

PROJETO ARES: MONITORAMENTO E ANÁLISE DA VENTILAÇÃO NATURAL E DISPERSÃO DE CO₂ EM AMBIENTES ESCOLARES COM SENSORES DE BAIXO CUSTO

Ares Project: Monitoring and Analysis of Natural Ventilation and CO₂ Dispersion in School Environments Using Low-Cost Sensors

Proyecto Ares: Monitoreo y Análisis de la Ventilación Natural y la Dispersión de CO₂ en Ambientes Escolares con Sensores de Bajo Costo

GOMES, J. P. T.¹; FORTES, N. H. M.²; SOUZA, J. G. P.³; GOMES, J. P. T.⁴; INNOCENTINI, M. D. M.⁵

Resumo

O Projeto Ares desenvolve um sistema inovador de monitoramento da qualidade do ar em ambientes escolares, utilizando sensores de baixo custo para medir CO₂, temperatura, umidade, material particulado e COVs. Este estudo analisou a ventilação natural e a dispersão de CO₂ em salas do campus Passos do IFSULDEMINAS, relacionando dados ambientais com ocupação e abertura de janelas e portas. Com um sensor de direção do vento, avaliou-se a orientação da ventilação e as condições de dispersão do CO₂. A taxa de renovação do ar (ACH) foi estimada pelo balanço de massa do CO₂. Os resultados indicam que, em alta ocupação e com portas e janelas fechadas, a ventilação natural isolada não mantém níveis seguros de CO₂, ultrapassando os limites recomendados. Destaca-se a necessidade de combinar ventilação cruzada com sistemas mecânicos de renovação do ar para garantir qualidade do ar e conforto térmico, especialmente diante das limitações estruturais comuns às escolas brasileiras. O Projeto Ares, ao disponibilizar dados em plataforma aberta, contribui para a conscientização ambiental e a promoção de ambientes escolares mais saudáveis e sustentáveis.

Palavras-chave: Qualidade do ar; Ventilação cruzada; Sensores ambientais; Síndrome do edifício doente.

¹ GOMES, J. P. T. - João Paulo de Toledo Gomes: Prof. Dr. do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sul de Minas Gerais - IFSULDEMINAS, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7301-7765>, joao.gomes@ifsuldeminas.edu.br

² FORTES, N. H. M. - Nilo Henrique Meira Fortes: Doutor em Engenharia Química pela Universidade de São Paulo - USP, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1763-8329>, nilomeirafortes@gmail.com

³ SOUZA, J. G. P. - José Guilherme Pascoal de Souza: Prof. M.e da Universidade de Ribeirão Preto - UNAERP, ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-2652-4221>, jsouza@unaerp.br

⁴ GOMES, J. P. T. - Carlos Eduardo Formigoni: Prof. Dr. da Universidade de Ribeirão Preto - UNAERP, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6753-1290>, cformigoni@unaerp.br

⁵ INNOCENTINI, M. D. M. - Murilo Daniel de Mello Innocentini: Prof. Dr. da Universidade de Ribeirão Preto - UNAERP, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5396-7798>, minnocentini@unaerp.br

COMO CITAR:

GOMES, J. P. T. et al. PROJETO ARES: MONITORAMENTO E ANÁLISE DA VENTILAÇÃO NATURAL E DISPERSÃO DE CO₂ EM AMBIENTES ESCOLARES COM SENSORES DE BAIXO CUSTO. Engenharia Urbana Em Debate, 7(1). <https://doi.org/10.14244/engurbdebate.v7i1.170>

Data da Submissão:
05 de outubro de 2025
Data da Aprovação:
24 de outubro de 2025
Data da Publicação:
29 de junho de 2026



Abstract

Project Ares develops an innovative air quality monitoring system for school environments using low-cost sensors to measure CO₂, temperature, humidity, particulate matter, and VOCs. This study analyzed natural ventilation and CO₂ dispersion in classrooms at the Passos campus of IFSULDEMINAS, correlating environmental data with occupancy and window and door openings. Using a wind direction sensor, ventilation orientation and CO₂ dispersion conditions were assessed. Air exchange rates (ACH) were estimated based on CO₂ mass balance. Results indicate that in high occupancy conditions with closed doors and windows, natural ventilation alone does not maintain safe CO₂ levels, exceeding recommended limits. The study highlights the need to combine cross ventilation with mechanical air renewal systems to ensure air quality and thermal comfort, especially considering the structural limitations common in Brazilian schools. By providing data on an open platform, Project Ares contributes to environmental awareness and promotes healthier and more sustainable school environments.

Keywords: Air quality; Cross ventilation; Environmental sensors; Sick building syndrome.

Resumen

El Proyecto Ares desarrolla un sistema innovador de monitoreo de la calidad del aire en ambientes escolares, utilizando sensores de bajo costo para medir CO₂, temperatura, humedad, material particulado y COVs. Este estudio analizó la ventilación natural y la dispersión de CO₂ en aulas del campus Passos de IFSULDEMINAS, relacionando datos ambientales con la ocupación y la apertura de ventanas y puertas. Con un sensor de dirección del viento, se evaluó la orientación de la ventilación y las condiciones de dispersión del CO₂. La tasa de renovación de aire (ACH) se estimó mediante el balance de masa del CO₂. Los resultados indican que en condiciones de alta ocupación con puertas y ventanas cerradas, la ventilación natural por sí sola no mantiene niveles seguros de CO₂, superando los límites recomendados. Se destaca la necesidad de combinar la ventilación cruzada con sistemas mecánicos de renovación de aire para garantizar la calidad del aire y el confort térmico, especialmente ante las limitaciones estructurales comunes en las escuelas brasileñas. Al ofrecer datos en una plataforma abierta, el Proyecto Ares contribuye a la conciencia ambiental y a la promoción de ambientes escolares más saludables y sostenibles.

Palabras-clave: Objetivos de Desarrollo Sostenible; ciudades Medias, Justicia Socioambiental.

1. Introdução

A poluição do ar configura-se como um dos maiores desafios ambientais e de saúde pública da atualidade, afetando tanto ambientes externos quanto a qualidade do ar interior (QAI). Relatórios da Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE, 2016) estimam que, sem ações eficazes, a poluição atmosférica resultará em milhões de mortes prematuras e perdas econômicas significativas até 2060, com impactos especialmente graves em países emergentes, devido aos elevados custos relacionados à saúde e à produtividade. A intensificação do efeito estufa, provocada pelo aumento de gases como dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) e óxido nitroso (N₂O), reforça ainda mais a necessidade de monitoramento rigoroso das emissões e de estratégias para mitigar seus efeitos.

A QAI assume papel crítico, considerando que as pessoas passam, em média, cerca de 90% do tempo em ambientes fechados (OMS, 2021). Poluentes como monóxido de carbono (CO), dióxido de nitrogênio (NO₂), benzeno, formaldeído,

partículas finas (PM_{2,5} e PM₁₀) e contaminantes biológicos estão associados a doenças respiratórias, cardiovasculares e câncer. Por isso, a Organização Mundial da Saúde recomenda o uso de sensores, sistemas construtivos adequados, ventilação eficiente e ações educativas como parte de uma abordagem integrada para garantir ambientes internos saudáveis (OMS, 2021).

Em áreas urbanas densamente povoadas, a poluição do ar figura entre os principais riscos ambientais à saúde. Dados recentes mostram que, em 2021, 99% da população mundial vivia em regiões que não atendiam aos padrões recomendados de qualidade do ar (Zhong et al., 2023) resultando em cerca de 6,7 milhões de mortes prematuras anuais atribuíveis à poluição interna e externa, sendo 91% relacionadas à exposição a PM_{2,5}. Entre os principais poluentes de interesse estão CO, NO₂, ozônio (O₃), dióxido de enxofre (SO₂) e compostos orgânicos voláteis (COVs).

Estudos recentes indicam que muitas intervenções

em sistemas de ventilação mecânica em escolas não atingem níveis adequados de renovação do ar, resultando no acúmulo elevado de CO₂ e comprometendo a saúde e o desempenho cognitivo dos estudantes (Hobson et al., 2023). Embora a ventilação natural seja uma alternativa promissora, sua eficiência depende significativamente da orientação arquitetônica do edifício, das condições de vento (direção e velocidade) e do comportamento dos ocupantes (Allen et al., 2020).

Em ambientes escolares, a ventilação insuficiente favorece o acúmulo de CO₂ gerado pelo metabolismo humano, especialmente em salas climatizadas onde as janelas permanecem fechadas para preservar a eficiência energética (Jacobson et al., 2019). Tal situação aumenta o risco da Síndrome do Edifício Doente (SED), caracterizada por sintomas como cefaleia, irritação ocular, fadiga e desconforto respiratório, sem causa clínica aparente (Mustafa; Cook; McLeod, 2025; Schirmer et al., 2011). Além disso, a exposição prolongada a altos níveis de CO₂ compromete funções cognitivas, como atenção, raciocínio e desempenho acadêmico (Silva et al., 2022) reforçando a necessidade do monitoramento contínuo e da adoção de estratégias eficientes, como a ventilação cruzada.

Além do CO₂, ambientes escolares mal ventilados frequentemente apresentam concentrações elevadas de compostos orgânicos voláteis (COVs) e material particulado, agravando impactos na saúde respiratória e no rendimento escolar (Andamon; Rajagopalan; Woo, 2023; Chatzidiakou et al., 2023; OMS, 2021; Shen et al., 2020). No Brasil, (Requia; Roig; Schwartz, 2021) identificaram que 25% das escolas estão situadas em áreas de alta exposição à poluição, afetando diretamente cerca de 10 milhões de estudantes, o que reforça a urgência de estratégias específicas de monitoramento e mitigação.

Inspirado no projeto SchoolAir (Barros et al., 2023), desenvolvido em Portugal e expandido para o Brasil por meio de parcerias com instituições como a UNAERP e o IFSULDEMINAS, o Projeto Ares (ares.eco.br) busca investigar e propor soluções

para as condições de acúmulo e dispersão de CO₂ em escolas brasileiras, promovendo ambientes de aprendizagem mais saudáveis e eficientes.

Diante desse cenário, o presente estudo tem como objetivo avaliar empiricamente, em salas de aula do IFSULDEMINAS – Campus Passos, a relação entre condições construtivas, ventilação natural e dispersão do CO₂, considerando também a influência da direção predominante do vento. Diferentemente de abordagens baseadas em modelagem computacional, este estudo utiliza dados reais coletados por sensores de baixo custo, buscando gerar evidências práticas que complementem o conhecimento já disponível na literatura e ofereçam subsídios para aprimoramentos em projetos arquitetônicos, práticas de ventilação e políticas públicas.

No Brasil, o tema é central em políticas públicas e regulamentações recentes, como a Lei nº 14.850/2024, que institui a Política Nacional de Qualidade do Ar, e a Resolução CONAMA nº 506/2024, que atualiza os padrões nacionais para poluentes atmosféricos (CONAMA, 2024; Presidência da República, 2024). Essas normativas fortalecem o monitoramento ambiental e incentivam a adoção de tecnologias limpas, ajustando parâmetros para maior efetividade na proteção da saúde pública.

Portanto, compreender a interação entre ventilação, ocupação e poluição em salas de aula torna-se essencial para desenvolver estratégias de mitigação e promoção de ambientes escolares saudáveis, alinhando-se aos objetivos propostos pelo Projeto Ares.

2. Caracterização

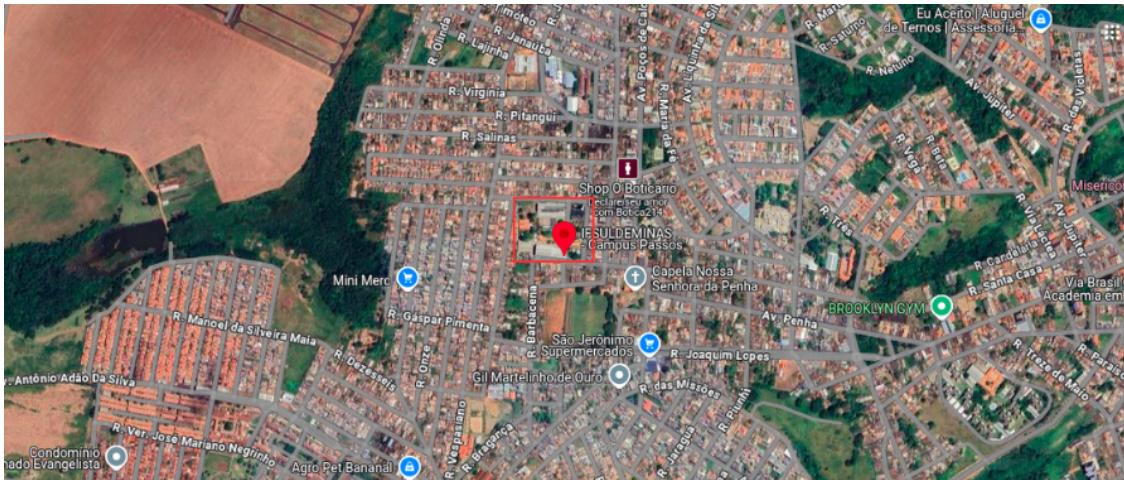
Os experimentos deste estudo foram realizados no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sul de Minas Gerais (IFSULDEMINAS – Campus Passos), nas coordenadas 20°42'50.3"S 46°37'40.2"W (Figura 1). O município de Passos pertence a uma área de transição entre Cerrado e Mata Atlântica, com topografia predominantemente plana, clima tropical de altitude e presença significativa de

recursos hídricos, fatores que contribuem para a diversidade ambiental e influenciam a qualidade do ar local (Passos, [S.d.]).

A Figura 2a apresenta o campus Passos e destaca a edificação denominada Bloco D,

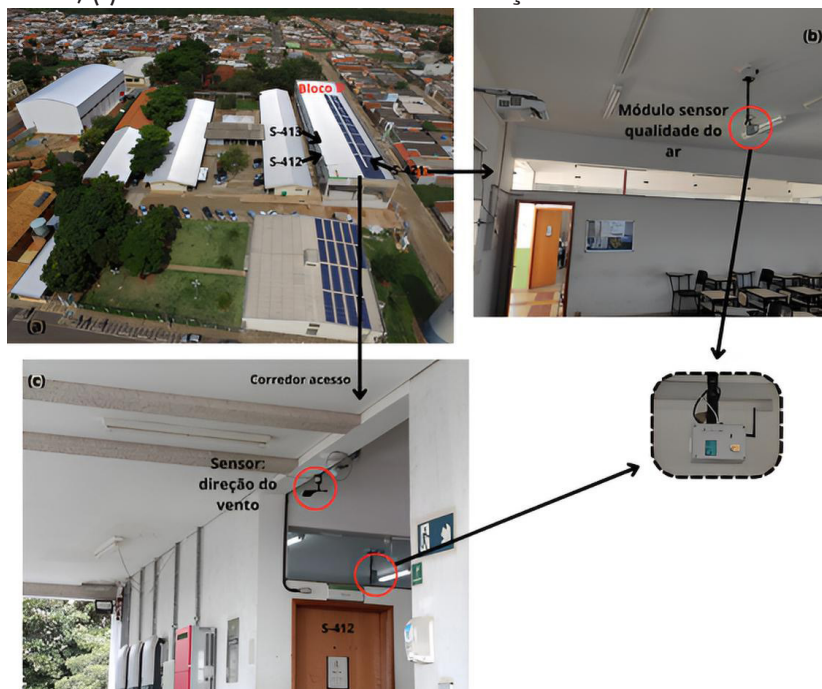
onde se localizam as salas equipadas com os módulos sensores de qualidade do ar (Figura 2b), cuja circulação natural é favorecida pelo corredor principal, no qual foi instalado um sensor de direção do vento (Figura 2c).

Figura 1 – Localização do campus do IFSULDEMINAS no município de Passos



Fonte: Google Maps (2025).

Figura 2 – (a) Vista aérea do campus e do pavimento das salas monitoradas; (b) Destaque da sala 421 e módulo sensor; (c) Posicionamento do sensor de direção do vento na entrada do corredor



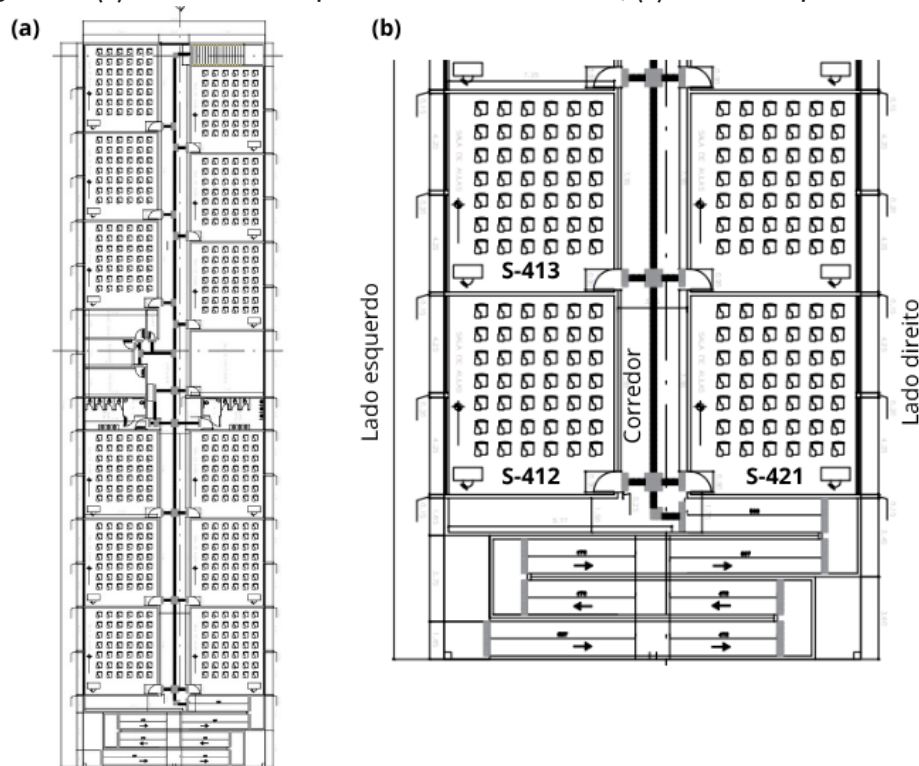
Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A Figura 3a apresenta a planta baixa do primeiro andar do bloco D, enquanto a Figura 3b mostra um recorte específico com o posicionamento das salas 412, 413 e 421. Esses ambientes são idênticos, com aproximadamente 220 m³ cada, e foram escolhidos por apresentarem diferentes orientações, padrões de ocupação e possibilidades de abertura de portas e janelas, permitindo uma análise comparativa das

estratégias de ventilação natural e cruzada. A Tabela 1 resume suas principais características construtivas.

As atividades urbanas e a vegetação local resultam em diferentes padrões de emissão e absorção de CO₂, tornando o município um cenário estratégico para o monitoramento ambiental.

Figura 3 – (a) Planta baixa do primeiro andar do bloco D; (b) Recorte da planta baixa



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Tabela 1 – Características construtivas das salas de aula monitoradas

Elemento	Dimensões	Observação
Largura	7,60 m	
Comprimento	8,70 m	
Altura	3,33 m	

Elemento	Dimensões	Observação
Janela 1	2,00 m (C) × 1,60 m (A)	Duas janelas separadas por coluna, voltadas para o lado externo, permitem ventilação natural direta.
Janela 2	1,10 m (C) × 0,45 m (A)	Janelas basculantes (4 partes móveis), próximo ao teto, voltadas para corredor interno.
Porta	0,90 m (C) × 2,10 m (A)	Voltada para o corredor interno.

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

3. Materiais e Métodos

A metodologia deste estudo foi fundamentada em princípios estabelecidos por estudos recentes, destacando a análise comparativa entre ventilação cruzada e unilateral (Souza; Rodrigues, 2012; SCOLARO; GHISI, 2024), além da importância das taxas de renovação do ar por hora (ACH) e seu impacto direto na qualidade do ar e no conforto térmico (Angueth; Sales, 2024). Embora não tenha sido aplicado cálculo direto de ACH ou modelagem computacional, o estudo foi concebido com base nesses referenciais teóricos, visando gerar dados empíricos que permitam inferir sobre a eficiência da ventilação natural em ambientes escolares.

O monitoramento ambiental foi realizado com sensores de baixo custo para registro contínuo de dióxido de carbono (CO₂) e outras variáveis atmosféricas. Os dispositivos foram instalados há cerca de um ano no campus Passos do IFSULDEMINAS (Gomes; Innocentini; Formigoni, 2024), distribuídos em salas do Bloco D (412, 413 e 421), Laboratório 9 do Bloco C, biblioteca e em uma estação externa localizada entre os blocos C e D, que serviu como referência para calibração e validação dos dados. Esses sensores medem em tempo real concentrações de CO₂, material particulado (PM1, PM2.5, PM10), compostos orgânicos voláteis (COVs), óxidos de nitrogênio (NOx), além de temperatura, umidade relativa e pressão atmosférica.

A calibração dos sensores de CO₂ foi conduzida

previamente conforme descrito em estudo anterior (Gomes; Innocentini; Formigoni, 2024), seguindo procedimentos rigorosos de comparação com equipamentos de referência e ajustes baseados em correlações estatísticas. Essa etapa garantiu a confiabilidade e a precisão dos dados coletados para a análise da qualidade do ar nos ambientes escolares.

Além disso, para assegurar a exatidão das medições ambientais, foram adotados sensores específicos para monitoramento contínuo de temperatura, umidade e pressão atmosférica, selecionados com base na maior correlação com dados oficiais do INMET, possibilitando a compensação adequada dos efeitos dessas variáveis nas leituras de CO₂, conforme a Lei dos Gases Ideais.

Os dados coletados são disponibilizados de forma aberta à comunidade por meio da plataforma Ares (ares.eco.br), que oferece uma visualização georreferenciada por meio de um mapa interativo baseado no OpenStreetMap (OpenStreetMap, [S.d.]). Os usuários podem consultar a localização dos sensores, acompanhar os dados em tempo real e realizar o download gratuito das séries temporais para diversas análises e pesquisas.

Para o presente estudo, foram selecionadas exclusivamente as salas do Bloco D, devido à presença de um sensor de direção do vento recentemente instalado, com a finalidade de ampliar a compreensão sobre a dispersão de CO₂ em função das condições de ventilação natural,

seja ela direta ou cruzada. O sensor de direção do vento utilizado foi o modelo VMS-3000-FXJT-N01 (Figura 4a), operando via protocolo ModBus RTU, com leitura de oito direções principais. Ele foi instalado no corredor central do Bloco D, próximo ao acesso principal, para permitir a avaliação dos padrões de circulação de ar no interior do edifício.

Como instrumento complementar, utilizou-se também um anemômetro digital manual modelo

AR816 (Figura 4b), que, apesar de não possuir certificação profissional, serviu para medições qualitativas da velocidade do vento junto às portas das salas e próximo aos sensores de qualidade do ar. Embora a medição exata da velocidade não fosse o objetivo central do estudo, essas informações auxiliaram na interpretação dos padrões de movimentação do ar e sua influência na dispersão de poluentes.

Figura 4 – (a) Sensor de direção do vento VMS-3000-FXJT-N01 instalado no corredor central; (b) Anemômetro digital manual AR816 utilizado para medições complementares



Fonte: Elaborado pelo autor (2025), a imagem da sala foi gerada por IA (2025).

O sensor de direção do vento apresenta alta precisão (tempo de resposta $\leq 0,5$ segundo) e foi escolhido por sua robustez para aplicações externas em regime contínuo. Para sua integração ao sistema baseado no microcontrolador ESP32, foi utilizado um módulo conversor MAX485, necessário para realizar a conversão do sinal TTL

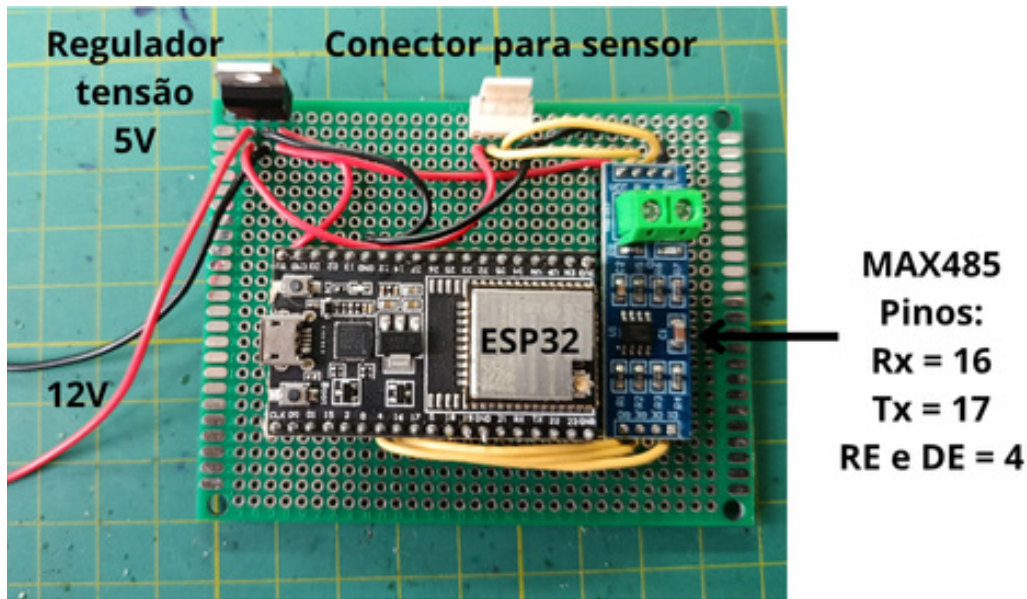
para RS485, conforme as exigências do protocolo ModBus RTU.

O circuito foi desenvolvido com base na documentação técnica do fabricante (Shandong Renke, [S.d.]), exigindo uma fonte de alimentação de 12 V para o sensor, enquanto o conversor

RS485 e o ESP32 operam com tensão de 5 V. Para compatibilizar as diferentes demandas energéticas, foi incorporado ao sistema um regulador de tensão adequado. A Figura 5 ilustra o protótipo montado para essa integração.

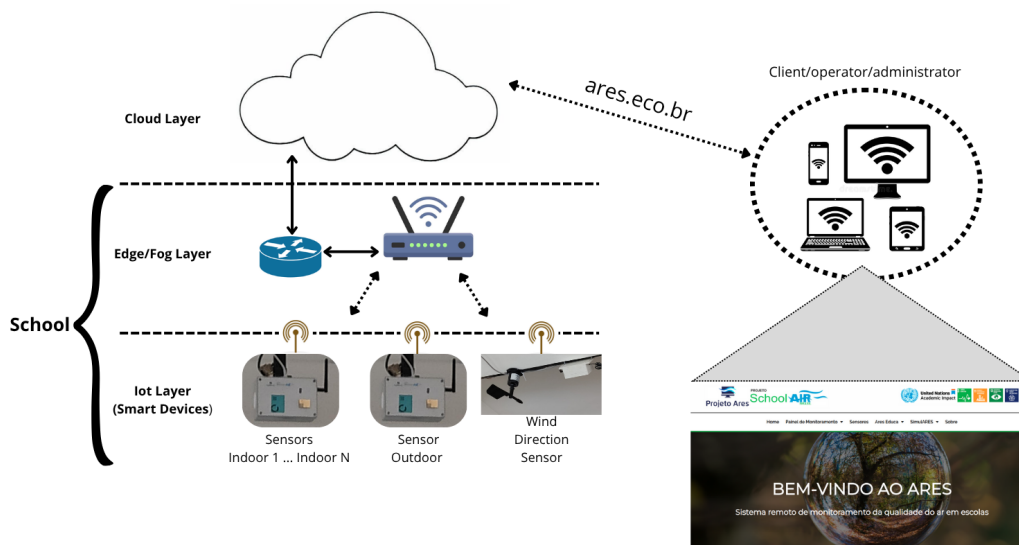
Para a transmissão e recepção de dados entre os agentes do processo, foi proposto uma atualização na arquitetura topológica em 3 camadas conforme apresentado pela Figura 6.

Figura 5 – Protótipo desenvolvido para integração do sensor de direção do vento ao sistema de monitoramento



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Figura 6 – Arquitetura do sistema de aquisição e disponibilização dos dados



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Onde:

- Camada IoT: Composta pelos módulos sensores, responsáveis pela coleta dos dados ambientais em tempo real. Os medidores indoor foram alocados nas salas de aula, o outdoor foi instalado do lado externo para referência do CO₂ juntamente ao sensor de direção do vento. O tráfego de dados ocorre por meio do protocolo Modbus IP (Barbosa, [S.d.]), e utilizam comunicação sem fio (WLAN) para transmitir as medições à camada seguinte garantindo a conectividade eficiente entre os sensores.

- Camada de Borda e Névoa (Edge/Fog Layer): Responsável pelo processamento intermediário dos dados, essa camada inclui equipamentos de rede local (LAN) e roteadores.

- Camada de Nuvem (Cloud Layer): Responsável pela disponibilização remota dos dados, permitindo que operadores, administradores e usuários acompanhem em tempo real as informações sobre a qualidade do ar através de uma dashboard interativa disponibilizada pelo Portal Ares. O acesso pode ser realizado por meio de computadores, tablets e dispositivos móveis, garantindo o monitoramento contínuo e facilitando a tomada de decisões baseadas nas condições ambientais registradas pelos sensores.

O período de monitoramento abrangeu os dias 10 a 13 de junho de 2025, com os sensores programados para registrar dados a cada 30 segundos. Durante esse período, foram realizadas observações presenciais (in loco) das condições nas salas, considerando fatores como número de ocupantes, abertura de portas e janelas, e medições manuais da velocidade do vento. Esses registros foram posteriormente comparados às medições automáticas de CO₂, com foco na análise do tempo de dispersão do gás no ambiente.

Para quantificar a eficiência da ventilação natural, foi realizada uma estimativa pontual da taxa de renovação de ar (ACH – Air Changes per Hour) a partir da evolução das concentrações de CO₂ medidas. Adotou-se o modelo clássico de balanço

de massa como descrito por (Persily; De Jonge, 2017; Persily; Polidoro, 2022) nos modelos do NIST, e apresentado pela Equação 1.

$$C(t) = C_{\text{ext}} + \frac{G}{\text{ACH} \times V} (1 - e^{-\text{ACH}t/60})$$

Onde:

- C(t) é a concentração interna de CO₂ no instante t (ppm);

- C_{ext} é a concentração externa de referência (ppm);

- G é a taxa de geração contínua de CO₂ pelos ocupantes, calculada como N × 7L/h (sendo N o número de pessoas);

- V é o volume do ambiente (m³);

- ACH é a taxa de renovação de ar a ser estimada (trocas por hora);

- t é o intervalo de medição (minutos).

Para cada sala e período com variação significativa de CO₂, a equação foi resolvida numericamente para ACH, considerando as concentrações inicial e final, o número de ocupantes e o tempo decorrido. Essa abordagem fornece uma estimativa prática da ventilação efetiva, evidenciando a diferença entre medições pontuais de velocidade do ar e a renovação volumétrica real do ambiente (Persily; De Jonge, 2017).

4. Resultados e Discussões

4.1. Análise da direção do vento

A Tabela 2 apresenta a distribuição das direções do vento registradas na entrada do Bloco D entre os dias 07/06/2025 e 15/07/2025, totalizando 14.604 registros. A Figura 7 ilustra graficamente essa distribuição, permitindo uma visualização mais intuitiva dos percentuais e destacando as direções predominantes durante o período analisado.

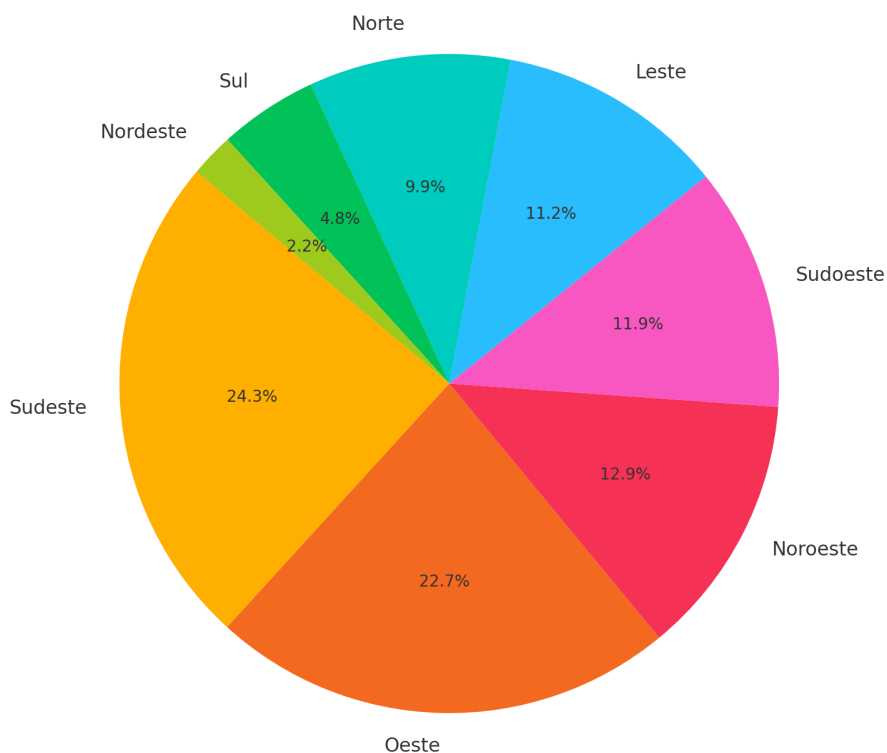
Tabela 2 – Frequência das direções do vento durante o período analisado

Direção	Contagem (amostra)	Percentual (%)
Sudeste	3556	24,3
Oeste	3322	22,7
Noroeste	1882	12,9
Sudoeste	1744	11,9
Leste	1636	11,2
Norte	1443	9,9
Sul	706	4,8
Nordeste	315	2,2

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Figura 7 – Distribuição percentual das direções do vento

Distribuição percentual das direções do vento

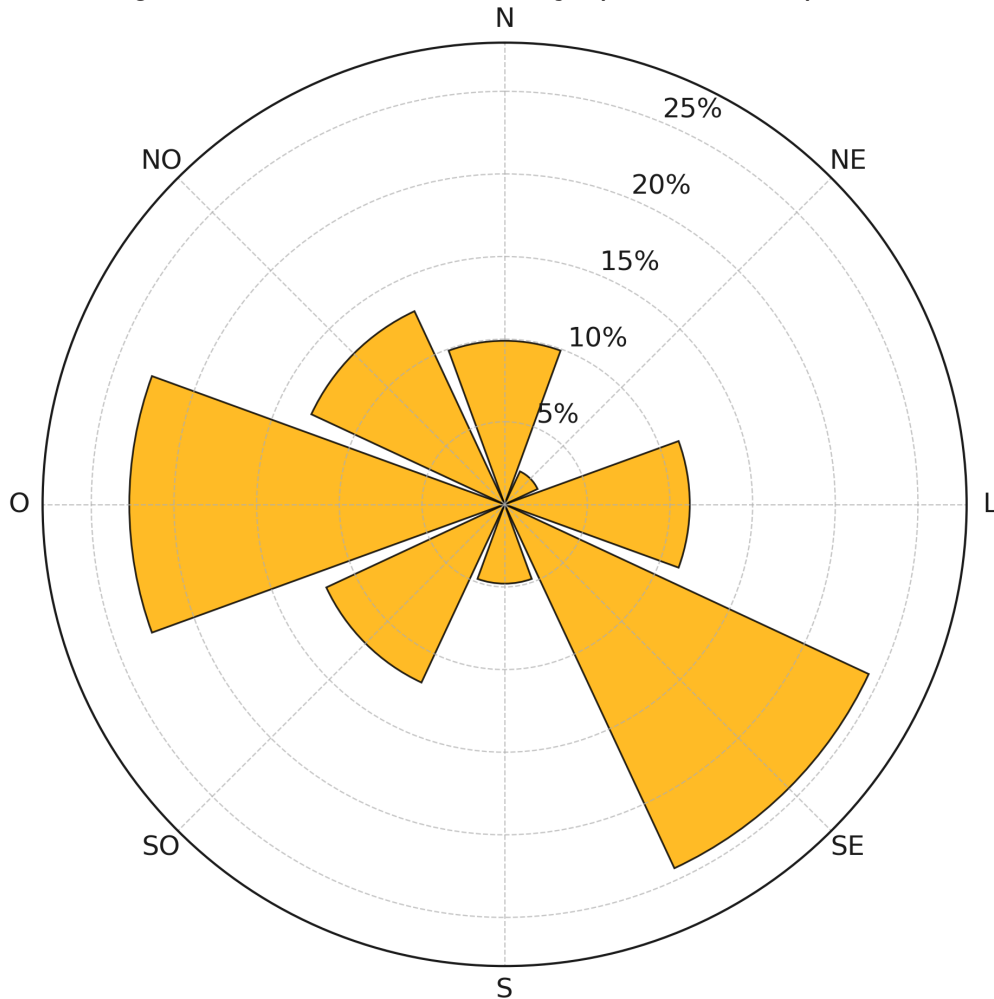


Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Observa-se que as direções sudeste e oeste correspondem a quase metade dos registros, evidenciando a predominância desses quadrantes no local de estudo (Figura 8). Esse padrão indica

que salas com aberturas orientadas para sudeste e oeste apresentam maior potencial para aproveitar a ventilação natural, especialmente sob condições favoráveis de ventilação cruzada.

Figura 8 – Rosa dos ventos da distribuição percentual da frequência



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Embora as demais direções tenham sido registradas com menor frequência, elas revelam uma diversidade nos padrões de circulação de ar, o que pode influenciar significativamente a dispersão do CO₂ nos ambientes avaliados.

4.2. Análise das condições das salas

As características construtivas do edifício e as

condições de ocupação permitiram explorar diferentes cenários de ventilação. A Tabela 3 resume as situações observadas, incluindo padrões de abertura de janelas e portas, ocupação e uso de ar-condicionado. Já a Tabela 4 apresenta as concentrações iniciais e finais de CO₂, os valores externos de referência e as velocidades do vento registradas no interior das salas e nas portas de entrada.

Tabela 3 – Situações observadas nas salas monitoradas

Data	Sala	Ocupação	Janela	Porta	Ar-condicionado
10/06 10h-10h50	412	0	aberta	aberta	desligado
	413	0	aberta	aberta	desligado
	421	0 a 11 (sem aula, alunos indo e vindo)	fechada	Aberta (oscilação de ocupantes)	ligado
12/06 10h50-11h40	412	0	fechada	aberta	desligado
	413	0	fechada	aberta	desligado
	421	21	semiaberta	fechada	desligado
13/06 10h-10h50	412	37	fechada	fechada	desligado
	413	35	fechada	fechada	desligado
	421	30 (inicial), durante o período com redução de ocupação	semiaberta	Fechada com várias aberturas e saídas de ocupantes (avaliação)	desligado

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Tabela 4 – Registros dos sensores para concentração de CO₂ e vento nas salas monitoradas

Data	Sala	CO ₂ Inicial interno (ppm)	CO ₂ Final interno (ppm)	CO ₂ externo (ppm)	Vento interno (m/s)	Vento porta (m/s)	Direção predominante do vento
10/06 10h-10h50	412	490	462	492	0,2	1,1	Sudeste
	413	465	454		0,1	0,3	
	421	726	525		Não medido	0,2	

Data	Sala	CO ₂ Inicial interno (ppm)	CO ₂ Final interno (ppm)	CO ₂ externo (ppm)	Vento interno (m/s)	Vento porta (m/s)	Direção predominante do vento
12/06 10h50-11h40	412	453	431	522	0,2	0,5-1,9	Oeste
	413	432	402		0,1	0,5-0,8	
	421	738	919		Não medido	0,5-1,9	
13/06 10h-10h50	412	673	1313	529	Não medido	0,4-1,5	Oeste
	413	728	1649		Não medido	0,3-0,8	
	421	923	1368		Não medido	0,4-1,5	

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Nos dias 10 e 12/06, com salas predominantemente vazias ou parcialmente ocupadas e portas abertas, os valores de CO₂ permaneceram próximos aos níveis externos, com variações mínimas ao longo do período. Por exemplo, na sala 412 no dia 10/06, o CO₂ caiu de 490 ppm para 462 ppm, com vento interno de 0,2 m/s e vento na porta de 1,1 m/s, sob predominância de ventos sudeste. Esse cenário demonstra a eficiência da ventilação natural em manter os níveis de CO₂ baixos, mesmo sem ventilação mecânica, especialmente quando portas e janelas estão abertas. A combinação do vento com direção favorável, como Sudeste e Oeste, com essas condições, mostrou-se eficaz para preservar a qualidade do ar interno.

No dia 12/06, observa-se comportamento semelhante para as salas 412 e 413, com ventilação natural suficiente para manter baixos os níveis de CO₂. Contudo, a sala 421 apresentou aumento nos níveis de CO₂, de 738 ppm para 919 ppm, apesar de possuir janela semiaberta, provavelmente devido à alta ocupação (21 pessoas) e à porta fechada. Além disso, o domínio dos ventos de oeste, menos favoráveis à ventilação cruzada na orientação

dessa sala, contribuiu para a menor renovação do ar. Estes resultados indicam que portas abertas desempenham papel fundamental na renovação do ar, mesmo quando as janelas estão fechadas, uma vez que as velocidades do vento na porta foram superiores e ajudaram na dispersão do CO₂.

Em contraste, no dia 13/06, as três salas estavam altamente ocupadas e com portas e janelas majoritariamente fechadas, resultando em aumento expressivo das concentrações de CO₂. Destaca-se a sala 413, que foi de 728 ppm para 1649 ppm. As velocidades do vento medidas nas portas variaram entre 0,3 e 1,5 m/s, insuficientes para garantir renovação adequada em ambientes fechados. A direção predominante do vento neste dia foi oeste, que, associada ao fechamento das aberturas, limitou a dispersão efetiva do CO₂, evidenciando que alta ocupação combinada com portas e janelas fechadas compromete significativamente a qualidade do ar interno.

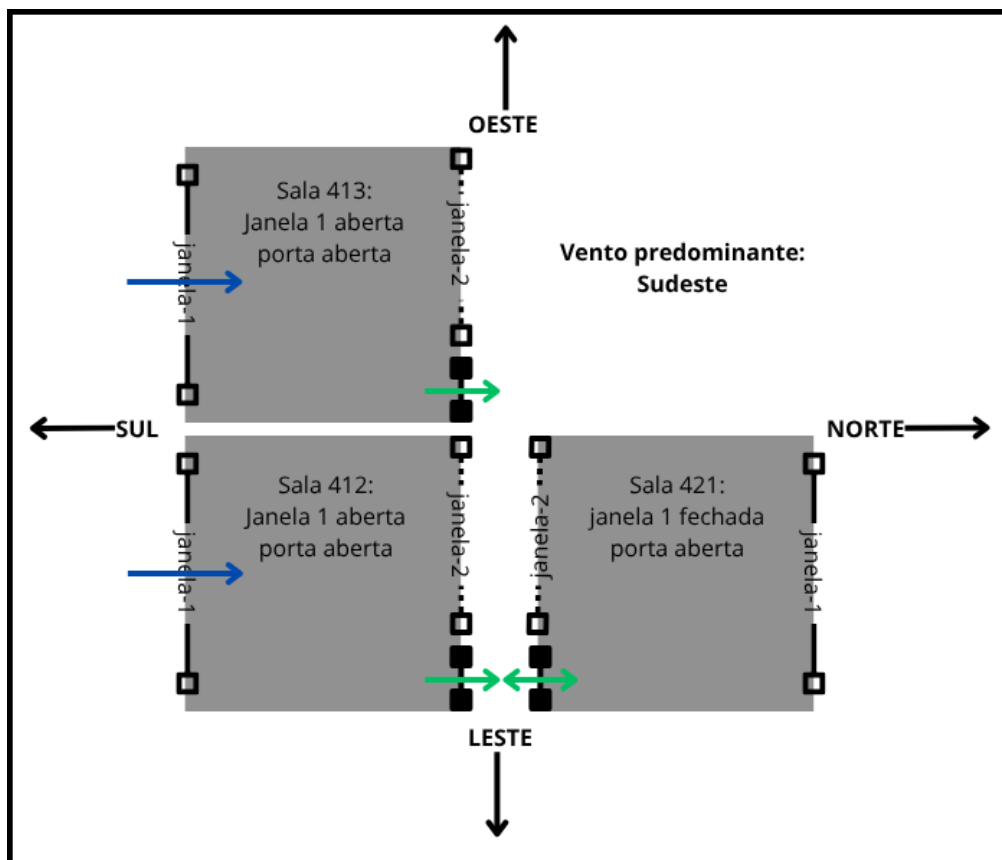
Adicionalmente, o uso do ar-condicionado com portas e janelas fechadas geralmente não assegura renovação adequada do ar, podendo favorecer o

acúmulo de CO₂. Contudo, na sala 421 no dia 10/06, apesar de a janela estar fechada e o ar-condicionado ligado, a porta aberta permitiu uma renovação significativa do ar, evidenciada pela redução da concentração de CO₂ de 726 ppm para 525 ppm, aproximando-se dos níveis externos. Esse resultado indica que, mesmo com a janela fechada, a ventilação natural via porta conectada ao corredor ventilado foi eficaz para manter a qualidade do ar, especialmente em condições de média ocupação inicial e variando durante o período de observação.

Os resultados evidenciam que a direção predominante do vento influencia diretamente a eficácia da ventilação natural. Ventos do Sudeste

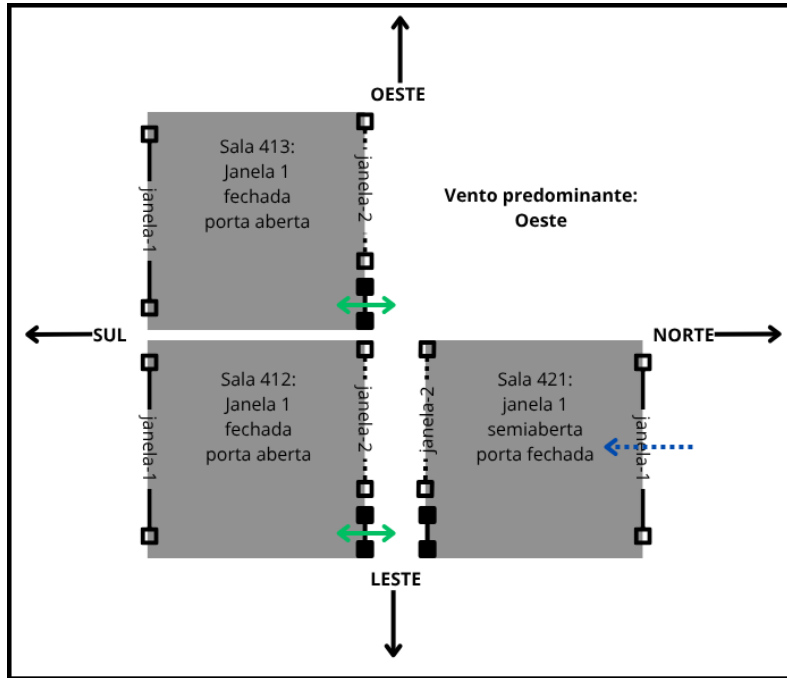
favoreceram a ventilação das salas orientadas para o Sul (412 e 413), promovendo uma circulação de ar mais eficiente e dispersão adequada do CO₂. Por outro lado, ventos do Oeste mostraram-se menos favoráveis para a ventilação cruzada nas condições avaliadas, especialmente devido à orientação das aberturas e ao fechamento de janelas e portas em vários momentos, limitando o fluxo de ar e reduzindo a renovação interna. Essa configuração comprometeu a dispersão do CO₂, resultando em maiores concentrações internas e menor qualidade do ar. As Figuras 9, 10 e 11 apresentam as situações observadas no local, confrontadas com os dados coletados pelos sensores.

Figura 9 – Representação do fluxo de ventilação natural referente ao dia 10/06/2025



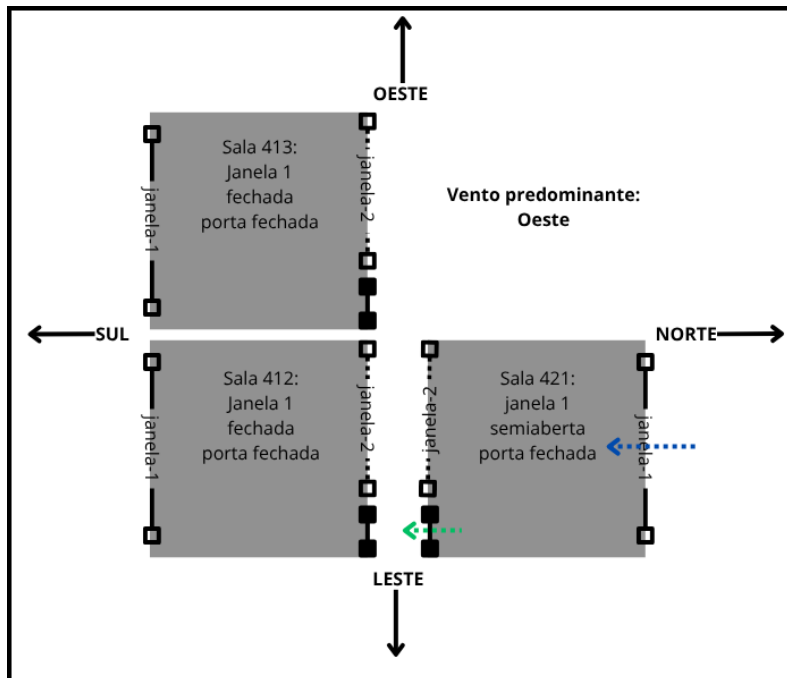
Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Figura 10 – Representação do fluxo de ventilação natural referente ao dia 12/06/2025



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Figura 11 – Representação do fluxo de ventilação natural referente ao dia 13/06/2025



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Esses achados reforçam a importância do planejamento construtivo aliado à ventilação natural, destacando que a combinação de portas abertas, janelas abertas (ou semiabertas) e alinhamento da direção do vento com a orientação das aberturas são fundamentais para manter os níveis de CO₂ próximos aos valores externos recomendados. Por outro lado, a alta ocupação associada ao fechamento das aberturas conduz ao acúmulo rápido de CO₂, ultrapassando os limites recomendados para a qualidade do ar interior conforme a ANVISA (2003), mesmo com ventilação natural parcial.

Assim, torna-se imprescindível a adoção de estratégias combinadas de ventilação cruzada e ventilação mecânica complementar, especialmente em dias e horários de maior ocupação, contribuindo para ambientes escolares mais saudáveis e mitigando riscos relacionados à Síndrome do Edifício Doente.

4.3. Relação entre ventilação natural, estimativa de ACH e dispersão de CO₂

As características construtivas do edifício e as condições de ocupação permitiram explorar diferentes cenários de ventilação. A Tabela 3 resume as situações observadas, incluindo padrões de abertura de janelas e portas, ocupação e uso de ar-condicionado. Já a Tabela 4 apresenta as concentrações iniciais e finais de CO₂, os valores externos de referência e as velocidades do vento

registradas no interior das salas e nas portas de entrada.

Para aprofundar a compreensão da ventilação efetiva, foi realizada uma estimativa da taxa de renovação de ar (ACH – Air Changes per Hour) com base no comportamento do CO₂ ao longo do tempo, utilizando o modelo de acúmulo com geração contínua baseado nos estudos do NIST (Persily; De Jonge, 2017; Persily; Polidoro, 2022).

Para cada sala e período com aumento expressivo de CO₂, aplicou-se um algoritmo iterativo que testa valores de ACH variando de 0,1 a 10 trocas/hora (passo de 0,01) até que a concentração modelada se iguale à concentração final medida C_{final} dentro de uma tolerância de ±1 ppm.

Foram usados:

- $V=220$ m³ (volume de cada sala do Bloco D)
- $G=N \times 7$ L/h (taxa de geração de CO₂, com N = número de ocupantes)
- $t=50$ min (duração da medição)
- C_{ext}, C_{inicial} e C_{final} conforme Tabela 4

Os resultados para as salas 412 e 413 no dia 13/06 estão na Tabela 5. Valores para outras salas ou dias com pouca variação de CO₂ não puderam ser estimados de forma confiável.

Tabela 5 – Estimativa de ACH para as salas 412 e 413 em 13/06/2025 (modelo do NIST)

Sala	Data	Ocupação (N)	CO ₂ inicial (ppm)	CO ₂ final (ppm)	ACH estimado (trocas/h)
412	13/06	37	673	1313	1,50
413	13/06	35	728	1649	1,40
421	13/06	30	923	1368	1,60

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Cabe destacar que o cálculo do ACH baseado no balanço de massa pressupõe ambientes bem misturados, geração constante de CO₂ e ausência de outras fontes ou sumidouros que possam influenciar as concentrações, o que pode não refletir plenamente a heterogeneidade espacial e temporal da ventilação natural em salas de aula reais. Portanto, os valores de ACH devem ser interpretados como estimativas pontuais indicativas da eficiência da ventilação.

Na sala 412, por exemplo, no dia 13/06 (37 ocupantes, volume de 220 m³, geração estimada de 259 L/h), a concentração de CO₂ aumentou de 673 ppm para 1313 ppm em 50 minutos, resultando em ACH aproximado de 1,5 trocas por hora. Estimativas semelhantes foram obtidas para as salas 413 (~1,4 trocas/hora) e 421 (~1,6 trocas/hora). Esses valores são consideravelmente inferiores ao mínimo recomendado para ambientes escolares (>5 trocas/hora), evidenciando que a ventilação natural, isoladamente, não foi suficiente para diluir o CO₂ em condições de alta ocupação e aberturas fechadas.

A análise reforça a necessidade de combinar estratégias de ventilação natural e mecânica, além de soluções arquitetônicas que favoreçam a renovação efetiva do ar em todo o volume das salas, mitigando riscos associados à Síndrome do Edifício Doente e garantindo ambientes saudáveis e confortáveis.

5. Conclusões

Este estudo demonstrou que a ventilação natural, especialmente quando associada à orientação arquitetônica adequada e ao alinhamento das aberturas com as direções predominantes do vento (sudeste e oeste), é fundamental para a dispersão eficiente do CO₂ em ambientes escolares. A análise integrada dos dados coletados pelo sistema de sensores no Bloco D do IFSULDEMINAS evidenciou que a abertura de portas e janelas contribui significativamente para manter as concentrações de CO₂ próximas aos níveis externos, reduzindo o risco de desconfortos e sintomas relacionados à Síndrome do Edifício Doente (SED).

Por outro lado, em condições de alta ocupação e com portas e janelas majoritariamente fechadas, o acúmulo de CO₂ foi expressivo, ultrapassando os limites recomendados para qualidade do ar interior. A estimativa pontual da taxa de renovação de ar (ACH) revelou valores significativamente inferiores aos recomendados (>5 trocas/hora), destacando que a ventilação natural isolada não é suficiente para garantir a diluição adequada dos poluentes em tais condições.

Os resultados ressaltam a importância de combinar estratégias de ventilação natural e mecânica, aliadas a soluções arquitetônicas que favoreçam a renovação volumétrica do ar em todo o ambiente. A ventilação mecânica, que inclui o uso de ventiladores, exaustores e sistemas de ar-condicionado com renovação de ar externo, torna-se essencial para ambientes escolares, especialmente no contexto brasileiro, onde muitas instituições enfrentam limitações de infraestrutura. Nessas condições, a ventilação natural sozinha muitas vezes não é capaz de garantir a qualidade do ar necessária, sobretudo em períodos de alta ocupação ou em escolas com janelas pequenas ou fechadas.

A implantação de sistemas de ventilação mecânicos adequados permite controlar a renovação do ar independentemente das condições externas, promovendo ambientes mais saudáveis e confortáveis para alunos e profissionais da educação. Contudo, a adoção desses sistemas deve considerar aspectos econômicos e operacionais, priorizando soluções de baixo custo, eficiência energética e facilidade de manutenção, fundamentais para a realidade das escolas brasileiras.

Além disso, o monitoramento contínuo por sensores de baixo custo mostrou-se eficaz para subsidiar a gestão ambiental das salas, fundamentando políticas e práticas para a promoção de ambientes escolares mais saudáveis, confortáveis e produtivos.

Por fim, este estudo reforça a necessidade de ampliar a aplicação de tecnologias de monitoramento e a conscientização sobre ventilação, promovendo a

integração entre estratégias naturais e mecânicas. Essa abordagem é fundamental para a proteção da saúde, a prevenção de doenças relacionadas à má qualidade do ar e o aprimoramento do desempenho acadêmico dos estudantes, contribuindo para ambientes educacionais dignos e sustentáveis.

6. Referências Bibliográficas

ALLEN, Joseph et al. How to assess classroom ventilation: 5-step guide to checking ventilation rates in classrooms. Cambridge: Harvard T.H. Chan School of Public Health. HARVARD HEALTHY BUILDINGS PROGRAM, 2020. Disponível em: <<https://healthybuildings.hsph.harvard.edu/research/schools/ventilation-guide/>>. Acesso em: 27 fev. 2025.

ANDAMON, Mary Myla; RAJAGOPALAN, Priyadarsini; WOO, Jin. Evaluation of ventilation in Australian school classrooms using long-term indoor CO₂ concentration measurements. *Building and Environment*, v. 237, p. 110313, jun. 2023.

ANVISA. RESOLUÇÃO-RE No 09. RESOLUÇÃO-RE No 09, DE 16 DE JANEIRO DE 2003. Disponível em: <https://antigo.anvisa.gov.br/documents/10181/2718376/RE_09_2003_.pdf>. Acesso em 24 jul. 2025.

BARBOSA, André Sarmiento. Biblioteca Modbus IP ESP8266. [S.d.]. Disponível em: <<http://github.com/andresarmiento/modbus-arduino>>. Acesso em: 17 maio 2024.

BARROS, Nelson et al. SchoolAIR: A Citizen Science IoT Framework Using Low-Cost Sensing for Indoor Air Quality Management. *Sensors*, v. 24, n. 1, p. 148, 27 dez. 2023.

BITTENCOURT, Leonardo; CÂNDIDO, Christhina Ventilação Natural em Edificações. PROCEL EDIFICA - Eficiência Energética Em Edificações. Rio de Janeiro: PROCEL EDIFICA, 2010.

CHATZIDIAKOU, Lia et al. Schools' air quality monitoring for health and education: Methods

and protocols of the SAMHE initiative and project. *Developments in the Built Environment*, v. 16, p. 100266, dez. 2023.

CONAMA. 506. Resolução do CONAMA No 506/2024. . 9 jul. 2024, Sec. 1. Disponível em: <https://conama.mma.gov.br/?option=com_sisconama&task=arquivo.download&id=827>. Acesso em: 24 jul. 2025.

GOMES, João Paulo de Toledo; INNOCENTINI, Murilo D.M.; FORMIGONI, Carlos E. Desempenho de sensores de CO₂: comparação experimental entre tecnologias NDIR, óxido metálico e eletroquímico. In: : J.JOSIF-2024. SIMPÓSIO DA PÓS-GRADUAÇÃO DO IFSULDEMINAS. Inconfidentes-MG: 18 dez. 2024. Disponível em: <<https://josif.ifsuldeminas.edu.br/ojs/index.php/anais/article/view/1785>>. Acesso em: 9 jul. 2025

HOBSON, Brodie W. et al. Minimum sensor grid density and configuration to enable CO₂-based demand-controlled ventilation in an office building. *Energy and Buildings*, v. 298, p. 113536, nov. 2023.

JACOBSON, Tyler A. et al. Direct human health risks of increased atmospheric carbon dioxide. *Nature Sustainability*, v. 2, n. 8, p. 691–701, 8 jul. 2019.

MUSTAFA, M.; COOK, M. J.; MCLEOD, R. S. A critical review of ventilation effectiveness in naturally ventilated spaces from the perspective of sustainability and health. *Building and Environment*, v. 270, p. 112471, fev. 2025.

OECD. The Economic Consequences of Outdoor Air Pollution. [S.l.]: OECD, 2016. Disponível em: <https://www.oecd.org/en/publications/the-economic-consequences-of-outdoor-air-pollution_9789264257474-en.html>. Acesso em 24 jul. 2025.

OMS, OMS. Diretrizes globais de qualidade do ar da OMS: partículas inaláveis (MP_{2,5} e MP₁₀), ozônio, dióxido de nitrogênio, dióxido de enxofre e monóxido de carbono. Resumo executivo. [S.l.]: Pan American Health Organization, 2021.

OPENSTREETMAP. OpenStreetMap, [S.d.]. Disponível em: <<https://www.openstreetmap.org/about>>. Acesso em: 15 jul. 2025

PASSOS, Município. Dados gerais do município, [S.d.]. Disponível em: <<https://www.passos.mg.gov.br/dados-gerais-do-municipio>>. Acesso em: 22 jul. 2025

PERSILY, A.; DE JONGE, L. Carbon dioxide generation rates for building occupants. *Indoor Air*, v. 27, n. 5, p. 868–879, set. 2017.

PERSILY, Andrew; POLIDORO, Brian J. Indoor carbon dioxide metric analysis tool. Gaithersburg, MD: National Institute of Standards and Technology (U.S.), 25 mar. 2022. Disponível em: <<https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/TechnicalNotes/NIST.TN.2213.pdf>>. Acesso em: 28 jun. 2025.

PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA. 14850. Política Nacional de Qualidade do Ar. . 2 maio 2024.

REQUIA, Weeberb J.; ROIG, Henrique L.; SCHWARTZ, Joel D. Schools exposure to air pollution sources in Brazil: A nationwide assessment of more than 180 thousand schools. *Science of The Total Environment*, v. 763, p. 143027, abr. 2021.

SCHIRMER, Waldir Nagel et al. A poluição do ar em ambientes internos e a síndrome dos edifícios doentes. *Ciência & Saúde Coletiva*, v. 16, n. 8, p. 3583–3590, ago. 2011.

SCOLARO, T. P.; GHISI, E. Influência da ventilação natural no conforto térmico de ocupantes em edificações com coberturas frias e verdes. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 20.,2024, Maceió. Anais... Maceió: ANTAC, 2024.

SHANDONG RENKE. RS-FXJT-N01Winddirectiontransmitteruser's manual (Type485). , [S.d.]. Disponível em: <<https://instrucenter.com/wp-content/uploads/2022/03/RS-FXJT-N01.pdf>>. Acesso em: 10 maio. 2025

SHEN, Juanyong et al. Evolution of source

contributions during heavy fine particulate matter (PM2.5) pollution episodes in eastern China through online measurements. *Atmospheric Environment*, v. 232, p. 117569, jul. 2020.

SILVA, Saulo Vieira De Oliveira et al. Ventilação natural e qualidade do ar em salas de aula: revisão sistemática da literatura. *PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção*, v. 13, p. e022021, 13 jun. 2022.

SOUZA, Henor Artur De; RODRIGUES, Luciano Souza. Ventilação natural como estratégia para o conforto térmico em edificações. *Rem: Revista Escola de Minas*, v. 65, n. 2, p. 189–194, jun. 2012.

TEIXERIAANGUETH DE ARAUJO, Larissa; DE LUNA SALES, Gustavo. Ventilação natural: estratégia de conforto térmico e eficiência energética para uma edificação residencial multifamiliar em Formosa (GO). *Paranoá*, v. 17, p. e44797, 14 maio 2024.

ZHONG, Jian et al. Impacts of net zero policies on air quality in a metropolitan area of the United Kingdom: Towards world health organization air quality guidelines. *Environmental Research*, v. 236, p. 116704, nov. 2023.