



Renovação do ar em salas de aula climatizadas com ar-condicionado tipo split

Air renewal in classrooms with split air conditioning

Renovación del aire en aulas climatizadas con aire acondicionado tipo split

Eric Loque Magalhães Xavier

Mestrando, UVV, Brasil.
eric.xavier@uvvnet.com.br

Erica Coelho Pagel

Professora Doutora, UVV, Brasil.
erica.pagel@uvv.br

Ramon Silva Martins

Professor Doutor, UFES, Brasil.
ramon.martins@ufes.br



RESUMO

O estudo avalia a taxa de renovação do ar em uma sala de aula climatizada com ar-condicionado do tipo Split, utilizando a concentração de dióxido de carbono (CO₂) como indicador de ventilação. O objetivo é verificar a conformidade dessa taxa com as normas vigentes e determinar a eficácia da ventilação no controle da qualidade do ar interior. O experimento foi realizado em uma escola técnica situada na cidade de Serra, Espírito Santo, durante o inverno de 2024. Foram monitorados os níveis de CO₂, temperatura e umidade relativa do ar utilizando-se o monitor HOBO Data Logger MX1102A. Os resultados indicam que a taxa de renovação do ar ficou abaixo dos níveis mínimos recomendados pelas normas ABNT NBR 16.401-3, ASHRAE 62.1 e EN 13779, especialmente com janelas e portas fechadas. As concentrações de CO₂ ultrapassaram os limites estabelecidos pelas normas, indicando comprometimento da qualidade do ar e potenciais riscos à saúde dos ocupantes. Constatou-se que a ventilação natural, mediante abertura de janelas e portas, possui o potencial de aumentar significativamente a taxa de renovação do ar. Conclui-se que uma análise individualizada da ventilação em salas de aula é essencial, ajustando-se a taxa de renovação às características específicas de cada ambiente para garantir a conformidade com as normas e a preservação da saúde dos ocupantes.

Palavras-chave: Qualidade do ar interior, taxa de renovação do ar, ar-condicionado, sala de aula.

ABSTRACT

The study evaluates the air changes per hour in a classroom air-conditioned with split-type air conditioning, using the concentration of carbon dioxide (CO₂) as an indicator of ventilation. The objective is to verify the compliance of this rate with current standards and determine the effectiveness of ventilation in controlling indoor air quality. The experiment was carried out at a technical school located in the city of Serra, Espírito Santo, during the winter of 2024. CO₂ levels, temperature and relative humidity were monitored using the HOBO Data Logger MX1102A monitor. The results indicate that the air changes per hour was below the minimum levels recommended by ABNT NBR 16.401-3, ASHRAE 62.1 and EN 13779 standards, especially with windows and doors closed. CO₂ concentrations exceeded the limits established by the standards, indicating compromised air quality and potential risks to the health of occupants. It was found that natural ventilation, through opening windows and doors, has the potential to significantly increase the air changes per hour. It is concluded that an individualized analysis of ventilation in classrooms is essential, adjusting the air changes per hour to the specific characteristics of each environment to ensure compliance with standards and the preservation of the health of occupants.

Keywords: Indoor air quality, Air changes per hour, air conditioning, Classroom.

RESUMEN

El estudio evalúa la tasa de renovación del aire en un aula climatizada con aire acondicionado tipo Split, utilizando la concentración de dióxido de carbono (CO₂) como indicador de ventilación. El objetivo es verificar el cumplimiento de esta tarifa con las normas vigentes y determinar la efectividad de la ventilación en el control de la calidad del aire interior. El experimento se llevó a cabo en una escuela técnica ubicada en la ciudad de Serra, Espírito Santo, durante el invierno de 2024. Los niveles de CO₂, temperatura y humedad relativa fueron monitoreados mediante el monitor HOBO Data Logger MX1102A. Los resultados indican que la tasa de renovación de aire estuvo por debajo de los niveles mínimos recomendados por las normas ABNT NBR 16.401-3, ASHRAE 62.1 y EN 13779, especialmente con ventanas y puertas cerradas. Las concentraciones de CO₂ excedieron los límites establecidos por las normas, lo que indica una calidad del aire comprometida y riesgos potenciales para la salud de los ocupantes. Se descubrió que la ventilación natural, mediante la apertura de ventanas y puertas, tiene el potencial de aumentar significativamente la tasa de renovación del aire. Se concluye que es fundamental un análisis individualizado de la ventilación en las aulas, ajustando la tasa de renovación a las características específicas de cada ambiente para garantizar el cumplimiento de las normas y la preservación de la salud de los ocupantes.

Palabras clave: Calidad del aire interior, tasa de renovación del aire, aire acondicionado, aula.



1 INTRODUÇÃO

O aumento das temperaturas globais, resultante do aquecimento global, tem gerado preocupações constantes em relação ao conforto térmico em ambientes fechados, especialmente em regiões de clima mais quente, como a Grande Vitória, no Espírito Santo. Esse cenário não só afeta o bem-estar das pessoas, mas também exige adaptações em espaços como escolas, onde o controle da temperatura é fundamental para garantir um ambiente adequado ao aprendizado.

Dawkins et al. (2024) apontam que o aquecimento global, com um aumento de 2°C a 4°C em relação aos níveis pré-industriais, tem causado mais dias com temperaturas internas acima de 35°C em escolas de climas quentes, intensificando o desconforto térmico. Dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) confirmam esse cenário, mostrando que as temperaturas médias na Grande Vitória têm subido ao longo dos anos, como o aumento de 1,6 °C registrado em abril, comparando os períodos de 1931-1960 e 1981-2010 (Xavier, Oliveira e Fialho, 2021). Como resposta, muitas escolas têm adotado ar-condicionado do tipo Split para proporcionar maior conforto aos alunos.

Mohamed et al. (2021) destaca que, principalmente em climas frios, mesmo as construções escolares novas não conseguem atender aos padrões mínimos de conforto devido à combinação de edifícios altamente isolados e herméticos, que são projetados para eficiência energética, mas que acabam gerando a necessidade de dispositivos de climatização.

Entretanto, a maioria desses sistemas carece de mecanismos adequados para a renovação do ar interior, o que pode comprometer a qualidade do ar nas salas de aula. Kubba (2017) observa que a poluição do ar interior pode ser mais prejudicial à saúde do que a poluição atmosférica externa, especialmente quando associada à ventilação inadequada. Em salas de aula climatizadas, onde as janelas e portas geralmente permanecem fechadas, a falta de renovação adequada do ar pode levar ao acúmulo de poluentes, como CO₂ e compostos orgânicos voláteis (COVs), aumentando o risco de doenças respiratórias e afetando negativamente a concentração e o desempenho dos alunos. Estudos sugerem que ambientes escolares com má qualidade do ar podem prejudicar a saúde e o desempenho dos alunos, levando a sintomas como fadiga, dores de cabeça e dificuldades de concentração (Shendell, Prill e Fisk, 2004).

Deng e Lau (2019) enfatizam que as concentrações de poluentes em escolas frequentemente excedem os limites recomendados, colocando em risco a saúde dos alunos. No presente estudo, as concentrações de CO₂ também ultrapassaram os níveis aceitáveis durante vários períodos de monitoramento, corroborando os achados de Deng e Lau e ressaltando a necessidade de sistemas de ventilação adequados em escolas para prevenir os impactos adversos à saúde.

Em uma perspectiva mais ampla, Winck et al. (2022) ressaltam que a má qualidade do ar em ambientes fechados, como escolas, também está associada ao aumento do risco de transmissão de doenças respiratórias, como a COVID-19. Esse risco é especialmente



preocupante em salas de aula com ventilação insuficiente, onde o ar-condicionado é utilizado sem a adequada renovação do ar.

A falta de circulação de ar fresco pode criar um ambiente propício à disseminação de patógenos, como observado nos níveis elevados de CO₂ e umidade monitorados neste estudo. Nesse sentido, a adoção de estratégias eficazes de ventilação e filtragem do ar se torna necessária para a proteção da saúde dos ocupantes.

Diante dessas questões, a legislação brasileira busca regulamentar a qualidade do ar em ambientes climatizados, a fim de mitigar os riscos associados à poluição interna. A Portaria GM/MS nº 3.523 (Brasil, 1998) estabelece diretrizes para a manutenção e operação de sistemas de climatização, exigindo, entre outras medidas, a renovação adequada do ar, com um mínimo de 27 m³/h por pessoa. Além disso, a implementação de um Plano de Manutenção, Operação e Controle (PMOC) é obrigatória, assegurando que os sistemas de climatização funcionem em conformidade com os padrões de qualidade do ar estabelecidos.

A legislação foi reforçada com a Lei 13.589 de 2018 (Brasil, 2018), que complementa as diretrizes da portaria ao estabelecer medidas adicionais para minimizar os riscos à saúde em ambientes climatizados. Entre as normas aplicáveis, destaca-se a NBR 17.037 (ABNT, 2023), que define parâmetros para a qualidade do ar interior em ambientes não residenciais climatizados. Essa norma estabelece que a concentração de CO₂ não deve exceder 700 ppm acima dos níveis do ar exterior, além de recomendar a manutenção de temperaturas entre 21°C e 26°C, e umidade relativa entre 35% e 65%, para garantir o conforto e a saúde dos ocupantes.

Outro ponto fundamental é a taxa de renovação do ar em ambientes escolares. A ABNT NBR 16.401-3 (ABNT, 2008), em conformidade com a ASHRAE 62.1 (ASHRAE, 2022), define que, em condições usuais, o CO₂ não representa um risco significativo à saúde, mas alerta para os perigos de sua concentração elevada, que pode deslocar o oxigênio e causar asfixia. A norma define um limite máximo de 3500 ppm de CO₂ em ambientes internos e apresenta parâmetros para a renovação do ar, conforme a Tabela 1.

Tabela 1 – Taxa de renovação do ar interior para sala de aula segundo a norma ABNT NBR 16.401-3:2008

Qualidade do ar		Taxa de renovação do ar			
		nº pessoas/100m ²	L/s por pessoa	m ³ /h por pessoa	L/s por m ²
Nível 1	Mínimo	35	5	18	0,6
Nível 2	Intermediário	35	6,3	22,7	0,8
Nível 3	Satisfatório	35	7,5	27	0,9

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 16.401-3 (2008)

A relevância deste estudo está na necessidade de discutir o impacto do uso de sistemas de climatização sem a renovação de ar na qualidade do ar em salas de aula. As práticas de monitoramento e controle da qualidade do ar, em conformidade com as diretrizes da OMS (2021) e com as regulamentações nacionais, são essenciais para garantir a saúde dos ocupantes em ambientes escolares. A adoção de medidas adequadas pode não apenas melhorar o bem-estar dos alunos, mas também contribuir para a prevenção de doenças e o aumento da produtividade acadêmica.

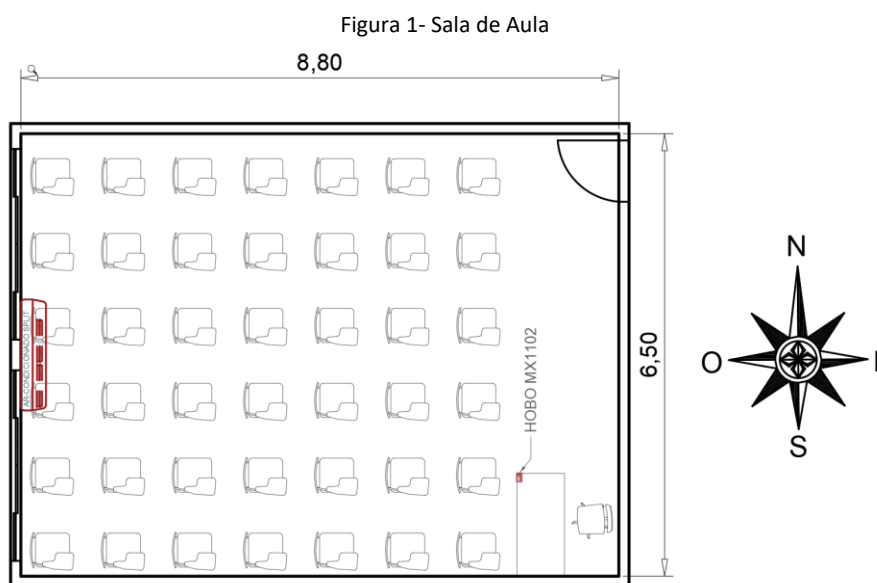
2 OBJETIVO

O objetivo deste estudo é avaliar a taxa de renovação do ar interior em uma sala de aula climatizada com ar-condicionado “Hi Wall” do tipo Split utilizando a concentração de dióxido de carbono (CO₂) como gás indicador. Além disso, busca-se determinar a conformidade dessa taxa com as legislações vigentes e normas internacionais de referência.

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

O estudo foi realizado em uma escola técnica situada no município de Serra, no estado do Espírito Santo, parte da Região Metropolitana de Vitória, localizada a 27 Km ao norte da capital estadual. A metodologia adotada baseou-se em um experimento de campo conduzido durante o inverno, em uma sala de aula. A coleta de dados ocorreu entre os dias 8 e 24 de julho de 2024. As aulas foram realizadas das 19h00 às 22h00, com um intervalo de 15 minutos das 20h30 às 20h45.

A sala de aula selecionada, localizada no pavimento térreo, tem capacidade para 40 alunos e está equipada com duas janelas voltadas para a fachada oeste do prédio. Com uma área de 57,2 m² e pé-direito de 3,5 m, a sala conta com duas janelas de correr, cada uma com uma área de ventilação de 2 m², além de uma porta com abertura de 1,0 m², conforme ilustrado na Figura 1.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

O ambiente é climatizado por um sistema de ar-condicionado “Hi Wall” do tipo Split de 36.000 BTU (*British Thermal Unit* - Unidade Térmica Britânica) sem mecanismo de renovação do ar interior, que opera continuamente ao longo do ano, inclusive no inverno, mantendo condições térmicas estáveis, com temperatura média de 24°C ±1°C e umidade relativa do ar de 66% ±5%. Durante o funcionamento do ar-condicionado, as janelas e a porta geralmente permanecem fechadas, o que impede a renovação do ar por meio da ventilação natural.



Para a coleta de dados quantitativos, foi utilizado o monitor HOBO Data Logger MX1102A, calibrado em ambiente externo 15 minutos antes do início das aulas, seguindo as recomendações do fabricante para garantir precisão e conformidade nas medições. O HOBO foi escolhido por sua capacidade de monitorar e registrar continuamente, minuto a minuto, as concentrações de dióxido de carbono (CO₂) de 0 a 5000 ppm, com precisão de ±50 ppm, utilizando tecnologia de espectroscopia por infravermelho não dispersivo (*Non-Dispersive Infrared – NDIR*). Além disso, o dispositivo registra a temperatura, com uma faixa de medição de 0°C a 50°C e precisão de ±0,21°C, e a umidade relativa do ar, variando de 1% a 90% com precisão de ±2%.

O monitor foi instalado a uma altura de 1,10 metro, conforme recomendado pela norma ISO 7726:1998 (ISO, 1998), e posicionado a 1,5 metro de distância das paredes, próximo a mesa do professor. Essa localização foi escolhida para minimizar a influência de infiltrações de ar causadas pela abertura das portas durante a entrada e saída dos alunos, assegurando que os dados coletados reflitam com precisão as condições ambientais internas, minimizando as interferências externas. É importante destacar que durante o experimento, o professor ministrava suas aulas em pé na área frontal da sala, e não sentado à sua mesa.

A taxa de renovação de CO₂ é um conceito fundamental na avaliação da ventilação em ambientes internos, especialmente em espaços ocupados como salas de aula. Batterman (2017) revisa os métodos baseados em CO₂ para determinar taxas de ventilação, com ênfase em salas de aula. A taxa de renovação do ar, expressa geralmente em termos de trocas de ar por hora (ACH - *air change per hour* ou h⁻¹), é a medida da quantidade de ar externo que é introduzido em um espaço por unidade de tempo em relação ao volume total do espaço.

Para determinar a taxa de ventilação foi adotado o Método de Balanço de Massa Transiente por ser o mais flexível e vantajoso entre os métodos baseados em CO₂ para estimar as taxas de ventilação em salas de aula. Isso se deve principalmente às baixas taxas de renovação de ar interior e aos padrões dinâmicos de ocupação observados nesses ambientes escolares. O Método de Balanço de Massa Transiente é considerado o método que permite modelar várias fases de ocupação, bem como padrões de ocupação arbitrários, o que proporciona resultados mais consistentes e precisos em comparação com outros métodos, como os métodos de estado estacionário e decaimento, que podem ser limitados em precisão dependendo das condições específicas de ocupação e operação dos sistemas de ventilação (Bastien *et al.*, 2024; Batterman, 2017; Johnson *et al.*, 2018).

O Método de Balanço de Massa Transiente pode ser calculado utilizando a Equação 1, que determina a concentração de CO₂ diretamente como uma função do tempo *t*. Essa equação pode ser aplicada para calcular a concentração de CO₂ em qualquer instante de tempo.

Equação 1

$$C_i(t) = \frac{6 \cdot 10^4 \cdot n_t \cdot G_p}{Q} \left(1 - e^{-\frac{Q}{V}t}\right) + \left(C_i(0) - C_{out} - \frac{G}{Q}\right) e^{-\frac{Q}{V}t} + C_{out}$$

Onde cada termo é expresso nas unidades de medida apropriadas:



- $C_i(t)$: Concentração interna de CO_2 no tempo t [ppm]
- n_t : número de ocupantes no ambiente
- G_p : taxa de emissão média de CO_2 por pessoa (L/min por pessoa)
- Q : Taxa de renovação do ar [m^3/h]
- V : Volume do ambiente [m^3]
- $C_i(0)$: Concentração inicial de CO_2 no ambiente [ppm]
- C_{out} : Concentração de CO_2 do ar de renovação [ppm]
- t : Tempo de permanência no ambiente [horas]

Com base nos estudos de Li et al. (2024), a geração de CO_2 por pessoa é influenciada por variáveis como a taxa metabólica, idade, sexo e área de superfície corporal. Considerando que os ocupantes da sala de aula são homens adultos entre 20 e 30 anos, em posição sentada, será utilizada uma taxa de geração de CO_2 de 0,36 L/s para o cálculo da taxa de renovação do ar interior.

A escolha deste método é justificada por considerar as variações de ventilação e ocupação em tempo real e proporcionar uma representação mais precisa das condições de qualidade do ar interno (IAQ) e, apesar da maior complexidade, o aumento da precisão justifica o esforço adicional, especialmente em estudos onde a qualidade do ar interno é crítica.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Mohamed et al. (2021) destacam que os projetos de climatização das salas de aula são elaborados para atender ao conforto térmico e a eficiência energética. Os dados obtidos pelas medições de temperatura e umidade aliado a prática de utilizar o ambiente com as janelas e porta fechadas demonstram uma preocupação com o conforto térmico e com a eficiência energética.

Os resultados apresentados na Tabela 2 apresentam um panorama detalhado das medições obtidas com o monitoramento realizado pelo dispositivo HOBO MX1102A demonstrando que a sala de aula analisada manteve uma temperatura média de $24^\circ C$, dentro da faixa de $21^\circ C$ a $26^\circ C$, conforme recomendado pela NBR 17.037 (ABNT, 2023) mas, a umidade relativa média ocasionalmente excedeu o valor máximo de 65% recomendado pela norma em cerca de 7%.

Em relação à taxa de renovação do ar interior, os valores registrados na condição usual da sala de aula, com as janelas e a porta fechadas, foram abaixo de $18 m^3/h$ por pessoa que corresponde ao mínimo recomendado pelas normas NBR 16.401-3 (ABNT, 2008), ASHRAE 62.1 (2022) e EN 13779 (CEN, 2007), variando de 0,4 ACH a 0,8 ACH, principalmente devido a infiltrações de ar causadas pela abertura ocasional da porta, como pode ser observado na Tabela 2.



Tabela 2 - Medições realizadas pelo HOBO MX1102A

Data	Taxa CO ₂		Ocupação (Pessoas)	Taxa de Ventilação por pessoa	ACH	Temp Média	Umidade Relativa	Observação
	19:00	20:00						
09/07	797	2477	23	5,4 m ³ /h	0,6	26 °C	66%	Janelas e porta fechadas
10/07	774	2336	23	6,8 m ³ /h	0,8	24 °C	56%	Janelas e porta fechadas
11/07	850	2638	22	3,8 m ³ /h	0,4	24 °C	65%	Janelas e porta fechadas
15/07	632	2539	24	4,8 m ³ /h	0,6	24 °C	69%	Janelas e porta fechadas
16/07	407	1991	21	7,4 m ³ /h	0,8	24 °C	67%	Janelas e porta fechadas
17/07	700	1567	21	16,6 m ³ /h	1,7	23 °C	60%	Janelas e porta abertas
22/07	1581	3101	23	4,4 m ³ /h	0,5	24 °C	70%	Janelas e porta fechadas
23/07	487	1406	24	20,0 m ³ /h	2,4	24 °C	72%	Janelas e porta abertas
24/04	1268	3218	27	3,9 m ³ /h	0,5	24 °C	70%	Janelas e porta fechadas

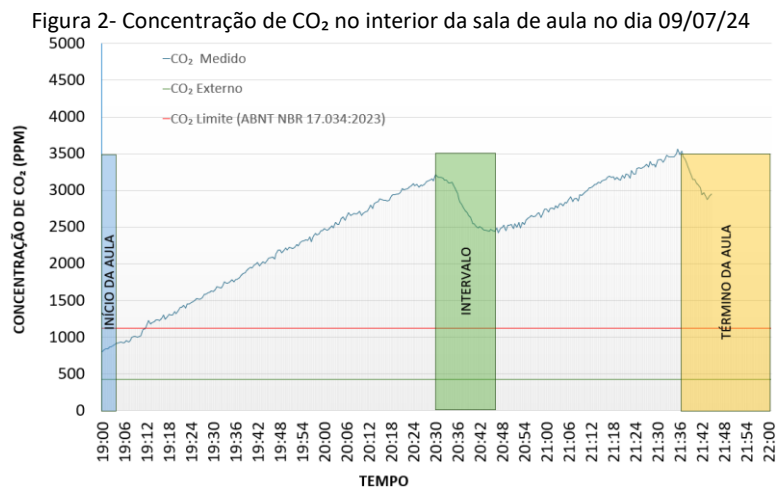
Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

A norma brasileira ABNT NBR 16.401 (ABNT, 2008) estabelece uma taxa mínima de renovação de ar de 18m³/h por pessoa para assegurar uma qualidade do ar classificada como Nível 1 que corresponde ao padrão mínimo aceitável para ambientes não residenciais. Este valor também é adotado pela norma americana ASHRAE 62.1 (ASHRAE, 2022) para salas de aula e pela norma europeia EN 13779 (CEN, 2007), onde é classificado como IDA 4, correspondente ao nível mínimo de qualidade do ar.

Considerando uma taxa mínima de renovação de ar de 18 m³/h por pessoa, para uma sala projetada para 41 ocupantes, o projeto do ambiente deveria garantir uma taxa de renovação do ar de, no mínimo, 738 m³/h. Para uma sala com um volume de 200,2 m³, essa taxa de ventilação corresponde a aproximadamente 3,7 ACH. No entanto, conforme a Lei 13.589/2018 (Brasil, 2018), a legislação brasileira recomenda uma taxa de renovação de ar de 27 m³/h por pessoa, o que equivale a 5,5 trocas de ar por hora (ACH).

A sala de aula analisada estava com uma ocupação de aproximadamente 60% com uma média de 24 pessoas. Para essa ocupação, a taxa mínima de renovação de ar, conforme os padrões recomendados pelas normas, deveria ser de 432 m³/h, o que equivale a 2,2 ACH. Esse nível de renovação de ar só foi alcançado com o auxílio da ventilação natural, por meio da abertura das janelas e da porta.

A Figura 2, baseada nas medições realizadas em 9 de julho de 2024, mostra uma taxa de crescimento constante na concentração de CO₂ entre 19h00 e 20h30 durante o período de aula em que a sala está ocupada. Às 20h30, quando os alunos saíram da sala para o intervalo, observou-se uma queda no nível de CO₂. Às 20h45, com o retorno dos alunos à sala, a concentração de CO₂ voltou a aumentar, continuando até às 21h35, momento em que diversos alunos começaram a sair gradualmente, devido ao término da aula.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

A concentração de CO₂ medida no ambiente externo foi de aproximadamente 420 ppm. No interior da sala, às 19h00, o nível registrado foi de 797 ppm, aumentando gradualmente até 3213 ppm às 20h30, em função da baixa taxa de renovação do ar e da geração de CO₂ pelos alunos.

As medições apresentadas na Figura 3 mostram uma elevação consistente nos níveis de CO₂, com variações explicadas pelos eventos específicos em cada dia analisado.

Nos dias 09, 10, 11 e 16 de julho, a sala de aula foi aberta às 18h30, e os alunos começaram a entrar por volta das 19h00, no início das aulas. Em 15 de julho, o início das atividades foi atrasado, com a sala sendo aberta apenas às 19h15. Nesse dia, foi aplicada uma atividade avaliativa referente ao conteúdo da disciplina, o que eliminou o horário de intervalo, e os alunos começaram a deixar a sala por volta das 20h30.

Em 17 de julho, a porta e as janelas foram abertas no início da aula, entre 19h00 e 19h10, permitindo a renovação do ar por ventilação natural durante 10 minutos, o que resultou em uma taxa de renovação de ar de 1,7 ACH até as 20h00. Esse procedimento foi repetido durante o intervalo, das 20h10 às 20h25, o que melhorou significativamente a qualidade do ar em comparação aos dias anteriores em que a sala permaneceu fechada. No entanto, essa melhoria ainda não foi suficiente para atingir os mínimos recomendados pelas normas, conforme demonstrado na Tabela 3.

Em 22 de julho, a maioria dos alunos chegou à sala antes das 18h40, o que resultou em uma concentração inicial de CO₂ de 1581 ppm registrada às 19h00. Isso levou a uma taxa de renovação do ar de 0,5 ACH calculada para o período das 19h00 às 20h00.

No dia 23 de julho, a porta e as janelas permaneceram abertas das 19h00 às 19h40. Durante esse período, a temperatura ambiente se manteve estável em comparação com os outros dias analisados. A ventilação natural resultou em ACH de 6,7 enquanto as janelas e a porta permaneceram abertas, e entre 19h00 e 20h00, o ACH foi de 2,4, atendendo aos valores mínimos estabelecidos pelas normas, conforme apresentado na Tabela 3.

Finalmente, em 24 de julho, os alunos ocuparam a sala antes das 18h40 para a prova final da disciplina, o que provocou uma elevação nos níveis de CO₂ antes das 19h00, resultando



em uma taxa de renovação do ar de 0,5 ACH entre 19h00 e 20h00. Às 20h15, após a conclusão da prova, os alunos começaram a se retirar do ambiente.

A Tabela 3 apresenta as taxas de renovação do ar medidas na sala de aula das 19h00 às 20h00 em comparação com as taxas recomendadas pelas normas mencionadas, levando em consideração a ocupação e o volume do ambiente. É importante destacar que para o ambiente estar em conformidade com as exigências legais, é recomendado que atenda ao Nível 3 da NBR 16.401-3 (ABNT, 2008) garantindo uma taxa de renovação do ar de 27m²/h por pessoa.

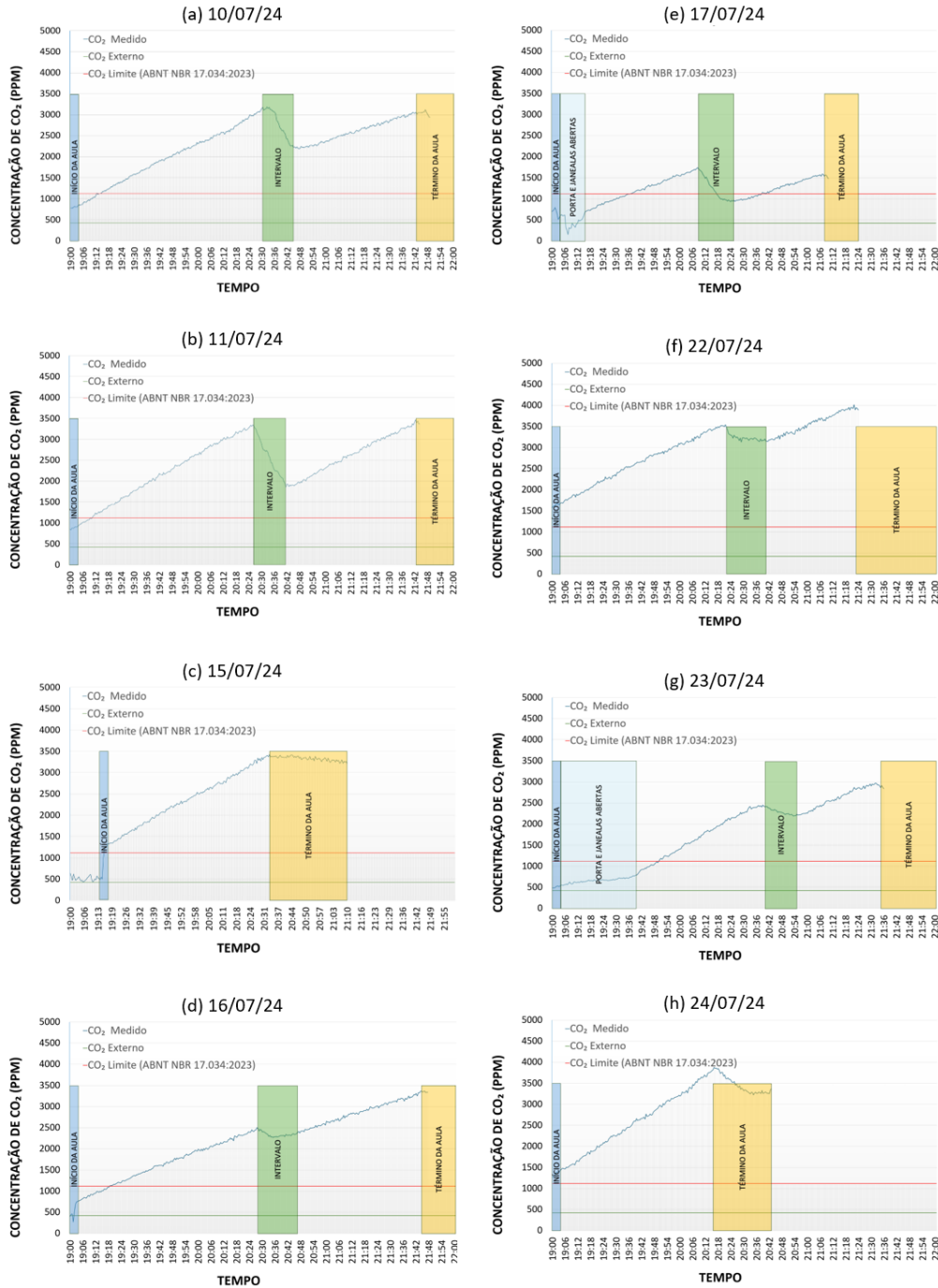
Tabela 3 – Comparação da taxa de renovação do ar medida e os valores mínimos recomendados pelas normas

Data	Ocupação (Pessoas)	ACH Medida	ASHRAE 62.1 (Sala de Aula)	NBR 16.401-3:2008			EN 13779:2007			
				Nível 1	Nível 2	Nível 3	IDA 1	IDA 2	IDA 3	IDA 4
09/07	23	0,6	2,1	2,1	2,6	3,1	8,3	5,2	3,3	2,1
10/07	23	0,8	2,1	2,1	2,6	3,1	8,3	5,2	3,3	2,1
11/07	22	0,4	2,0	2,0	2,5	3,0	7,9	4,9	3,2	2,0
15/07	24	0,6	2,2	2,2	2,7	3,2	8,6	5,4	3,5	2,2
16/07	21	0,8	1,9	1,9	2,4	2,8	7,6	4,7	3,0	1,9
17/07	21	1,7	1,9	1,9	2,4	2,8	7,6	4,7	3,0	1,9
22/07	23	0,5	2,1	2,1	2,6	3,1	8,3	5,2	3,3	2,1
23/07	24	2,4	2,2	2,2	2,7	3,2	8,6	5,4	3,5	2,2
24/07	27	0,5	2,4	2,4	3,1	3,6	9,7	6,1	3,9	2,4

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Observa-se que a taxa de renovação do ar interior é um parâmetro essencial no projeto de ambientes, devendo ser calculada com base na ocupação e no tempo de permanência, para garantir que a concentração de CO₂ não ultrapasse 700 ppm acima dos níveis externos. Isso não apenas assegura um ambiente saudável, mas também garante a conformidade com a legislação vigente, uma vez que o não cumprimento dos requisitos mínimos de qualidade do ar configura uma infração sanitária.

Figura 3 - Concentração de CO₂



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Esses resultados são importantes para direcionar futuras intervenções e políticas para a melhoria das condições ambientais nas escolas, destacando a importância de uma boa ventilação para a saúde e o bem-estar dos alunos.



5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados deste estudo demonstram que o uso de sistemas de climatização artificial, como o ar-condicionado do tipo Split, sem a devida renovação de ar, podem comprometer a qualidade do ar em ambientes escolares, afetando de forma direta a saúde, o bem-estar e o desempenho acadêmico dos alunos. As concentrações elevadas de dióxido de carbono (CO₂), superiores aos limites normativos, evidenciam a insuficiência da ventilação, o que exige a adoção de medidas corretivas imediatas.

Este estudo apresenta a eficácia da ventilação natural como uma solução simples e de baixo custo para a melhoria da qualidade do ar em salas de aula. A abertura das janelas e da porta realizada por 40 minutos no dia 23/07/2024 mostrou-se eficaz para aumentar a taxa de renovação do ar para 20,0m³/h por pessoa superando o limite mínimo de 18m³/h por pessoa recomendado pelas normas brasileira, americana e europeia.

A ventilação do ambiente no início da aula, realizada por 10 minutos no dia 23/07/2024, elevou a taxa de ventilação para 16,6m³/h por pessoa. Isso demonstra uma significativa melhoria na taxa de ventilação se comparada com a utilização usual da sala com as janelas e a porta fechadas, mesmo não atingindo o mínimo de 18m³/h por pessoa recomendado pelas normas.

Entretanto, para uma solução mais abrangente e eficiente, é recomendável adotar uma abordagem integrada, que combine a ventilação natural com a instalação de equipamentos de ar-condicionado com capacidade de renovação de ar exterior, ou sistemas híbridos que permitam a combinação entre ventilação mecânica e natural como uma solução viável para garantir o conforto térmico e a qualidade do ar em ambientes escolares.

Para trabalhos futuros, sugere-se a condução de estudos mais detalhados sobre a viabilidade de novas tecnologias de ventilação, tanto mecânica quanto natural, com ênfase na otimização do consumo energético. Além disso, é relevante a realização de investigações adicionais sobre a presença de outros poluentes atmosféricos, como material particulado (PM), dióxido de enxofre (SO₂), monóxido de carbono (CO), ozônio (O₃) e compostos orgânicos voláteis (COVs), entre outros, visando aprofundar o entendimento sobre a influência do ar externo na qualidade do ar em ambientes climatizados. Ademais, pesquisas longitudinais que examinem os efeitos prolongados da exposição à má qualidade do ar sobre a saúde e o desempenho acadêmico dos estudantes são essenciais para embasar o desenvolvimento de políticas públicas mais eficientes.

Este estudo reforça a necessidade de uma abordagem individualizada para a ventilação de salas de aula climatizadas, integrando diferentes soluções para garantir o cumprimento das normas vigentes e promover ambientes escolares mais saudáveis e confortáveis. A renovação do ar não deve ser vista apenas como uma questão técnica, mas como um aspecto central na garantia de um ambiente educacional de qualidade, que influencia diretamente tanto o desempenho acadêmico quanto a saúde dos ocupantes.



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASHRAE, ANSI. Standard 62.1-2022 Ventilation for acceptable indoor air quality. **American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.**, Atlanta, GA, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16401-3: Instalações de Ar-Condicionado**. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 17037: Qualidade do ar interior em ambientes não residenciais climatizados artificialmente - Padrões referenciais**. Rio de Janeiro: ABNT, 2023.

BASTIEN, Diane et al. The impact of real-time carbon dioxide awareness on occupant behavior and ventilation rates in student dwellings. **Energy and Buildings**, v. 310, p. 114132, 2024.

BATTERMAN, Stuart. Review and extension of CO₂-based methods to determine ventilation rates with application to school classrooms. **International journal of environmental research and public health**, v. 14, n. 2, p. 145, 2017.

BRASIL. Lei nº 13.589, de 4 de janeiro de 2018. **Dispõe sobre a Manutenção de Instalações e Equipamentos de Sistemas de Climatização de Ambientes**. Brasília. Disponível em: <<https://www.planalto.gov.br>>. Acesso em: 30 mai. 2024.

BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. **Norma Regulamentara nº15: Atividade e Operações Insalubres**. Brasil: MTE, 2023. Disponível em: <<https://www.gov.br>>. Acesso: 06 ago. 2024.

Brasil. **Portaria Nº 3.523**, de 28 de agosto de 1998. Brasília. Disponível em:<<https://bvsms.saude.gov.br>>. Acesso em: 30 maio. 2024.

BRASIL. Resolução – RE Nº 09, de 16 de janeiro de 2003. **Diário Oficial da União**, Brasília, 20 de janeiro de 2003. Disponível em: <<https://antigo.anvisa.gov.br>>. Acesso em: 30 mai. 2024.

BRASIL. **Resolução CJF nº 886, de 29 de abril de 2024**. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Poder Executivo, Brasília, DF, 12 julho de 2024. Edição 133, Seção 1, p. 123.

CEN, E. N. 13779:2007. **Ventilation for non-residential buildings—performance requirements for ventilation and room-conditioning systems**. In. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium, 2007.

DAWKINS, Laura C. et al. Quantifying overheating risk in English schools: A spatially coherent climate risk assessment. **Climate Risk Management**, v. 44, p. 100602, 2024.

DENG, Shihan; LAU, Josephine. Seasonal variations of indoor air quality and thermal conditions and their correlations in 220 classrooms in the Midwestern United States. **Building and Environment**, 157, 79–88, June 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.04.038>.

ESPÍRITO SANTO, **Lei Nº 11.605**, de 5 de maio de 2022. Dispõe sobre a obrigatoriedade de o Poder Executivo Estadual manter a temperatura adequada na climatização das salas de aula nas unidades de ensino público no Estado do Espírito Santo. Espírito Santo, ES: Diário Oficial, 2022.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 7726: Ergonomics of the Thermal Environment—Instruments for Measuring Physical Quantities**. ISO, Genève, 1998.

JOHNSON, David L. et al. Indoor air quality in classrooms: Environmental measures and effective ventilation rate modeling in urban elementary schools. **Building and Environment**, v. 136, p. 185-197, 2018.

KUBBA, Sam. **Handbook of green building design and construction: LEED, BREEAM, and Green Globes**. Butterworth-Heinemann, 2012. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com>>. Acesso: 06 ago. 2024.



LEE, H.; AWBI, H. B. **Effect of Internal Partitioning on Room Air Quality With Mixing Ventilation — Statistical Analysis**. *Renewable energy*, v. 29, n. 10, p. 1721–1732, 2004.

LI, Yanyan et al. A method for estimating occupant carbon dioxide generation rates. **Energy and Buildings**, v. 312, p. 114163, 2024.

MOHAMED, Sara et al. Overheating and indoor air quality in primary schools in the UK. **Energy and Buildings**, v. 250, p. 111291, 2021.

ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE, OMS. **How Air Pollution Is Destroying Our Health**. Disponível em: <<https://www.who.int>>. Acesso em: 29 mai. 2024.

SHENDELL, Derek G. et al. Associations between Classroom CO₂ Concentrations and Student Attendance in Washington and. **Info. Lawrence Berkeley National Laboratory**, 2004.

WINCK, J. C. et al. A call for a national strategy for indoor air quality. **Pulmonology**, v. 28, n. 4, p. 245, 2022.

XAVIER, Tatiana Camello; OLIVEIRA, Wemerson Diascanio; FIALHO, Edson Soares. Análise das condições de conforto térmico da cidade de Vitória, ES. **Revista do Departamento de Geografia**, v. 41, p. e172471-e172471, 2021.