XVIII ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO
XIV ENCONTRO LATINO-AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO
AMBIENTE CONSTRUÍDO E USUÁRIO: PERSPECTIVAS LATINO-AMERICANAS

# Sala de Aula Saudável (SAS): Validação de Dispositivo IoT para monitoramento da renovação do ar

## *Aula Saludable (SAS): Validación de un dispositivo IoT para el monitoreo de la renovación del aire*

## *Healthy Classroom (SAS): Validation of IoT Device for Air Renewal Monitoring*

Conforto Ergonômico e Qualidade Ambiental

*Confort ergonómico y calidad ambiental*

*Ergonomic Comfort and Environmental Quality*

**Xavier, Eric Loque Magalhães**
Mestrando, UVV, Vila Velha/ES, Brasil, eric.xavier@uvvnet.com.br
**Pagel, Erica Coelho**
Doutora, UVV, Vila Velha/ES, Brasil, erica.pagel@uvv.br
**Martins, Ramon Silva**
Doutor, UFES, Vitória/ES. Brasil, ramon.martins@ufes.br

**Resumo**

Com o aumento da temperatura em várias regiões do planeta, o uso dos sistemas de climatização, por meio do ar-condicionado, está cada vez mais crescente nos ambientes escolares. O objetivo deste estudo é apresentar a validação de um dispositivo IoT de baixo custo, denominado Sala de Aula Saudável (SAS), projetado para monitorar a taxa de renovação do ar, sinalizando a necessidade de ações corretivas, como a abertura controlada de portas e janelas. Para validação foi realizado um experimento com monitoramento de dióxido de carbono ($CO_2$), temperatura do ar e umidade relativa do ar, comparação dos resultados com equipamento de referência e análise da consistência dos dados. Os resultados indicaram uma forte correlação das medições entre os dispositivos reforçando o SAS como uma solução de potencial aplicação em ambientes educacionais, contribuindo para a tomada de decisão eficiente do usuário em busca de uma melhor qualidade do ar interior.

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

***Resumen***

*Con el aumento de la temperatura en varias regiones del planeta, los sistemas de aire acondicionado son cada vez más comunes en los entornos educativos. Este estudio tiene como objetivo presentar la validación de un dispositivo IoT de bajo costo llamado Aula Saludable (SAS, por sus siglas en portugués), diseñado para monitorear la tasa de renovación del aire y mostrar la necesidad de acciones correctivas, como la apertura controlada de puertas o ventanas. Para la validación, se realizó un experimento para monitorear la concentración de dióxido de carbono ($CO_2$), la temperatura del aire y la humedad relativa, comparar los resultados con equipos de referencia y analizar la consistencia de los datos. Los resultados indicaron una fuerte correlación de las mediciones entre los dispositivos, reforzando al SAS como una solución con potencial aplicación en entornos educativos y contribuyendo a la toma de decisiones eficiente del usuario en busca de una mejor calidad del aire interior.*

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

***Abstract***

*With the increase in temperature in several regions of the planet, air conditioning systems are increasingly common in educational environments. This study aims to present the validation of a low-cost IoT device called Healthy Classroom (SAS, from the acronym in Portuguese), designed to monitor the air renewal rate and display the need for corrective actions, such as the controlled opening of doors or windows. For validation, an experiment was carried out to monitor carbon dioxide ($CO_2$) concentration, air temperature, and relative humidity, compare the results with reference equipment, and analyze the consistency of the data. The results indicated a strong correlation of the measurements between the devices, reinforcing the SAS as a solution with potential application in educational environments and contributing to the efficient decision-making of the user in search of better indoor air quality.*

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

## Introdução

A má qualidade do ar em ambientes escolares, agravada pela ausência de sistemas adequados de renovação do ar interior, impacta diretamente a saúde e o desempenho cognitivo dos alunos como evidenciado por Shendell et al. (2004). Com o aumento das temperaturas globais e a intensificação de eventos climáticos extremos (Reis Junior et al., 2023), o uso de sistemas de climatização, especialmente do ar-condicionado, tem se tornado mais frequente nesses espaços. No entanto, esses sistemas impactam significativamente no consumo energético e, em muitos casos, não garantem uma renovação eficiente do ar, necessária para a qualidade ambiental e o bem-estar dos ocupantes.

Os aparelhos de ar-condicionado do tipo "*Hi-Wall*" Split, amplamente utilizados em escolas, não possuem mecanismos integrados de ventilação, tornando necessária a adoção de estratégias complementares. Entretanto, para reduzir o consumo energético, esses mecanismos frequentemente são negligenciados, resultando em ambientes herméticos e na acumulação de poluentes, compostos orgânicos voláteis (COVs) e partículas biológicas, que prejudicam a saúde e a concentração dos alunos (Kubba, 2017; Shendell, Prill e Fisk, 2004). As concentrações desses poluentes frequentemente excedem os limites recomendados, elevando os riscos respiratórios (Winck et al., 2022) e impactos cognitivos (Deng e Lau, 2019).

Diante desses desafios, a legislação brasileira estabelece critérios para a qualidade do ar em ambientes climatizados, buscando mitigar os impactos negativos da ventilação inadequada. A Portaria GM/MS nº 3.523/1998 (Brasil, 1998) define diretrizes para a manutenção e o controle da qualidade do ar em sistemas de climatização, estabelecendo requisitos para a limpeza e operação dos equipamentos. Posteriormente, a Lei nº 13.589/2018 (Brasil, 2018) tornou o Plano de Manutenção, Operação e Controle (PMOC) obrigatório para edifícios climatizados de uso coletivo, visando minimizar riscos à saúde dos ocupantes. A ABNT NBR 17.037:2023 (ABNT, 2023) estabelece padrões referenciais para a qualidade do ar interior, recomendando que a concentração interna de $CO_2$ não ultrapasse 700 ppm acima do nível externo. Além disso, a norma define faixas ideais de temperatura, umidade e contaminantes atmosféricos, contribuindo para ambientes mais saudáveis. A ABNT NBR 16.401-3:2008 (ABNT, 2008) e a ASHRAE 62.1:2022 (ASHRAE, 2022) estabelecem diretrizes para a taxa mínima de renovação do ar interior, definindo valores entre 5 e 7,5 L/s por pessoa, conforme a ocupação do ambiente, e utilizado como referência para o dimensionamento de sistemas de climatização em edificações não residenciais, sendo que para ambientes de sala de aula o valor mínimo é de 5 L/s por pessoa.

Diante desse cenário, torna-se necessário o desenvolvimento de soluções tecnológicas que possibilitem o monitoramento contínuo da qualidade do ar interior em salas de aula climatizadas. Nesse contexto, o presente estudo propõe o uso de um dispositivo IoT de baixo custo, projetado para identificar os níveis de renovação do ar interior e indicar estratégias simples e eficientes, como a abertura controlada de portas e janelas, para aumento da taxa de ventilação. É importante colocar que no mercado já existem instrumentos para aferição de parâmetros, tais como, CO2, temperatura do ar, umidade relativa do ar, velocidade do vento, entretanto, não se tem um dispositivo que calcule a taxa de renovação do ar e a compare com as normativas pertinentes, dando um feedback contínuo e imediato ao usuário.

## METODOLOGIA

Este trabalho é composto pelas seguintes etapas metodológicas: a) desenvolvimento do protótipo de monitoramento, b) Calibração e validação.

## DESCRIÇÃO DO PROTÓTIPO DE MONITORAMENTO

O protótipo SAS (Sala de Aula Saudável), ilustrado na Figura 1 (a), foi desenvolvido com foco no baixo custo e facilidade de replicação, permitindo sua aplicação em diferentes ambientes educacionais. Para viabilizar essas características, adotou-se a placa ESP32-S3-Touch-LCD-2.8 com sua parte traseira apresentada na Figura 1 (b), escolhida por sua capacidade de processamento, conectividade sem fio e compatibilidade com aplicações IoT.

**Figura 1 – Protótipo IoT SAS**



(a) Protótipo IoT SAS (b) Placa ESP32-S3-Touch-LCD-2.8

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

O dispositivo integra um microcontrolador dual-core e sensores para monitoramento contínuo da concentração de $CO_2$, temperatura e umidade relativa do ar. As informações captadas são processadas por um algoritmo embarcado, que calcula a taxa de renovação do ar e a compara com os limites normativos estabelecidos pela ABNT NBR 16.401-3 (2008) e

ASHRAE 62.1 (2022). Caso os valores ultrapassem o recomendado, o sistema emite alertas sonoros e visuais para orientar ações corretivas, como a abertura de janelas ou ajustes no sistema de ventilação.

Além da conectividade Wi-Fi e Bluetooth BLE, a placa conta com uma tela sensível ao toque, permitindo a exibição dos dados em tempo real de forma intuitiva. Sua capacidade de armazenamento possibilita o registro das medições para análises posteriores, auxiliando na tomada de decisões para a melhoria da qualidade do ar interior também a longo prazo.

**Sensor SCD41**

O sensor SCD41 (Figura 2), foi desenvolvido pela Sensirion AG para a medição precisa da concentração de dióxido de carbono ($CO_2$) em ambientes internos. Utilizando a tecnologia NDIR fotoacústica (Infravermelho Não Dispersivo), o sensor detecta a absorção de luz infravermelha pelo $CO_2$, convertendo variações de pressão em sinais elétricos. Esse método elimina a necessidade de componentes ópticos complexos, resultando em um dispositivo mais robusto e resistente a flutuações térmicas e mecânicas, garantindo medições estáveis e confiáveis ao longo do tempo.

O sensor opera na faixa de 400 a 5000 ppm de $CO_2$, com precisão de ±40 ppm, e conta com calibração automática (ASC) e forçada (FRC) para manter a exatidão das medições ao longo do tempo. Além do $CO_2$, mede temperatura e umidade relativa do ar, permitindo a compensação de variações ambientais e melhorando a confiabilidade dos dados.

A comunicação ocorre via interface I2C, facilitando a integração com sistemas embarcados e aplicações IoT. Essa característica permite sua conexão com múltiplos dispositivos e possibilita comandos avançados de calibração e controle.

**Figura 2 – Sensor SCD41**




Fonte: SENSIRION AG. SCD4x $CO_2$ sensor datasheet. Versão 1.6. Disponível em: https://www.sensirion.com.

**Cálculo da renovação do ar**

A determinação da taxa de renovação do ar pelo dispositivo IoT Sala de Aula Saudável (SAS) é realizada com base na variação da concentração de $CO_2$ no ambiente. O SAS emprega um

algoritmo embarcado no microcontrolador, que processa os dados coletados em tempo real e calcula a taxa de renovação do ar considerando o volume da sala de aula e a taxa de geração de $CO_2$ pelos ocupantes.

Para isso, utiliza-se o Método de Balanço de Massa Transiente, descrito na Equação 1, para modelar as variações dinâmicas da ventilação e ocupação ao longo do tempo, aprimorando a estimativa da taxa de renovação do ar (Batterman, 2017; Bastien et al., 2024).

**Equação 1**

$$C_i(t) = \frac{6.10^4.n_t.G_p}{Q}\left(1 - e^{-\frac{Q}{V}t}\right) + \left(C_i(0) - C_{out} - \frac{G_p}{Q}\right)e^{-\frac{Q}{V}t} + C_{out}$$

Fonte: Batterman et al.(2017)

A concentração interna de $CO_2$ no tempo *t* é representada por Ci(*t*) e medida em ppm (partes por milhão). O número de ocupantes do ambiente é indicado por $n_t$ , enquanto $G_p$ corresponde à taxa média de emissão de $CO_2$ por pessoa, expressa em litros por minuto por indivíduo. A taxa de renovação do ar, simbolizada por *Q*, é medida em metros cúbicos por hora. O volume do ambiente é representado por *V*, em metros cúbicos. A concentração inicial de $CO_2$ no ambiente é indicada por *Ci(0)*, e a concentração de $CO_2$ do ar de renovação é representada por $C_{out}$, ambas medidas em ppm. O tempo de permanência no ambiente é denotado por *t* e expresso em horas.

A taxa de geração de $CO_2$ por pessoa foi estimada com base na metodologia de Li et al. (2024), adotando-se 0,36 L/s para adultos em posição sentada. A partir das medições realizadas, o sistema calcula a taxa de renovação do ar e verifica sua conformidade com os limites estabelecidos pelas normas ABNT NBR 16.401-3 (2008) e ASHRAE 62.1 (2022).

**Calibração e validação**

Para avaliar a precisão do dispositivo IoT SAS, seu desempenho foi comparado ao HOBO MX1102A, um equipamento de referência calibrado pela ELUS Instrumentação. A escolha do HOBO MX1102A se deve à sua confiabilidade na medição de $CO_2$, temperatura e umidade relativa do ar, permitindo um monitoramento contínuo e preciso dos parâmetros ambientais.

O equipamento registra concentrações de $CO_2$ na faixa de 0 a 5000 ppm, com precisão de ±50 ppm, além de medir temperatura entre 0°C e 50°C (±0,21°C) e umidade relativa de 1% a 90% (±2%). Esses dados permitiram uma comparação detalhada com o SAS, assegurando a consistência das medições e a confiabilidade dos resultados obtidos nos testes.

A validação das medições do SAS foi realizada em uma sala de aula em Vila Velha, Espírito Santo, parte da Região Metropolitana de Vitória. O experimento de campo ocorreu durante a primavera, entre os dias 11/10/2024 e 14/11/2024, com coletas de dados realizadas no período matutino, entre 08h00 e 12h00.

A sala de aula utilizada para a calibração do dispositivo IoT SAS está localizada no terceiro pavimento, a 30 metros acima do nível do mar e 900 metros do litoral. O ambiente, com capacidade para 50 alunos, teve uma taxa de ocupação de 23 pessoas durante a coleta de dados. Possui janelas basculantes voltadas para a fachada noroeste, exposta a uma avenida movimentada, e conta com uma área de 80 m² e pé-direito de 3,30 metros (Figura 3).

**Figura 3 - Sala de Aula utilizada na calibração do dispositivo IoT**



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

O ambiente é climatizado por um sistema de ar-condicionado central do tipo Cassete, com 02 aparelhos de teto com capacidade de 24000 btus cada um, operando ao longo do ano letivo, incluindo o inverno, principalmente no turno matutino e noturno. Durante as medições, manteve-se uma temperatura média de 23°C ±1°C e umidade relativa de 70% ±5%. Durante o funcionamento, as janelas e a porta permaneceram fechadas, garantindo que a renovação do ar ocorresse exclusivamente pelo sistema de climatização.

Os monitores foram instalados a 1,10 metro do piso, em conformidade com a ISO 7726:1998 (ISO, 1998), que estabelece critérios para medições térmicas em ambientes internos. Além disso, foram posicionados a 1,5 metro das paredes, próximos à mesa do professor, de modo a minimizar interferências de infiltração de ar decorrentes da abertura de portas. Essa configuração assegurou que os dados coletados refletissem com precisão as condições ambientais internas, garantindo maior confiabilidade nas medições.

A correlação de Pearson foi utilizada para verificar a precisão das medições do dispositivo IoT Sala de Aula Saudável (SAS) em comparação com o equipamento de referência HOBO MX1102A. Esse método estatístico é amplamente empregado para avaliar a similaridade entre dados coletados por diferentes dispositivos, determinando se os padrões de variação são consistentes.

Como ambos os dispositivos monitoram temperatura, umidade e $CO_2$ em intervalos idênticos, a correlação de Pearson (Equação 2) avalia a correspondência entre as medições. Segundo Fávero et al. (2017), um coeficiente próximo de 1 indica forte correlação, validando a precisão do SAS na replicação dos resultados do HOBO MX1102A.

**Equação 2 - Coeficiente de Pearson**

$$r = \frac{\sum_j X_{ij}X_{i\prime j} - \frac{1}{p}.(\sum_j X_{ij}).(X_{i\prime j})}{\sqrt{\left[\sum_j X_{ij}^2 - -\frac{1}{p}(\sum_j X_{ij})^2\right].\left[\sum_j X_{i\prime j}^2 - -\frac{1}{p}(\sum_j X_{i\prime j})^2\right]}}$$

Fonte: Fávero et al.(2017)

As variáveis $X_{ij}X_{i'j}$ representam os dois conjuntos de dados comparados, correspondendo às observações registradas para cada *i* e *j*. O termo $\sum_j$ indica o somatório aplicado sobre *j*, abrangendo todas as observações do conjunto de dados analisado. O parâmetro p refere-se ao número total de amostras consideradas na análise, ou seja, a quantidade de observações utilizadas no cálculo estatístico.

Embora a correlação de Pearson indique a similaridade entre as medições, ela não avalia a exatidão dos valores registrados. Para isso, foi aplicado o RMSE (*Root Mean Square Error*), ou Raiz do Erro Quadrático Médio, apresentado na Equação 3, que quantifica a proximidade entre os dados do dispositivo Sala de Aula Saudável (SAS) e do HOBO MX1102A.

As medições foram consideradas precisas, pois o RMSE permaneceu dentro da margem de erro dos dispositivos de referência, conforme a literatura e as especificações dos sensores. Além de validar a confiabilidade do SAS, a análise do RMSE identificou discrepâncias pontuais e avaliou a estabilidade das medições.

**Equação 3 - RMSE (*Root Mean Square Error*)**

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(y_i - y_{i\prime})^2}$$

Fonte: Fávero et al.(2017)

Os valores $y_i$ representam as medições observadas, também chamadas de valores reais, enquanto $y_i$, correspondem aos valores previstos ou registrados pelo dispositivo em análise. O parâmetro $n$ indica o total de observações consideradas no estudo, sendo utilizado para avaliar a precisão das medições.

**Investimento**

O investimento necessário para a construção do protótipo, detalhado na Tabela 1, evidencia sua viabilidade econômica em comparação com o HOBO Data Logger MX1102A, cujo custo de aquisição no mesmo período era de R$ 3.553,20. Os valores apresentados para o protótipo correspondem aos componentes importados em abril de 2024, já considerando frete e impostos, proporcionando uma estimativa precisa do investimento total.

**Tabela 1 – Investimento para construção do protótipo**

| Componente | Valor Unitário | Quantidade | Valor Total |
|---|---|---|---|
| ESP32-S3-Touch-LCD-2.8 | R$ 157,88 | 01 | R$ 157,88 |
| Sensor de CO2 SCD41 | R$ 100,79 | 01 | R$ 100,79 |
| Caixa Plástica Montagem PB202 50 X 70 X 97 Patola | R$ 33,61 | 01 | R$ 33,61 |
| TOTAL | | | R$ 329,36 |

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

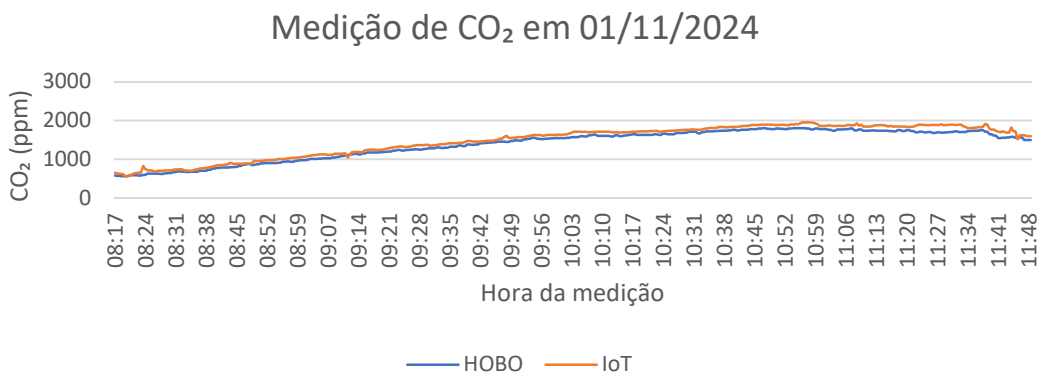
## RESULTADOS E DISCUSSÕES

A análise dos dados coletados pelo dispositivo IoT SAS e pelo equipamento de referência HOBO MX1102A demonstrou uma forte correlação entre as medições realizadas. O estudo avaliou três parâmetros principais, sendo eles a concentração de dióxido de carbono, a temperatura do ar e a umidade relativa do ambiente. Os resultados evidenciaram a precisão do protótipo, reforçando seu potencial como uma solução viável para o monitoramento da qualidade do ar interior em salas de aula climatizadas.

A medição da concentração de dióxido de carbono apresentou uma correlação de Pearson de 0,97, indicando que os valores registrados pelo SAS e pelo HOBO estão alinhados, com variações mínimas entre os dispositivos. O cálculo do erro quadrático médio resultou em 67,4 ppm, um valor dentro da faixa aceitável considerando que os sensores utilizados possuem uma precisão de ±50 ppm. Esse nível de concordância confirma a confiabilidade do protótipo

na detecção de alterações na concentração de $CO_2$, fator essencial para o monitoramento da renovação do ar. A comparação entre os dispositivos pode ser visualizada na Figura 4.

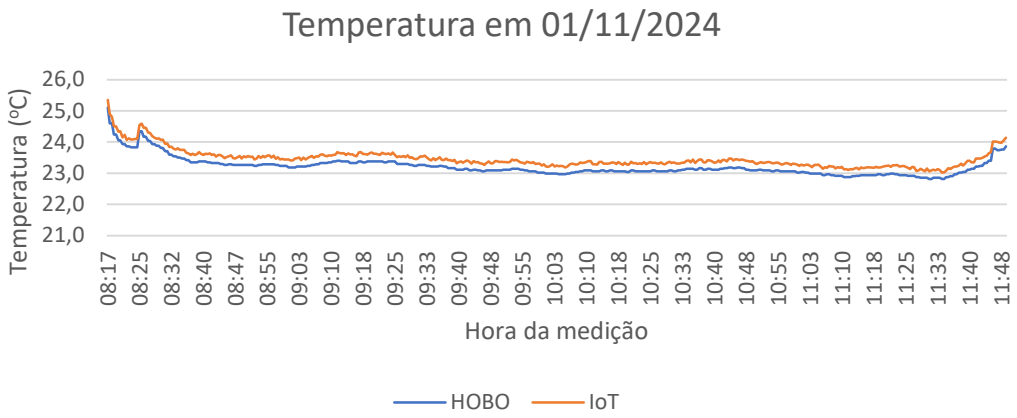
**Figura 4 - Comparação entre o HOBO e o dispositivo IoT em relação às leituras de $CO_2$**




Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

A análise da temperatura do ar também revelou uma forte correlação entre os dispositivos, atingindo um coeficiente de 0,96. O erro quadrático médio foi de 0,4°C, demonstrando que as medições realizadas pelo SAS apresentam uma precisão elevada. Foi observado que os valores registrados pelo protótipo estavam aproximadamente 0,5°C acima dos valores medidos pelo HOBO, o que motivou uma investigação mais detalhada. Identificou-se que o posicionamento do sensor dentro do dispositivo influenciava a leitura, devido ao aquecimento interno da placa ESP32. A solução para essa interferência foi o reposicionamento do sensor, garantindo maior confiabilidade nas medições subsequentes. A Figura 5 apresenta os valores obtidos para temperatura do ar comparando o dispositivo SAS e o equipamento de referência.

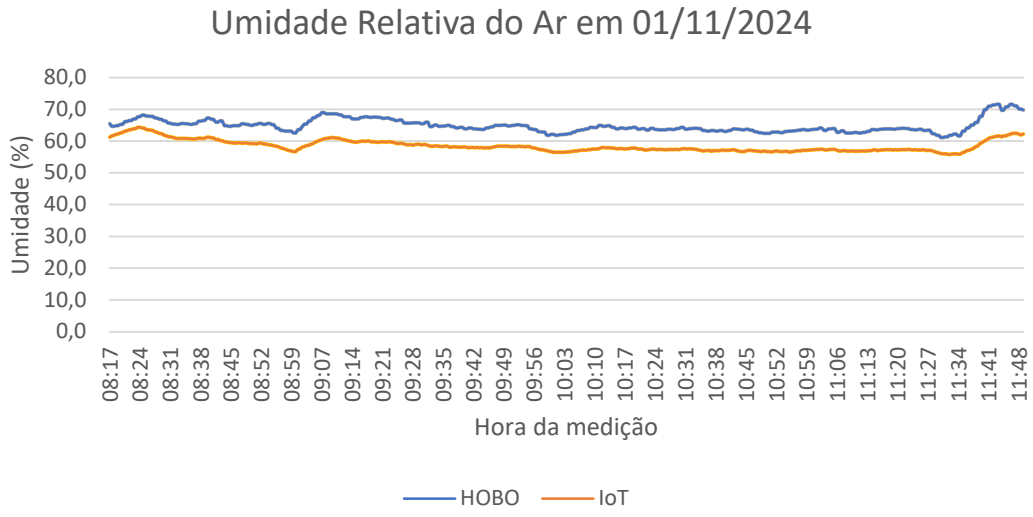
**Figura 5- Comparação entre o HOBO e o dispositivo IoT em relação às leituras de Temperatura**




Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

As medições da umidade relativa do ar demonstraram um coeficiente de correlação de 0,92, o que indica uma boa concordância entre os dados coletados pelos dois dispositivos. O erro quadrático médio foi de 1,3%, um valor compatível com as especificações dos sensores utilizados. Pequenas variações foram identificadas, mas não comprometeram a interpretação dos dados, garantindo a confiabilidade do monitoramento realizado pelo SAS. A Figura 6 apresenta a comparação entre os dispositivos para esse parâmetro.

**Figura 6- Comparação entre o HOBO e o dispositivo IoT em relação às leituras de umidade relativa do ar**




Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Os resultados obtidos demonstram a capacidade do dispositivo SAS de monitorar com precisão os principais indicadores da qualidade do ar interior. A alta correlação com o equipamento de referência demonstra que o protótipo pode ser utilizado como uma alternativa acessível para o acompanhamento contínuo das condições ambientais em salas de aula. A implementação de ajustes técnicos, como a calibração dos sensores e o seu posicionamento adequado, mostrou-se fundamental para aprimorar a precisão das medições.

De forma geral, o SAS apresentou um desempenho satisfatório, confirmando sua viabilidade como uma solução de baixo custo para o monitoramento da qualidade do ar interior. O estudo reforça a importância de ajustes técnicos, como a calibração e o posicionamento adequado dos sensores, para garantir medições mais precisas. O protótipo se destaca como uma ferramenta eficiente para promover ambientes mais saudáveis, especialmente em contextos escolares, onde a qualidade do ar é fundamental para o bem-estar e o desempenho dos ocupantes.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

O experimento realizado com o dispositivo IoT *Sala de Aula Saudável* (SAS) demonstrou sua precisão e confiabilidade ao ser comparado com o equipamento de referência HOBO MX1102A $CO_2$. Os resultados para concentração de $CO_2$, temperatura e umidade relativa do ar permaneceram dentro da faixa de precisão especificada, comprovando a eficácia do protótipo no monitoramento da qualidade do ar interior. A alta correlação de Pearson e os baixos desvios médios confirmam a capacidade do SAS de replicar com eficiência as medições do equipamento de referência. Ajustes técnicos, como o reposicionamento do sensor de temperatura, contribuíram para aprimorar a precisão das medições. Tem-se que o SAS é uma solução de baixo custo, com desempenho consistente e confiável, sendo uma alternativa viável para o monitoramento da taxa da renovação do ar em salas de aula e podendo ser replicável com os devidos ajustes a outros ambientes climatizados. O dispositivo é uma ferramenta acessível para acompanhamento da qualidade do ar, promovendo ambientes mais saudáveis.

Futuras melhorias podem incluir a integração de sensores para monitoramento de outros poluentes, além da integração com sistemas de automação das aberturas do edifício. O aprimoramento do dispositivo também envolve o desenvolvimento de algoritmos avançados para análise preditiva, melhorando a gestão da qualidade do ar em ambientes escolares.

## Referências


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 16.401-3: Instalações de Ar-Condicionado.** Rio de Janeiro: ABNT, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 17.037: 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 $CO_2$-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. **Portaria Nº 3.523**, de 28 de agosto de 1998. Brasília. Disponível em: <https://bvsms.saude.gov.br >. Acesso em: 30 maio. 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.

FÁVERO, Luiz Paulo; BELFIORE, Patrícia. **Manual de análise de dados: estatística e modelagem multivariada com Excel®, SPSS® e Stata®**. Elsevier Brasil, 2017.

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

KUBBA, Sam. **Handbook of green building design and construction: LEED, BREEAM, and Green Globes**. Butterworth-Heinemann, 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com>. Acesso: 06 ago. 2024.

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

REIS JUNIOR, Neyval Costa et al. **Mudanças climáticas: efeitos sobre o Espírito Santo.** Jundiaí: Paco Editorial, 2023. 248 p. ISBN 978-85-462-2475-3.

SHENDELL, Derek G. et al. Associations between Classroom $CO_2$ 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.