alto; Desconformidade normativa parcial ou total.	Temperaturas acima da norma; Umidade excessiva; Desconformidade normativa parcial ou total.
Ações corretivas sugeridas	Ajustar o parâmetro de desumidificação do sistema climatizador para reduzir a umidade relativa quando estiver fora da faixa aceitável; Manutenção frequente / PMOC: garantir filtros limpos, dutos sem obstruções, serpentinas limpas, vedação adequada e balanceamento do sistema; Controle de entrada de ar externo (aberturas, selagem) para reduzir infiltrações indesejadas e permitir controle mais eficiente; Monitoramento contínuo de CO_2 + alarmes/limiares automáticos: configurar alertas quando CO_2 ultrapassar limites aceitáveis; Operar em regime híbrido (climatização + ventilação): ligar a climatização apenas quando necessário, mas deixar momentos de renovação ativa de ar externo.	Sombras, brises ou sombreamento externo para minimizar os picos de calor, reduzindo a penetração solar direta; Desumidificação passiva ou uso de ventiladores com controle de umidade, se viável, evitando níveis elevados constantes; Monitoramento térmico mais preciso para evitar que períodos prolongados fiquem fora da faixa normativa.

Fonte: os autores.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise dos dados obtidos nas salas 3 e 4 da Universidade Federal de Alagoas permitiu uma compreensão aprofundada sobre o comportamento dos parâmetros de qualidade do ar interno (QAI) (temperatura, umidade relativa e concentração de dióxido de carbono), em ambientes de ensino com diferentes condições de ventilação. Os resultados alcançados até agora evidenciam que ambos os espaços avaliados apresentaram não conformidades em relação aos limites definidos pelas normas NBR

17037:2023 e EN 16798-3:2017, mesmo que por razões distintas, o que reforça a complexidade do controle ambiental em edificações escolares situadas em regiões de clima quente e úmido.

A Sala 3, climatizada artificialmente e com janelas e portas fechadas, apresentou médias de temperatura de 26,05 °C e concentração média de CO_2 de 1001,9ppm, com picos que atingiram 3285ppm, valores que ultrapassam o limite superior de conforto térmico e configuram episódios de não conformidade em relação à NBR 17037. Essa norma estabelece que a concentração de dióxido de carbono em ambientes não residenciais climatizados deve ser de até 700ppm acima da concentração externa, o que, considerando o valor médio externo de 400ppm, resulta em um limite máximo aceitável de 1100ppm. Portanto, embora a média obtida na sala 3 se mantenha próxima ao limite, os picos observados indicam deficiência na renovação de ar e acúmulo de poluentes internos, consequência direta do uso de climatização sem ventilação mecânica suplementar.

Já a Sala 4, caracterizada pela ventilação natural contínua, apresentou temperaturas médias de 24,70^{O}C, dentro da faixa de conforto recomendada pela NBR 17037 (21^{O}C a 26^{O}C), e nível de CO_2 médio de 420,2ppm, praticamente equivalentes ao ar externo, porém, a sala apresentou médias de umidade relativa de 77,23%, excedendo significativamente o limite superior de 65% previsto na NBR 17037.

Esses achados reforçam que, em regiões de clima quente e úmido, soluções de ventilação e climatização devem ser cuidadosamente planejadas e integradas, de modo a equilibrar eficiência energética, desempenho ambiental e bem-estar dos usuários. Deste modo, o estudo contribui para o avanço das discussões sobre estratégias de projeto e operação de ambientes escolares, destacando a necessidade de abordagens híbridas e adaptativas que respondam às particularidades climáticas e funcionais desses espaços.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à disponibilização da estrutura e equipamentos do Grupo de pesquisa GECA – Grupo de estudos em conforto ambiental da Universidade Federal de Alagoas – UFAL.

DECLARAÇÃO

Os autores declaram que não utilizaram IA generativa nem tecnologias assistidas por IA no processo de preparação do manuscrito.

REFERÊNCIAS

[1] JENKLINS, P L; PHILIPS, T; MULBERG, E; HUI, S P. Activity patterns of Californians: Use of and proximity to indoor pollutant sources. In: **Atmospheric Environment**. Part A. General Topics. Volume 26, Issue 12, August 1992, Pages 2141-2148, 1992. doi: https://doi.org/10.1016/0960-1686(92)90402-7

[2] BASTO, J. E. **Qualidade do ar interno. Itajaí, SC, Brasil**, 2007. Disponível em <https://xdocz.com.br/doc/apostila-de-qualidade-do-ar-interno-itajai-48ge2x332dn2>. Acessado em: 02/07/2025.

[3] EPA - UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Estimating PM2.5- and Ozone-Attributable Health Benefits**. Washington, D.C., 2024.

[4] CARMO, A. T., PRADO, R. T. A. **Qualidade do Ar Interno**. São Paulo, Escola Politécnica da USP, 1999. Disponível em: https://labeee.ufsc.br/sites/default/files/disciplinas/Racine%20-%20IAQ.pdf. Acessado em: 24 set. 2025.

[5] WORLD HEALTH ORGANIZATION – WHO. **WHO guidelines for indoor air quality: selected pollutants**. Copenhagen: WHO Regional Office for Europe, 2010.

[6] LAMBERTS, Roberto. **Desempenho Térmico de Edificações**. Florianópolis, março de 2016. Disponível em: <https://labeee.ufsc.br/sites/default/files/disciplinas/ApostilaECV5161_v2016.pdf> Acesso em: 02/05/2025.

[7] ISO. **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.

[8] ASHRAE. **Standard 55**: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. Atlanta: ASHRAE, 2020.

[9] DJONGYANG, N.; TCHINDA, R.; NJOMO, D. Thermal comfort: A review paper. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 14, n. 9, 2010.

[10] SOUZA, J. F.; LIMA, A. V. P.; MACEDO, P. P.; LEDER, S. M. Estudo de conforto térmico em salas de aulas condicionadas artificialmente em clima quente e úmido. In: **ENCONTRO NACIONAL DO CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO**, 15, 2019. João Pessoa, 2019.

[11] BRASIL. Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA). **Resolução RDC nº 525**, de 16 de julho de 2021. Altera a Resolução RDC nº 522, de 23 de junho de 2021. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, 16 jul. 2021.

[12] BAKÓ-BIRÓ, Z.; CLEMENTS-CROOME, D. J.; KOLOKOTSA, D.; KOZMA, V.; NAGY, K. G. Ventilation rates in schools and pupils' performance. **Building and Environment**, v. 48, p. 215–223, 2012. DOI: 10.1016/j.buildenv.2011.08.018.

[13] SATISH, U. et al. Is CO_2 an Indoor Pollutant? Direct Effects of Low-to-Moderate CO_2 Concentrations on Human Decision-Making Performance**. Environmental Health Perspectives**, v. 120, n. 12, p. 1671–1677, 2012. DOI: 10.1289/ehp.1104789.

[14] ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas**. NBR 16401-3** – Instalações de arcondicionado – Sistemas centrais e unitários – Parte 3: Qualidade do ar interior. Rio de Janeiro: ABNT, 2022. (Norma técnica).

[15] CHATZIDIAKOU, Lia; MUMOVIC, Dejan; SUMMERFIELD, Alex. Is CO2 a good proxy for indoor air quality in classrooms? Part I: The interrelationships between thermal conditions, CO2 levels, ventilation rates and selected indoor pollutants. **Building Services Engineering Research & Technology**, v. 36, n. 2, p.129-161, 2015. DOI: https://doi.org/10.1177/0143624414566244.

[16] ALMEIDA, Ricardo M. S. F.; PINTO, Manuel; PINHO, Paulo G.; LEMOS, Luís T. Natural ventilation and indoor air quality in educational buildings: experimental assessment and improvement strategies. **Energy Efficiency**, v. 10, p. 839-854, Oct. 2017. DOI: https://doi.org/10.1007/s12053-016-9485-0.

[17] GAO, Jie; WARGOCKI, Pawel; WANG, Yi. Ventilation system type, classroom environmental quality and pupils' perceptions and symptoms. **Building and Environment**, v. 75, p.46-57, May 2014. DOI: https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.01.015.

[18] MA, Fusheng; ZHAN, Changhong; XU, Xiaoyang. Investigation and Evaluation of Winter Indoor Air Quality of Primary Schools in Severe Cold Weather Areas of China**. Energies**, v. 12, n. 9, 1602, Apr. 2019. DOI: https://doi.org/10.3390/en12091602.

[19] CACIORA, T. et al. Comprehensive analysis of classroom microclimate in context to health-related national and international indoor air quality standards. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 21, n. 7, 2024.

[20] CERVANTES, R.; PENA, P.; RIESENBERGER, B.; et al. Critical insights on fungal contamination in schools: a comprehensive review of assessment methods. **Frontiers in Public Health**, v. 13, 2025.

[21] NYEMBWE, J. P. K. B.; KABAMBA, M. N.; KABILA, M. B.; et al. Assessment of Indoor Air Quality in Primary School Classrooms: A Case Study in Mbuji Mayi and Lubumbashi, Democratic Republic of Congo**. Buildings**, v. 13, n. 12, 3158, 2023.

[22] GE, B.; TIESKENS, K.; VYAS, P.; et al. Decision tools for schools using continuous indoor air quality monitors: a case study of CO_2 in **Boston Public Schools. Lancet Regional Health - Americas**, v. 36, 100861, 2025.

[23] ALMAGRO-LIDÓN, M., PÉREZ-CARRAMIÑANA, C., GALIANO-GARRIGÓS, A., & EMMITT, S. Thermal comfort in school children: Testing the validity of the Fanger method for a Mediterranean climate. **Building and Environment**, 253. 2024. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.111305

[24] BETTI, G., TARTARINI, F., NGUYEN, C, SCHIAVON, S. CBE Clima Tool: A free and open-source web application for climate analysis tailored to sustainable building design. **Build. Simul**. 2023. https://doi.org/10.1007/s12273-023-1090-5.