

Dissertação

Mestrado em Engenharia da Energia e do Ambiente

***Visualização e análise de dados de qualidade
do ambiente interior em edifícios***

RODRIGO JOEL LÓPEZ MEDINA

Leiria, Portugal

Abril de 2026

Dissertação

Mestrado em Engenharia da Energia e do Ambiente

***Visualização e análise de dados de qualidade
do ambiente interior em edifícios***

RODRIGO JOEL LÓPEZ MEDINA

Dissertação de Mestrado realizada sob a orientação da Doutora Sandra de Jesus Martins Mourato, Professora Adjunta da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria, e sob a coorientação do Doutor Hermano Joaquim dos Santos Bernardo, Professor adjunto da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria.

Leiria, Portugal

Abril de 2026

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Dedicatória

Aos meus pais, cuja sabedoria, amor e exemplo moldaram o meu caminho e iluminaram cada passo desta jornada. A vossa força, paciência e dedicação ensinaram-me o valor do esforço, da integridade e da perseverança. Obrigado por terem sido o meu primeiro exemplo e o alicerce sobre o qual construí este percurso.

Aos meus irmãos, companheiros de vida e de sonhos, pelo apoio incondicional, pela amizade e pelas palavras que tantas vezes deram alento nos momentos de maior desafio. Esta conquista é também vossa, um reflexo do amor e da união que sempre me inspiraram.

A todos aqueles que já partiram, mas continuam vivos na minha memória e no meu coração. Que este trabalho seja uma pequena homenagem ao amor, ao exemplo e às saudades que deixaram.

Com profunda gratidão e carinho, dedico-vos este trabalho, fruto do vosso exemplo e da confiança que me deram ao longo do caminho.

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Agradecimentos

À minha família, pela paciência infinita ao longo deste trabalho, pelo apoio incondicional nos momentos de maior cansaço e pelas palavras de incentivo que me deram forças para continuar. O vosso carinho, presença e compreensão tornaram este percurso mais leve e ajudaram-me a concretizar esta dissertação.

Aos meus amigos, pela presença constante, pela empatia e pela alegria partilhada, que transformaram o cansaço em motivação e os desafios em oportunidades de crescimento. Obrigado por celebrarem comigo cada pequena conquista ao longo deste processo.

Aos professores e docentes da Escola, pela dedicação, pelo rigor académico e pelas lições que ultrapassaram o âmbito das aulas, contribuindo de forma inestimável para o meu desenvolvimento pessoal e profissional.

Aos meus orientadores e à equipa académica que acompanhou esta investigação, deixo um profundo agradecimento pela orientação atenta, pelas sugestões pertinentes e por estimularem o pensamento crítico e a busca constante pela excelência. A vossa orientação foi essencial para conferir estrutura, coerência e significado a este trabalho.

A todos aqueles que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização desta dissertação, expresso a minha mais sincera gratidão. Cada palavra e cada gesto de apoio fizeram parte desta conquista.

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Resumo

O presente estudo teve como objetivo desenvolver um *dashboard* interativo em Power BI, capaz de visualizar e analisar, em tempo real, indicadores de qualidade do ar e de conforto em salas de aula, permitindo igualmente a consulta de dados históricos, de forma a facilitar a monitorização contínua e a tomada de decisão baseada em dados. Foram realizadas medições no interior da sala DS.00.12B e no exterior do Edifício B do Campus 2 do Politécnico de Leiria para monitorizar a concentração de CO₂, a temperatura do ar, a humidade relativa do ar, as partículas em suspensão PM_{2,5} e PM₁₀, bem como a iluminância. A metodologia combinou análise temporal e comparação com valores de referência, permitindo caracterizar o comportamento ambiental sob diferentes condições de funcionamento. Os resultados mostraram que os níveis médios de CO₂ nas salas se mantiveram dentro de intervalos aceitáveis para espaços educativos, embora tenham sido observados picos pontuais associados à elevada ocupação ou à ventilação insuficiente. A temperatura interior manteve-se estável, entre 17 °C e 26 °C, evidenciando o efeito amortecedor do edifício. A humidade relativa do ar operou próxima do limite superior da faixa de conforto recomendada, com valores médios entre 60 e 67 %, o que reflete a influência direta das condições externas. As concentrações de partículas PM_{2,5} e PM₁₀ foram, em média, reduzidas e não representaram risco contínuo, ainda que tenham sido verificados valores elevados em eventos isolados de ressuspensão de poeiras. A iluminância foi o parâmetro com o maior número de não conformidades: identificaram-se situações de sobreiluminação com estores abertos, níveis insuficientes em condições noturnas e baixa uniformidade ao longo do dia. A integração dos dados permitiu identificar prioridades de melhoria orientadas para a gestão operacional: ventilação ajustada à ocupação para reduzir picos de CO₂, controlo higrométrico em dias húmidos, reforço das rotinas de limpeza em zonas de maior ressuspensão de poeiras e, em especial, um plano de otimização da iluminação que considere controlo solar, redistribuição fotométrica e adequação das luminárias. Conclui-se que o estudo fornece uma base técnica sólida para a monitorização da qualidade do ar e do conforto em ambientes educativos, apoiando a tomada de decisão.

Palavras-chave: Qualidade do ar interior; ventilação; partículas em suspensão; conforto térmico; iluminação em ambientes educativos.

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Abstract

This study aimed to develop an interactive dashboard in Power BI capable of viewing and analysing, in real time, air quality and comfort indicators in classrooms, while also allowing historical data to be consulted to facilitate continuous monitoring and data-based decision-making. Measurements were taken inside room DS.00.12B and outside Building B of Campus 2 of the Polytechnic Institute of Leiria to monitor CO₂ concentration, air temperature, relative humidity, PM_{2.5} and PM₁₀ suspended particles, and illuminance. The methodology combined temporal analysis, indoor-outdoor comparison, and benchmarking against reference values, enabling the characterisation of environmental behaviour under different operating conditions. The results showed that average CO₂ levels in the classrooms remained within acceptable ranges for educational spaces, although occasional peaks associated with high occupancy or insufficient ventilation were observed. Indoor temperature remained stable between 17 °C and 26 °C, highlighting the building's buffering effect. Relative humidity operated close to the upper limit of the recommended comfort range, with mean values around 60-67%, reflecting the direct influence of outdoor conditions. PM_{2.5} and PM₁₀ particle concentrations were, on average, low and did not pose a continuous risk, although high values were observed during isolated dust resuspension events. Illuminance was the parameter with the highest number of non-compliances, including over-illumination when blinds were open, insufficient levels under nighttime conditions, and low uniformity at different times of the day. Data integration enabled the identification of improvement priorities focused on operational management, including occupancy-adjusted ventilation to mitigate CO₂ peaks, hygrometric control on humid days, reinforcement of cleaning routines in areas prone to dust resuspension, and, in particular, an optimised lighting plan incorporating solar control, photometric redistribution, and appropriate luminaires. The study concluded that it provides a solid technical basis for monitoring air quality and comfort in educational environments, supporting decision-making.

Keywords: indoor air quality; ventilation; particulate matter; thermal comfort; educational lighting.

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Lista de figuras

Figura 1 - Concentração de CO ₂ em diferentes níveis numa sala de aula. Fonte: Felisi et al. (2021).	8
Figura 2 - Ventilação natural. Fonte: Mundielectro (2024).	9
Figura 3 - Vantagens da ventilação mecânica. Fonte: Mundielectro (2024).	10
Figura 4 - Partículas em suspensão. Fonte: Metropol (2024).	13
Figura 5 - Fatores ambientais e pessoais para criar as condições adequadas para o conforto térmico. Fonte: Soler & Palau (2022).	17
Figura 6 - (a) Vista aérea do Campus 2, com identificação dos Edifícios B e D e localização das salas DS.00.12B e DS.00.09; (b) Plano do Edifício D, com identificação das salas monitorizadas; (c) Localização do ponto de medição no exterior do Edifício B.	34
Figura 7 – Grelha para medição da iluminância (norma EN 12464-1:2017). (a) Laboratório de Energia DS.00.09 (94 pontos). (b) Sala Projeto Civil DS.00.12B (68 pontos).	37
Figura 8 - Estrutura geral do sistema de visualização.	40
Figura 9 - Fluxo metodológico de dados e conceção funcional do <i>dashboard</i> no Power BI.	41
Figura 10 - Comparação entre os níveis de CO ₂ interior e exterior na sala DS.00.12B e o limiar de referência, período: 18 de novembro a 16 de dezembro de 2024.	46
Figura 11 - Comparação entre a concentração de CO ₂ medida no interior da sala DS.00.12B e no exterior face ao limiar de referência, período: 3 de março a 3 de abril de 2025.	47
Figura 12 - Evolução da concentração de CO ₂ durante os períodos noturnos analisados. Período de 2024.	49
Figura 13 - Curvas de decaimento logarítmico do CO ₂ utilizadas no cálculo da taxa de renovação do ar (AER). Período de 2024.	49
Figura 14 - Evolução da concentração de CO ₂ durante os períodos noturnos analisados. Período de 2025.	50
Figura 15 - Curvas de decaimento logarítmico do CO ₂ utilizadas no cálculo da taxa de renovação do ar (AER). Período 2025.	50
Figura 16 - Temperatura do ar no interior da sala de aula DS.00.12B do edifício D e no exterior do edifício B - Período de referência: 16 de novembro a 16 de dezembro de 2024.	52
Figura 17 – Temperatura do ar no interior da sala de aula DS.00.12B do edifício D e no exterior do edifício B - Período de referência: 3 de março a 3 de abril de 2025.	53

Figura 18 - Comparação entre a humidade relativa do ar medida no interior da sala DS.00.12B e no exterior face ao limiar de referência, período: 16 de novembro a 16 de dezembro de 2024.....	55
Figura 19 - Comparação entre a humidade relativa do ar medida no interior da sala DS.00.12B e no exterior face ao limiar de referência, período: 3 de março a 3 de abril de 2025.	56
Figura 20 - Comparação entre as PM _{2,5} medidas no interior da sala DS.00.12B e no exterior face ao limiar de referência, período: 16 de novembro a 16 de dezembro de 2024.	57
Figura 21 - Comparação entre as PM _{2,5} medidas no interior da sala DS.00.12B e no exterior face ao limiar de referência, período: 3 de março a 3 de abril de 2025.	58
Figura 22 - Comparação entre as PM ₁₀ medidas no interior da sala DS.00.12B e no exterior face ao limiar de referência, período: 16 de novembro a 16 de dezembro de 2024.	59
Figura 23 - Comparação entre as PM ₁₀ medidas no interior da sala DS.00.12B e no exterior face ao limiar de referência, período: 3 de março a 3 de abril de 2025.	60
Figura 24. Escala de iluminância utilizada na análise, com valores de referência expressos em lux.	61
Figura 25. Medição da iluminância (manhã) (norma EN 12464-1). (a) Iluminação artificial com persianas fechadas. (b) Iluminação artificial com persianas abertas. (c) Iluminação artificial desligada com persianas abertas.....	63
Figura 26 - Medição da iluminância (tarde/noite) (norma EN 12464-1). (a) Iluminação artificial com persianas fechadas. (b) Iluminação artificial com persianas abertas. (c) Iluminação artificial desligada e persianas aberta. (d) (noite). Iluminação artificial.....	64
Figura 27 - Medição da iluminância (manhã) (norma EN 12464-1). (a) Iluminação artificial com persianas fechadas. (b) Iluminação artificial com persianas abertas. (c) Iluminação artificial desligada e persianas abertas.	66
Figura 28 - Medição da iluminância (tarde/noite) (norma EN 12464-1). (a) Iluminação artificial com persianas fechadas. (b) Iluminação artificial com persianas abertas. pontos de acordo com a legislação. (c) Iluminação artificial desligada e persianas abertas. (d) (noite). Iluminação artificial.	67
Figura 29. Ecrã inicial do <i>dashboard</i> com opções para navegar pelos diferentes modos, histórico e tempo real.....	69
Figura 30 - Representação gráfica do histórico de dados com indicadores, filtros e gráficos interativos, permitindo análise de tendências e exportação para Excel.....	70
Figura 31 - Painel de avaliação geral do modo histórico, com comparação de dados, média e identificação do valor máximo com data e hora.	71
Figura 32 - Seletor do intervalo temporal e seleção de medições internas/externas no modo histórico do painel de controlo.	71

Figura 33 - Indicadores da média geral dos parâmetros no intervalo temporal selecionado no modo histórico.	72
Figura 34 - Gráficos da evolução dos parâmetros ambientais no intervalo de datas selecionado no modo histórico.....	72
Figura 35 - Tabela detalhada de transferência de dados no formato Excel do modo histórico.	73
Figura 36 - Representação em tempo real com indicadores e séries temporais por minuto de CO ₂ , PM _{2,5} , PM ₁₀ , temperatura do ar (°C) y humidade relativa do ar (HR), distinguindo entre ambientes interior e exterior.....	73
Figura 37 - Indicadores em tempo real dos parâmetros ambientais, com comparação entre ambientes interior e exterior.....	74
Figura 38 - Representação em tempo real, ao longo de 24 horas, dos principais parâmetros ambientais, com valores interiores em barras e exteriores em linha.	74
Figura 39. Cronograma de implementação das medidas de monitorização e correção....	85
Figura 40. Modelo integrado de gestão da Qualidade da QAI e do conforto ambiental.	86

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Lista de tabelas

Tabela 1 - Limiar de proteção e margem de tolerância para os poluentes físico-químicos	23
Tabela 2 - Requisitos de concentração de CO ₂ nas salas de aula em diferentes países	24
Tabela 3 - Quadro regulamentar para a iluminação dos edifícios.....	24
Tabela 4 - Principais componentes do Power BI.....	29
Tabela 5 - Equipamentos utilizados	35
Tabela 6 – Resumo das principais configurações dos equipamentos utilizados.....	36
Tabela 7 - Períodos de medição e caracterização da recolha de dados.	42
Tabela 8 - Definição das variáveis e parâmetros do método do decaimento de CO ₂	43
Tabela 9 - Concentrações máximas de CO ₂ registadas e datas em que ocorreram.....	47
Tabela 10 - Episódios noturnos selecionados para o cálculo da AER.....	48
Tabela 11 - Temperaturas do ar máximas registadas e datas em que ocorreram.....	53
Tabela 12 - Valores máximos de humidade relativa do ar registados e datas em que ocorreram	56
Tabela 13 - Concentrações máximas de PM _{2,5} e datas em que ocorreram	58
Tabela 14 - Concentrações máximas de PM ₁₀ e datas em que ocorreram.....	60
Tabela 15 - Indicadores de desempenho luminoso no laboratório segundo diferentes cenários (manhã).....	62
Tabela 16 - Indicadores de desempenho luminoso no laboratório segundo diferentes cenários (tarde e noite)	64
Tabela 17 - Indicadores de desempenho luminoso na Sala Projeto Civil segundo diferentes cenários (manhã).....	65
Tabela 18 - Indicadores de desempenho luminoso na Sala Projeto Civil segundo diferentes cenários (tarde e noite)	67
Tabela 19 - Período Setembro a Dezembro 2024.....	98
Tabela 20 - Período de Fevereiro a Junho de 2025	98
Tabela 21 - Campanha de medição da iluminância	99

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Lista de siglas

AER	<i>Air exchange rate</i>
ANSI	<i>American National Standards Institute</i>
ASHRAE	<i>American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers</i>
BIM	<i>Building Information Modeling</i>
BI	<i>Business Intelligence</i>
COV	Compostos orgânicos voláteis
CO ₂	Dióxido de Carbono
CO	Monóxido de Carbono
DCV	<i>Demand-Controlled Ventilation</i>
EPBD	<i>Energy Performance of Buildings Directive</i>
EPA	<i>Environmental Protection Agency</i>
GIS	<i>Geographic Information Systems</i>
HR	Humidade relativa
HRV	<i>Heat Recovery Ventilation</i>
IDAEA	Instituto de Diagnóstico Ambiental e Estudos da Água
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
NP	Norma Portuguesa
LED	<i>Light-emitting diode</i>
OMS	Organização Mundial da Saúde
PM	<i>Particulate Matter</i>
PMV	<i>Predicted Mean Vote</i>
PPD	<i>Predicted Percentage of Dissatisfied</i>
QAI	Qualidade do Ar Interior
REHVA	<i>Federation of European Heating, Ventilation and Air Conditioning Associations</i>
RITE	Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios (Espanha)

RSECE	Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios
UE	União Europeia
UFC	Unidades Formadoras de Colónias

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Índice

1. Introdução.....	1
1.1. Enquadramento do tema.....	1
1.2. Problema de investigação.....	2
1.3. Objetivo do estudo	2
1.4. Questões de investigação e hipóteses	3
1.4.1. Questões de investigação:.....	3
1.4.2. Hipótese.....	3
1.6. Estrutura da Dissertação.....	3
2. Revisão da Literatura	4
2.1. Qualidade do ambiente interior	4
2.2. Parâmetros de avaliação da qualidade do ambiente interior	7
2.2.1. Concentração de CO ₂ e ventilação.....	7
2.2.2. Compostos orgânicos voláteis (COVs).....	11
2.2.3. Partículas em suspensão (PM _{2,5} e PM ₁₀).....	12
2.2.4. Parâmetros microbiológicos	14
2.2.5. Conforto térmico	16
2.2.6. Iluminação e conforto visual.....	18
2.3. Legislação e Normas	20
2.3.1. Normas internacionais	20
2.3.2 Enquadramento legal na União Europeia e em Portugal.....	21
2.3.3. Normas e Limiares Aplicáveis aos Parâmetros de Qualidade do Ar Interior.....	23
2.4 Estratégias para otimizar a qualidade ambiental em espaços educativos	26
2.5. Power BI e Visualização de Dados Ambientais.....	28
2.5.1. Conceitos de Power BI e Ferramentas.....	28
2.5.2. Aplicações do Power BI	29
3. Metodologia	32
3.1. Caracterização dos Ambientes Monitorizados	32
3.2. Equipamentos e técnicas de medição.....	34
3.2.1 Equipamentos de medição utilizados	34
3.2.2. Configuração dos equipamentos.....	35
3.2.3 Definição da malha para a medição da iluminância	36
3.3. Recolha e Integração de Dados Ambientais	38
3.3.1. Procedimentos de recolha e análise dos dados	38
3.4. Processamento e Modelação dos Dados.....	38

3.4.1. Limpeza e Validação dos Dados	38
3.4.2. Modelos Matemáticos e Estatísticos	39
3.5. Desenvolvimento do <i>Dashboard</i> em Power BI	39
3.5.1. Arquitetura e Fluxo de Dados.....	39
3.5.2. Design das Visualizações e Funcionalidades.....	40
3.6 Período de medição e recolha de dados	41
3.7 Taxa de Renovação do Ar	42
3.7.1 Método do Decaimento do CO ₂	42
3.7.2 Critério de seleção dos períodos de análise.....	43
3.7.3 Enquadramento normativo de referência para a avaliação	43
4. Resultados e Discussão.....	45
4.1. Resultados da monitorização	45
4.1.1. Análise da concentração de CO ₂ interior e exterior	45
4.1.2. Temperatura	51
4.1.3. Humidade relativa do ar	54
4.1.4. PM _{2,5} e PM ₁₀	57
4.1.5. Iluminação	61
4.2. Visualização e funcionalidade do <i>dashboard</i>	68
4.2.1. Integração dos dados no Power BI.	68
4.2.2. Vantagens da visualização interativa para a interpretação e gestão dos dados ambientais.	68
4.2.3 Descrição das principais interfaces do <i>dashboard</i>	68
4.3. Discussão	76
4.3.1. Implicações dos resultados para a gestão da QAI.	76
4.3.2. Limitações da monitorização e do <i>dashboard</i>	80
4.4. Propostas para melhoria da qualidade do ambiente interior.....	82
4.4.1 Objetivos e metas quantificáveis.....	82
4.4.2 Medidas por horizonte temporal.....	82
4.4.3 Impacto esperado e justificação.....	85
4.4.4 Governação, operação, acompanhamento e mitigação de riscos	86
5. Conclusões e trabalhos futuros.....	88
Anexo	97
Anexo I - Script de web scraping	97
Anexo II - Parâmetros avaliados	98
Anexo III - Medições de iluminância.....	99

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

1. Introdução

1.1. Enquadramento do tema

A preocupação com a qualidade do ar interior e o conforto ambiental em espaços fechados tem-se tornado cada vez mais importante em ambientes académicos, institucionais e de cuidados de saúde. Vários estudos têm demonstrado que condições ambientais inadequadas, como elevada concentração de dióxido de carbono (CO₂), presença de partículas (PM₁₀, PM_{2,5} e PM₁), temperaturas do ar extremas ou níveis inadequados de humidade relativa do ar, têm impacto negativo na saúde, na concentração e no desempenho cognitivo das pessoas, especialmente em contextos educativos. Alunos e professores que passam várias horas em espaços fechados, sem ventilação adequada ou monitorização ambiental, podem sentir fadiga, sonolência, irritabilidade ou perda de atenção, comprometendo, assim, o processo de ensino-aprendizagem (Al-Jokhadar et al., 2023; Blanco et al., 2022; Brink et al., 2022; Toyinbo, 2023).

Neste cenário, as instituições de ensino enfrentam um duplo desafio: por um lado, devem garantir condições de vida seguras e saudáveis nas suas salas de aula; por outro lado, são chamadas a integrar novas tecnologias que lhes permitam gerir estes ambientes de forma eficiente e preventiva e de acordo com a regulamentação em vigor. A nível europeu, diretivas como a 2008/50/CE sobre a qualidade do ar exterior estabelecem valores-limite, limiares e valores-alvo para vários poluentes, e no contexto português, decretos como o Despacho n.º 1618/2022 apontam para a necessidade de controlar os parâmetros de conforto térmico e de qualidade do ar nos espaços escolares.

Graças ao avanço da tecnologia digital, é possível utilizar ferramentas de visualização interativa, como o Power BI, que permitem processar grandes volumes de informação em tempo real, sendo uma das plataformas mais acessíveis e poderosas para o desenvolvimento de *dashboards* que integram dados de diferentes fontes, facilitando sua interpretação por meio de gráficos, indicadores e mapas dinâmicos. Ao conectar esta ferramenta aos dispositivos de medição da qualidade do ambiente, abre-se a possibilidade de construir sistemas de monitorização ambiental que, ao mesmo tempo, sejam funcionais e pedagógicos, na medida em que sensibilizam a comunidade educativa para a importância do ambiente físico para a qualidade educativa.

Consequentemente, este estudo é proposto como uma contribuição concreta para o desenvolvimento de soluções inteligentes para a melhoria do bem-estar dos estudantes, por meio da conceção de um *dashboard* no Power BI que integra medições reais dos ambientes interior e exterior de um campus de uma instituição de ensino superior,

permitindo uma visualização clara e atempada da conformidade das condições ambientais com as normas estabelecidas.

1.2. Problema de investigação

Apesar dos avanços tecnológicos no desenvolvimento de sensores ambientais de baixo custo, muitas instituições educativas ainda carecem de mecanismos eficazes e acessíveis para a monitorização sistemática dessas condições, uma vez que as tecnologias disponíveis costumam ser caras e pouco adaptadas aos ambientes escolares, o que dificulta a sua implementação em grande escala. Além disso, as informações ambientais, quando disponíveis, muitas vezes não são integradas de forma visual e intuitiva para os utilizadores responsáveis por tomar decisões operacionais ou pedagógicas.

Esta situação demonstra a necessidade de desenvolver ferramentas digitais que permitam a recolha e a análise de dados ambientais, em tempo real e histórico, e a sua visualização de forma acessível e interativa, facilitando, assim, a interpretação dos indicadores de qualidade do ar e de conforto térmico, e que, além disso, estejam em conformidade com a legislação nacional e internacional em vigor em matéria de saúde ambiental em edifícios de ensino.

Reconhece-se uma lacuna técnica e operacional que limita a capacidade institucional de agir de forma preventiva e proativa diante de situações de risco ambiental. Perante este desafio, a presente investigação propõe a conceção e validação de uma ferramenta digital integradora, baseada em dados provenientes de sensores ambientais, que permita às instituições de ensino realizar um acompanhamento contínuo das condições ambientais dos seus espaços, apresentar em tempo real indicadores-chave de qualidade do ar e conforto térmico, e apoiar a tomada de decisões informadas mediante a comparação dos valores obtidos com os limites estabelecidos pela regulamentação vigente. Esta ferramenta pretende tornar-se um recurso acessível e eficaz para as instituições de ensino, apoiando a melhoria dos ambientes de aprendizagem e reforçando a sua capacidade de gestão ambiental.

1.3. Objetivo do estudo

O presente estudo tem como objetivo analisar as condições de qualidade do ar interior e conforto ambiental em salas de uma instituição de ensino superior, através da monitorização de parâmetros ambientais (CO₂, temperatura do ar, humidade relativa do ar, PM_{2,5}, P M₁₀ e iluminação) e da sua integração num *dashboard* interativo em Power BI, com o objetivo de facilitar a interpretação dos dados, avaliar o cumprimento dos critérios normativos e apoiar a tomada de decisões baseada em evidências.

1.4. Questões de investigação e hipóteses

1.4.1. Questões de investigação:

1. ¿Em que medida os parâmetros ambientais monitorizados no interior da sala de aula (CO₂, temperatura do ar, humidade relativa do ar, PM_{2,5}, P M₁₀ e iluminação) satisfazem os critérios normativos nacionais e europeus de qualidade do ar interior e conforto ambiental em contexto educativo?

2. Como se comportam as condições ambientais interiores e exteriores durante o período de estudo?

3. ¿De que forma a integração de dados de sensores ambientais numa plataforma de visualização interativa em Power BI pode apoiar, de forma contínua e objetiva, a tomada de decisão orientada para a melhoria da qualidade do ar interior em Instituições de Ensino Superior (IES)?

1.4.2. Hipótese

As condições de ventilação da sala de aula são insuficientes para evitar episódios de acumulação de CO₂ durante períodos de ocupação, o que pode ser identificado e gerido eficazmente através da visualização integrada de dados num *dashboard* interativo.

1.6. Estrutura da Dissertação

O presente trabalho está organizado nos capítulos seguintes:

Capítulo I - Introdução: apresenta-se a contextualização, o problema de investigação, os objetivos, as questões e hipóteses, e a organização geral do estudo.

Capítulo II - Enquadramento teórico: são apresentados conceitos-chave relacionados com a qualidade do ar interior, o conforto ambiental, a regulamentação aplicável, as ferramentas de visualização de dados, entre outros, com especial ênfase em sua utilização no contexto das IES.

Capítulo III - Metodologia: descreve-se o desenho do estudo, a seleção dos dispositivos de medição, os procedimentos de recolha de dados e o processo de integração com o Power BI.

Capítulo IV - Resultados e discussão: neste capítulo, apresentam-se os dados recolhidos, sua representação no *dashboard* e a análise do cumprimento dos parâmetros.

Capítulo V - Conclusões e trabalhos futuros: sintetiza os resultados do estudo, os contributos práticos da ferramenta desenvolvida e sugere possíveis linhas de melhoria ou de replicação em outros contextos educativos.

2. Revisão da Literatura

2.1. Qualidade do ambiente interior

A Qualidade do Ambiente Interior pode ser entendida como um conceito abrangente e multidimensional, que integra variáveis físicas, químicas, biológicas e perceptivas do espaço construído, organizando-se em torno de três eixos fundamentais. Em primeiro lugar, representa uma experiência de conforto integrada, na medida em que engloba simultaneamente o conforto térmico, acústico e visual, bem como a qualidade do ar interior, reconhecendo que estes domínios sensoriais se reforçam mutuamente para promover o bem-estar geral dos ocupantes (Al-Jokhadar et al., 2023). Em segundo lugar, assume uma função protetora e promotora do desempenho, uma vez que condições ambientais adequadas não só previnem sintomas e doenças associados à presença de poluentes ou a situações de desconforto térmico, como também favorecem a produtividade, a concentração e a aprendizagem dos ocupantes, aspeto salientado por estudos que estabelecem uma relação direta entre os parâmetros de qualidade do ambiente interior e os resultados académicos e laborais (Toyinbo, 2023). Terceiro, serve de pilar regulatório e de sustentabilidade, na medida em que organismos como a EPA (2023) e a nova Diretiva Europeia EPBD 2024/1275 estabelecem requisitos mínimos de ventilação, temperatura do ar e iluminação para proteger a saúde sem comprometer a eficiência energética. Assim, a qualidade do ambiente interior configura-se como a qualidade sensorial, higiénica e funcional do ambiente interior que, quando gerida de maneira integrada, salvaguarda a saúde, maximiza o conforto e reforça o desempenho humano, alinhando-se simultaneamente com metas de sustentabilidade.

Em termos práticos, os principais componentes da Qualidade do Ambiente Interior incluem a qualidade do ar interior, o conforto térmico, o conforto visual e o conforto auditivo (Al-Jokhadar et al., 2023; European Commission, 2024; Toyinbo, 2023). Um controlo eficaz pressupõe monitorizar contaminantes, garantir ventilação contínua, manter temperaturas e humidades adequadas e otimizar a iluminação (*American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers* [ASHRAE], 2023).

A Qualidade do Ar Interior (QAI), de acordo com a ASHRAE (2023); “refere-se aos tipos e concentrações de poluentes do ar interior que se sabe ou se suspeita afetarem o conforto, o bem-estar, a saúde, a produtividade e a capacidade de aprendizagem das pessoas”. Granados et al. (2024) enfatizam a contaminação química e biológica, partículas (PM), compostos orgânicos voláteis (COV) e radão, como fatores críticos de risco.

O conforto térmico, classicamente definido como “a condição mental que expressa a satisfação com o ambiente térmico”, de acordo com a norma *International Organization for*

Standardization (ISO) 7730/ASHRAE 55, implica que a maioria dos ocupantes se sinta termicamente confortável num espaço (Soler & Palau, 2022). A iluminação e o conforto visual são também parâmetros muito importantes para uma boa qualidade ambiental. Uma iluminação deficiente provoca fadiga visual, dores de cabeça e dificulta a leitura, afetando a concentração dos alunos. Em contrapartida, níveis adequados de iluminação melhoram a acuidade visual e a concentração, facilitando as tarefas de estudo (Muvit, 2025)

A má qualidade do ambiente interior tem sido associada a uma série de problemas de saúde a curto e longo prazo para os estudantes, bem como para o pessoal docente e administrativo (Brink et al., 2023). Os sintomas agudos podem incluir asma, lacrimejamento excessivo, dores de cabeça, fadiga, falta de ar, congestão nasal, tosse, espirros, tonturas, náuseas, irritação dos olhos, nariz, garganta e pele e sintomas respiratórios (Al-Jokhadar et al., 2023). É importante notar que os indivíduos com doenças pré-existentes, como asma, alergias, doenças respiratórias ou sistemas imunitários comprometidos, são particularmente vulneráveis aos efeitos adversos destes poluentes (Pérez-Moneo et al., 2025). Para além dos efeitos diretos na saúde, uma qualidade do ambiente interior deficiente também tem sido associada a taxas mais elevadas de absentismo nas escolas (Al-Jokhadar et al., 2023; Fisk, 2017). Em contextos educativos não só causa desconforto imediato, como também tem um impacto sistemático na saúde pública e na economia, com o absentismo escolar e a diminuição da produtividade do pessoal, o que torna claro que a qualidade do ambiente interior representa um custo indireto significativo que se estende para além das despesas diretas com os cuidados de saúde. Se os ocupantes adoecerem ou sentirem desconforto devido a uma má qualidade do ambiente interior, isso traduz-se num aumento das faltas e numa redução da eficácia do ensino e da aprendizagem (Brink et al., 2023; Fisk, 2017).

Do ponto de vista do rendimento académico, evidências empíricas indicam que salas de aula com ventilação adequada, temperatura do ar moderada e baixos níveis de partículas finas potenciam até duplicar os escores em testes de raciocínio e memória de curto prazo, enquanto ambientes mal ventilados e sobreaquecidos deterioram a atenção em cerca de 5-15 % e prolongam o tempo de resposta (Brink et al., 2022, 2023; Fisk, 2017). Estudos de campo e ensaios controlados em universidades da Europa, América Latina e Ásia reforçam esta associação: a redução pontual de $PM_{2.5}$ para menos de $5 \mu g/m^3$ resultou em um aumento significativo nas médias dos exames dos estudantes (Xu et al., 2024), enquanto a ventilação natural insuficiente, sinalizada por $CO_2 > 1500$ ppm, foi correlacionada com perdas de 0,2-0,3 valores numa escala de 0-20 (Rus et al., 2021). Além dos efeitos imediatos, a exposição crónica a uma qualidade do ambiente interior deficiente intensifica sintomas respiratórios, aumenta o absentismo escolar e compromete a trajetória

académica, repercutindo-se na produtividade laboral futura e nos custos de saúde pública (Al-Jokhadar et al., 2023; Brink et al., 2022). Portanto, a importância da qualidade do ambiente interior em contextos educativos é particularmente acentuada, tendo em conta que os estudantes, especialmente as crianças e os jovens, passam cerca de 30% do seu dia nas salas de aula (Cedeño et al., 2022), e que a população em geral pode passar até 90% do seu tempo em espaços fechados (Brink et al., 2023).

Um estudo efetuado por Martino et al. (2024) analisou exaustivamente a forma como a convergência de ferramentas de Modelação da Informação da Construção (BIM), Sistemas de Informação Geográfica (GIS) e *Business Intelligence* (BI) poderia ser concretizada numa aplicação de Sistema de Gestão de Ativos baseada na Web para campus universitários e desenvolveram um “gémeo digital” capaz de combinar modelos espaciais, dados operacionais e métricas de desempenho com painéis analíticos. A plataforma, concebida para superar a fragmentação da informação típica dos grandes complexos de ensino, digitalizou e georreferenciou quase todo o parque imobiliário, optimizou a programação dos cursos com base na disponibilidade real das salas de aula, geriu dinamicamente os postos de trabalho e, utilizando sensores IoT, monitorizou continuamente a temperatura do ar, o CO₂, a humidade do ar e os parâmetros subjectivos de conforto, todos eles visualizados em painéis interativos que forneceram aos gestores universitários um apoio abrangente à decisão. Os autores constataram reduções significativas nos tempos de pesquisa de informações, economia de custos operacionais, melhorias na sustentabilidade energética e um aumento mensurável no bem-estar e no desempenho dos estudantes e do pessoal. Notaram, no entanto, desafios persistentes: interoperabilidade entre formatos BIM e GIS, necessidade de normalizar fluxos de dados heterogêneos e formação do pessoal para adotar plenamente a ferramenta.

Arias y Ávila (2025), por seu lado, salientam que a crise climática mundial incita os Estados a adotarem tecnologias de construção sustentáveis e eficientes do ponto de vista energético. O seu estudo salienta o papel estratégico que os espaços de ensino superior, nomeadamente nas regiões de clima semi-temperado, podem desempenhar para reduzir o consumo de água e de energia e, ao mesmo tempo, atenuar os efeitos de futuras crises de saúde pública.. Os autores analisam o conforto ambiental a partir de duas dimensões: térmica (adaptação climática do utilizador) e luminosa (qualidade da iluminação natural), argumentando que ambos os fatores afetam diretamente o bem-estar e a saúde dos ocupantes. Concluem que a construção sustentável em instituições universitárias contribui para o objetivo nacional de redução do impacto ambiental e aumenta a resiliência a possíveis epidemias futuras.

2.2. Parâmetros de avaliação da qualidade do ambiente interior

A avaliação da qualidade do ambiente interior assenta na monitorização de um conjunto de parâmetros que, de forma interligada, condicionam a saúde e o conforto dos ocupantes. Entre os fatores mais relevantes destacam-se a concentração de CO₂ e as condições de ventilação, os compostos orgânicos voláteis (COVs), as partículas em suspensão (PM_{2,5} e PM₁₀), os parâmetros microbiológicos, o conforto térmico, bem como a iluminação e o conforto visual, cada um dos quais é caracterizado e analisado nos pontos que se seguem.

2.2.1. Concentração de CO₂ e ventilação.

A ventilação implica a substituição contínua do ar interior potencialmente poluído por ar exterior limpo, assegurando assim condições adequadas de saúde e conforto (Cedeño et al., 2022). No contexto educativo, onde a aglomeração é elevada e a atividade metabólica é constante, a ventilação torna-se ainda mais importante, uma vez que influencia diretamente a concentração de CO₂, pelo que a elevada presença deste gás nas salas de aula é um sinal claro de renovação insuficiente do ar, e a sua acumulação pode ter efeitos negativos na saúde, na atenção e no desempenho académico dos alunos (Toyinbo, 2023).

A concentração de CO₂ é um indicador-chave da ventilação e da renovação do ar interior (European Commission, 2024). No ar exterior limpo, o seu nível é de cerca de 400 ppm, mas em espaços fechados ocupados o CO₂ aumenta rapidamente devido à exalação humana. A sua acumulação indica uma ventilação insuficiente: O valor de 1 na taxa de renovação de ar (ACH) substitui cerca de 60% do ar interior e para salas de aula de 100 m² com 25 alunos, recomenda-se 5-6 ACH, o que equivale a 14 L s⁻¹ por pessoa de ar exterior (Arias & Ávila, 2025).

As diretrizes existentes em matéria de CO₂ em recintos fechados estipulam que as concentrações ≤ 1000 ppm representam uma boa ou excelente qualidade do ar em recintos fechados, as concentrações entre 1000 e 1500 ppm representam uma qualidade do ar em recintos fechados aceitável ou moderada e as concentrações > 1500 ppm representam uma má qualidade do ar em recintos fechados. Os seres humanos constituem a principal fonte de CO₂ em recintos fechados, pelo que os níveis deste gás dependem fundamentalmente da ocupação humana e da taxa de renovação do ar (Guo et al., 2023). A norma europeia EN 13779 classifica a qualidade do ar interior em quatro categorias, designadas por IDA (*Indoor Air Quality*): IDA 1 (excelente), quando a concentração de CO₂ é inferior a 800 ppm; IDA 2 (boa), até 1000 ppm; IDA 3 (moderada), até 1400 ppm; e IDA 4 (baixa), quando ultrapassa os 1400 ppm. O denominado «número de Pettenkofer», fixado

em 1000 ppm, é frequentemente referenciado como limiar higiénico de referência em espaços de trabalho e salas de aula (PCE Instruments, 2024).

A Figura 1 ilustra, de forma comparativa, o impacto direto da taxa de ventilação na concentração de CO₂ numa sala de aula tipo, com volume de 360 m³ e 40 ocupantes adultos. Os resultados evidenciam que taxas de ventilação reduzidas, como 2 L/seg/pessoa (0,8 ACH), conduzem a concentrações críticas de 2670 ppm, enquanto taxas mais elevadas, como as preconizadas pela norma EN 16798-1 para Categoria I (10 L/seg/pessoa, 4 ACH) ou pela recomendação de Harvard (15 L/seg/pessoa, 6 ACH), permitem manter os níveis abaixo dos 870 ppm e 720 ppm, respetivamente. O valor de 700 ppm, recomendado pelo grupo AIREAMOS com uma taxa de 16,1 L/seg/pessoa (6,4 ACH), representa o cenário de melhor qualidade do ar no conjunto analisado, reforçando a importância de uma ventilação adequada como medida preventiva essencial em ambientes escolares.

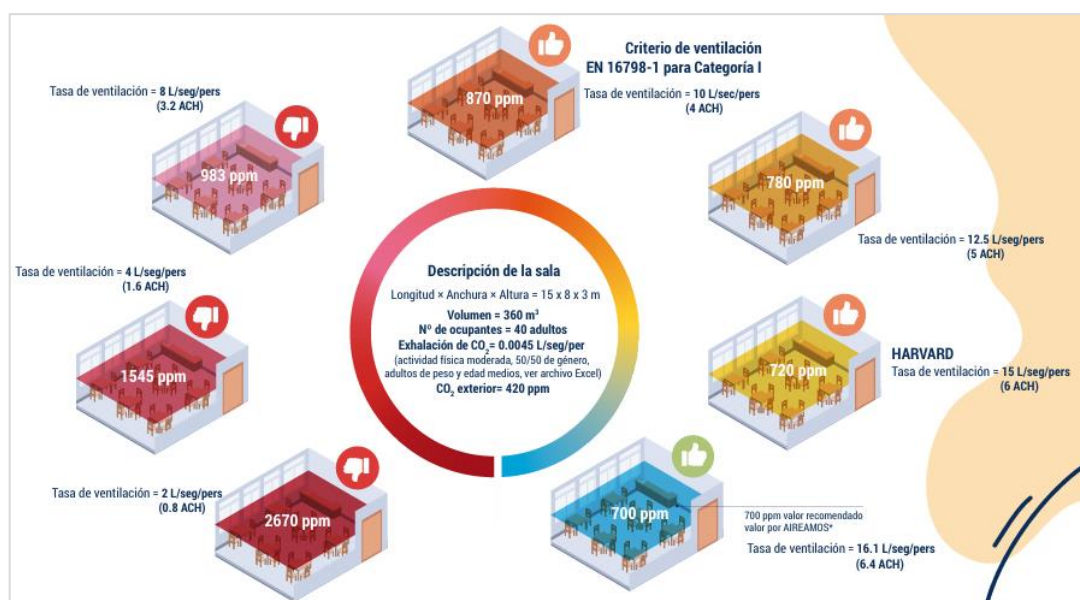


Figura 1 - Concentração de CO₂ em diferentes níveis numa sala de aula. Fonte: Felisi et al. (2021).

A conceção cada vez mais hermética dos edifícios modernos, embora orientada para a eficiência energética, pode comprometer a qualidade do ar interior ao favorecer o aprisionamento de poluentes e a acumulação de CO₂, especialmente quando a ventilação é passiva ou insuficiente (Atencio, 2023). Em contexto escolar, esta problemática assume particular relevância, sendo frequente que as concentrações de CO₂ ultrapassem os 1000 ppm durante grande parte do período letivo, podendo atingir picos de 3000 a 4000 ppm em situações extremas, com impacto direto nas funções cognitivas dos ocupantes (Meiss et al., 2021), situação agravada em salas com sobrelotação, ventilação natural deficiente ou sistemas mecânicos mal dimensionados (Rus et al., 2021). A relação entre estas deficiências e o desempenho académico foi diretamente evidenciada por Rus et al. (2021),

cujo estudo demonstrou que, numa sala com níveis mais elevados de CO₂, em ambos os casos acima do limiar regulamentar de 1000 ppm, as pontuações obtidas em exame foram significativamente mais baixas, confirmando que condições ambientais inadequadas se traduzem numa redução mensurável do rendimento dos alunos, pelo que os sistemas de ventilação mecânica com insuflação e extração surgem como a solução mais eficaz para manter concentrações estáveis e conformes com os requisitos normativos.

Existem diferentes tipos de sistemas de ventilação que têm um impacto direto na concentração de CO₂: ventilação natural, ventilação mecânica e sistemas híbridos. A ventilação natural, dependente do vento e da diferença térmica entre o interior e o exterior, representa uma opção sustentável e energeticamente eficiente. No entanto, a sua eficácia varia consoante as condições climáticas e, em muitos casos, não consegue manter os níveis de CO₂ abaixo dos limiares recomendados. A ventilação mecânica, nas suas variantes de extração, insuflação ou combinada, permite um controlo mais preciso do fluxo de ar e melhora a qualidade do ar interior, mas requer um maior consumo de energia e uma manutenção técnica contínua. Os sistemas híbridos, que integram ambas as modalidades, provaram ser uma alternativa eficaz, ativando a ventilação mecânica apenas quando a ventilação natural não é suficiente (Toyinbo, 2023).

A Figura 2 ilustra o princípio de funcionamento da ventilação por convecção natural numa habitação unifamiliar de dois pisos. O esquema evidencia como a energia solar captada pela cobertura aquece o ar interno, induzindo o seu movimento ascendente através de ductos de ventilação até à saída de ar no topo do edifício, enquanto ar exterior mais fresco penetra pelos espaços habitáveis ao nível do piso inferior. Este processo cíclico e passivo assegura a renovação do ar nos diferentes compartimentos sem consumo energético adicional, constituindo uma solução de referência em projetos de construção sustentável.

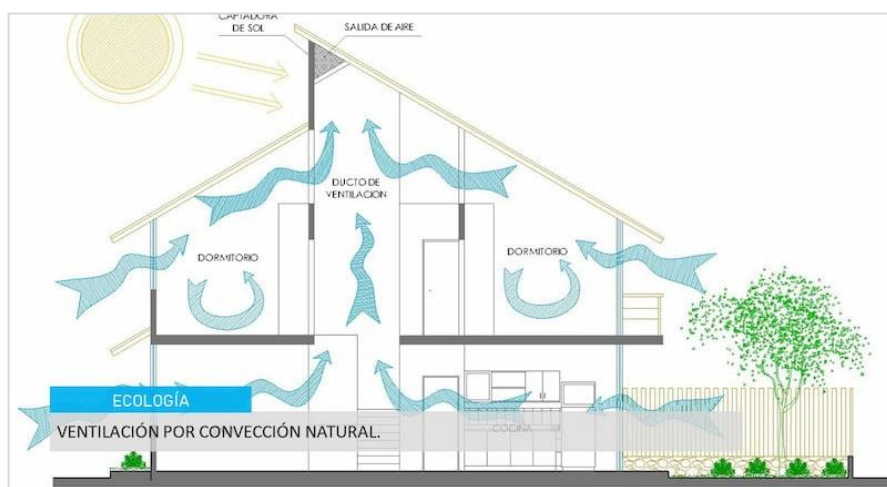


Figura 2 - Ventilação natural. Fonte: Mundielectro (2024).

A instalação de sistemas de ventilação mecânica em centros educativos oferece múltiplos benefícios, especialmente evidentes na sequência da pandemia da COVID-19. Estes sistemas permitem a renovação constante do ar interior sem depender da abertura de janelas, o que evita o desconforto térmico em épocas de frio ou calor extremos, minimiza a entrada de alérgenos e reduz o ruído exterior. Ao contrário da ventilação natural, a ventilação mecânica garante uma filtragem eficaz do ar, diminuindo a concentração de CO₂ e de partículas poluentes, o que contribui diretamente para a melhoria da saúde, a prevenção de contágios por aerossóis e o aumento do desempenho académico (Constructora Brillas Agusti, 2021).

A Figura 3 sintetiza as principais vantagens associadas à ventilação mecânica em edifícios. O esquema destaca quatro benefícios estruturantes: a obtenção de ar limpo e elevada qualidade do ar interior; a recuperação de energia, que torna estes sistemas compatíveis com edifícios de consumo quase nulo; a renovação constante e controlada do ar; e a prevenção da formação de humidades, fator frequentemente associado à degradação da qualidade do ambiente interior e ao aparecimento de patologias respiratórias. Em conjunto, estas características consolidam a ventilação mecânica como uma solução técnica de referência para espaços com elevada densidade de ocupação, como é o caso das salas de aula.



Figura 3 - Vantagens da ventilação mecânica. Fonte: Mundielectro (2024).

Entre as estratégias proativas e rentáveis para controlar a QAI em ambientes educativos, destaca-se a medição constante do CO₂, permitindo ajustes em tempo real na ventilação (Porras, 2025). A instalação de sensores de CO₂ permite às instituições monitorizar ativamente a QAI e ajustar a ventilação, natural ou mecânica, para manter os níveis ideais. Isto atenua os efeitos negativos na saúde e no desempenho académico, enquanto optimiza o consumo de energia. Os Detetores de infravermelhos não dispersivo

(NDIR) de CO₂ (ppm) são a ferramenta padrão para este controle contínuo (PCE Instruments, 2024); valores persistentemente abaixo de 1000 ppm indicam ventilação adequada, enquanto ultrapassar esse limiar exige ações corretivas (por exemplo, abrir janelas ou ativar sistemas mecânicos) e, idealmente, manter taxas de 8-14 L s⁻¹ por pessoa, ajustadas à ocupação e ao volume do recinto (Arias & Ávila, 2025).

Por tanto, a monitorização contínua dos parâmetros ambientais tornou-se uma estratégia central para a detecção precoce de condições inadequadas. Atualmente, observa-se uma transição significativa do modelo tradicional de auditorias pontuais para sistemas de monitorização em tempo real, mais acessíveis e frequentes. Esta mudança é facilitada pelo desenvolvimento e disseminação de sensores de baixo custo, que permitem medir variáveis como CO₂, temperatura do ar, humidade do ar e partículas em suspensão com razoável precisão, viabilizando a sua integração em sistemas de gestão ambiental acessíveis e descentralizados. Estes sensores, muitas vezes baseados em tecnologias óticas ou eletroquímicas miniaturizadas, têm demonstrado desempenho suficiente para aplicações em contextos educativos, desde que devidamente calibrados. A sua implementação permite não apenas alertas automáticos quando os valores ultrapassam limites de referência, mas também a construção de séries temporais detalhadas, úteis para diagnósticos técnicos e tomada de decisões em gestão de edifícios (Castell et al., 2017).

Palacios et al. (2020) desenharam e implementaram um estudo longitudinal que monitorizou a qualidade ambiental interior em 280 salas de aula ao longo de cinco anos, envolvendo cerca de 10 000 alunos. Cada sala de aula tinha um sensor permanente que registava, minuto a minuto, as concentrações de CO₂ e de partículas, a temperatura do ar, a humidade relativa do ar, a iluminação e o nível de ruído, enquanto o desempenho cognitivo dos alunos era avaliado através de testes normalizados. Paralelamente, foram recolhidos indicadores de saúde (absentismo e utilização dos serviços de saúde) e dados sociodemográficos. O protocolo, esclareceu a forma como as condições ambientais escolares afetaram o desenvolvimento cognitivo e a saúde das crianças, gerando provas sólidas para orientar políticas destinadas a promover ambientes académicos mais saudáveis.

2.2.2. Compostos orgânicos voláteis (COVs)

Entre os principais poluentes que afetam a qualidade do ar interior nas salas de aula encontram-se os compostos orgânicos voláteis (COV), que incluem substâncias como formaldeído, tolueno, benzeno, limoneno, xileno e tricloroetileno, presentes em materiais de construção, mobiliário, produtos de limpeza, ambientadores e artigos escolares, bem como os microrganismos em suspensão, que podem proliferar em ambientes com elevada humidade (Pérez-Moneo et al., 2025; Porras, 2025).

Os COVs são emitidos com maior intensidade a temperaturas elevadas e estão associados a efeitos adversos na saúde respiratória, incluindo asma, obstrução crônica das vias respiratórias e irritação ocular persistente. A sua presença em espaços educativos destaca a importância de controlar as fontes emissoras e melhorar a ventilação para prevenir riscos ambientais e para a saúde dos ocupantes (Pérez-Moneo et al., 2025).

Para mitigar esses riscos, recomenda-se utilizar materiais de baixas emissões, evitar produtos químicos agressivos e aplicar sistemas de filtragem avançados, capazes de eliminar tanto partículas finas como contaminantes gasosos (Porras, 2025).

2.2.3. Partículas em suspensão ($PM_{2,5}$ e PM_{10})

As partículas em suspensão no ar (PM), são um poluente atmosférico composto por pequenas partículas sólidas ou líquidas. As $PM_{2,5}$ são partículas ultrafinas com um diâmetro inferior a 2,5 micrómetros, capazes de penetrar profundamente nos pulmões e mesmo na corrente sanguínea (Pérez-Moneo et al., 2025). As PM_{10} são ligeiramente maiores, com menos de 10 micrómetros de diâmetro, mas ainda assim suficientemente pequenas para chegar aos pulmões. As fontes comuns de PM incluem emissões de veículos, fábricas, estaleiros de construção, atividades mineiras, incêndios florestais e tempestades de poeira (Caciara et al., 2024). A Figura 4 ilustra a natureza e origem destes contaminantes, evidenciando que as partículas em suspensão resultam não apenas de emissões diretas, provenientes do tráfego rodoviário e de fontes industriais, mas também da transformação química de outros gases que originam $PM_{2,5}$ de formação secundária, bem como da presença de ozono troposférico, composto igualmente prejudicial à qualidade do ar.

Contudo, as partículas em suspensão não são exclusivas do ambiente exterior. Em espaços interiores, como as salas de aula, as PM têm origem tanto na infiltração de poluentes exteriores, como poeiras urbanas e emissões de tráfego, como em fontes internas, entre as quais se destacam o pó ressuspenso pelo movimento de pessoas, fibras têxteis, pólen introduzido, partículas de giz e aerossóis provenientes de produtos de limpeza. Em ambientes educativos, a atividade contínua no espaço favorece a ressuspensão persistente de partículas finas, conferindo às fontes internas uma relevância particularmente significativa na determinação da qualidade do ar interior (Pérez-Moneo et al., 2025).

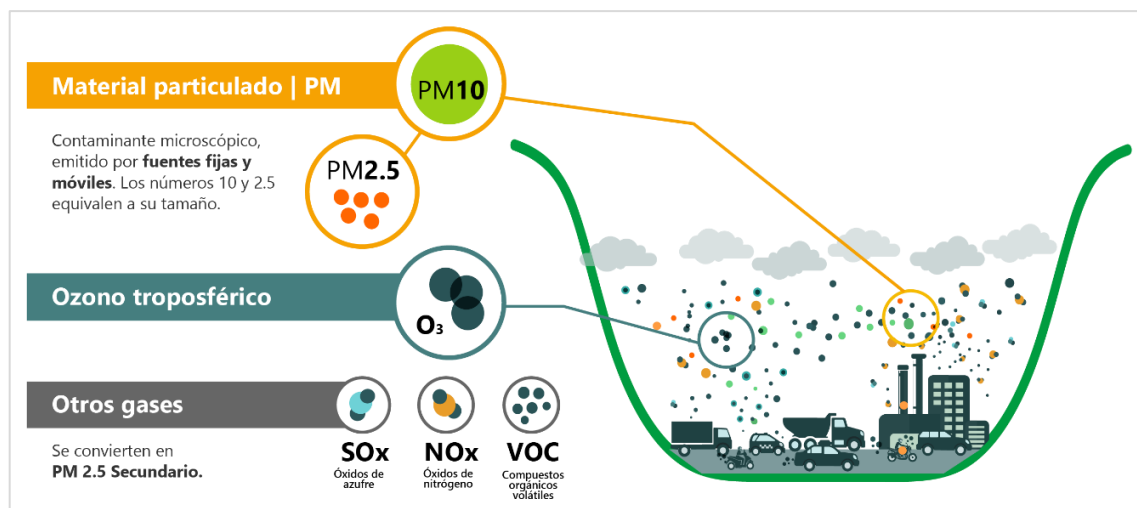


Figura 4 - Partículas em suspensão. Fonte: Metropól (2024).

Do ponto de vista da saúde, os riscos associados à exposição a $PM_{2.5}$ incluem doenças respiratórias, problemas cardiovasculares, agravamento da asma e, em casos graves, morte prematura (Blanco et al., 2022; Pérez-Moneo et al., 2025). Embora as PM_{10} geralmente não atinjam a corrente sanguínea, podem afetar a função pulmonar e a saúde respiratória. As crianças, os idosos e as pessoas com problemas de saúde pré-existent são os mais vulneráveis (Caciara et al., 2024).

Importa destacar que, quando os níveis de PM se encontram abaixo dos limites legais, mas acima das recomendações da Organização Mundial da Saúde (OMS) (não exceder $15 \mu g m^{-3}$ (24 h) para $PM_{2.5}$ e $45 \mu g m^{-3}$ para PM_{10}), podem ocorrer impactos subtis na saúde e na função cognitiva dos estudantes. A investigação de Xu et al. (2024) sugere que a redução da concentração de partículas finas em espaços interiores pode resultar em melhorias mensuráveis no desempenho acadêmico dos alunos, evidenciando uma ligação com o funcionamento cognitivo. De forma semelhante, Pérez-Moneo et al. (2025) indicam que, mesmo a concentrações consideradas “aceitáveis”, a exposição contínua a $PM_{2.5}$ e PM_{10} em ambientes educativos pode ter efeitos subclínicos. Neste sentido, Caciara et al. (2024) alertam que tais níveis podem comprometer o potencial de aprendizagem, reforçando a necessidade de manter as concentrações de partículas tão baixas quanto possível.

A qualidade do ar interior está, assim, intrinsecamente ligada à qualidade do ar exterior, especialmente em ambientes urbanos (ASHRAE, 2023). A poluição exterior por partículas finas, como as emissões de combustíveis, pode agravar os problemas de asma e alergia, enquanto a qualidade do ar interior é influenciada por fontes externas (Cedeño et al., 2022). Isto significa que as estratégias para melhorar a QAI não podem limitar-se a medidas internas, como a filtragem e a ventilação, mas devem também ter em conta a

localização do edifício, a qualidade do ar circundante e, eventualmente, a implementação de barreiras ou sistemas de filtragem mais avançados para o ar que entra.

Entre as estratégias de mitigação destacam-se: utilizar filtros HEPA (*High Efficiency Particulate Air*) ou MERV (*Minimum Efficiency Reporting Value*) elevados nos sistemas de climatização; limpeza frequente com aspiradores equipados com HEPA para remover quase 100 % do pó fino; preferir limpeza húmida em vez de varrer a seco; e instalar purificadores portáteis quando a poluição exterior é alta. Barreiras vegetais externas e localização cuidadosa das entradas de ar também reduzem a entrada de partículas de tráfego (Pérez-Moneo et al., 2025).

A avaliação ambiental realiza-se com sensores ópticos ou amostradores ativos; os valores obtidos ($\mu\text{g m}^{-3}$) comparam-se com referências supracitadas. Estudos universitários indicam que, salvo poluição exterior severa ou higiene deficiente, as PM interiores tendem a manter-se abaixo dos limites, mas em zonas urbanas densas podem elevar-se em picos de tráfego (Meiss et al., 2021).

Para além das medições instrumentais, é também possível realizar avaliações visuais em contexto, observando a deposição de pó em superfícies ou identificando atividades que potenciem o aumento momentâneo das partículas em suspensão (como a limpeza a seco). Neste âmbito, os estudos realizados em salas de aula de IES confirmam que, salvo em situações excecionais, os níveis de $\text{PM}_{2,5}$ mantêm-se geralmente dentro dos limites recomendados. Todavia, em edifícios localizados junto a vias movimentadas, é frequente observar correlações entre os picos de tráfego e o aumento das concentrações de partículas no interior, o que pode justificar a adoção de medidas complementares, como a instalação de purificadores de ar, barreiras verdes ou sistemas de ventilação melhorados (Meiss et al., 2021).

2.2.4. Parâmetros microbiológicos

A presença de microrganismos em suspensão, tais como aeróbios mesófilos, bolores e leveduras, pode refletir deficiências nas condições higiénicas, na ventilação ou nos procedimentos de limpeza (Morales-Pinto & Jiménez-Vargas, 2024). A carga bacteriana do ar indica a quantidade de bactérias presentes em suspensão no ar de um espaço fechado. A sua medição permite avaliar a qualidade microbiológica do ambiente interior e detetar possíveis riscos para a saúde dos ocupantes (Ramírez et al., 2023). Para a sua avaliação, é frequentemente utilizado o método de cultura em placas de Petri, que permite quantificar as unidades formadoras de colónias (UFC) presentes no ar através de meios de cultura específicos.

Neste contexto, é essencial considerar a origem dos contaminantes microbiológicos nos espaços interiores. Em espaços interiores fechados, os contaminantes biológicos (fungos e bactérias) podem ter origem em fontes externas e internas. No caso de fungos como bolores e leveduras, a sua origem é geralmente no ambiente exterior, de onde esporos microscópicos penetram nos edifícios através da ventilação ou de aberturas como portas e janelas (Ávila et al., 2024). Uma vez no interior, esses esporos podem encontrar substrato e condições adequadas para se desenvolverem, especialmente se houver problemas de humidade ou ventilação deficiente. Por outro lado, as bactérias presentes no ar interior tendem a provir principalmente de fontes internas, sendo os ocupantes humanos um dos principais contribuintes para a carga bacteriana no ar. As pessoas libertam continuamente microrganismos para o ambiente através da descamação da pele e das gotículas emitidas ao falar, respirar, tossir ou espirrar; estima-se que cada indivíduo emita cerca de mil milhões de células da pele por dia, influenciando significativamente as concentrações microbianas do ar interior (Chawla et al., 2023). Além disso, a falta de higienização em sistemas de climatização, como dutos e filtros de ar condicionado, pode criar reservatórios de fungos e bactérias que, se não forem mantidos adequadamente, são recirculados no ambiente (Ávila et al., 2024).

Em ambientes com elevada ocupação, como salas de aula, bibliotecas ou IES, estes fatores tendem a intensificar-se e requerem atenção especial. A aglomeração de estudantes e trabalhadores aumenta a emissão de bioaerossóis humanos, elevando as concentrações bacterianas proporcionalmente ao número de pessoas presentes e ao tempo de ocupação do espaço (Ávila et al., 2024). Simultaneamente, a circulação de ar entre o exterior e o interior introduz esporos fúngicos do ambiente nos recintos. Se existirem condições internas favoráveis, como materiais orgânicos acumulados ou altos níveis de humidade, esses fungos introduzidos podem encontrar um ambiente propício para crescer e se dispersar, aumentando a carga fúngica interna. Uma revisão recente sobre a qualidade do ar em instituições educacionais destacou que a ventilação deficiente, o crescimento de mofo e a entrada de contaminantes externos são causas comuns da má qualidade do ar interior nesses espaços (Adamopoulos et al., 2025). Por outro lado, vários estudos indicam que uma ventilação eficiente e o controlo da humidade relativa do ar (mantendo-a abaixo de 70%) contribuem para reduzir a proliferação e dispersão tanto de bactérias como de fungos (Ávila et al., 2024). Por isso, em espaços universitários, é essencial aplicar sistemas de ventilação adequados, manutenção periódica dos equipamentos de climatização e protocolos de limpeza rigorosos, garantindo assim uma qualidade do ar interior segura para os ocupantes e, especialmente, para as populações vulneráveis.

Para mitigar isso, recomenda-se incorporar planos de higiene ambiental, sistemas de ventilação eficientes e monitorizações periódicas como medidas preventivas para garantir uma qualidade microbiológica adequada do ar em espaços fechados (Morales-Pinto & Jiménez-Vargas, 2024).

2.2.5. Conforto térmico

O conforto térmico é definido como a condição mental em que um indivíduo expressa satisfação relativamente ao ambiente térmico que o rodeia, sendo influenciado por um conjunto de variáveis que interagem de forma simultânea (European Commission, 2024; Porras, 2025; Toyinbo, 2023). Estas variáveis organizam-se em dois grupos distintos: os fatores ambientais, temperatura do ar, temperatura radiante média, humidade relativa do ar e velocidade do ar, e os fatores pessoais, taxa metabólica e isolamento proporcionado pelo vestuário, cuja conjugação determina a perceção subjetiva de conforto ou desconforto térmico de cada ocupante (Soler & Palau, 2022).

Em ambientes educativos, este equilíbrio é particularmente exigente devido à elevada densidade de ocupação, à reduzida atividade metabólica dos estudantes em posição sedentária e à variabilidade dos ciclos de utilização das salas de aula ao longo do dia. Considera-se que um espaço é termicamente confortável quando, pelo menos, 80% dos ocupantes não manifesta sensação de frio nem de calor (Soler & Palau, 2022). Condições térmicas inadequadas, por excesso ou por défice de temperatura, podem comprometer significativamente a concentração, induzir fadiga e reduzir o desempenho académico; o calor extremo, em particular, afeta as funções cognitivas e emocionais, com impacto direto na capacidade de memorização e de atenção sustentada (Porras, 2025).

Para a avaliação quantitativa do conforto térmico recorre-se a índices normalizados que integram estas variáveis, permitindo estimar a percentagem de ocupantes em situação de desconforto e determinar se as condições do espaço se encontram dentro dos limites considerados aceitáveis para ambientes de ocupação continuada (Soler & Palau, 2022). A Figura 5 sintetiza graficamente o conjunto de fatores ambientais e pessoais que, em interação, determinam as condições necessárias para alcançar o conforto humano nos espaços interiores.

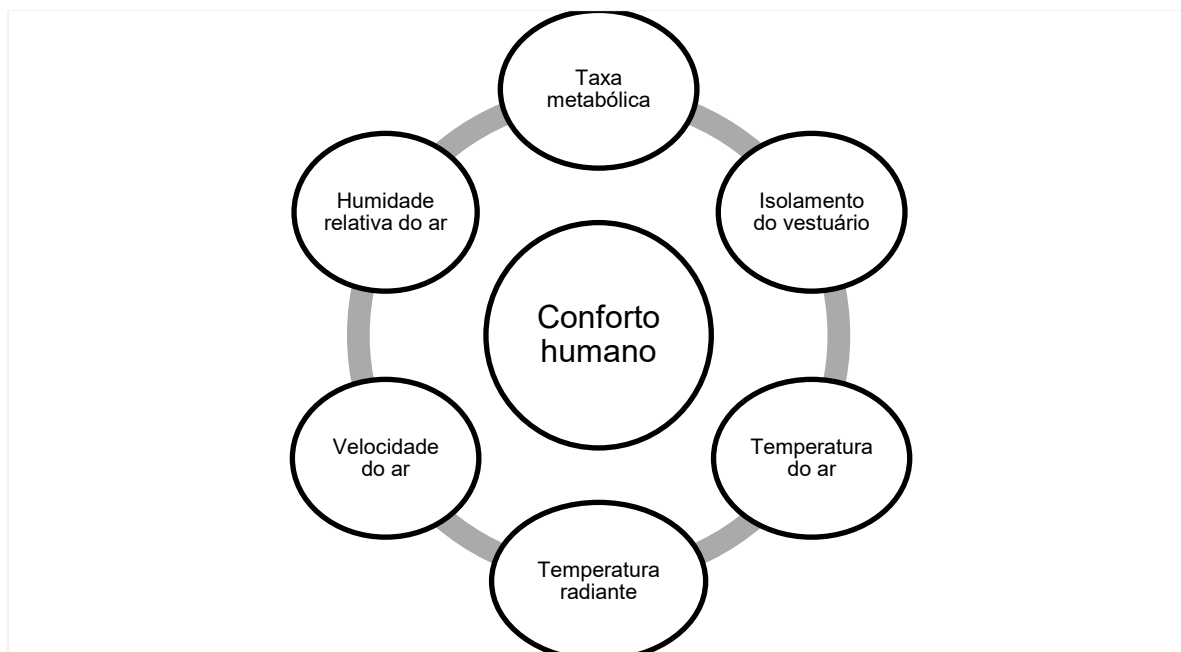


Figura 5 - Fatores ambientais e pessoais para criar as condições adequadas para o conforto térmico. Fonte: Soler & Palau (2022).

A literatura científica apresenta alguma variabilidade nos intervalos de temperatura do ar considerados ótimos para o desempenho académico. Em contextos de climas quentes, alguns estudos identificam o intervalo entre 26 e 29 °C como aquele em que os alunos demonstram maior envolvimento e produtividade (Toyinbo, 2023), enquanto estudos realizados em climas temperados apontam para gamas significativamente mais baixas: a meta-análise de Wargocki et al. (2019) indica que o desempenho tende a diminuir abaixo de 21-22 °C e acima de 23-24 °C, sendo que Haverinen-Shaughnessy e Shaughnessy (2015) verificaram que, no intervalo de 20-22 °C, os resultados académicos em matemática e leitura eram significativamente superiores. Do ponto de vista da saúde, a OMS (2018) estabelece 18 °C como temperatura do ar mínima interior recomendada para a população geral, podendo este limiar ser superior no caso de grupos vulneráveis, como crianças. A aparente discrepância entre os valores ótimos identificados pelos diferentes estudos sugere que a temperatura do ar ideal para a aprendizagem não é universal, variando em função do contexto geográfico e climático, do tipo de atividade realizada e das características individuais de cada estudante (Toyinbo, 2023). Em edifícios não climatizados aplica-se o critério de conforto adaptativo, admitindo gamas superiores no verão conforme a temperatura exterior recente (Meiss et al., 2021). Além da temperatura média deve-se considerar a estratificação térmica (diferença de temperatura cabeça-pés), as correntes de ar sentidas e a temperatura radiante das superfícies. Velocidades de ar moderadas ($<0,2 \text{ m s}^{-1}$) são benéficas em clima quente, mas fluxos superiores geram desconforto local (Soler & Palau, 2022).

Em termos de efeitos negativos para a saúde, reconhece-se que, devido a uma temperatura ambiente insuficiente, podem surgir sintomas de ritmo cardíaco elevado, mau humor, cansaço, asma, comichão e lacrimejo excessivo, dores de cabeça, dores de garganta, vírus da influenza e sintomas respiratórios (Al-Jokhadar et al., 2023).

A humidade relativa do ar é outro fator crítico; trata dos danos causados pela água nos edifícios devido a uma execução inadequada ou à falta de manutenção, a acumulação excessiva de humidade cria condições para o crescimento de bolores e produz substâncias irritantes responsáveis por doenças respiratórias e odor a mofo (Granados et al., 2024). Níveis de humidade adequados evitam o desenvolvimento de bolores, ácaros e bactérias. A renovação do ar ajuda a controlar a humidade, evitando a sensação de secura excessiva ou de desconforto (ASHRAE, 2023). Em termos do impacto dos níveis insuficientes de humidade relativa do ar, são mencionados a asma, a frequência cardíaca elevada, o mau humor, o cansaço, a secura, a tosse, a comichão e o lacrimejar excessivo, as dores de cabeça, a dor de garganta, a irritação, os vírus da gripe, o aperto no peito, a rouquidão da voz e os sintomas respiratórios (Al-Jokhadar et al., 2023).

Para mitigar o desconforto térmico em espaços educativos, é fundamental considerar os seis fatores estabelecidos pela norma ASHRAE 55 mencionados anteriormente. A interação dessas variáveis influencia diretamente a percepção de conforto térmico por parte dos ocupantes. Uma das estratégias mais eficazes é ajustar a velocidade do ar, pois uma ventilação mal distribuída pode causar correntes de ar incómodas ou zonas de superaquecimento. Além disso, o uso de ferramentas de simulação que permitem modelar perfis térmicos e projetar sistemas de difusão de ar adequados de acordo com a arquitetura da sala de aula, a ocupação e a atividade, permite antecipar condições desfavoráveis e corrigi-las com antecedência. Assim, essa abordagem preditiva, complementada por um projeto integrado e monitorização contínua das variáveis ambientais, garante um maior grau de satisfação térmica entre alunos e professores (Soler & Palau, 2022).

2.2.6. Iluminação e conforto visual

A iluminação considera os aspetos físicos, fisiológicos e psicológicos relacionados com a luz. A luz natural é um dos recursos mais abundantes e é importante na nossa regulação fisiológica, metabólica e comportamental. Tanto a iluminação natural como a artificial devem ter em conta a sua qualidade e quantidade para o desenvolvimento ótimo das várias atividades (Granados et al., 2024).

O conforto visual é definido como a sensação de bem-estar durante a realização de uma atividade, embora seja considerado uma condição subjetiva, está diretamente relacionado com a qualidade da luz no espaço de trabalho, especialmente se estivermos a

falar de estudantes que frequentam o curso à noite, onde há pouca ou nenhuma iluminação natural (Proaño & Mendoza, 2024). Numa sala de aula depende da quantidade, qualidade e distribuição da luz para tarefas como ler, escrever ou visualizar o quadro, bem como da ausência de fatores incômodos (encandeamento, cintilação, contrastes excessivos). Uma iluminação bem desenhada melhora a acuidade visual e reduz a fadiga ocular, criando um ambiente de aprendizagem agradável (Velásquez et al., 2023).

Uma iluminação adequada nos espaços educativos é um fator fundamental para o bem-estar e o desempenho acadêmico dos alunos. Um ambiente bem iluminado contribui para melhorar a concentração e a capacidade de atenção, elementos essenciais para uma aprendizagem eficaz. Nas salas de aula, recomenda-se que a iluminância sobre as superfícies de trabalho se situe entre 300-500 lux, sendo os valores mais elevados especialmente úteis para tarefas visuais detalhadas ou para estudantes adultos. Além da intensidade luminosa, é essencial garantir uma boa uniformidade da luz, a fim de evitar zonas excessivamente escuras junto a áreas demasiado iluminadas. Durante o dia, deve-se aproveitar ao máximo a luz natural difusa através de janelas ou claraboias, controlando o brilho solar direto com persianas ou cortinas (Velásquez et al., 2023). De acordo com estudos recentes, aumentar a iluminação de 300 para 500 lux pode aumentar o desempenho dos alunos em 8%, enquanto níveis mais elevados, como 2000 lux, podem aumentar o desempenho até 20% (Proaño & Mendoza, 2024). Além disso, uma iluminação adequada previne a fadiga visual, que é uma das principais causas de desconforto ocular e de redução do conforto durante o estudo, podendo originar sintomas como visão turva, dores de cabeça e cansaço, afetando a concentração e o tempo efetivo de estudo (Muvit, 2025).

Brink - Krijnen et al. (2023) destacam o papel crítico da qualidade do ambiente interior na satisfação dos ocupantes dos edifícios de ensino superior. O estudo de campo realizado em salas de aula holandesas no ano letivo de 2020-2021 avaliou se três parâmetros ambientais deveriam ser alinhados com a classe A das diretrizes nacionais: tempo de reverberação ($RT \leq 0,4$ s), iluminância horizontal (≥ 750 lx) e ventilação que manteve $CO_2 < 800$ ppm; melhorou a percepção e o desempenho dos alunos. Com 201 alunos avaliados, a redução do RT aumentou a percepção do desempenho cognitivo; A adição de luz mais intensa reforçou a avaliação do ambiente e a qualidade percebida da aprendizagem, embora tenha prejudicado as capacidades de resolução de problemas e não tenha alterado os resultados nos testes de conteúdo. Quando foi adicionada a melhoria da qualidade do ar interior, os benefícios subjetivos desapareceram. Concluíram que a otimização da acústica e da iluminação aumenta o conforto percebido, mas não garante um impacto acadêmico imediato e pode ter efeitos opostos em tarefas cognitivas específicas; a

sequência ou combinação de intervenções pode ser decisiva, aspeto que ainda tem de ser esclarecido.

Num outro trabalho de Brink - Lechner et al. (2023) investigaram qualitativamente a relação entre a qualidade do ambiente interior das salas de aula, as respostas internas dos professores e dos alunos e o desempenho académico. Através de entrevistas semiestruturadas com 11 professores e três focus group com 24 alunos, o estudo mostrou que as deficiências térmicas, luminotécnicas, acústicas e de qualidade do ar dificultam o ensino e a aprendizagem: a ventilação natural, necessária para melhorar a qualidade do ambiente interior, gera perturbação sonora; os professores optam por encurtar ou interromper as aulas; e os alunos reportam menor concentração, perturbações emocionais e pior perceção da qualidade da aprendizagem.

Para mitigar esses efeitos, recomenda-se otimizar o aproveitamento da luz natural através do projeto de janelas amplas, livres de obstruções, bem como a orientação adequada dos espaços. Complementarmente, devem ser implementados sistemas de iluminação artificial com tecnologia LED (*light-emitting diode*) regulável, que permitam ajustar a intensidade e a temperatura da cor de acordo com o tipo de atividade. Essas soluções não só melhoram a velocidade de leitura e a compreensão, mas também reduzem a hiperatividade, a fadiga ocular e os distúrbios do sono, contribuindo assim para um ambiente de aprendizagem mais saudável e eficaz. Além disso, o uso de iluminação inteligente permite uma gestão mais eficiente da energia, fortalecendo a sustentabilidade dos centros educacionais (Muvit, 2025).

2.3. Legislação e Normas

A qualidade do ar e o conforto térmico nos edifícios de ensino estão sujeitos a um quadro regulamentar em constante evolução, tanto a nível nacional como internacional.

2.3.1. Normas internacionais

Organismos como a OMS, a ASHRAE e a ISO estabeleceram critérios técnicos amplamente reconhecidos e adotados a nível global, definindo parâmetros de referência para a concentração de CO₂, a humidade relativa do ar, a temperatura do ar e outros fatores determinantes da qualidade do ambiente interior.

No que diz respeito à concentração de CO₂, o valor de 1000 ppm é amplamente citado na literatura como limiar de referência que não deve ser ultrapassado para garantir ventilação adequada e conforto dos ocupantes (Rus et al., 2021). O Regulamento de Instalações Térmicas em Edifícios (RITE), em Espanha, estabelece uma concentração máxima de 900 ppm, correspondente à categoria IDA 2, qualidade do ar considerada boa, valor igualmente recomendado pela norma europeia EN 13779 (Meiss et al., 2021). Países

como a França fixam o limite em 1300 ppm, o Reino Unido em 1500 ppm e os Estados Unidos recomendam um máximo de 1100 ppm (Meiss et al., 2021; Pérez-Moneo et al., 2025). A norma EN 16798-1:2019, que sucedeu à EN 15251, estabelece categorias de qualidade do ar interior com base nos níveis de CO₂ acima da concentração exterior, sendo amplamente adotada no contexto europeu como referência para o dimensionamento de sistemas de ventilação em edifícios de uso coletivo, incluindo estabelecimentos de ensino.

Relativamente à temperatura do ar, o RITE e a norma EN 16798-1:2019 recomendam, para espaços de ocupação sedentária como salas de aula, uma temperatura do ar entre 21-23 °C no período de aquecimento e entre 23-25 °C no período de arrefecimento (Meiss et al., 2021).

No que concerne à humidade relativa do ar, os valores de referência internacionalmente reconhecidos situam-se entre 40% e 50% durante o inverno e entre 45% e 60% durante o verão, intervalos que refletem consenso normativo nos requisitos de conforto higrotérmico (Meiss et al., 2021).

Quanto ao material particulado PM_{2,5}, a OMS propõe limites mais exigentes do que os estabelecidos por muitas normas em vigor: 15 µg/m³ como média diária e 5 µg/m³ como média anual. A norma norte-americana ASHRAE 62.1, por sua vez, admite concentrações até 35 µg/m³ (Pérez-Moneo et al., 2025), evidenciando que os critérios internacionais divergem quanto ao nível de proteção conferido à saúde dos ocupantes.

No domínio da iluminação, a norma europeia EN 12464-1 recomenda níveis de iluminância entre 300 e 500 lux para tarefas de leitura e escrita em ambientes educativos, podendo atingir valores superiores em contextos de maior exigência visual.

2.3.2 Enquadramento legal na União Europeia e em Portugal

A União Europeia tem demonstrado um forte compromisso com a qualidade do ar interior, refletido na Diretiva (UE) de 23 de outubro de 2024 relativa à qualidade do ar ambiente exterior e a um ar mais limpo na Europa. Esta diretiva, que entrou em vigor em 10 de dezembro de 2024, estabelece objetivos de qualidade do ar interior para prevenir ou reduzir os efeitos nocivos para a saúde humana e o ambiente. Visa alinhar as normas de qualidade do ar da UE com as mais recentes orientações da OMS até 2030 (Diretiva (UE) 2024/2881 do Parlamento Europeu e do Conselho, 2024).

Embora não exista uma diretiva europeia dedicada exclusivamente à qualidade do ar interior (QAI), várias disposições regulamentares relevantes incidem sobre esta matéria. A Diretiva 2010/31/UE relativa ao desempenho energético dos edifícios (*Energy Performance of Buildings Directive*, EPBD), revista em 2018, incentiva os Estados-Membros a considerarem a QAI no contexto da melhoria do desempenho energético. Por sua vez, a

Diretiva (UE) 2013/59/Euratom estabelece requisitos para a concentração de radão em espaços interiores, fixando um nível de referência de 300 Bq/m³ e obrigando os Estados-Membros a adotarem medidas corretivas sempre que este valor seja excedido, disposição que Portugal transpôs para o ordenamento jurídico nacional através do Decreto-Lei n.º 108/2018 (Portugal. Ministério do Ambiente e Ação Climática, 2021).

Em paralelo, a revisão da EPBD, consubstanciada na Diretiva (UE) 2024/1275, em vigor desde maio de 2024, representa um avanço significativo ao introduzir, pela primeira vez, disposições específicas em matéria de QAI. Esta diretiva não só apresenta uma definição formal do conceito, como consagra o princípio da QAI ótima e impõe aos Estados-Membros a obrigação de estabelecerem requisitos nacionais para a aplicação de normas adequadas, com vista à garantia de um ambiente interior saudável (European Commission, 2024).

Em Portugal, a regulamentação relativa à qualidade do ar interior e ao conforto térmico nos estabelecimentos de ensino foi totalmente alinhada com o “Pacote Energia Limpa” europeu, na sequência da publicação do Decreto-Lei n.º 101-D/2020 de 7 de dezembro de 2020. Esta norma transpõe a Diretiva (UE) 2018/844 e determina que “todos os edifícios de comércio e serviços em funcionamento” devem cumprir parâmetros mínimos de qualidade do ar interior, com valores-limite de poluentes definidos e condições de referência. Adicionalmente, impõe a realização de avaliações periódicas, com periodicidade mínima anual, nos edifícios de maior dimensão que integrem creches, educação pré-escolar, ensino básico do primeiro ciclo ou estruturas residenciais para pessoas idosas, devendo estas ser conduzidas por técnicos de saúde ambiental.

Para concretizar estes requisitos, a Portaria n.º 138-G/2021 de 1 de julho fixou os valores limite de proteção e os métodos de medição de CO₂, PM_{2,5}, PM₁₀, CO, formaldeído, COV totais e parâmetros microbiológicos. Estabelece igualmente que os grandes edifícios, bem como aqueles que integrem os referidos usos sensíveis, ficam sujeitos a uma avaliação anual simplificada de requisitos específicos de qualidade do ar interior, incluindo a verificação da conformidade dos resultados obtidos.

No que respeita à qualidade do ar exterior, o Decreto-Lei n.º 102/2010 transpôs a Diretiva 2008/50/CE do Parlamento Europeu e do Conselho, de 21 de Maio e estabeleceu valores limite para as partículas em suspensão, ozono e outros poluentes no ar ambiente. Estes valores servem de referência para avaliar a influência do ar exterior na QAI das escolas. Para além da legislação, organismos como a OMS Europa e a REHVA (*Federation of European Heating, Ventilation and Air Conditioning Associations*) publicaram

recomendações pós-COVID-19 para aumentar a ventilação em escolas, complementando o enquadramento legal com boas práticas na gestão da QAI (Meiss et al., 2021).

Como suporte técnico, as normas EN 13779:2007 (hoje complementada pela EN 16798-1:2019) definem categorias de qualidade do ar interior (IDA 1-4) em função da concentração de CO₂ sobre o exterior, e sugerem caudais de ventilação por pessoa. A EN 15251/2007 (substituída igualmente por EN 16798) aborda critérios de conforto térmico e QAI para projeto. Estes documentos são voluntários, mas referenciados nas regulamentações nacionais (PCE Instruments, 2024).

Verifica-se, assim, que o quadro legal português exige que os “edifícios de serviços” disponham de sistemas de ventilação capazes de manter a QAI dentro dos limites estabelecidos pela Portaria 138-G/2021 de 1 de julho e que documentem anualmente o seu cumprimento através da ASA; este facto articula-se com a certificação energética prevista no Decreto-Lei 101-D/2020 de 7 de dezembro, em coerência com os regulamentos europeus sobre eficiência e salubridade dos edifícios.

2.3.3. Normas e Limiares Aplicáveis aos Parâmetros de Qualidade do Ar Interior

As normas e recomendações para os parâmetros de QAI variam consoante as diferentes entidades e legislações.

A tabela 1 mostra que, para o CO₂, a legislação portuguesa estabelece uma média de 1250 ppm para as salas ocupadas com uma margem de tolerância de 30%. En cuanto a las partículas, estabelece 25 µg/m³ para as PM_{2,5} e 50 µg/m³ para as PM₁₀ (Tabela 1). A tolerância de 100% indicada permite picos até duas vezes mais elevados (50 µg/m³ e 100 µg/m³, respetivamente). Estes valores estão em conformidade com anteriores diretrizes europeias e limites diários para a qualidade do ar exterior (Diretiva 2008/50/CE). A nova Diretiva 2024/2881 da UE visa reduzir o limite de PM_{2,5} de 25 µg/m³ para 10 µg/m³ até 2030, e o de PM₁₀ de 50 µg/m³ para 20 µg/m³ (Diretiva (UE) 2024/2881, 2024), mas, por enquanto, o regulamento atual mantém 25/50 µg/m³.

Tabela 1 - Limiar de proteção e margem de tolerância para os poluentes físico-químicos

Poluentes	Unidade	Limiar de proteção	Margem de tolerância [%]
CO ₂	ppm	1250	30
PM ₁₀	µg/m ³	50	100
PM _{2,5}	µg/m ³	25	100

Fonte: Portaria 138-G/2021 de 1 de julho

A Tabela 2 apresenta os valores de concentração de CO₂ adotados em diferentes referenciais normativos para salas de aula, observando-se uma variação entre 900 ppm e 1500 ppm. Neste conjunto, Portugal estabelece 1250 ppm, valor que se situa acima da referência da EN 16798-1:2020 da União Europeia (950 ppm), da Espanha (900 ppm) e

dos Estados Unidos (1100 ppm), mas abaixo dos limites admitidos pela Alemanha e pelo Reino Unido, ambos fixados em 1500 ppm.

Tabela 2 - Requisitos de concentração de CO₂ nas salas de aula em diferentes países

Região e legislação	Concentração CO ₂ [ppm]
Portugal [RECS (2013)]	1250
Europa [EN 16798-1:2020]	950
Alemanha [DIN 1946-4 (2005)]	1500
Espanha [RITE (2007)]	900
Reino Unido [Boletín de Construcción 101 (2018)]	1500
Estados Unidos [ASHRAE 62.1 (2019)]	1100

Fonte: (Meiss et al., 2021).

Relativamente à Iluminação, as normas ISO 8995 e EN 12464-1 recomendam entre 300 e 500 lux sobre a superfície de trabalho em salas de aula; valores mais altos (500 lux) são indicados para tarefas visuais finas ou para estudantes adultos. É igualmente importante a uniformidade luminosa (mínimo/médio $\geq 0,6-0,7$) a fim de evitar zonas demasiado escuras ao lado de áreas muito iluminadas. De dia, a luz natural difusa deve ser maximizada através de janelas ou claraboias, controlando o encandeamento solar com estores ou cortinas (Velásquez et al., 2023).

Portugal adota as orientações europeias através da Norma Portuguesa NP EN 12464-1:2017 (Tabela 3), que define os níveis mínimos de iluminância, uniformidade, controlo de encandeamento e reprodução de cor para cada tipo de espaço. Nas salas de aula, a norma estabelece 300-500 lx, $UGR \leq 19$ e uniformidade $\geq 0,60$, garantindo conforto visual e condições adequadas ao ensino. A NP EN 12464-2:2017 aplica-se ainda às áreas exteriores escolares, promovendo a segurança e a continuidade entre os espaços interiores e exteriores.

Tabela 3 - Quadro regulamentar para a iluminação dos edifícios

Norma	Âmbito legal em PT	Requisitos quantitativos mais relevantes*
NP EN 12464-1:2017	Requisitos de iluminação para locais de trabalho interiores. Diretamente aplicável a salas de aula, bibliotecas, laboratórios, etc.	Salas de Aula: Em = 300 lx (ensino geral) ou 500 lx (formação de adultos), $UGR \leq 19$, $U_0 \geq 0,60$, $R_a \geq 80$. Escala oficial de iluminância: 20 - 5000 lx.
NP EN 12464-2:2017	Requisitos para os locais de trabalho exteriores (parques infantis, rampas, acessos). Complementa a parte 1 para as áreas exteriores dos estabelecimentos de ensino.	Estabelece valores mínimos de iluminação na zona de trabalho e nas zonas circundantes, controlos do encandeamento e critérios de restituição das cores; a metodologia é descrita no ponto 4 e nos quadros 5.1-5.15.

Fonte: NP EN 12464-1 (2017a) y NP EN 12464-2 (2017b).

*Os valores de exemplo são retirados das tabelas específicas para os estabelecimentos escolares; a norma inclui tabelas equivalentes para outros espaços (escritórios, saúde, indústria, etc.), bem como critérios adicionais de uniformidade, UGR e manutenção.

Quanto ao conforto térmico, ele resulta do equilíbrio energético entre o corpo humano e o ambiente. Esse equilíbrio é expresso através dos modelos de Fanger, onde o Voto Médio Previsto (PMV) é calculado considerando a produção metabólica (M), o trabalho mecânico (W), as trocas por radiação (R), convecção (C), condução (K), evaporação (E) e respiração (Res). A partir desse equilíbrio, obtém-se a Percentagem Prevista de Insatisfeitos (PPD), que estima a proporção de ocupantes insatisfeitos com o ambiente térmico. O PMV varia numa escala de -3 (muito frio) a +3 (muito quente), e aceita-se que valores entre -0,5 e +0,5 correspondem a um PPD inferior a 10 %, condição considerada confortável (ISO 7730:2005; CEN, 2005) (Ruas, 2023).

No entanto, reconhece-se que as normas tradicionais, como a ASHRAE 55, foram elaboradas principalmente com base em estudos realizados em climas temperados da América do Norte e Europa, o que limita a sua aplicabilidade em regiões tropicais ou contextos socioculturais diversos. Por isso, normas mais recentes, como a EN 16798-1:2019, incorporam categorias de referência que permitem ajustar os sistemas de climatização a diferentes graus de exigência de conforto (desde ambientes de alta qualidade - Categoria I - até ambientes de qualidade aceitável - Categoria III), conciliando as necessidades dos ocupantes com a eficiência energética (Ruas, 2023).

A norma ANSI/ASHRAE 55-2020 estabelece as condições ambientais que permitem que pelo menos 80 % dos ocupantes de um espaço estejam termicamente confortáveis. A norma limita o rácio de humidade a 0,012 kg H₂O/kg de ar seco (60 % HR a 26 °C), regula as correntes de ar (máx. 0,15 m s⁻¹ a < 22,5 °C) e estabelece limiares de desconforto local (por exemplo, diferenças de temperatura verticais ≤ 3-4 °C). Além disso, exige a documentação dos momentos em que as condições excedem as gamas de conforto e especifica os procedimentos de medição e os inquéritos aos ocupantes dos edifícios existentes (ASHRAE, 2020).

Em complemento, o apêndice f da norma ANSI/ASHRAE 55-2010 reforça esses critérios, estabelecendo valores concretos para o desconforto térmico local e as variações de temperatura ao longo do tempo. Entre eles destacam-se: uma diferença vertical máxima de 3 °C entre a cabeça e os tornozelos, limites de assimetria radiante de 5 °C para tetos quentes, 10 °C para paredes frias, 14 °C para tetos frios e 23 °C para paredes quentes; uma temperatura do piso aceitável na faixa de 19-29 °C; e uma velocidade do ar inferior a 0,15 m/s em ambientes com temperaturas abaixo de 22,5 °C, exceto quando os ocupantes dispõem de controlo local. Além disso, a variação cíclica da temperatura é limitada a ±1,1

°C em períodos inferiores a 15 minutos e as derivações ou rampas a um máximo de 2,2 °C por hora. O objetivo global é que a percentagem de insatisfação por fatores locais não ultrapasse os 10 %, complementando assim o critério geral de 80 % de aceitação térmica definido pelo PMV/PPD (ASHRAE, 2010).

Em Portugal, o antigo Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios (RSECE) e as normas de conforto térmico adotam as gamas da EN 15251: no inverno, 20-24 °C; no verão (com ar condicionado), 23-26 °C como banda de projeto. Vale a pena mencionar que, para os edifícios sem ar condicionado, são aplicados os critérios de conforto adaptativo (ASHRAE 55 Adaptive Model), em que a temperatura de conforto interior depende da temperatura do ar exterior média, por exemplo, a 30 °C no exterior, são tolerados cerca de 28 °C no interior com ar em movimento. Mesmo assim, 28 °C é normalmente definida como a temperatura do ar máxima de funcionamento interior no verão, antes de se considerarem as condições de stress térmico.

Embora a ventilação não seja um “valor único” observável sem uma medição específica, os regulamentos fornecem critérios. A legislação portuguesa não fixa L/s por pessoa no texto legal, mas a REHVA/ASHRAE recomenda em salas de aula onerosamente 8-14 L/s·pessoa de acordo com a ocupação para manter o CO₂ abaixo de 1000 ppm. A norma EN 16798-1 /2019 sugere para salas de aula de alta qualidade (Cat. I) 14 L/s·pessoa, qualidade média (Cat. II) 10 L/s·pessoa. Em Espanha, a RITE indica um caudal mínimo de 12,5 L/s·pessoa nas salas de aula (equivalente a IDA 2). Em geral, um valor de 5-6 renovações de ar por hora (ACH) em salas de aula totalmente ocupadas é considerado adequado para uma qualidade elevada (Arias & Ávila, 2025).

2.4 Estratégias para otimizar a qualidade ambiental em espaços educativos

Porras (2025), Pérez-Moneo et al., (2025), Muvit (2025), sugerem a implementação das seguintes estratégias:

(a) O conforto térmico e a qualidade do ar interior estão estreitamente relacionados. A perceção de bem-estar num espaço não depende apenas da temperatura, mas também da circulação e pureza do ar. Uma sala de aula com temperatura do ar adequada, mas sem renovação suficiente do ar, pode acumular CO₂ e comprometer a concentração dos alunos. Inversamente, uma ventilação elevada sem controlo térmico pode provocar desconforto devido a correntes de ar ou temperaturas instáveis. Para evitar estes problemas, é necessário integrar estratégias de projeto e de operação que otimizem simultaneamente ambas as variáveis, como resumo em seguida:

(b) Gestão térmica e ventilação combinada: em climas quentes, a ventilação deve ser projetada para reduzir a carga térmica sem provocar sobreaquecimento. A ventilação cruzada, o recurso a chaminés solares e a inércia térmica de determinados materiais permitem alcançar este equilíbrio sem dependência excessiva de sistemas mecânicos. Em salas com ocupação intermitente, sistemas que possibilitem o acondicionamento rápido do ar antes da entrada dos alunos podem constituir uma solução eficaz.

(c) Controlo da humidade relativa do ar: uma humidade elevada pode aumentar a sensação de calor e favorecer a proliferação de microrganismos, afetando a qualidade do ar interior. Em escolas situadas em zonas de elevada humidade, o projeto deve contemplar materiais com baixa absorção de água, coberturas ventiladas e sistemas de drenagem de condensados, evitando a acumulação de humidade em paredes e tetos. Estratégias passivas e ativas de desumidificação, combinadas com ventilação controlada por procura, podem prevenir estes efeitos sem gerar custos energéticos adicionais.

(d) Sistemas de ventilação adaptativos: espaços educativos com grande variabilidade de ocupação necessitam de sistemas capazes de ajustar a ventilação e a climatização consoante a procura real. Sensores de CO₂, temperatura do ar e humidade do ar podem ativar estratégias de renovação do ar quando os níveis de contaminantes excedem os valores recomendados, melhorando a qualidade do ar e o conforto térmico sem consumos desnecessários. Além disso, um sistema que regule o caudal de ar fresco de acordo com o número de ocupantes pode evitar picos de CO₂ que prejudiquem a função cognitiva.

(e) Integração da envolvente com a qualidade do ar interior: o design das fachadas e a orientação do edifício influenciam diretamente a necessidade de ventilação e climatização mecânica numa sala de aula. Edifícios com janelas situadas em orientações estratégicas podem tirar melhor partido da ventilação natural e minimizar o ganho térmico interno. Além disso, o uso de vidros de controlo solar, superfícies refletoras e coberturas ventiladas pode reduzir a carga térmica, permitindo que as salas mantenham uma temperatura do ar confortável sem recurso constante a ventilação forçada.

Em linha com as estratégias propostas, Andrade et al. (2025) destacam a necessidade de intervenções integradas para melhorar a qualidade ambiental interior em IES, especialmente diante dos desafios das alterações climáticas. Entre as estratégias mais destacadas estão o uso de ventilação natural cruzada e sistemas mecânicos controlados por sensores, capazes de ajustar o fluxo de ar fresco de acordo com a ocupação real da sala de aula. Além disso, destaca-se a implementação de purificadores com filtros HEPA e de plantas interiores (fitorremediação) para mitigar contaminantes como

PM_{2,5}, COVs e CO₂, melhorando assim a saúde e o desempenho cognitivo dos estudantes. O projeto arquitetónico também desempenha um papel essencial: recomenda-se a incorporação de sombreamentos solares, coberturas verdes e janelas estrategicamente localizadas que maximizem a ventilação natural e reduzam a carga térmica. Por outro lado, a iluminação eficiente e regulável e o uso de materiais de construção com baixas emissões de compostos orgânicos voláteis complementam uma abordagem holística que prioriza o conforto térmico, a acústica e a qualidade do ar, promovendo o bem-estar físico, mental e cognitivo dos alunos.

2.5. Power BI e Visualização de Dados Ambientais

2.5.1. Conceitos de Power BI e Ferramentas

O Power BI é uma ferramenta de *Business Intelligence* (BI) desenvolvida pela Microsoft, concebida para transformar dados brutos em informação visual interativa e acionável. É amplamente reconhecido como uma das ferramentas de visualização de dados mais populares e robustas do mercado (Microsoft Power Platform, s. f.). O Instituto Superior do Meio Ambiente (ISM, 2025) indica que permite uma análise de dados interativa, rápida e eficiente, pode ser ligado a outras ferramentas, como o Excel ou o Teams, e facilita a tomada de decisões com base em informações precisas e atualizadas.

Chapellier (2024) explica que se trata de uma plataforma de *business intelligence* composta principalmente por três componentes: Power BI Desktop (aplicação de ambiente de trabalho para desenvolver relatórios e modelos de dados), Power BI Service (serviço na nuvem para publicar e partilhar *dashboards*) e Power BI Mobile (aplicação para visualizar relatórios em dispositivos móveis). Com o Power BI, os utilizadores podem ligar-se a inúmeras fontes de dados, como ficheiros Excel, bases de dados SQL, serviços em nuvem, dados IoT em tempo real, etc., combinar e transformar esses dados e, por fim, criar *dashboards* visuais interativos utilizando gráficos, mapas, tabelas dinâmicas e outros elementos visuais.

A Tabela 4 resume os principais componentes do Power BI e as suas funções complementares. O Power BI Desktop permite criar e modelar relatórios, o Power BI Service facilita a publicação e partilha na nuvem, e o Power BI Mobile assegura o acesso aos *dashboards* em dispositivos móveis. Em conjunto, estes componentes reforçam a flexibilidade e a capacidade de análise da plataforma.

Tabela 4 - Principais componentes do Power BI

Componente	Descrição
Power BI Desktop	Ferramenta de ambiente de trabalho orientada para o ambiente de desenvolvimento que permite a ligação a várias fontes de dados e a criação de relatórios. É o ponto de partida do fluxo de uma solução analítica com Power BI, já que é onde se modelam os dados e se desenham os <i>dashboards</i> .
Power BI Service (SaaS)	Plataforma em nuvem sob o modelo <i>Software-as-a-Service</i> que oferece um ambiente colaborativo para múltiplos utilizadores. Facilita a gestão, a publicação e a partilha de relatórios criados no <i>Desktop</i> , bem como o controlo de acesso e a atualização programada de conjuntos de dados.
Power BI Mobile	Aplicação concebida para dispositivos móveis Android e iOS que permite consultar e explorar os relatórios e painéis de controlo publicados no serviço, oferecendo acesso em tempo real aos principais indicadores a partir de smartphones ou tablets.

Fonte: Rioja (2022)

Um dos pontos fortes do Power BI é a sua integração com o ecossistema Microsoft Office 365, que facilita a importação de dados do Excel ou do SharePoint e a partilha de resultados através do Teams, OneDrive, etc. De facto, a ferramenta foi concebida não só para tornar acessível a visualização de dados complexos, mas também para simplificar a criação de relatórios dinâmicos e a sua divulgação colaborativa nas organizações (Chapellier, 2024).

Em termos de interatividade, o Power BI permite que os gráficos e os filtros respondam à seleção do utilizador em tempo real: ao clicar numa categoria de um gráfico, todos os outros elementos visuais se ajustam para refletir esse filtro, fornecendo *insights* rápidas. Também incorpora linguagem natural (Q&A) para consultar os dados com perguntas como “Qual foi o consumo de energia em 2022 por edifício?” e obter respostas visuais instantâneas. Estas capacidades fazem do Power BI uma ferramenta muito versátil para a tomada de decisões com base em dados atualizados e precisos (ISM, 2025).

2.5.2. Aplicações do Power BI

No setor do ambiente e da sustentabilidade, o Power BI tem encontrado uma ampla aplicação para gerir e comunicar dados ambientais de forma eficaz. As organizações e os profissionais do ambiente utilizam o Power BI para visualizar e acompanhar indicadores como os níveis de poluição atmosférica, as emissões de CO₂, o consumo de energia, a produção de resíduos, entre outros (ISM, 2025). Por exemplo, é possível ligar o Power BI a uma base de dados sobre a qualidade do ar numa cidade e criar um painel que mostre em tempo real as concentrações de poluentes (PM_{2,5}, NO₂, etc.) por zona, com códigos de cores de acordo com a regulamentação, permitindo identificar rapidamente as zonas com má qualidade do ar e a sua evolução ao longo do tempo. De facto, foram desenvolvidos

dashboards de ciência cidadã onde a população pode consultar a qualidade do ar na sua localidade de uma forma amigável graças a este tipo de ferramenta.

Outra aplicação relevante é a monitorização da pegada de carbono e energia. Empresas e universidades têm utilizado o Power BI para consolidar dados de consumo de eletricidade, consumo de água e emissões dos seus vários locais, criando *dashboards* de sustentabilidade. Um caso ilustrativo é o do Gabinete de Turismo de Sevilha, que produziu um relatório interativo em Power BI com seis grandes índices de sustentabilidade turística e a pegada de carbono associada ao transporte de visitantes. Este relatório permitia a filtragem por ano ou semestre e apresentava um índice global resumido, facilitando a comunicação dos seus esforços de turismo sustentável de uma forma transparente. Por detrás desta aparente simplicidade estava um poderoso processamento de dados: o sistema cruzou 26 indicadores diferentes para obter 7 indicadores compostos que foram depois visualizados, tudo quase em tempo real. Isto demonstra como uma boa visualização interativa pode resumir *big data* ambientais em informações digeríveis para os gestores e o público, sem exigir conhecimentos técnicos avançados para a sua interpretação (Chapellier, 2024).

Outra área de aplicação é a geração de relatórios de sustentabilidade de empresas ou instituições. Tradicionalmente, um relatório de sustentabilidade é um documento estático (PDF) com tabelas e gráficos fixos. Com o Power BI, várias entidades migraram para relatórios dinâmicos online, onde os investidores ou stakeholders podem navegar pelas diferentes secções, filtrar por parâmetros (ano, região, tipo de questão) e ver os resultados atualizados em tempo real. Um exemplo é o relatório da Repsol sobre a sua contribuição para os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), disponível publicamente em formato Power BI (Chapellier, 2024). Nele, os utilizadores podem filtrar as ações da empresa por ODS, localização geográfica, estado de implementação, etc., tudo através de menus interativos, permitindo que diferentes utilizadores obtenham exatamente a visualização de dados em que estão interessados sem necessitar de vários relatórios separados. Isto demonstra a vantagem da visualização interativa para abordar diversas questões com o mesmo conjunto de dados, aumentando a transparência e a eficiência na comunicação de informações ambientais (Chapellier, 2024).

Num contexto académico, a integração do BI com modelos BIM e GIS permite visualizar dados de sensores ambientais (temperatura do ar, humidade relativa do ar, CO₂, etc.) em painéis interativos. Isto ajuda a otimizar a ocupação do espaço, a programação de atividades e a qualidade ambiental interior em espaços educativos. Os painéis de BI centralizam as informações de várias fontes, permitindo aos gestores identificar

rapidamente áreas de melhoria, responder a emergências e planejar intervenções de manutenção ou melhorias em tempo real (Martino et al., 2024)

É importante mencionar que o Power BI, sendo uma ferramenta geral, não efetua por si só uma análise científica profunda; pelo contrário, facilita o processamento básico e, acima de tudo, a visualização compreensível dos resultados. Em projetos ambientais, complementa frequentemente outro software de modelização ou análise: por exemplo, os resultados de um modelo de qualidade do ar (realizado com software especializado) podem ser carregados no Power BI para comunicar cenários aos decisores políticos de uma forma visual e interativa. As integrações do Power BI também foram vistas com plataformas IoT para cidades inteligentes, onde os dados de sensores ambientais (ruído, poluição, temperatura) fluem automaticamente para painéis de controlo municipais.

3. Metodologia

A metodologia adotada para este estudo abrange desde a extração automatizada de dados de qualidade do ambiente interior/exterior, até à medição manual da iluminância, ao seu tratamento e à análise posterior, seguindo um fluxo de trabalho estruturado para garantir a integridade dos dados e a consistência dos registos ao longo do período de monitorização.

Nesta seção, são abordados a caracterização dos ambientes monitorizados, os equipamentos e técnicas de medição utilizados, bem como o período de medição e de recolha de dados. Descreve-se igualmente o processo de recolha e integração dos dados ambientais, os procedimentos de processamento e modelação da informação recolhida, o cálculo da taxa de renovação de ar e, por fim, o desenvolvimento do *dashboard* em Power BI, que permite a visualização integrada dos resultados obtidos.

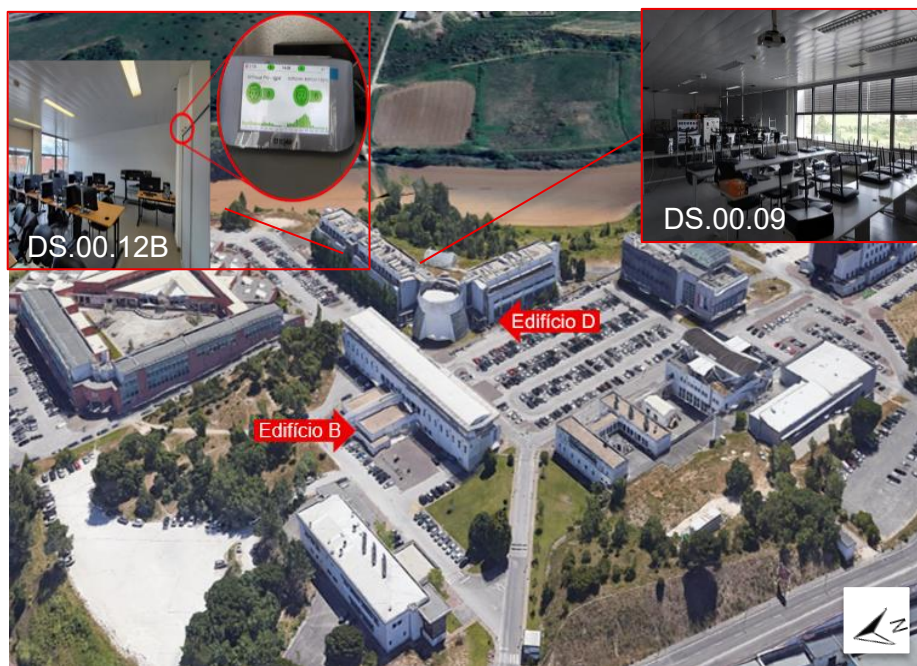
3.1. Caracterização dos Ambientes Monitorizados

No que diz respeito às medições de parâmetros de qualidade do ambiente interior, o estudo foi realizado no Campus 2 do Politécnico de Leiria, com área total de 8851 m², dividida em 5 pisos, considerando dois ambientes interiores no Edifício D e um ponto de referência exterior no Edifício B, conforme apresentado na Figura 6.

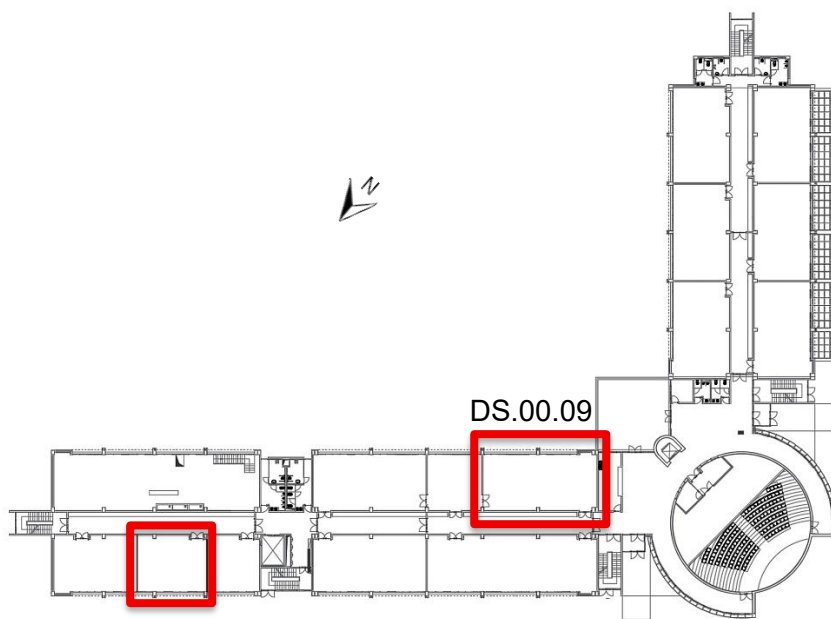
O primeiro espaço de estudo, localizado no Edifício D, corresponde à Sala de Projeto Civil DS.00.12B, com área de 72 m² (Figura 6.a) e orientação noroeste. Esta sala foi selecionada pelas suas condições típicas de ocupação e uso prolongado por parte dos alunos. A caracterização física do ambiente, juntamente com a sua utilização académica frequente, torná-la-á um ambiente ideal para a monitorização dos parâmetros relacionados com a qualidade ambiental interior. O segundo espaço de estudo, igualmente situado no Edifício D, corresponde ao Laboratório de Energia DS.00.09, com área de 120,3 m² (Figura 6.a), orientado sudeste, destinado exclusivamente à medição do parâmetro de iluminância, sem medição de outras variáveis ambientais. A localização e identificação de ambas as salas monitorizadas no edifício podem ser consultadas na planta apresentada na Figura 6.b.

O terceiro espaço de estudo corresponde a um espaço exterior localizado no Bloco B com orientação noroeste, pertencente ao Edifício B do Campus 2 do Politécnico de Leiria (Figura 6.c). Este local foi selecionado como ponto de referência para as medições em condições ambientais do exterior, permitindo comparar os dados obtidos no interior com os do ambiente exterior. A escolha do espaço exterior justifica-se por sua localização e pela capacidade de representar fielmente as condições climáticas e ambientais do campus em

geral, o que constitui um elemento fundamental para a interpretação comparativa dos níveis de qualidade do ar interior e exterior.



(a)



(b)

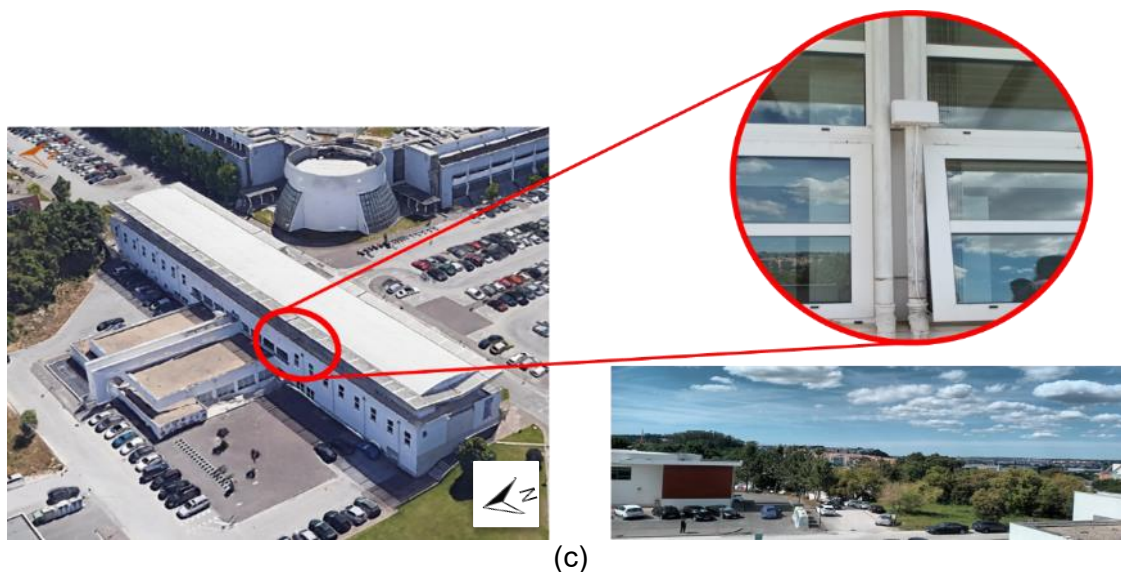


Figura 6 - (a) Vista aérea do Campus 2, com identificação dos Edifícios B e D e localização das salas DS.00.12B e DS.00.09; (b) Plano do Edifício D, com identificação das salas monitorizadas; (c) Localização do ponto de medição no exterior do Edifício B.

3.2. Equipamentos e técnicas de medição

Neste item apresentam-se os equipamentos utilizados e as técnicas adotadas para a monitorização dos parâmetros de qualidade do ambiente interior e exterior ao longo do estudo.

3.2.1 Equipamentos de medição utilizados

Para a monitorização da qualidade do ambiente interior no Edifício D (sala DS.00.12B) e das condições exteriores no Edifício B do Campus 2 do Politécnico de Leiria, selecionaram-se dois equipamentos da marca IQAir: o AirVisual Pro Indoor e o AirVisual Outdoor. Para a medição da iluminância, foram consideradas duas salas, DS.00.12B e DS.00.09, limitando-se aos espaços interiores, utilizando o equipamento TESTO 545. As características técnicas dos equipamentos utilizados encontram-se descritas na tabela 5.

Tabela 5 - Equipamentos utilizados

Equipamento	Descrição	Parâmetros medidos	Unidades	Gama de medição	Precisão
	Medidor de qualidade do ambiente interior	CO ₂	ppm	400...10 000 ppm	±10%
		T	°C	-40°C...90°C	±2°C
		HR	%	0%...100%	±1%
		PM _{2,5}	µg/m ³	0...1 000 µg/m ³	±10 µg/m ³
	Medidor de qualidade do ambiente exterior	CO ₂	ppm	400...10 000 ppm	±10%
		T	°C	-40°C...90°C	±2°C
		HR	%	0%...100%	±1%
		Patm	hPa	300...1 100 hPa	± 1 hPa
		PM ₁ , PM _{2,5} , PM ₁₀	µg/m ³	0...1 000 µg/m ³	±10 µg/m ³
	Luxímetro digital para medir a iluminância	Lux fc	lux	0...100 000 lux	± 3%

É importante ressaltar que o presente estudo não considerou medições de compostos orgânicos voláteis (COV) nem parâmetros microbiológicos do ar interior e do exterior. Esta decisão deve-se à disponibilidade de equipamentos e à delimitação do enfoque técnico da investigação, centrada nos parâmetros físicos e químicos (dióxido de carbono, temperatura do ar, humidade relativa do ar, partículas em suspensão com diâmetros inferiores a 2,5 micrómetros e a 10 micrómetros).

3.2.2. Configuração dos equipamentos

A Tabela 6 sintetiza a configuração de cada equipamento utilizado, permitindo distinguir claramente suas características operacionais, condições de instalação e procedimentos de funcionamento.

Tabela 6 – Resumo das principais configurações dos equipamentos utilizados

Equipamento	Local de Instalação	Ligação e Configuração	Principais Procedimentos
IQAir AirVisual Pro Indoor	Sala DS.00.12B (interior)	Ligação à corrente elétrica; configuração manual via ecrã LED; ligação à rede Wi-Fi do edifício; associação à conta no portal web IQAir.	- Configuração de idioma e fuso horário. - Ligação Wi-Fi e verificação de sinal. - Registo de utilizador e associação do dispositivo. - Definição de intervalo de registo (5 min). - Instalação fixa a 1,8 m de altura, afastada de janelas, portas e fontes de interferência.
IQAir AirVisual Outdoor	Terraço Noroeste do Bloco B (exterior aberto)	Ligação por cabo Ethernet com adaptador PoE (alimentação e dados); sincronização automática com o portal web IQAir.	- Ligação física via PoE (rede → adaptador → equipamento). - Registo e associação à mesma conta do modelo <i>Indoor</i>. - Definição de intervalo de registo (5 min). - Montagem vertical com aberturas orientadas para baixo, a 1,7 m do chão, afastado de fontes poluentes.
Luxímetro TESTO 545	Sala DS.00.12B e DS.00.09. Pontos interiores definidos (malhas de medição, altura 0,75 m)	Alimentação por pilhas AA; ligação opcional via Bluetooth à aplicação Testo Smart App.	- Ligar o equipamento (botão ON/OFF 2 s). - Selecionar unidade (lux) e modo de medição. - Posicionar o sensor na horizontal, evitando sombras/reflexos. - Medições em diferentes horários (9h, 16h, 21h) e condições de luz (natural/artificial). - Exportação de dados em formato editável Excel.

3.2.3 Definição da malha para a medição da iluminância

A avaliação da iluminância foi efetuada com base numa malha de medição, entendida como um conjunto de pontos equidistantes distribuídos regularmente no espaço, cuja finalidade é caracterizar adequadamente a distribuição da luz no ambiente e permitir a análise da iluminância média e da uniformidade no plano de trabalho. A densidade da malha foi definida em função das dimensões de cada sala (DS.00.12B e DS.00.09), garantindo um número suficiente de pontos de medição tanto no comprimento quanto na largura, de modo a evitar a sub- ou sobre-representação de determinadas zonas do espaço e a assegurar a comparabilidade dos resultados com os valores de referência normativos.

Conforme preconizado na norma NP EN 12464-1:2017, procedeu-se ao dimensionamento das malhas de medição de iluminância para as salas em estudo, aplicando a fórmula:

$$p = 0,2 \times 5^{(\log d)} \quad (1)$$

onde p representa a distância máxima admissível entre pontos de medição (em metros) e d corresponde à maior dimensão linear da divisão (em metros). Desta forma, calculou-se o número mínimo de pontos ao longo do comprimento (2) e da largura (3), sendo b a dimensão menor da sala.

$$M = \frac{d}{p} \quad (2)$$

$$N = M \times \left(\frac{b}{p}\right) \quad (3)$$

A metodologia adotada privilegiou a avaliação dos níveis de iluminância com base na malha de medição definida pela norma, sendo adicionalmente realizadas medições pontuais nos postos de trabalho com carácter complementar para enriquecer ainda mais a comparação dos dados.

Como se pode observar na Figura 7, de acordo com a legislação em vigor, foram definidos 94 pontos e 68 pontos de medição nas salas para avaliar a iluminância média, mínima e uniformidade, conforme os critérios da norma.

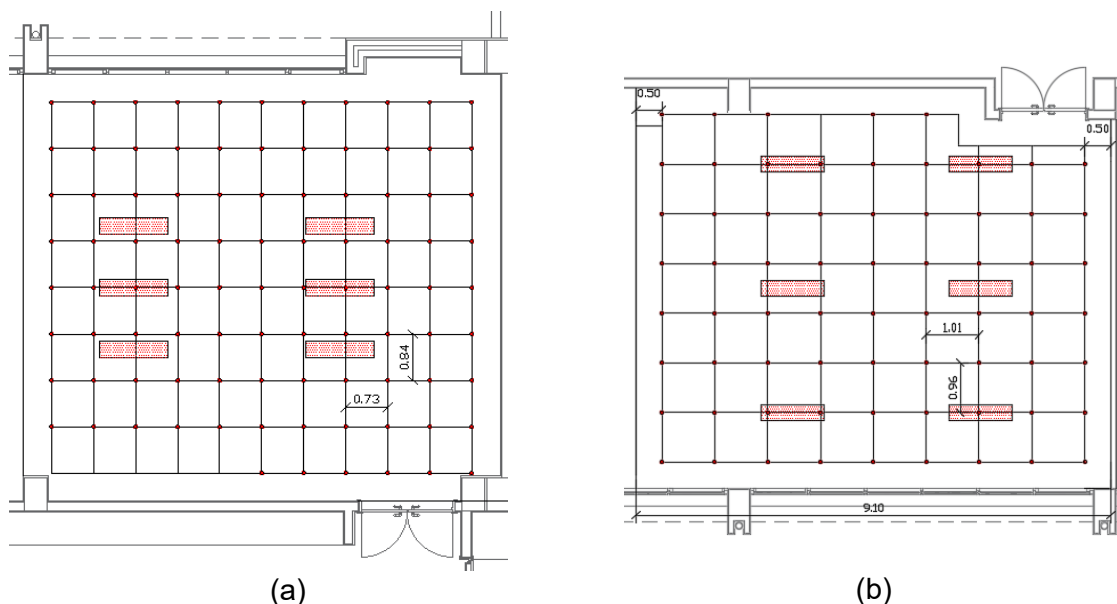


Figura 7 – Grelha para medição da iluminância (norma EN 12464-1:2017). (a) Laboratório de Energia DS.00.09 (94 pontos). (b) Sala Projeto Civil DS.00.12B (68 pontos).

Este número de pontos resulta da aplicação prática da malha de medição anteriormente descrita, considerando as dimensões específicas de cada sala e a necessidade de garantir uma cobertura espacial adequada. A distribuição adotada

assegura que a avaliação da iluminância reflete o comportamento global da iluminação no espaço, permitindo a obtenção de indicadores médios e de uniformidade consistentes e tecnicamente comparáveis aos requisitos normativos.

3.3. Recolha e Integração de Dados Ambientais

3.3.1. Procedimentos de recolha e análise dos dados

O processo de recolha de dados foi concebido para ser totalmente automatizado por meio da interação com a API (Interface de Programação de Aplicações) do IQAir, garantindo um fluxo contínuo e fiável de informações ao sistema. Um *script* desenvolvido em Python (Anexo I), executado a cada 10 minutos, realiza as seguintes ações:

- Solicitação de Exportação via API: O *script* autentica-se e solicita à API do IQAir a exportação dos dados dos dispositivos monitorizados.
- Extração de dados: O *script* descarrega e processa o ficheiro de dados resultante, que contém os valores numéricos dos cinco parâmetros ambientais monitorizados: CO₂ (ppm), Temperatura do ar (°C), Humidade relativa do ar (%), PM_{2,5} (µg/m³) e PM₁₀ (µg/m³).
- Registo temporal: Juntamente com cada conjunto de medições, associa-se um carimbo de data/hora (timestamp) preciso, garantindo a contextualização temporal exata de cada registo.

Assim, a fonte primária de dados é a API do serviço IQAir, que fornece medições contínuas e confiáveis provenientes de sensores instalados no edifício. Os dados recolhidos são de natureza quantitativa e organizados em séries temporais, o que permite observar a evolução dos parâmetros ao longo do tempo. Este ciclo repetitivo garante um conjunto de dados de alta frequência, possibilitando uma análise detalhada das flutuações e tendências da qualidade do ambiente interior.

3.4. Processamento e Modelação dos Dados

3.4.1. Limpeza e Validação dos Dados

Antes da inserção na base de dados, o *script* em Python realiza uma etapa de processamento e validação para assegurar a consistência dos dados. Este processo inclui:

- Verificação de integridade: Confirmação de que todos os cinco parâmetros foram extraídos corretamente. Em caso de falha na leitura de um valor, o registo pode ser descartado para evitar dados incompletos.

- Conversão de tipos: Os valores numéricos das medições são tratados como valores de ponto flutuante (*float*), e o carimbo de data/hora é padronizado e estruturado como um *timestamp*, compatível com a base de dados.

- Gestão de erros: Implementação de lógica para lidar com possíveis erros de ligação ao servidor, registando-os sem interromper o ciclo de extração.

Este processo de limpeza automatizado garante a qualidade, a rastreabilidade e a robustez do conjunto de dados, fundamentais para a análise da qualidade ambiental nos espaços educativos monitorizados.

3.4.2. Modelos Matemáticos e Estatísticos

O foco do projeto não está na modelação preditiva, e sim na análise descritiva. Os cálculos estatísticos são realizados diretamente no Power BI por meio de expressões DAX (Data Analysis Expressions). As principais métricas incluem:

- Cálculo de médias, valores máximos e mínimos para os períodos selecionados pelo utilizador.
- Agregações em tempo real para apresentar o estado atual e a evolução diária.
- Contagem de registos para verificar a continuidade da recolha de dados.
- Comparação dos valores registados com os valores de referência nacionais e internacionais.

3.5. Desenvolvimento do *Dashboard* em Power BI

Neste item, descreve-se o desenvolvimento do *dashboard* no Power BI, bem como a arquitetura do sistema e o fluxo de dados adotado, desde a recolha de dados pelos sensores até à visualização final pelo utilizador.

3.5.1. Arquitetura e Fluxo de Dados

A Figura 8 apresenta a arquitetura do sistema e o fluxo de dados adotado no desenvolvimento do *dashboard* no Power BI.

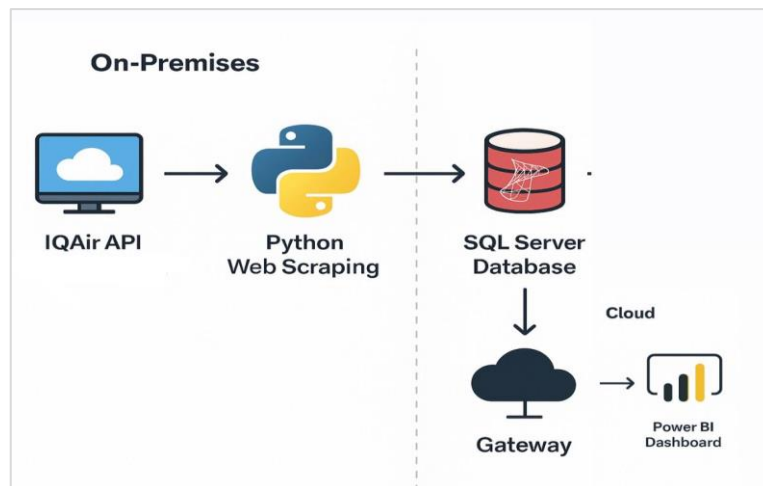


Figura 8 - Estrutura geral do sistema de visualização.

A arquitetura do sistema foi projetada para garantir um fluxo de dados robusto e eficiente desde a fonte até ao utilizador final:

- **Medição (Sensores IQAir):** Os dispositivos capturam continuamente dados sobre a qualidade do ar no edifício.
- **Centralização (API da IQAir):** Os dados são enviados e armazenados na plataforma web dashboard.iqair.com.
- **Extração (*Script* Python):** Um *script* Python, a executar num servidor local, extrai os dados da API a cada 10 minutos.
- **Armazenamento (Base de Dados Local):** O *script* insere os dados extraídos (Temperatura do ar, Humidade relativa do ar, CO₂, PM_{2,5}, PM₁₀, *Timestamp*) numa base de dados relacional do Microsoft SQL Server.
- **Consumo de Dados (Power BI):** O Power BI atualiza os dados a cada 10 minutos. Para que o serviço Power BI (na nuvem) possa aceder de forma segura à base de dados local, utiliza-se um Power BI *Gateway*, que permite a atualização automática dos dados.
- **Visualização (*Dashboard*):** O utilizador final interage com o *dashboard* publicado no serviço Power BI, que obtém os dados da base de dados local, garantindo que a informação permaneça sempre atualizada.

3.5.2. Design das Visualizações e Funcionalidades

O design do *dashboard* foi concebido para ser intuitivo e funcional, dividido em duas modalidades principais de análise (Modo Histórico e Modo Tempo-real), para atender a diferentes necessidades dos utilizadores.

A Figura 9 apresenta o fluxo de dados e a conceção do *dashboard* no Power BI.

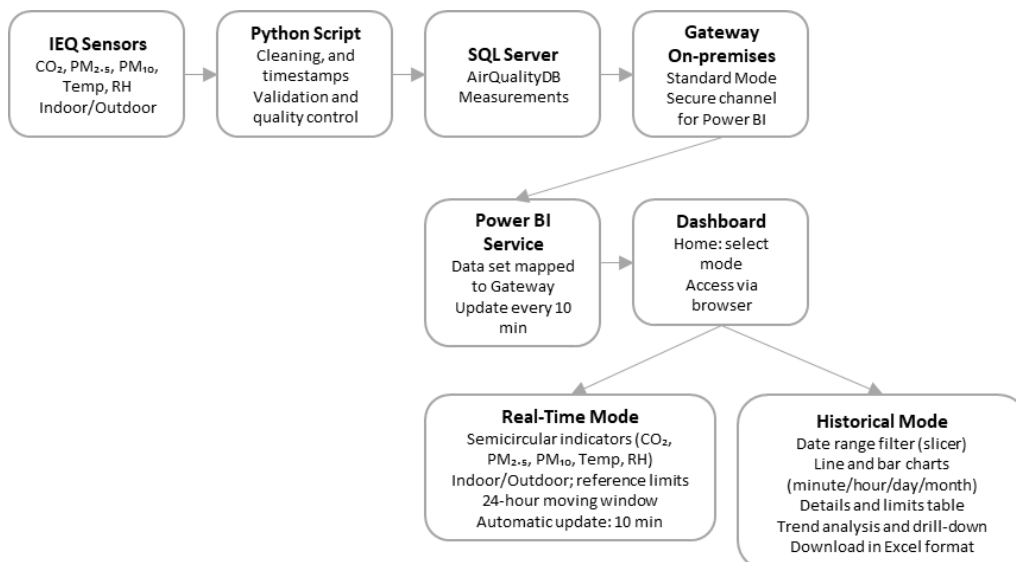


Figura 9 - Fluxo metodológico de dados e conceção funcional do dashboard no Power BI.

O *Historical Mode* permite uma análise retrospectiva. O principal elemento interativo é um seletor de intervalo de datas (*slider*), no qual o utilizador pode definir livremente um período de início e fim. São utilizados gráficos de linha para mostrar a tendência de cada um dos cinco parâmetros ao longo do período selecionado. Esta visualização permite a fácil identificação de padrões de comportamento, de correlações entre variáveis e de anomalias passadas.

O *Real-Time Mode* dá uma visão da evolução da qualidade do ar no dia atual. A página é filtrada e atualizada automaticamente para mostrar, em tempo real, os dados em gráficos dinâmicos semicirculares e também em gráficos de barras e linhas, num intervalo de 24 horas, desde a hora mais recente até à visualização do mesmo horário do dia anterior no mesmo gráfico. O conjunto de dados é atualizado a cada 10 minutos. A visualização principal é um gráfico de linhas e barras que mostra a evolução dos parâmetros ao longo das horas do dia em questão. Adicionalmente, são utilizados gráficos dinâmicos semicirculares que destacam o valor de cada parâmetro em tempo real, oferecendo uma leitura numérica clara e imediata das condições mais recentes no interior do edifício.

3.6 Período de medição e recolha de dados

Seguidamente descrevem-se os períodos de medição e a organização temporal da recolha de dados.

Tabela 7 - Períodos de medição e caracterização da recolha de dados.

Período	Intervalo temporal	Tipo de medição	Caracterização
Período 1	30 de setembro a 20 de dezembro de 2024	Monitorização contínua	Corresponde ao início do ano letivo, refletindo condições típicas de ocupação regular das salas de aula.
Período 2	24 de fevereiro a 6 de junho de 2025	Monitorização contínua	Permite complementar a análise numa fase distinta do calendário académico, possibilitando a comparação entre períodos e a identificação de padrões temporais, operacionais e climáticos.
Campanha de iluminação	10 a 12 de abril de 2024	Medição pontual	Avaliação realizada em diferentes horários e condições de utilização dos espaços, conforme a norma NP EN 12464-1:2017 (ver Anexo II).

A utilização destes diferentes intervalos temporais contribuiu para reforçar a robustez da análise, permitindo avaliar a estabilidade dos resultados ao longo do tempo e apoiar a interpretação dos dados no contexto real de funcionamento dos espaços educativos estudados.

3.7 Taxa de Renovação do Ar

Neste ponto, apresenta-se o cálculo da taxa de renovação do ar com base no método do decaimento do CO₂.

3.7.1 Método do Decaimento do CO₂

Para determinar a taxa de renovação de ar (*Air Exchange Rate*, AER) da sala durante o período noturno, quando o espaço se encontra desocupado e a fonte de CO₂ cessa, foi aplicado o método do decaimento de CO₂ com ajuste logarítmico. Este método baseia-se no princípio de que, na ausência de fontes e com ventilação constante, a concentração interior de CO₂ decresce de forma exponencial ao longo do tempo, de acordo com o modelo de zona única de mistura perfeita (Persily, 1997; Sherman, 1990).

A linearização logarítmica da curva de decaimento exponencial permite calcular o AER como a pendente da recta resultante, através da expressão (Sherman, 1990; ASTM E741, 2017):

$$AER = [\ln(C_1 - C_0) - \ln(C_2 - C_0)]/\Delta t \quad (4)$$

As variáveis da Equação 4 encontram-se definidas na Tabela 8

Tabela 8 - Definição das variáveis e parâmetros do método do decaimento de CO₂.

Símbolo	Parâmetro	Definição
C ₁	Concentração inicial de CO ₂	Concentração de CO ₂ no início do período de decaimento (ppm).
C ₂	Concentração final de CO ₂	Concentração de CO ₂ no final do intervalo de análise (ppm).
C ₀	Concentração de fundo	Concentração de CO ₂ exterior de referência, ≈ 400 ppm.
Δt	Intervalo de tempo	Duração do período de decaimento entre C ₁ e C ₂ , em horas (h).
AER	Taxa de renovação de ar	<i>Air Exchange Rate</i> : renovações do volume de ar por hora (h ⁻¹).
Q	Caudal de ar fresco	Fluxo volúmico de ar exterior que entra no espaço (m ³ /h).
V	Volume da sala	Volume interior da sala em análise: V = 216 m ³ .

O AER indica o número de vezes que o volume de ar da sala é renovado por hora. O tempo de renovação característico estima-se como $T \approx 1/AER$ (Batterman, 2017). Com base no AER obtido, calculou-se o caudal de ar fresco (Q) (m³/h) mediante (ASHRAE Standard 62.1, 2022):

$$Q = V \times AER \quad (5)$$

Para a sala em análise (V = 216 m³), este valor permite avaliar o cumprimento dos requisitos mínimos de ventilação estabelecidos pelos normativos internacionais (ASHRAE Standard 62.1, 2022; ISO 16000-8, 2007).

3.7.2 Critério de seleção dos períodos de análise

Utilizaram-se exclusivamente os períodos noturnos em que a sala de aula se encontrava desocupada e a concentração de CO₂ apresentava uma tendência descendente estável, tendo sido excluídos os intervalos de transição e os trechos afetados por ruído no sinal. As medições foram realizadas em dois momentos distintos, em dezembro de 2024 e março de 2025, tendo-se considerado apenas os intervalos noturnos que reuniam condições mais estáveis. Foram selecionados os períodos em que se observaram os valores de pico de CO₂ mais elevados no final do período letivo, uma vez que estes proporcionam uma faixa de decaimento mais ampla e, consequentemente, permitem um cálculo mais robusto da AER.

3.7.3 Enquadramento normativo de referência para a avaliação

Os valores de AER obtidos foram comparados com os padrões internacionais de qualidade do ar interior em salas de aula. As normas de referência, nomeadamente a

ASHRAE 62.1 e legislação europeia equivalente, estabelecem os seguintes critérios orientativos:

- Recomendam-se aproximadamente 4-6 renovações de ar por hora ($4-6 \text{ h}^{-1}$) para salas de aula do ensino básico e secundário.
- Com $\text{AER} \approx 5$, o ar renova-se equivalentemente a cada 12 minutos, contribuindo para manter o CO_2 na faixa de 600-1000 ppm, associada a boa qualidade do ar e melhor desempenho cognitivo.
- Valores de AER claramente inferiores a 1 h^{-1} são considerados pobres ou muito pobres. O limiar mínimo aceitável segundo a ASHRAE situa-se em 3 h^{-1} .
- Quando o AER é baixo, as salas de aula tendem a apresentar concentrações de CO_2 superior a 1000 ppm com frequência (e frequentemente entre 1500 e 2500 ppm), o que se associa a ventilação insuficiente, maior presença de contaminantes e redução do conforto e do desempenho.

4. Resultados e Discussão

Neste capítulo apresentam-se e discutem-se os resultados obtidos a partir da monitorização dos parâmetros ambientais no interior e no exterior dos espaços estudados. A análise é desenvolvida com base nos dados recolhidos ao longo dos períodos de medição, permitindo avaliar o comportamento das variáveis, a sua conformidade com os critérios normativos e a identificação de eventuais situações críticas.

4.1. Resultados da monitorização

Nesta secção apresentam-se os resultados da monitorização contínua dos principais parâmetros ambientais no interior das salas de aula e no exterior do campus. A análise abrange CO₂, temperatura do ar, humidade relativa do ar, PM_{2,5} e PM₁₀, monitorizados entre 30 de setembro e 20 de dezembro de 2024 (período 1) e entre 24 de fevereiro e 6 de junho de 2025 (período 2), e iluminação, avaliada em duas campanhas específicas em 10 e 12 de abril de 2024. Avalia-se o seu comportamento temporal face a valores orientadores e critérios de referência, identificando condições de conformidade, episódios críticos e oportunidades de melhoria associadas ao conforto e à qualidade do ambiente interior em contexto educativo.

4.1.1. Análise da concentração de CO₂ interior e exterior

Neste ponto analisa-se a concentração de CO₂ no interior e no exterior, considerando a sua variação ao longo do tempo e a adequação dos valores registados face aos níveis recomendados para espaços educativos.

O primeiro período de monitorização decorreu entre 30 de setembro e 20 de dezembro de 2024, registando-se no interior concentrações de CO₂ entre 394 ppm (mínimo) e 2794 ppm (máximo), com uma média geral de 684 ppm. Embora esta média se situe dentro dos parâmetros aceitáveis para espaços interiores bem ventilados, os picos que ultrapassaram o limite de 1250 ppm evidenciam episódios recorrentes de acumulação de CO₂, associados a períodos de elevada ocupação ou ventilação insuficiente. Estes ocorreram sobretudo no final da manhã, à tarde e no início da noite, sem correspondência a um dia específico da semana. No exterior, os valores mantiveram-se estáveis entre 391 ppm e 534 ppm (média de 425 ppm), confirmando que as variações elevadas registadas no interior resultam da atividade humana e da ventilação intermitente, e não de fontes externas. Este período reflete, portanto, uma qualidade do ar interior geralmente satisfatória, ainda que com picos pontuais que justificam a adoção de estratégias de ventilação mais consistentes.

Para efeitos de representação gráfica, optou-se por ilustrar o intervalo de 18 de novembro a 16 de dezembro de 2024 no primeiro período (Figura 10) e de 3 de março a 3

de abril de 2025 no segundo período (Figura 11), por corresponderem aos meses com maior número de registos fora dos limites estabelecidos, evitando que o intervalo completo dos períodos tornasse a leitura dos gráficos excessivamente extensa. Consideraram-se exclusivamente dias úteis, no horário das 08:00 às 23:00, excluindo os fins de semana e os períodos noturnos anteriores às 08:00, uma vez que nesses intervalos não há ocupação e os valores registados não refletem as condições reais de utilização do espaço.

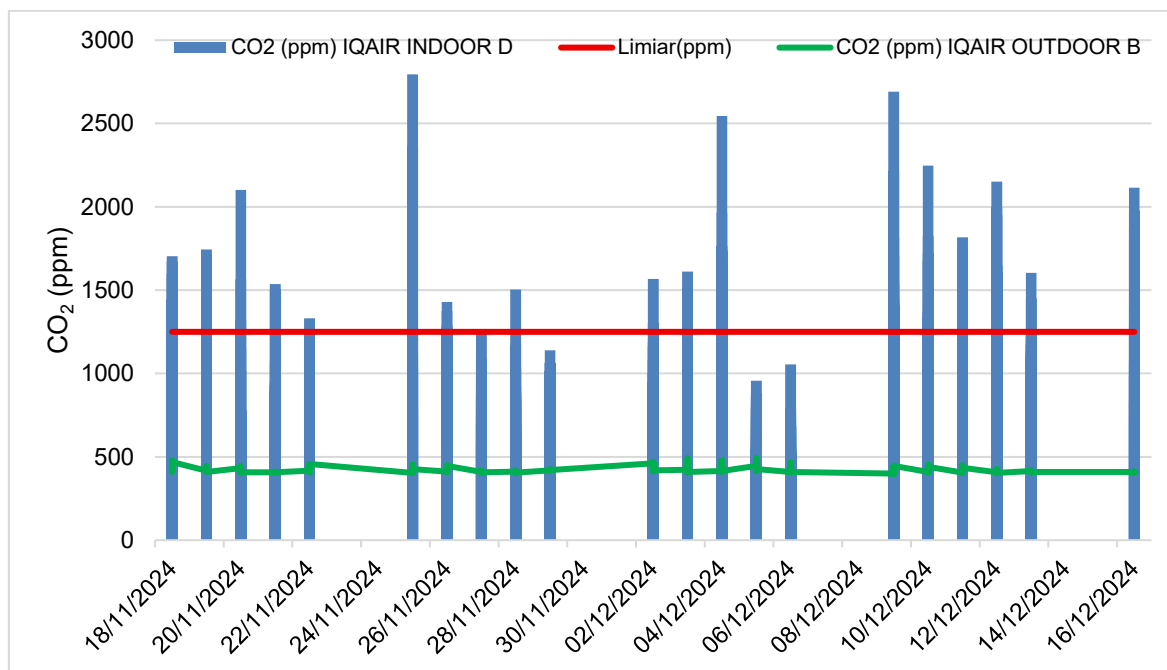


Figura 10 - Comparação entre os níveis de CO₂ interior e exterior na sala DS.00.12B e o limiar de referência, período: 18 de novembro a 16 de dezembro de 2024.

O segundo período de monitorização, realizado entre 24 de fevereiro e 6 de junho de 2025, apresentou, no interior, concentrações de CO₂ que variaram de 382 ppm a 2474 ppm, com uma média de 642 ppm. Apesar de esta média se manter nos limites normativos aceites (<1250 ppm), os valores excecionais acima de 2000 ppm denunciam situações de ventilação inadequada. No exterior, as medições mantiveram-se consistentes entre 386 ppm e 520 ppm (média de 423 ppm), evidenciando a regularidade das condições atmosféricas locais em diferentes fases do calendário académico, sem interferência relevante de emissões próximas, e confirmando a adequação do ar exterior como referência para a renovação interior. Assim, este período demonstra uma qualidade geral do ar interior razoável, embora os valores máximos isolados sublinhem a importância de medidas regulares de ventilação.

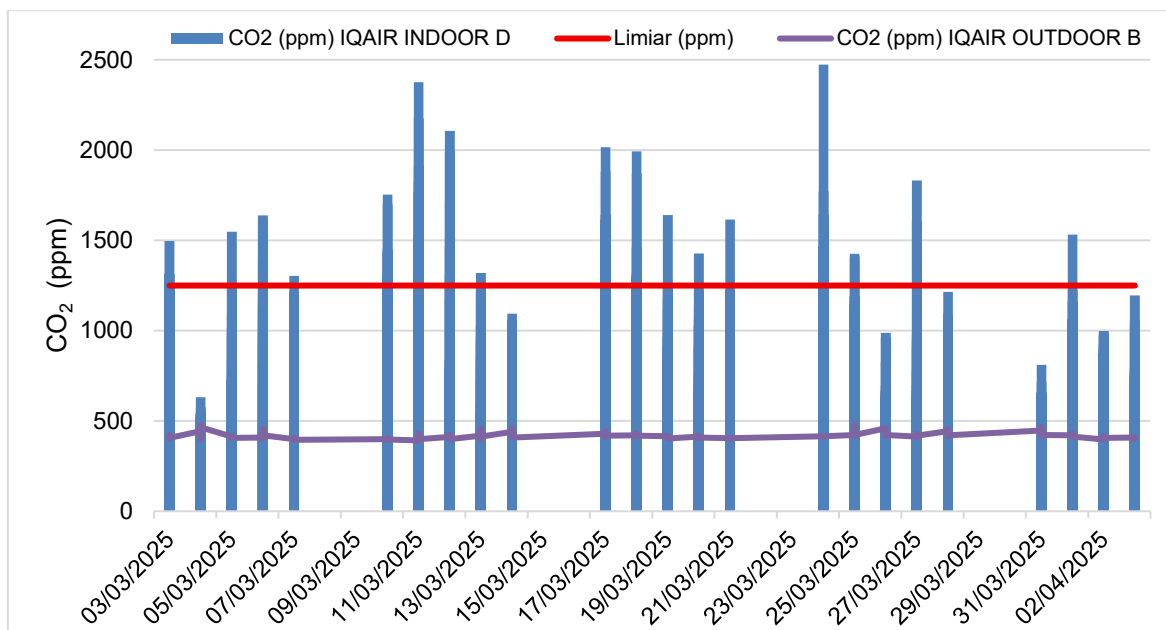


Figura 11 - Comparação entre a concentração de CO₂ medida no interior da sala DS.00.12B e no exterior face ao limiar de referência, período: 3 de março a 3 de abril de 2025.

Os valores máximos de concentração de CO₂ registados em cada período, bem como as respetivas datas e número de ocorrências acima do limite de referência (> 1250 ppm), encontram-se sintetizados na Tabela 9.

Tabela 9 - Concentrações máximas de CO₂ registadas e datas em que ocorreram

Período	Ambiente	Valor máximo (ppm)	Data e hora	Nº de ocorrências acima do limite (> 1250 ppm)
2024	interior	2794	25/11/2024 - 13:00	146
2024	exterior	534	23/10/2024 - 01:00	0
2025	interior	2474	24/03/2025 - 22:00	128
2025	exterior	520	08/04/2025 - 06:00	0

As excedências ocorreram exclusivamente no ambiente interior, 146 ocorrências em 2024 e 128 em 2025, enquanto o exterior se manteve dentro dos parâmetros esperados em ambos os períodos. Embora a redução entre os dois anos seja positiva, o número de excedências continua a ser expressivo, apontando para problemas persistentes de renovação do ar durante os períodos de ocupação da sala de aula.

Estes resultados revelam episódios recorrentes de acumulação significativa de CO₂, associados principalmente aos períodos em que a sala de aula está ocupada e a condições de ventilação insuficiente.

4.1.1.1 Determinação da AER

A determinação da AER foi realizada com base no decaimento da concentração de CO₂ durante os períodos noturnos de desocupação, recorrendo a um método não intrusivo amplamente utilizado na avaliação da ventilação em edifícios. As medições foram realizadas em dois momentos distintos, dezembro de 2024 e março de 2025, sendo considerados apenas os intervalos noturnos com tendência descendente estável, excluindo-se os trechos de transição ou afetados por ruído no sinal, e privilegiando os períodos com valores de pico de CO₂ mais elevados no final do período letivo, por proporcionarem uma faixa de decaimento mais ampla e um cálculo mais robusto da AER.

Foram selecionados quatro episódios noturnos a partir das duas campanhas de medição, sintetizados na Tabela 10. Em todos os casos a sala permaneceu desocupada e verificou-se uma tendência descendente estável do CO₂.

Tabela 10 - Episódios noturnos selecionados para o cálculo da AER

Período de início	Período de fim	AER (h ⁻¹)	T (h)	Q (m ³ /h)
23:35 (2/12/24)	08:40 (3/12/24)	0,18	5,6	39,7
23:45 (3/12/24)	08:10 (4/12/24)	0,22	4,5	47,5
21:40 (5/03/25)	07:50 (6/03/25)	0,12	8,3	25,2
22:30 (6/03/25)	08:15 (7/03/25)	0,18	5,6	38,9
Estatística		AER (h ⁻¹)	T (h)	Q (m ³ /h)
Mínimo		0,12	4,5	25,9
Máximo		0,22	8,3	47,5
Média		0,175	5,7	37,8
DP		0,04	-	-

Nota: Q = caudal de ar fresco (m³/h); V = volume da sala de aula (216 m³); AER = taxa de renovação do ar (h⁻¹). O «tempo típico» para renovar um volume é aproximado por $T = 1/AER$. O valor de Q é calculado como $Q = V \times AER$. DP = desvio padrão.

No que respeita ao período de 2024, a Figura 12 ilustra a evolução temporal da concentração de CO₂ ao longo dos dias monitorizados, evidenciando os ciclos diários de ocupação e desocupação com decaimentos noturnos progressivos visíveis nas zonas sombreadas, enquanto a Figura 13 apresenta as respetivas curvas de decaimento logarítmico, nas quais as retas de regressão a vermelho permitem estimar a AER para cada período noturno selecionado. As Figuras 14 e 15 reproduzem a mesma metodologia para o período de 2025, possibilitando uma análise comparativa entre os dois momentos de medição e uma avaliação da consistência e evolução das condições de ventilação ao longo do tempo.

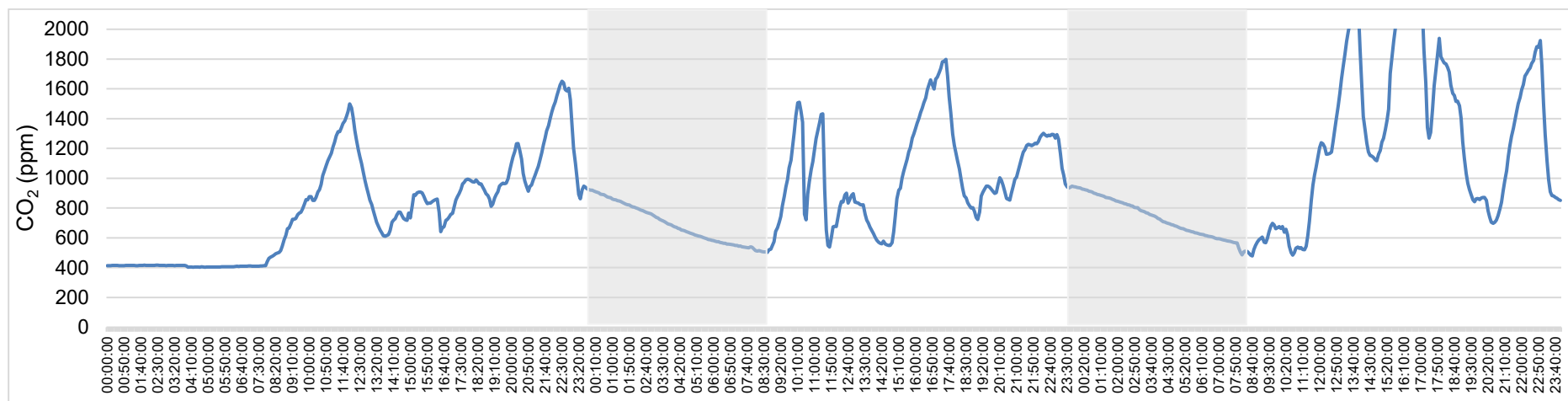


Figura 12 - Evolução da concentração de CO₂ durante os períodos noturnos analisados. Período de 2024.



Figura 13 - Curvas de decaimento logarítmico do CO₂ utilizadas no cálculo da taxa de renovação do ar (AER). Período de 2024.

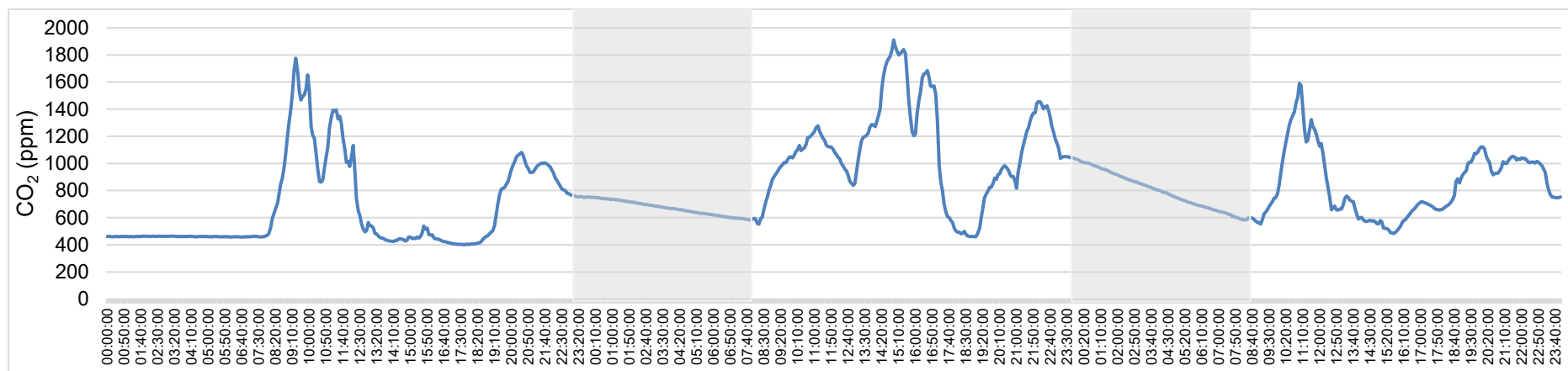


Figura 14 - Evolução da concentração de CO₂ durante os períodos noturnos analisados. Período de 2025.

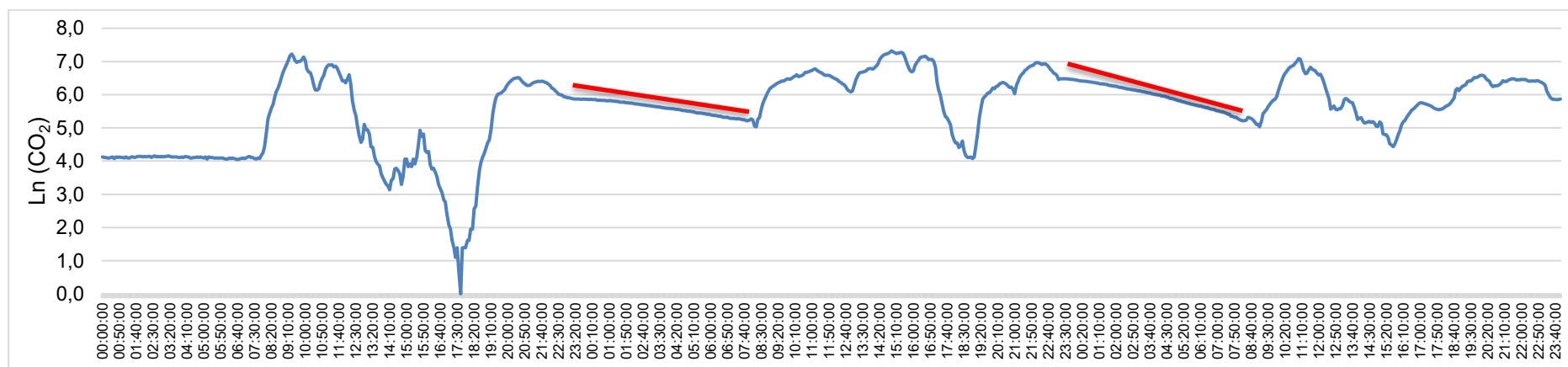


Figura 15 - Curvas de decaimento logarítmico do CO₂ utilizadas no cálculo da taxa de renovação do ar (AER). Período 2025.

Nos gráficos de concentração de CO₂ observa-se uma diminuição progressiva durante os períodos noturnos, o que indica a ausência de fontes internas de emissão e permite analisar o processo de decaimento. Por sua vez, os gráficos logarítmicos apresentam trechos aproximadamente lineares, o que confirma o comportamento exponencial da diminuição do CO₂ e valida a aplicação do método logarítmico no cálculo da AER.

O valor mais baixo de AER foi registado na noite de 5 a 6 de março de 2025 (AER = 0,12 h⁻¹), o que implica que a sala de aula necessitaria de aproximadamente 8,3 horas para renovar um volume de ar equivalente ao do recinto. O valor mais elevado correspondeu à noite de 3 a 4 de dezembro de 2024 (AER = 0,22 h⁻¹), com um tempo de renovação equivalente de 4,5 horas. A média das quatro medições é de 0,175 h⁻¹, com desvio padrão de 0,04 h⁻¹, indicando alguma variabilidade entre as noites, mas dentro de uma gama de valores consistentemente baixa.

O caudal de ar fresco resultante ($Q = V \times \text{AER}$) varia entre 25,2 e 47,5 m³/h. Estes valores são coerentes com os registos de CO₂ diurno analisados no ponto anterior: nos períodos letivos, a concentração de CO₂ atingiu um pico máximo de 2850 ppm em dezembro de 2024 e de 1910 ppm em março de 2025, refletindo a acumulação progressiva associada a uma renovação de ar manifestamente insuficiente.

Estes valores de AER obtidos (0,12; 0,18 e 0,22 h⁻¹) numa sala de aula indicam uma ventilação muito inferior aos valores considerados bons para salas de aula, que se situam aproximadamente entre 4 e 6 renovações de ar por hora (Persily et al., 2010 citado em Laussmann & Helm, 2011), pelo que a qualidade da ventilação é insuficiente, embora 0,22 seja “menos mau” do que 0,12 e 0,18.

4.1.2. Temperatura

Nesta subsecção, analisa-se a evolução da temperatura do ar no interior da sala de aula e no exterior do campus ao longo do período de monitorização, com o objetivo de caracterizar a variação térmica registada e avaliar a adequação das condições observadas ao conforto térmico em contexto educativo.

Durante o primeiro período de monitorização, entre setembro e dezembro de 2024, as temperaturas interiores situaram-se entre 17 °C e 26 °C, com uma média de 21,74 °C. Estes valores enquadram-se no intervalo de conforto adaptativo da norma ASHRAE 55 recomendado para espaços de ensino (19,4-27 °C), sugerindo que, na generalidade do período, as condições térmicas foram propícias ao bem-estar dos utilizadores. As ocorrências pontuais próximas do valor máximo poderão ser atribuídas à incidência de radiação solar direta sobre o espaço ou a situações de ocupação intensa, ao passo que os

valores mínimos de 17 °C traduzem descidas noturnas da temperatura ambiente ou episódios de ventilação natural pronunciada. No exterior, as temperaturas oscilaram entre 3 °C e 28 °C, com média de 15,89 °C, refletindo a amplitude térmica característica do período outonal e o papel da envolvente construtiva na atenuação das variações externas.

Para efeitos de representação gráfica, seleccionaram-se os intervalos de novembro a dezembro de 2024, apresentados na Figura 16, e de março a abril de 2025, ilustrados na Figura 17, por corresponderem às fases com maior contraste térmico entre o interior e o exterior e por permitirem uma leitura mais clara das tendências sazonais.

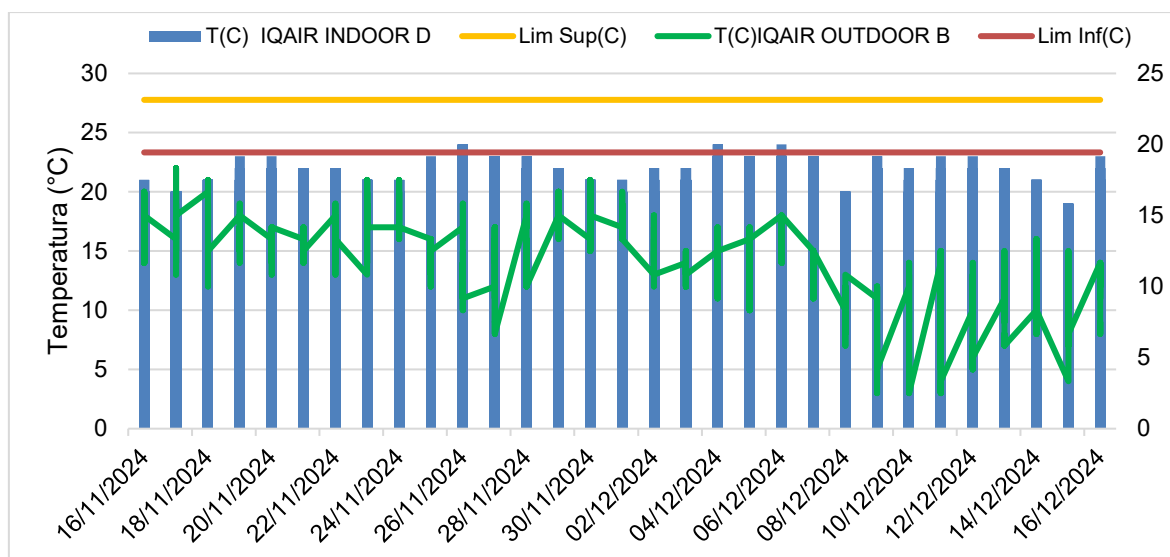


Figura 16 - Temperatura do ar no interior da sala de aula DS.00.12B do edifício D e no exterior do edifício B - Período de referência: 16 de novembro a 16 de dezembro de 2024.

O segundo período de monitorização, decorrido entre fevereiro e junho de 2025, revelou temperaturas interiores entre 17 °C e 26 °C, com uma média de 21,64 °C, mantendo-se igualmente dentro da faixa de conforto recomendada. No exterior, os valores variaram de forma mais expressiva, entre 4 °C e 34 °C, com uma média de 15,33 °C, o que evidencia a influência crescente das condições climáticas de final de primavera e a maior amplitude térmica diária típica desta estação. A comparação entre os dois ambientes reforça a capacidade da sala de aula de amortecer as flutuações externas, assegurando condições interiores mais homogêneas e estáveis ao longo do período letivo.

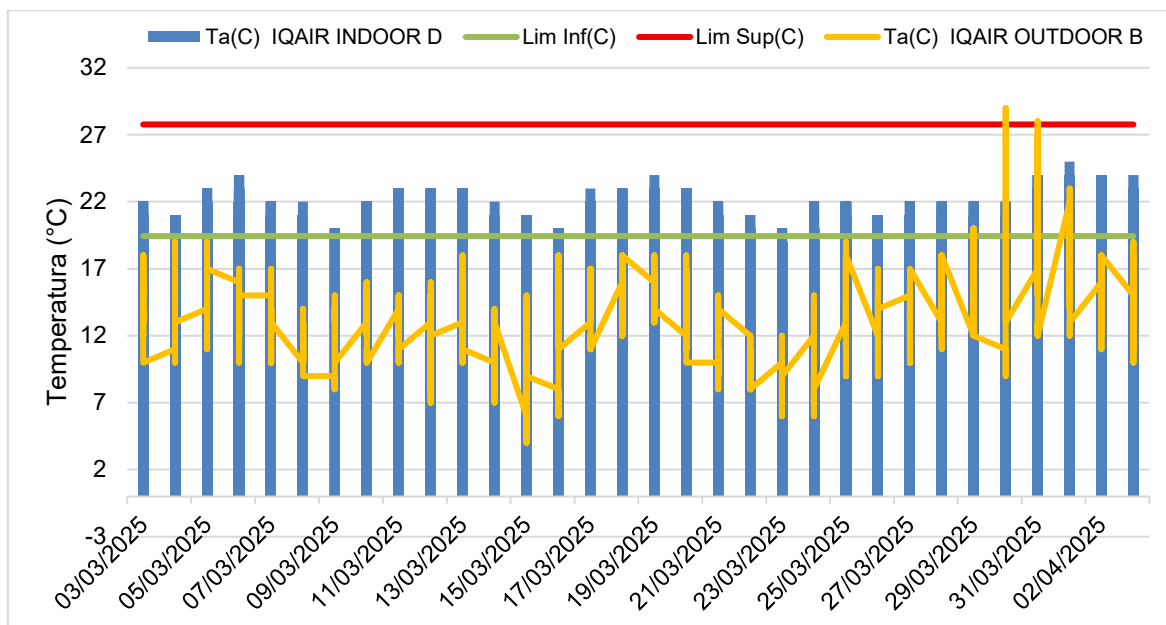


Figura 17 – Temperatura do ar no interior da sala de aula DS.00.12B do edifício D e no exterior do edifício B - Período de referência: 3 de março a 3 de abril de 2025.

A análise privilegia os valores máximos de temperatura do ar registados, em detrimento das médias, uma vez que são as condições extremas as que têm maior impacto sobre o desempenho cognitivo e o conforto térmico dos ocupantes. A literatura científica demonstra que temperaturas interiores elevadas induzem fadiga, redução da concentração e deterioração do rendimento académico, com efeitos ainda mais pronunciados quanto maior for o desvio em relação à zona de conforto (Haverinen-Shaughnessy & Shaughnessy, 2015; Wargocki & Wyon, 2007).

A Tabela 11 sintetiza os máximos absolutos registados em cada período, com indicação da data, hora e frequência de excedência. No interior, a temperatura do ar máxima atingiu os 26 °C em ambos os períodos, o que indica condições térmicas geralmente estáveis. No exterior, registou-se uma temperatura do ar máxima de 28 °C em 2024 e de 34 °C em 2025, refletindo a influência das condições climáticas.

Tabela 11 - Temperaturas do ar máximas registadas e datas em que ocorreram

Período	Ambiente	Valor máximo (°C)	Data e hora (h)	Nº de ocorrências fora do limite (19,4 - 27 °C)	
				<19,4	>27
2024	interior	26	15/10/2024 - 21:00	84	0
2024	exterior	28	14/10/2024 - 15:00	1578	1
2025	interior	26	09/04/2025 - 14-21		
2025	interior	26	10/04/2025 - 16:00-27:00	114	0
2025	interior	26	29/05/2025 - 14:00-15:00		
2025	exterior	34	29/05/2025 - 12:00-13:00	2095	40

O limite superior não foi excedido em nenhum dos dois períodos, enquanto as ocorrências abaixo do limite inferior, 84 em 2024 e 114 em 2025, se concentram nas primeiras horas da manhã, antes da sala atingir a temperatura de equilíbrio resultante da presença humana e dos ganhos internos, sem impacto significativo no conforto durante os períodos de ocupação efetiva. No ambiente exterior, o comportamento foi naturalmente mais variável, refletindo as condições climáticas de cada período de monitorização. Em 2024, registaram-se 1578 ocorrências abaixo do limite inferior e apenas 1 acima dos 27 °C. Em 2025, verificou-se um aumento em ambos os extremos, com 2095 registos abaixo do limite inferior e 40 acima do limite superior, atingindo um máximo de 34 °C durante o período de arrefecimento, o que reflete a transição entre a estação de aquecimento e a de arrefecimento ao longo do período de monitorização. Mas, de modo geral, a temperatura do ar manteve-se dentro de valores adequados no interior, não representando um problema significativo.

4.1.3. Humidade relativa do ar

Apresenta-se a análise da humidade relativa do ar no interior da sala e no exterior, avaliando-se a sua variação temporal e a proximidade dos valores registados aos limites da faixa de conforto higrométrico.

No decurso do primeiro período de recolha de dados, entre setembro e dezembro de 2024, a humidade relativa do ar interior variou entre 46 % e 85 %, com uma média de 66,83 %, enquanto a humidade exterior apresentou valores entre 46 % e 100 %, com uma média de 79,38 % traduzindo fenómenos de saturação atmosférica associados a precipitação ou a períodos de nebulosidade persistente. A análise revela que a sala de aula mantém uma humidade ligeiramente superior ao intervalo ideal recomendado (40-60 %), o que sugere condições de ar mais húmido, possivelmente devido à acumulação de vapor pela respiração dos ocupantes e à renovação limitada do ar.

Tal como nos restantes parâmetros já apresentados, para a representação gráfica foram selecionados os subperíodos compreendidos entre 16 de novembro e 16 de dezembro de 2024, apresentados na Figura 18, e entre 3 de março e 3 de abril de 2025, ilustrados na Figura 19, uma vez que correspondem aos intervalos temporais com maior contraste higrométrico entre os dois ambientes e facilitam a identificação das tendências predominantes em cada fase do calendário académico.

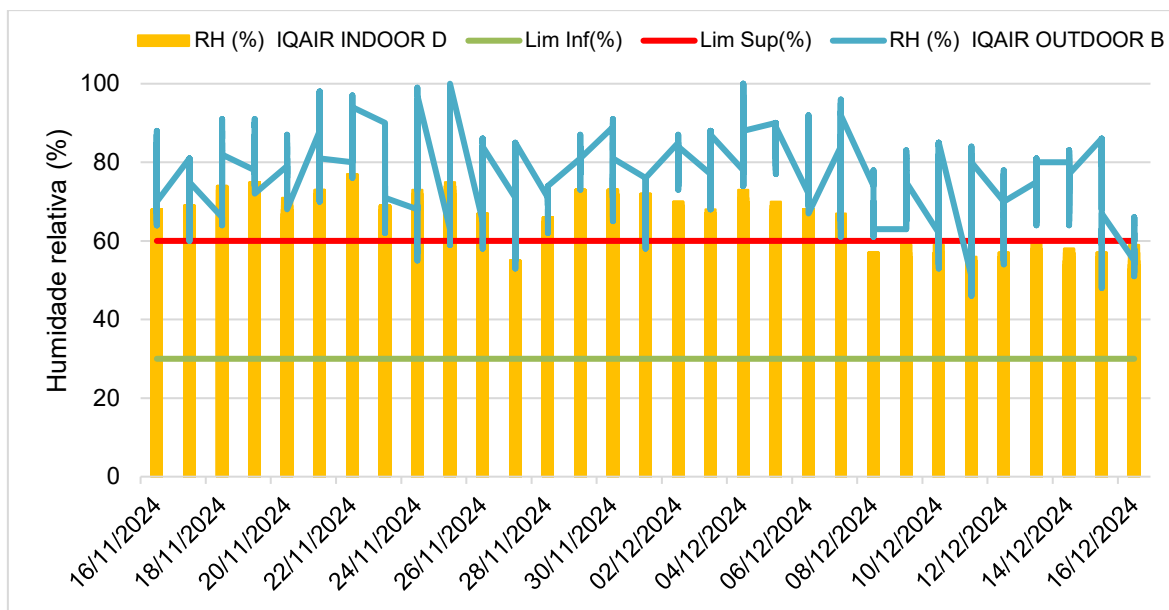


Figura 18 - Comparação entre a umidade relativa do ar medida no interior da sala DS.00.12B e no exterior face ao limiar de referência, período: 16 de novembro a 16 de dezembro de 2024.

No segundo ciclo de monitorização, entre fevereiro e junho de 2025, a amplitude higrométrica interior reduziu-se, com valores entre 40 % e 76 % e uma média de 62,49 %, situando-se acima do limite superior da faixa de referência. Esta ligeira melhoria face ao período anterior poderá refletir condições de ocupação menos intensas ou uma ventilação ligeiramente mais eficaz nos meses de primavera. No exterior, a oscilação foi mais acentuada, entre 19% e 100%, com média de 75,23%, o que demonstra que as condições atmosféricas locais continuaram a exercer influência determinante sobre o ambiente higrométrico do interior.

Este comportamento indica que a umidade interior é diretamente influenciada pelas condições externas, embora moderada pelo microclima do recinto, mantendo níveis que, embora confortáveis, podem favorecer sensações de peso ou sonolência se persistirem acima dos 70 %.

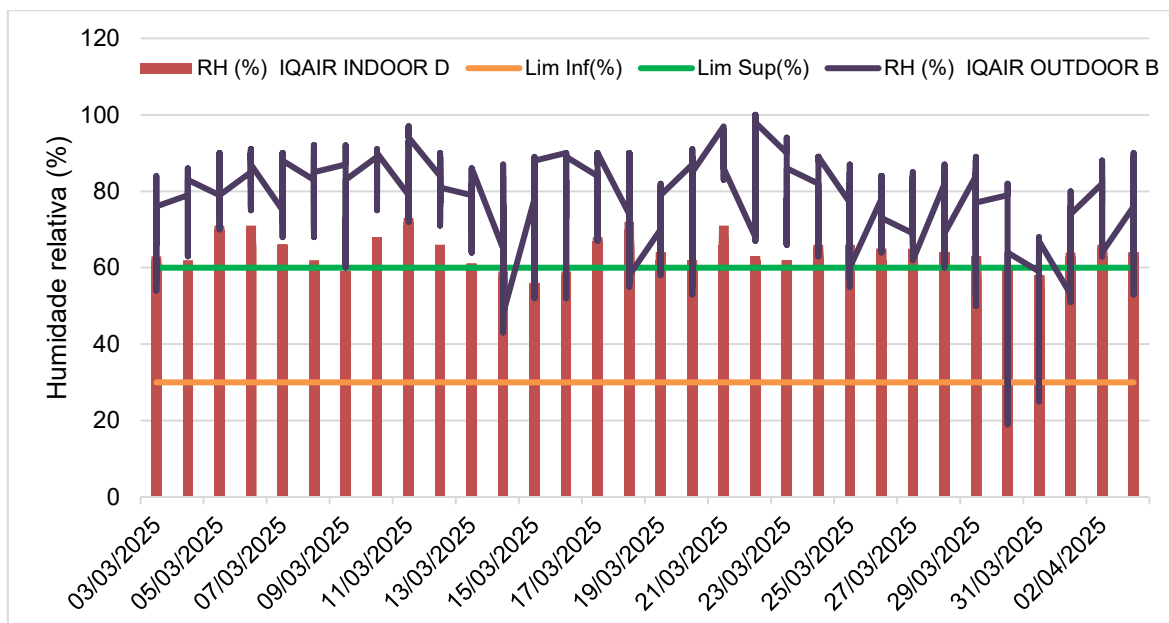


Figura 19 - Comparação entre a umidade relativa do ar medida no interior da sala DS.00.12B e no exterior face ao limiar de referência, período: 3 de março a 3 de abril de 2025.

No que diz respeito aos valores de umidade relativa do ar fora dos limites, a Tabela 12 resume os valores máximos registados.

Tabela 12 - Valores máximos de umidade relativa do ar registados e datas em que ocorreram

Período	Ambiente	Valor máximo (%)	Nº de ocorrências fora do limite (30 - 60 %)	
			<30	>60
2024	interior	85	0	1531
2024	exterior	100	0	1817
2025	interior	76	0	1559
2025	exterior	100	17	2108

No ambiente interior, não se registou qualquer ocorrência abaixo dos 30 % em nenhum dos dois períodos analisados, o que indica a ausência de condições de secura excessiva. Acima do limite de 60 %, contabilizaram-se 1531 registos em 2024, com um máximo de 85 %, e 1559 em 2025, com um máximo de 76 %, sugerindo uma ligeira melhoria no segundo período de monitorização. No ambiente exterior, as excedências do limite superior foram mais expressivas, com 1817 ocorrências em 2024 e 2108 em 2025, verificando-se saturação total do ar em ambos os períodos; em 2025 registaram-se ainda 17 ocorrências abaixo dos 30 %, refletindo a maior variabilidade higrométrica associada às condições climáticas do período de monitorização.

Uma vez que as excedências não correspondem a picos pontuais, mas antes a condições persistentes ao longo do tempo, optou-se por não identificar datas específicas, privilegiando a contagem total de registos como indicador mais representativo do comportamento higrométrico global. Em conjunto, os dados evidenciam uma forte

dependência da humidade relativa do ar interior face às condições atmosféricas exteriores, o que sublinha a pertinência de adotar mecanismos de ventilação mais eficazes para atenuar os episódios de desconforto higrométrico.

4.1.4. PM_{2,5} e PM₁₀

Nesta subsecção, analisa-se o comportamento da PM_{2,5} e da PM₁₀, considerando os valores médios, os valores máximos registados e a sua relevância para a qualidade do ar interior.

Entre setembro e dezembro de 2024, as concentrações de PM_{2,5} apresentaram uma média de 5,48 µg/m³ no interior e de 9,22 µg/m³ no exterior, mantendo-se, na generalidade, abaixo do limiar de 25 µg/m³ e indicando boa qualidade do ar interior. Regista-se, contudo, um valor máximo interior de 113 µg/m³, correspondente a um episódio pontual possivelmente associado a alterações momentâneas das condições de ventilação ou perturbações no ambiente interior.

Para uma análise mais detalhada das dinâmicas temporais, foram selecionados os intervalos de 16 de novembro a 16 de dezembro de 2024, apresentados na Figura 20, e de 3 de março a 3 de abril de 2025, ilustrados na Figura 21. Estes períodos permitem evidenciar com maior clareza as variações e os padrões característicos das concentrações de PM_{2,5} em ambiente interior e exterior ao longo do calendário académico.

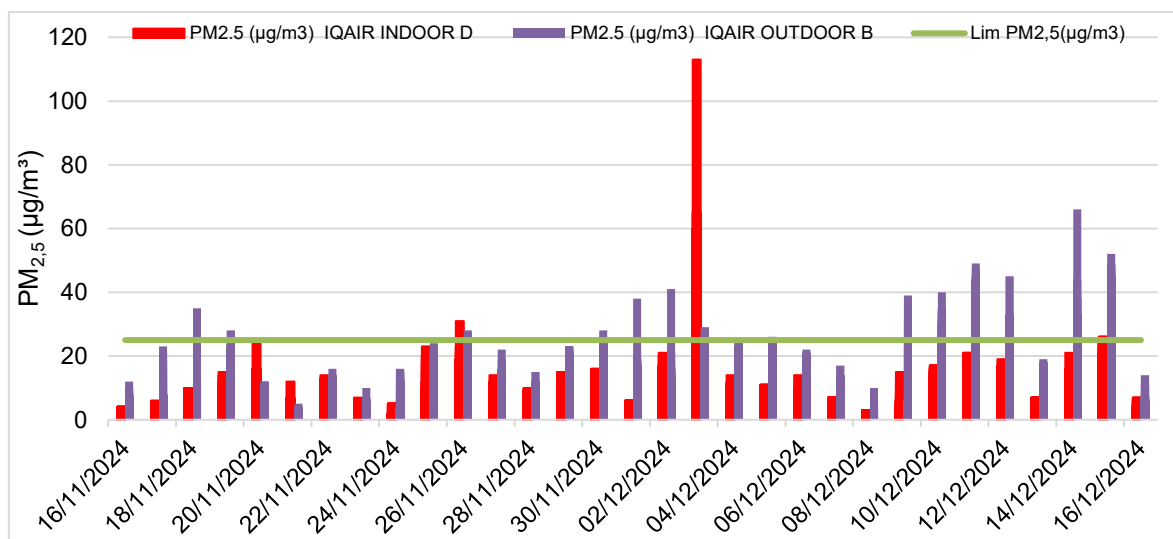


Figura 20 - Comparação entre as PM_{2,5} medidas no interior da sala DS.00.12B e no exterior face ao limiar de referência, período: 16 de novembro a 16 de dezembro de 2024.

Os valores mais elevados, superiores a 100 µg/m³, correspondem a episódios pontuais de aumento significativo das concentrações de PM_{2,5}. Destaca-se o dia 3 de dezembro de 2024, entre as 18:00 e as 20:00, período em que se registou o valor máximo de 113 µg/m³. Estes episódios caracterizam-se pela sua curta duração e ausência de continuidade temporal, sendo seguidos por uma rápida diminuição das concentrações.

Assim, não são representativos do comportamento médio da qualidade do ar interior ao longo do período de monitorização.

No segundo ciclo de monitorização, entre fevereiro e junho de 2025, as concentrações de PM_{2,5} evidenciam uma boa qualidade do ar interior, com uma média de 4,19 µg/m³, inferior à registada no exterior, de 7,11 µg/m³. De forma geral, os valores mantêm-se dentro de limites aceitáveis; contudo, destaca-se a ocorrência de um pico exterior de 104 µg/m³, indicativo de episódios pontuais de poluição atmosférica de origem externa.

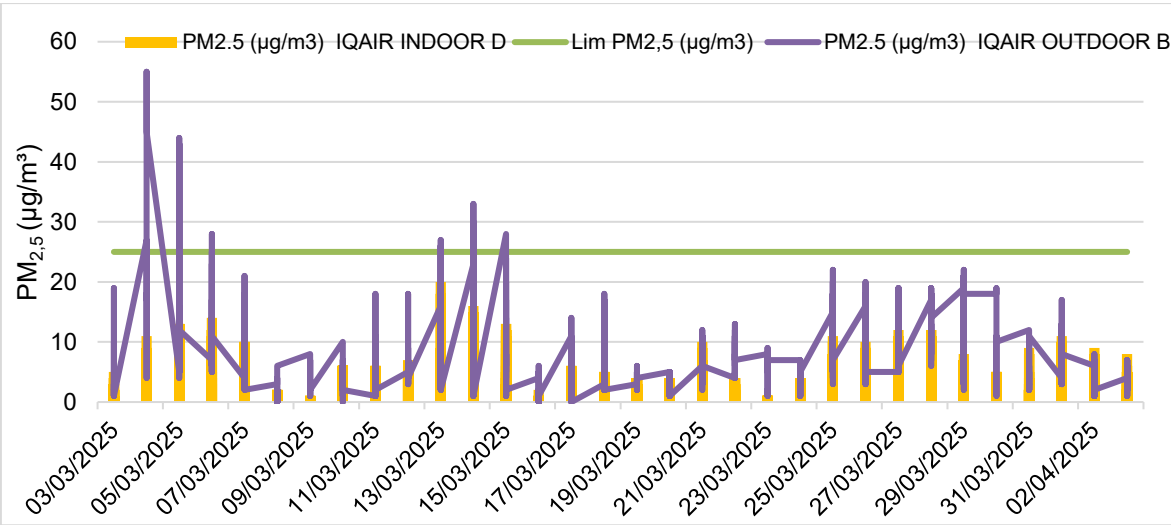


Figura 21 - Comparação entre as PM_{2,5} medidas no interior da sala DS.00.12B e no exterior face ao limiar de referência, período: 3 de março a 3 de abril de 2025.

Os picos mais elevados correspondem provavelmente a eventos isolados de suspensão de poeira ou poluição pontual, sem repercussão sustentada no ambiente. Em geral, os níveis de PM_{2,5} mantiveram-se muito abaixo dos limites de risco para a saúde.

No que diz respeito às concentrações máximas de PM_{2,5}, os valores registados são apresentados na Tabela 13.

Tabela 13 - Concentrações máximas de PM_{2,5} e datas em que ocorreram

Período	Ambiente	Valor máximo (µg/m³)	Data e hora	Nº de ocorrências acima do limite (> 25 µg/m³)
2024	interior	113	03/12/2024 - 19:00	12
2024	exterior	66	14/12/2024 - 23:00	83
2025	interior	27	28/02/2025 - 23:00	1
2025	exterior	104	30/04/2025 - 16:00	43

No âmbito da análise das PM_{2,5}, verifica-se uma melhoria substancial da qualidade do ar interior entre os dois períodos, refletida na diminuição das excedências de 12 para 1.

O valor máximo de $113 \mu\text{g}/\text{m}^3$ registado em 2024 corresponde a um episódio isolado, possivelmente associado a défices de ventilação em contextos de baixa ocupação. No exterior, apesar da redução do número de excedências em 2025, o valor máximo observado foi significativamente superior, atingindo $104 \mu\text{g}/\text{m}^3$, evidenciando a influência de fontes externas de poluição.

No que respeita às partículas PM_{10} , verifica-se que, no primeiro período, os valores interiores apresentaram uma média de $7,26 \mu\text{g}/\text{m}^3$, enquanto no exterior a média foi de $14,88 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Estes resultados evidenciam uma boa qualidade do ar interior e sugerem uma atenuação eficaz da penetração de partículas provenientes do exterior. Em geral, o comportamento das PM_{10} mostra níveis controlados e dentro dos limites de conforto ambiental, tanto em ambientes internos quanto externos, durante o último trimestre de 2024.

Para uma melhor compreensão das variações das PM_{10} , a Figura 22 e a Figura 23 apresentam os dados referentes a períodos distintos já descritos, destacando os padrões característicos em ambiente interior e exterior.

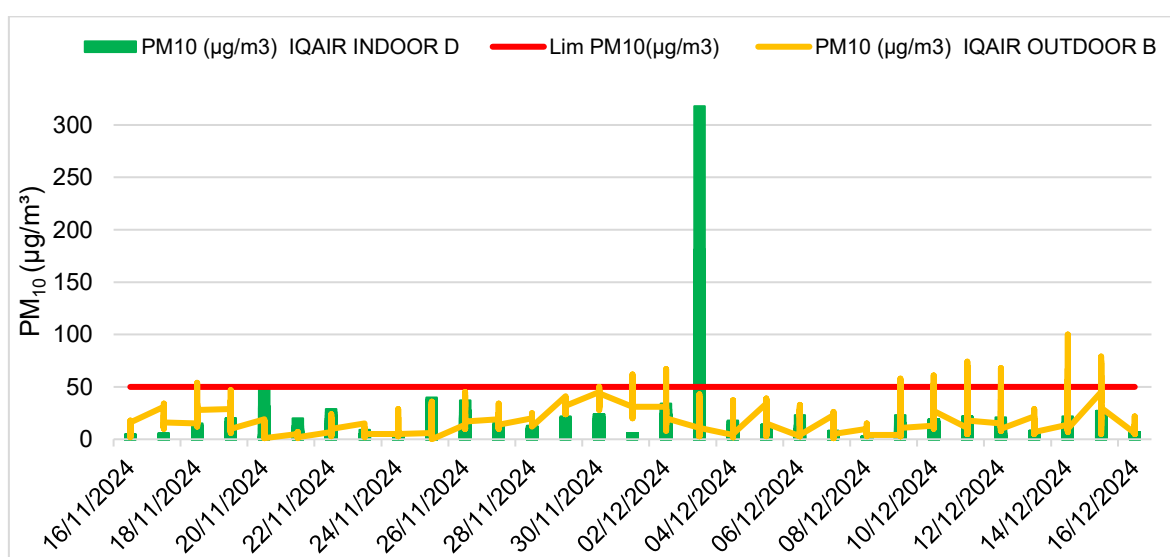


Figura 22 - Comparação entre as PM_{10} medidas no interior da sala DS.00.12B e no exterior face ao limiar de referência, período: 16 de novembro a 16 de dezembro de 2024.

Durante o período de fevereiro a junho de 2025, as concentrações de PM_{10} apresentaram, de forma geral, níveis moderados e um número reduzido de excedências. No interior, registou-se uma média de $4,99 \mu\text{g}/\text{m}^3$, significativamente inferior à observada no exterior, de $11,10 \mu\text{g}/\text{m}^3$, evidenciando uma atenuação eficaz da entrada de partículas. Embora tenham ocorrido picos exteriores superiores ao valor de referência de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$, estes foram pontuais e sem persistência. No conjunto, os resultados confirmam uma boa qualidade do ar interior e a eficácia do espaço na limitação da penetração de partículas.

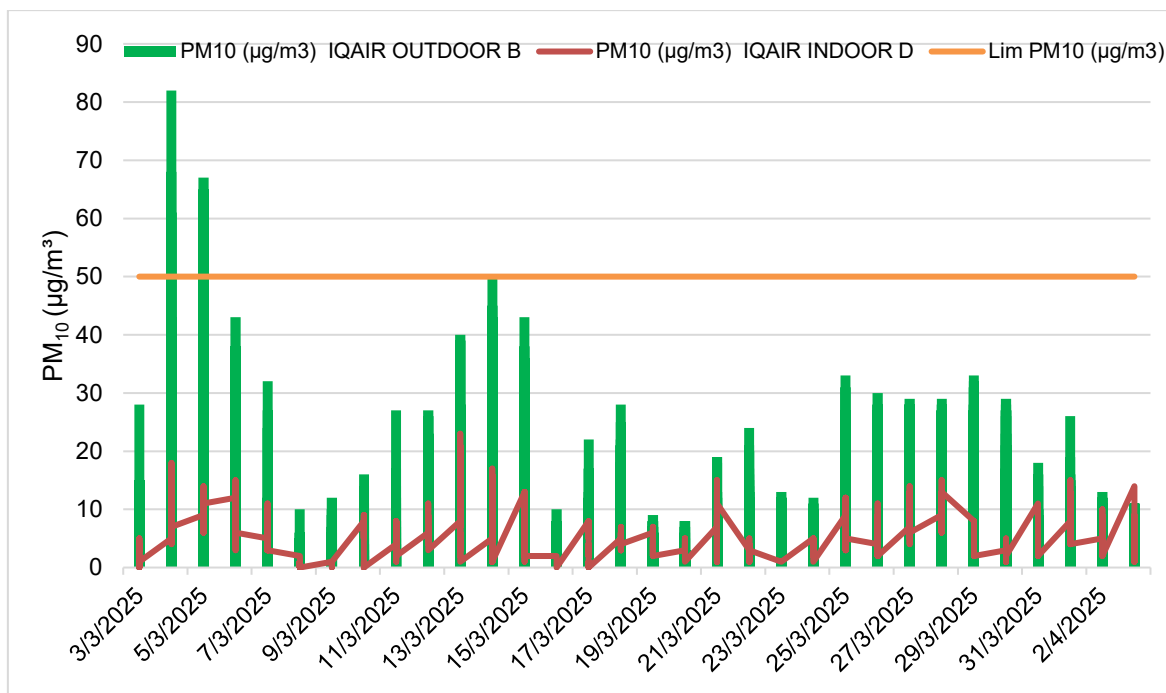


Figura 23 - Comparação entre as PM₁₀ medidas no interior da sala DS.00.12B e no exterior face ao limiar de referência, período: 3 de março a 3 de abril de 2025.

Considerando as concentrações máximas de PM₁₀, a Tabela 14 apresenta os valores registados.

Tabela 14 - Concentrações máximas de PM₁₀ e datas em que ocorreram

Período	Ambiente	Valor máximo (µg/m³)	Data e hora	Nº de ocorrências acima do limite (> 50 µg/m³)
2024	interior	318	03/12/2024 - 19:00	6
2024	exterior	104	18/12/2024 - 19:00	57
2025	interior	29	28/02/2025 - 23:00	0
2025	exterior	161	30/04/2025 - 16:00	11

No interior, a redução de 6 excedências em 2024 para nenhuma em 2025 representa uma melhoria substancial. O pico de 318 µg/m³ registado em 2024 constitui um episódio pontual e atípico, provavelmente associado à ressuspensão de partículas depositadas ou a condições de ventilação muito reduzida. No exterior, apesar da diminuição do número de excedências, o valor máximo registado em 2025 foi superior ao de 2024, sugerindo a ocorrência de episódios de concentração elevada de partículas de origem atmosférica, possivelmente associados ao transporte de poeiras ou a condições meteorológicas específicas. Estes resultados reforçam a necessidade de manter barreiras físicas eficazes que limitem a infiltração de partículas exteriores para o espaço de ensino.

4.1.5. Iluminação

A iluminância nas salas de aula foi analisada em diferentes condições de utilização e de controlo solar, avaliando-se a adequação dos níveis e da uniformidade luminosa às exigências do ambiente educativo.

Seguidamente, apresentam-se os resultados das medições de iluminância realizadas no Laboratório de Energia DS.00.09, orientado a sudeste e com vista para uma zona verde, e na Sala Projeto Civil DS.00.12B, orientada a noroeste e com vista para a zona de estacionamento. A análise considera diferentes cenários de utilização, representativos do funcionamento real dos espaços e das suas orientações cardeais. As avaliações foram efetuadas em períodos distintos do dia (manhã 9h, tarde 16h e noite 21h) e sob diferentes condições de iluminação, nomeadamente com persianas abertas e fechadas, bem como com e sem recurso à iluminação artificial. Estas condições permitem analisar a influência combinada da luz natural e da iluminação artificial no desempenho luminoso das salas, considerando também a orientação e a exposição à luz solar, que condicionam a entrada de luz natural ao longo do dia.

A Figura 24 apresenta a escala de iluminância utilizada como referência para a interpretação das medições, com valores em lux (de 0 a 3000), servindo de base de comparação para avaliar os níveis de iluminância nos pontos das salas estudadas em relação aos padrões normativos.

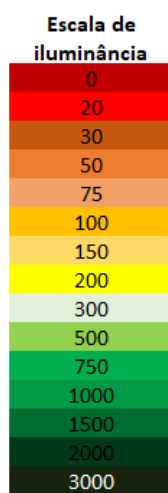


Figura 24. Escala de iluminância utilizada na análise, com valores de referência expressos em lux.

Para cada cenário analisado, foram determinados os valores de iluminância média (Emed), mínima (Emin) e máxima (Emax), bem como o índice de uniformidade (U_0), procedendo-se, posteriormente, à comparação destes resultados com os requisitos estabelecidos na norma EN 12464-1 para espaços educativos.

4.1.5.1 Laboratório de Energia DS.00.09

A Tabela 15 sintetiza os indicadores de desempenho luminoso para os três cenários analisados no período da manhã. Apenas a condição com iluminação artificial e persianas fechadas apresenta uma iluminância média dentro do intervalo recomendado (300–500 lux), embora com uniformidade reduzida ($U_0 = 0,23$). As restantes condições, com luz natural, originam valores muito superiores ao recomendado e uma variabilidade espacial elevada, traduzida pelos baixos índices de uniformidade e pelos elevados desvios padrão. Em nenhum dos cenários se atingem valores de U_0 próximos do mínimo recomendado pela norma EN 12464-1 (0,6), evidenciando a necessidade de implementar estratégias de controlo da luz natural e de ajuste da iluminação artificial para garantir condições luminosas adequadas e homogêneas no espaço.

Tabela 15 - Indicadores de desempenho luminoso no laboratório segundo diferentes cenários (manhã)

Condições	Emed	Emin	Emax	U_0	DP
Iluminação artificial com persianas fechadas	435,4	98,8	795,9	0,2269	176,93
Iluminação artificial com persianas abertas	4984	792,0	26399	0,1589	7448,49
Iluminação artificial desligada e persianas abertas	2119	372,8	50044	0,1759	6160,72

Na figura 25, que integra as três condições de iluminação no período da manhã, observa-se o comportamento da iluminância no laboratório sob diferentes cenários. Para uma melhor diferenciação dos níveis de iluminância nas figuras, foram aplicadas escalas de cores específicas para a iluminância, que permitem identificar visualmente as zonas mais ou menos iluminadas.

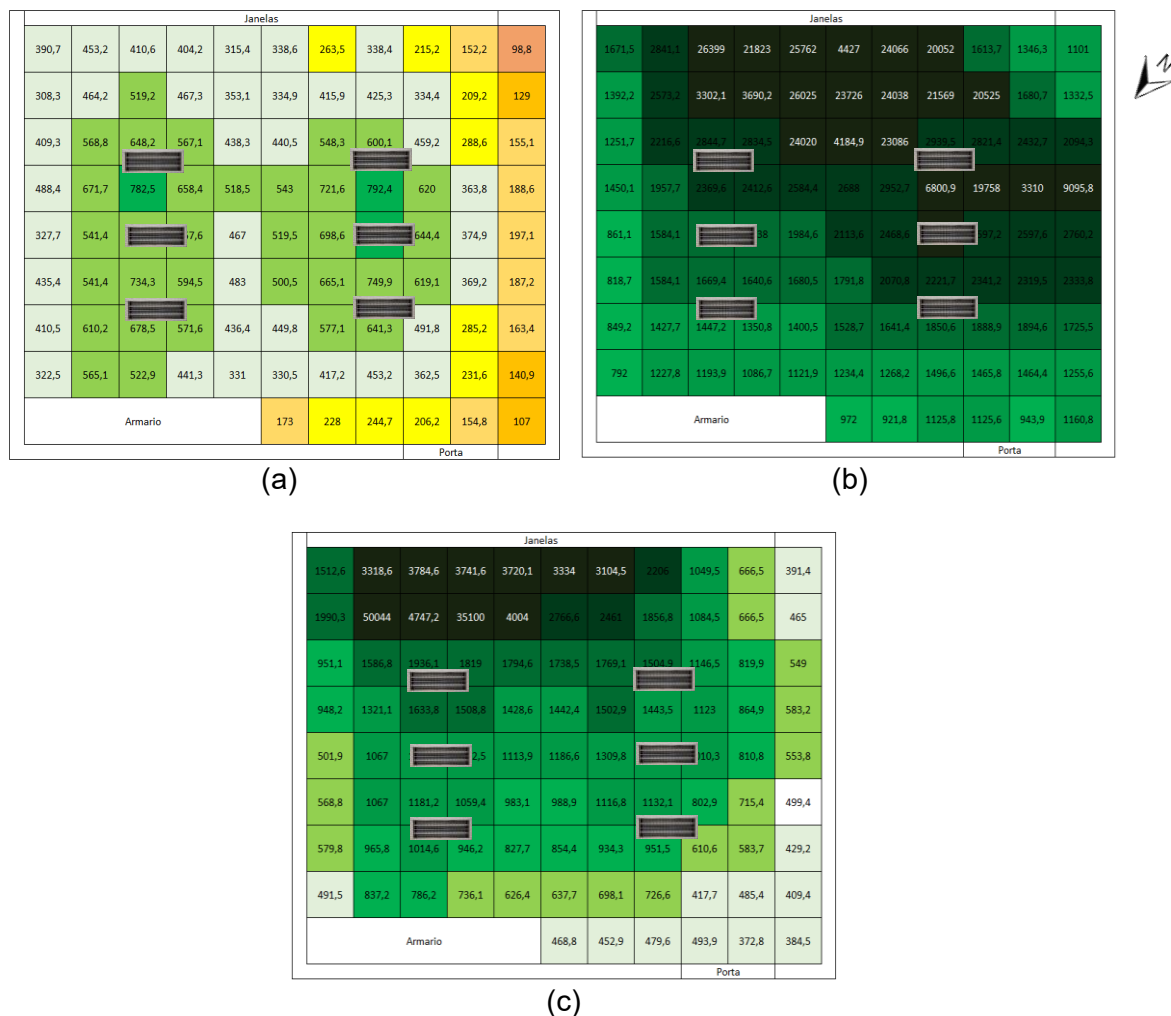


Figura 25. Medição da iluminância (manhã) (norma EN 12464-1). (a) Iluminação artificial com persianas fechadas. (b) Iluminação artificial com persianas abertas. (c) Iluminação artificial desligada com persianas abertas.

A Tabela 16 reúne os indicadores luminosos obtidos nos cenários de tarde e noite. Os resultados mostram que os cenários com persianas fechadas e iluminação são os que melhor se aproximam dos níveis de iluminância recomendados, sendo o cenário noturno o mais estável dado que não está sujeito à variabilidade da luz solar. Quando as persianas se encontram abertas, a contribuição da luz natural eleva os níveis de iluminância para valores excessivos e introduz uma maior heterogeneidade na distribuição luminosa. Transversalmente a todos os cenários, os índices de uniformidade registam valores bastante inferiores ao mínimo previsto pela EN 12464-1 ($\geq 0,6$), o que revela que a luz não se distribui de forma equilibrada pelo espaço em nenhuma das condições testadas. Esta limitação estrutural aponta para a necessidade de intervir tanto ao nível do controlo das proteções solares como da disposição e regulação do sistema de iluminação artificial instalado.

Tabela 16 - Indicadores de desempenho luminoso no laboratório segundo diferentes cenários (tarde e noite)

Condições	Emed	Emin	Emax	U ₀	DP
Iluminação artificial com persianas fechadas	383,5	77,1	730	0,2010	172,67
Iluminação artificial com persianas abertas	803,7	194,8	2086,7	0,2423	390,58
Iluminação artificial desligada e persianas abertas	550,4	111,2	2491,4	0,2020	559,99
Iluminação artificial (noite)	396,6	84,5	768,5	0,2130	178,54

Na figura 26, que integram as diferentes condições de iluminação no período da tarde e noite, observa-se o comportamento da iluminância no laboratório sob vários cenários.

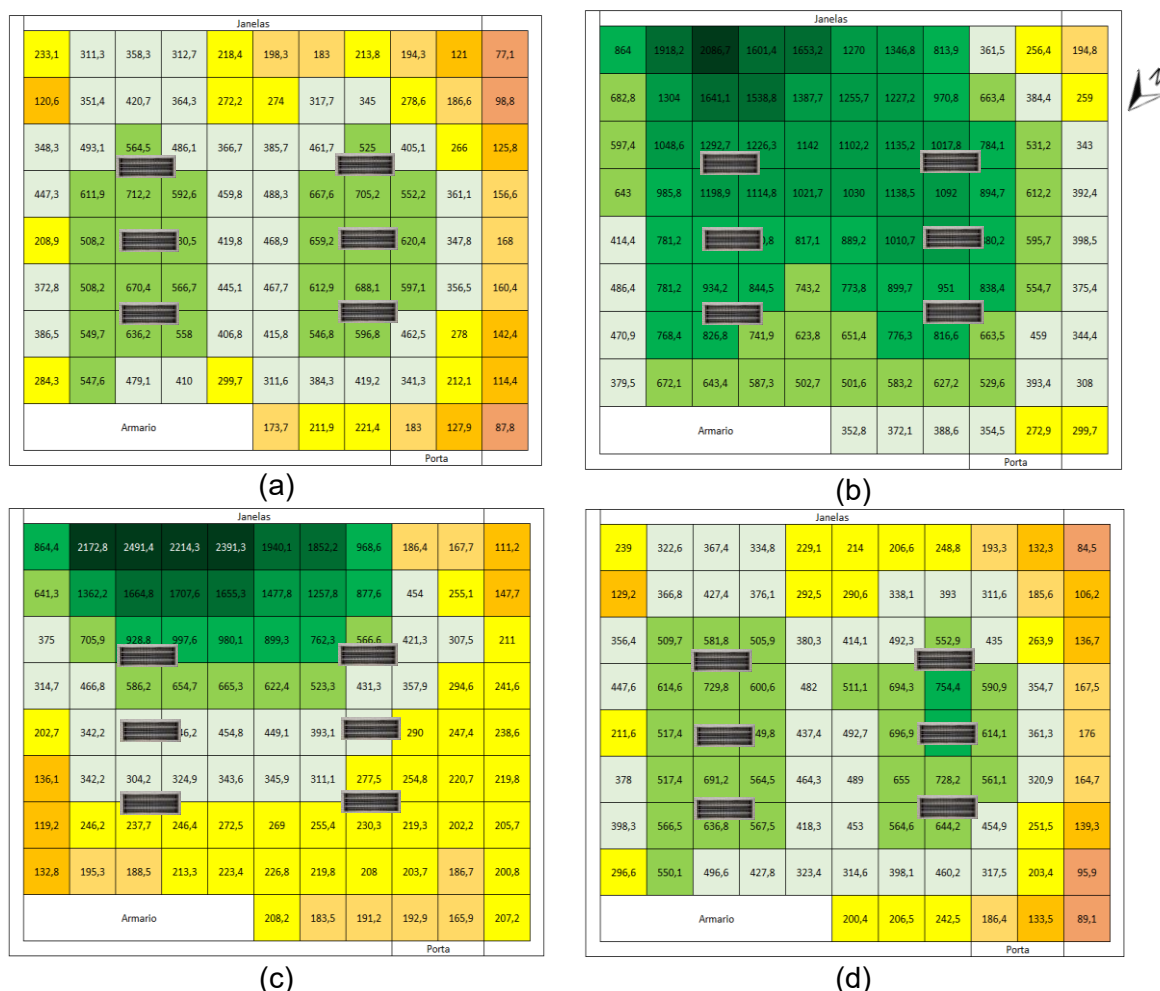


Figura 26 - Medição da iluminância (tarde/noite) (norma EN 12464-1). (a) Iluminação artificial com persianas fechadas. (b) Iluminação artificial com persianas abertas. (c) Iluminação artificial desligada e persianas aberta. (d) (noite). Iluminação artificial.

De forma geral, verifica-se que, embora alguns valores médios estejam dentro do intervalo recomendado, nenhuma das condições cumpre integralmente os critérios da norma EN 12464-1, sobretudo no que se refere à uniformidade da iluminância.

4.1.5.2 Sala Projeto Civil DS.00.12B

A Tabela 17 apresenta os indicadores de desempenho luminoso da Sala Projeto Civil para o período da manhã. Ao contrário do laboratório, nenhuma das condições analisadas origina excesso de iluminância, sendo o desafio principal a insuficiência de luz em determinados cenários. A condição com iluminação artificial e persianas fechadas é a que apresenta melhor desempenho global, com uma iluminância média dentro do intervalo recomendado e um índice de uniformidade ($U_0 = 0,56$) próximo do mínimo normativo de 0,6. Nos restantes cenários, a dependência total ou parcial da luz natural resulta em iluminâncias médias abaixo do recomendado e numa distribuição menos homogênea, com maior contraste entre as zonas próximas das janelas e as áreas interiores. Em síntese, o sistema de iluminação artificial revela-se determinante para garantir condições luminosas adequadas neste espaço, sendo insuficiente a contribuição exclusiva da luz natural durante o período da manhã.

Tabela 17 - Indicadores de desempenho luminoso na Sala Projeto Civil segundo diferentes cenários (manhã)

Condições	E_{med}	E_{min}	E_{max}	U₀	DP
Iluminação artificial com persianas fechadas	401,2	225,5	701,6	0,5620	109,97
Iluminação artificial com persianas abertas	218,7	103,1	657,3	0,4714	93,31
Iluminação artificial desligada e persianas abertas	264,2	113,6	624,2	0,4299	104,44

Na figura 27, observam-se três condições de iluminação na Sala Projeto Civil DS.00.12B durante o período da manhã.

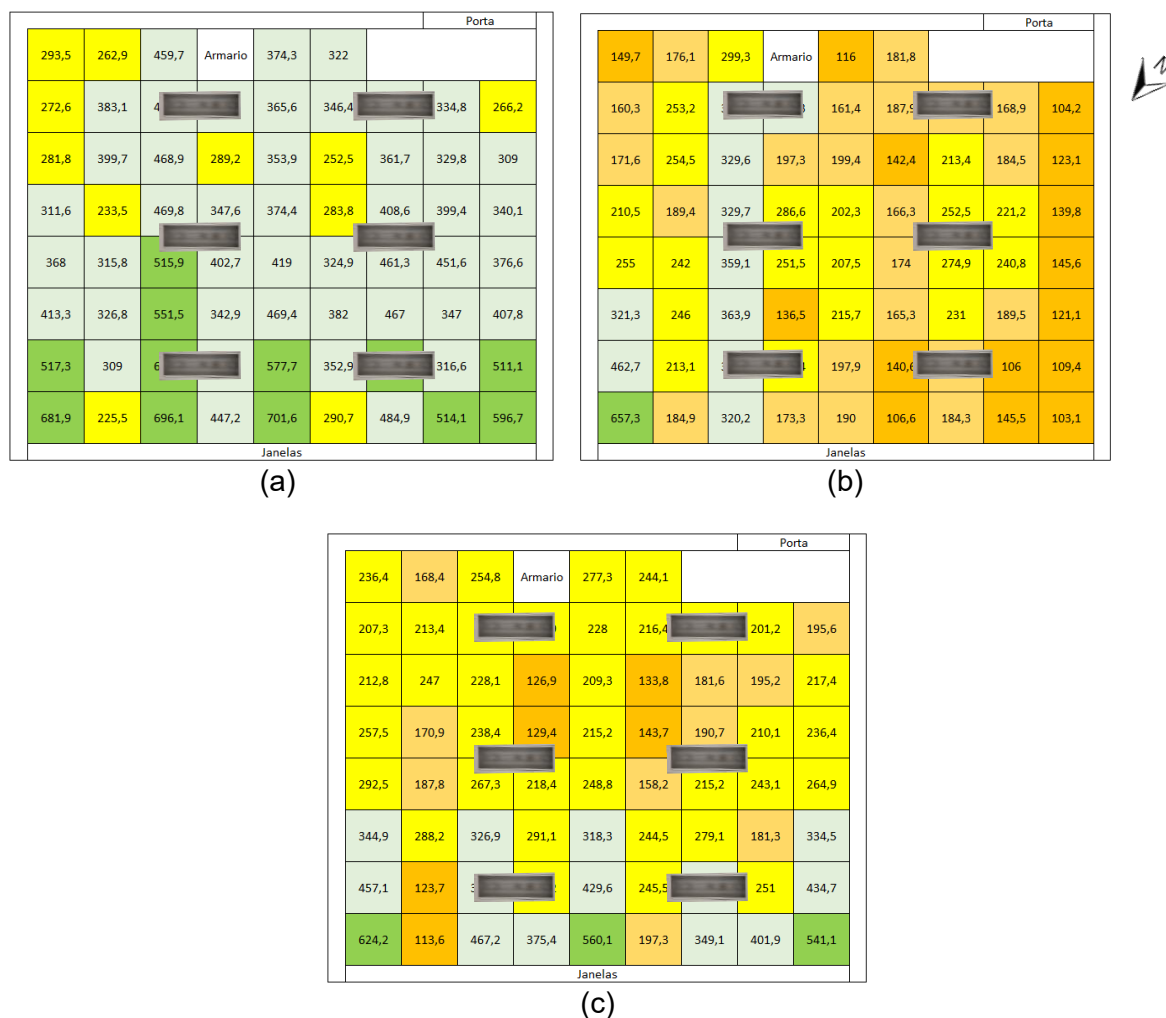


Figura 27 - Medição da iluminância (manhã) (norma EN 12464-1). (a) Iluminação artificial com persianas fechadas. (b) Iluminação artificial com persianas abertas. (c) Iluminação artificial desligada e persianas abertas.

A Tabela 18 apresenta os indicadores luminosos da Sala Projeto Civil para os períodos de tarde e noite. Os resultados revelam um desempenho globalmente insatisfatório em todos os cenários analisados, por razões distintas. As condições com persianas abertas, com ou sem iluminação artificial, originam iluminâncias médias muito superiores ao recomendado, com forte concentração de luz junto às janelas e acentuada heterogeneidade espacial. Em sentido oposto, o cenário noturno apresenta níveis de iluminância claramente insuficientes (161,5 lux), ficando muito aquém do intervalo normativo. A condição com iluminação artificial e persianas fechadas é a que mais se aproxima dos valores recomendados, ainda que a uniformidade registada ($U_0 = 0,37$) permaneça abaixo do mínimo exigido pela EN 12464-1. Em nenhum dos quatro cenários se atingem índices de uniformidade adequados, o que evidencia limitações estruturais no sistema de iluminação da sala, particularmente acentuadas no período da tarde devido à influência da radiação solar direta.

Tabela 18 - Indicadores de desempenho luminoso na Sala Projeto Civil segundo diferentes cenários (tarde e noite)

Condições	Emed	Emin	Emax	U ₀	DP
Iluminação artificial com persianas fechadas	328,2	120,1	1869,7	0,3659	253,99
Iluminação artificial com persianas abertas	1182,8	381,2	7044,0	0,3222	1064,2
Iluminação artificial desligada e persianas abertas	978,9	233,8	5820,2	0,2388	939,42
Iluminação artificial (noite)	161,5	41,4	291,6	0,2563	66,57

Na figura 28, observam-se as diferentes condições de iluminação na Sala Projeto Civil DS.00.12B durante o período da tarde e noite.

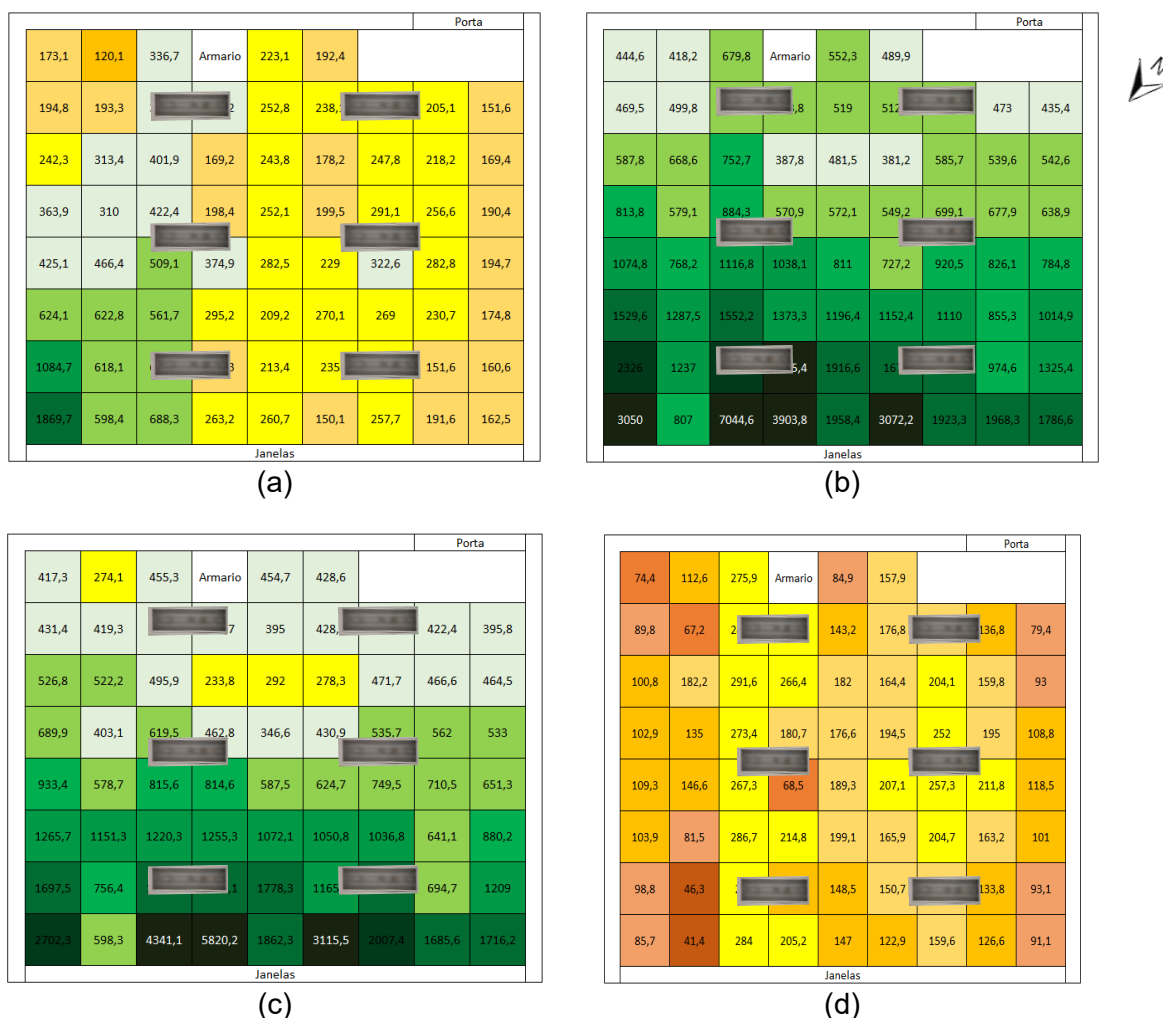


Figura 28 - Medição da iluminância (tarde/noite) (norma EN 12464-1). (a) Iluminação artificial com persianas fechadas. (b) Iluminação artificial com persianas abertas. pontos de acordo com a legislação. (c) Iluminação artificial desligada e persianas abertas. (d) (noite). Iluminação artificial.

Estes resultados evidenciam que a iluminação noturna é deficiente, com valores médios insuficientes e uniformidade limitada, pelo que se recomenda aumentar a potência ou redistribuir as luminárias para cumprir as normas de conforto visual.

4.2. Visualização e funcionalidade do *dashboard*

A implementação do *dashboard* no Power BI não só permite a visualização dos dados, mas também transforma a maneira como a informação ambiental é gerida e interpretada pela comunidade académica.

4.2.1. Integração dos dados no Power BI.

4.2.2. Vantagens da visualização interativa para a interpretação e gestão dos dados ambientais.

A implementação de um *dashboard* interativo com o Power BI oferece vantagens significativas em comparação com métodos tradicionais de análise de dados, como relatórios estáticos ou folhas de cálculo.

- **Acessibilidade e democratização dos dados:** A informação, antes restrita a análises técnicas, torna-se acessível a qualquer membro da comunidade (gestores, professores, alunos) através de um simples navegador web, sem necessidade de software especializado ou de conhecimento técnico. O acesso pelo navegador oferece dois modos principais, o que facilita a navegação para qualquer perfil de utilizador.

- **Monitorização contínua e proativa:** A atualização automática a cada 10 minutos permite uma vigilância quase em tempo real. Isto facilita a deteção imediata de anomalias, como picos de CO₂ ou de partículas, permitindo uma resposta rápida para mitigar riscos à saúde e ao bem-estar dos ocupantes.

- **Capacidade de análise aprofundada (*Drill-down*):** A funcionalidade de “Modo Histórico”, com filtros de data interativos, permite que os utilizadores explorem os dados de forma autónoma. É possível analisar tendências sazonais, identificar padrões de ocupação e correlacionar eventos específicos (por exemplo, uma aula com muitas pessoas) com alterações na qualidade do ar.

- **Suporte à decisão baseada em evidências:** O *dashboard* transforma dados brutos em conhecimento acionável. A gestão do edifício pode utilizar a informação para otimizar o funcionamento dos sistemas de ventilação, planear manutenções ou validar a eficácia das medidas implementadas, sempre com base em dados quantitativos e fiáveis. A visualização clara e contextualizada é fundamental para uma gestão ambiental eficiente e transparente.

4.2.3 Descrição das principais interfaces do *dashboard*

Depois de apresentadas as principais vantagens da visualização interativa, apresentam-se seguidamente as principais interfaces do painel de controlo.

No primeiro ecrã (figura 29) observa-se a interface de acesso principal do painel de controlo, concebida para orientar o utilizador, desde o início, para dois modos de consulta

claramente diferenciados: *Historical* e *Real Time*. Esta estrutura é importante porque organiza a navegação de forma simples e evita que o utilizador tenha de percorrer vários ecrãs antes de chegar à informação relevante. Em termos funcionais, esta página desempenha um papel introdutório e de classificação, pois separa, desde o início, a análise retrospectiva da imediata.

A lógica desta tela inicial, para além de uma função estética, responde a uma estrutura operacional do sistema. A página foi concebida como o ponto de entrada acessível via navegador, a partir do qual se seleciona o modo de visualização mais adequado de acordo com a necessidade do utilizador, seja consulta histórica ou monitorização em tempo real. Isto facilita a utilização por diferentes perfis da comunidade académica, incluindo utilizadores sem formação técnica em análise de dados ou no ambiente do Power BI.

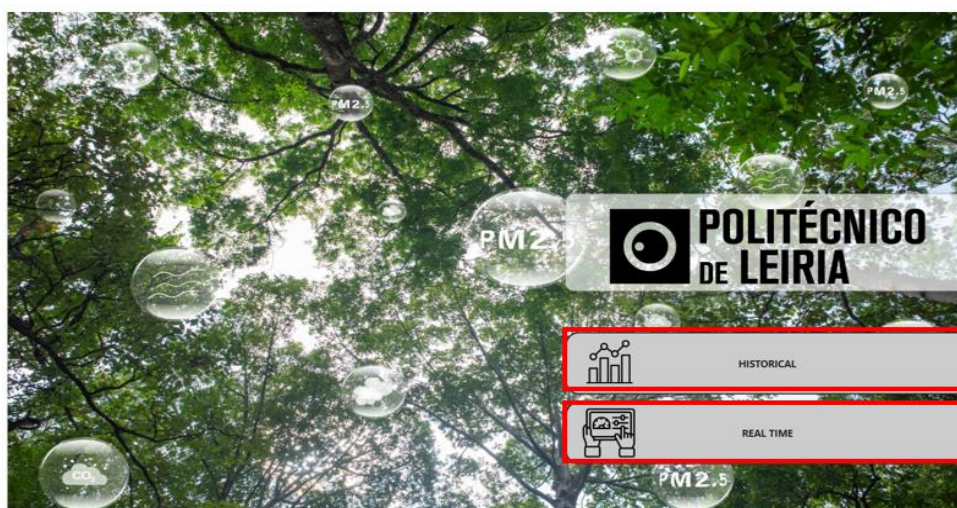


Figura 29. Ecrã inicial do dashboard com opções para navegar pelos diferentes modos, histórico e tempo real.

A Figura 30 mostra o modo histórico do painel, concebido para a análise retrospectiva de dados ambientais, permitindo ao utilizador explorar o comportamento dos parâmetros num intervalo de tempo definido. Ao contrário do modo em tempo real, que será abordado mais adiante, esta visualização não se centra no estado instantâneo do ambiente, mas sim na interpretação de tendências, variações e episódios ocorridos no passado.

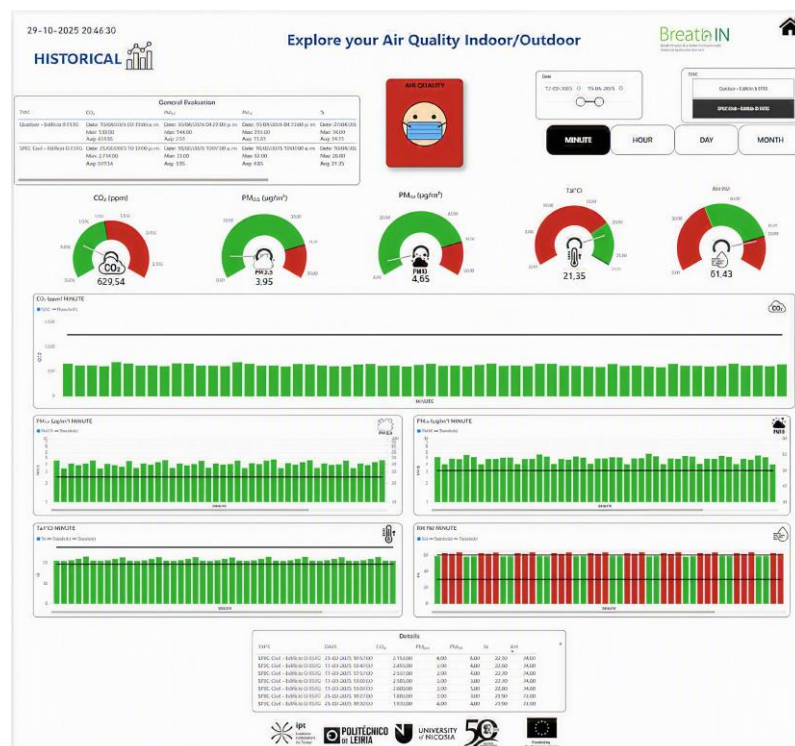


Figura 30 - Representação gráfica do histórico de dados com indicadores, filtros e gráficos interativos, permitindo análise de tendências e exportação para Excel.

A Figura 31 apresenta o quadro que resume as informações mais relevantes do período selecionado. O seu objetivo é oferecer uma síntese interpretativa antes de se passar à análise detalhada. Nesta secção, são apresentadas comparações entre os dados, valores médios e, especialmente, a identificação do valor máximo registado com a respetiva data e hora. O quadro de avaliação geral reúne toda a informação solicitada, permitindo reconhecer rapidamente eventos críticos sem necessidade de rever toda a série temporal. Por exemplo, se o utilizador quiser saber quando ocorreu o pico mais elevado de CO₂ ou qual foi o valor extremo de uma variável num determinado intervalo, esta zona mostra-o de forma direta. Por isso, funciona como um primeiro nível de interpretação quantitativa.

General Evaluation				
TYPE	CO ₂	PM _{2.5}	PM ₁₀	Ta
Outdoor - Edifício B ESTG	Date: 10/04/2025 02:39:00 a. m. Max: 538.00 Avg: 424.95	Date: 30/04/2025 04:22:00 p. m. Max: 544.00 Avg: 7.51	Date: 30/04/2025 04:22:00 p. m. Max: 816.00 Avg: 11.61	Date: 27/04/2025 04:22:00 p. m. Max: 34.00 Avg: 14.11
SPEC Civil - Edifício D ESTG	Date: 25/02/2025 10:32:00 p. m. Max: 2,734.00 Avg: 629.54	Date: 18/02/2025 10:07:00 a. m. Max: 31.00 Avg: 3.95	Date: 18/02/2025 10:02:00 a. m. Max: 62.00 Avg: 4.65	Date: 10/04/2025 10:02:00 a. m. Max: 26.60 Avg: 21.35

Figura 31 - Painel de avaliação geral do modo histórico, com comparação de dados, média e identificação do valor máximo com data e hora.

A área destacada na figura 32 corresponde à área de controlo principal do modo histórico. A sua função é permitir que o utilizador defina o período de análise e selecione se pretende visualizar dados do ambiente interior, do exterior ou ambos, conforme a configuração do painel. Esta parte é essencial porque determina tudo o que é apresentado no resto do ecrã: uma vez escolhido o intervalo temporal, os indicadores, gráficos e tabelas são atualizados automaticamente. Do ponto de vista metodológico, esta secção é importante porque transforma o painel de controlo numa ferramenta interativa. O utilizador não observa dados fixos, mas pode construir a sua própria consulta de acordo com a necessidade de análise. Isto facilita a comparação de períodos, a revisão de episódios concretos e o estudo do comportamento dos parâmetros em diferentes momentos do calendário académico.

The image shows three main UI components for the historical mode control panel. On the left, a date range selector with two date inputs (12-02-2025 and 15-05-2025) and a range slider. In the center, a 'TYPE' selector with two radio buttons: 'Outdoor - Edifício B ESTG' (selected) and 'SPEC Civil - Edifício D ESTG'. On the right, four buttons for time intervals: 'MINUTE' (highlighted in black), 'HOUR', 'DAY', and 'MONTH'.

Figura 32 - Seletor do intervalo temporal e seleção de medições internas/externas no modo histórico do painel de controlo.

Na figura 33, observa-se o quadro que reúne os valores médios dos parâmetros ambientais do intervalo filtrado. O seu objetivo é proporcionar uma visão global do comportamento médio do ambiente no período selecionado. Em vez de se centrar em valores pontuais, esta parte resume a tendência geral das variáveis. Do ponto de vista analítico, esta área é útil porque permite comparar rapidamente períodos distintos. Por exemplo, facilita determinar se um intervalo temporal apresentou condições médias mais favoráveis ou mais críticas do que outro. Além disso, estes indicadores ajudam a complementar a leitura dos gráficos, pois traduzem grandes conjuntos de dados em valores sintéticos fáceis de interpretar.

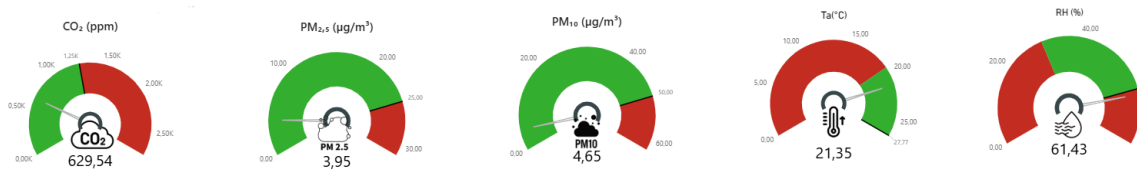


Figura 33 - Indicadores da média geral dos parâmetros no intervalo temporal selecionado no modo histórico.

A Figura 34 mostra o painel que constitui o núcleo visual do modo histórico. Aqui são apresentados os dados ambientais correspondentes ao intervalo filtrado, permitindo observar a evolução temporal de cada parâmetro. O seu principal valor reside no facto de permitir identificar tendências, picos, descidas, padrões repetitivos e diferenças entre variáveis ao longo do tempo. Estes gráficos permitem uma análise muito mais aprofundada do que a oferecida pelas médias ou valores máximos. Graças a eles, o utilizador pode detectar se um problema é recorrente, se há uma relação entre determinados horários e o aumento de poluentes, ou se certos parâmetros se comportam de forma semelhante num mesmo período.

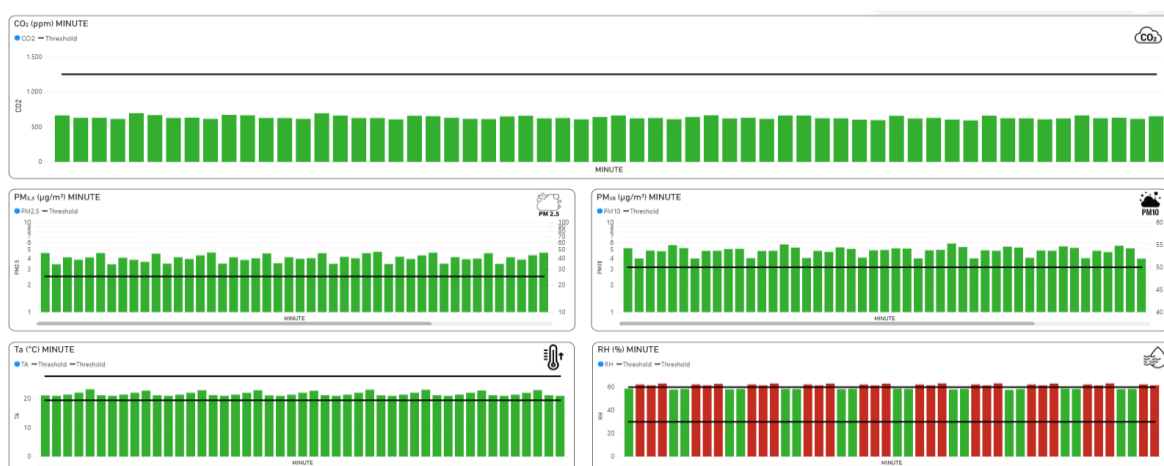


Figura 34 - Gráficos da evolução dos parâmetros ambientais no intervalo de datas selecionado no modo histórico.

A última parte do modo histórico contém este quadro (Figura 35) que corresponde à funcionalidade de exportação de dados. O seu objetivo é permitir que o utilizador descarregue, em formato Excel, as informações do período selecionado, facilitando a análise posterior fora do painel. Esta opção amplia o uso da ferramenta, uma vez que não limita a consulta à visualização no ecrã. De um ponto de vista académico e técnico, esta função é especialmente relevante porque permite reutilizar os dados para elaborar tabelas, comparações, relatórios ou análises complementares. Por outras palavras, transforma o painel de controlo não só numa plataforma de visualização, mas também numa ferramenta de apoio ao trabalho analítico e documental.

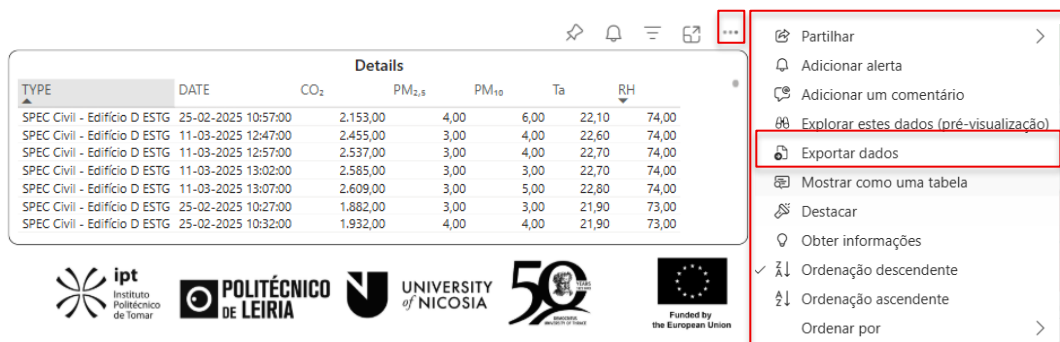


Figura 35 - Tabela detalhada de transferência de dados no formato Excel do modo histórico.

A Figura 36 mostra o painel de controlo em tempo real, destinado à monitorização contínua das condições ambientais da sala de aula, permitindo observar o estado atual dos principais parâmetros de qualidade do ar interior e exterior. Ao contrário do modo histórico, que se centra na análise retrospectiva, esta visualização foi concebida para oferecer uma leitura rápida, comparativa e atualizada dos dados, facilitando a deteção de variações recentes e possíveis anomalias.



Figura 36 - Representação em tempo real com indicadores e séries temporais por minuto de CO₂, PM_{2.5}, PM₁₀, temperatura do ar (°C) y humidade relativa do ar (HR), distinguindo entre ambientes interior e exterior.

O primeiro painel, apresentado na figura 37, corresponde aos indicadores superiores do modo em tempo real. Nesta zona, são apresentados, para cada parâmetro monitorizado, os valores relativos aos ambientes exterior e interior, o que permite uma comparação direta e imediata entre ambos. A principal utilidade desta secção é proporcionar uma leitura rápida do estado atual da sala de aula e do exterior, facilitando a deteção de diferenças marcantes entre ambos os ambientes. De uma perspetiva analítica, esta secção é importante porque resume, num único olhar, o comportamento instantâneo

das principais variáveis. Assim, o utilizador pode identificar se um valor elevado se localiza apenas no interior, o que poderia sugerir um problema relacionado com a ocupação ou a ventilação, ou se o fenómeno também está presente no exterior, o que indicaria uma influência ambiental mais ampla.



Figura 37 - Indicadores em tempo real dos parâmetros ambientais, com comparação entre ambientes interior e exterior.

A imagem a seguir, apresentada na Figura 38, mostra a área gráfica principal do modo em tempo real. Nela, os dados internos são representados por barras e os externos por linhas, apresentando, para cada parâmetro, uma sequência temporal que abrange as últimas 24 horas. Esta forma de representação facilita a comparação visual entre os dois ambientes, permitindo identificar tanto diferenças de magnitude quanto divergências na evolução temporal.

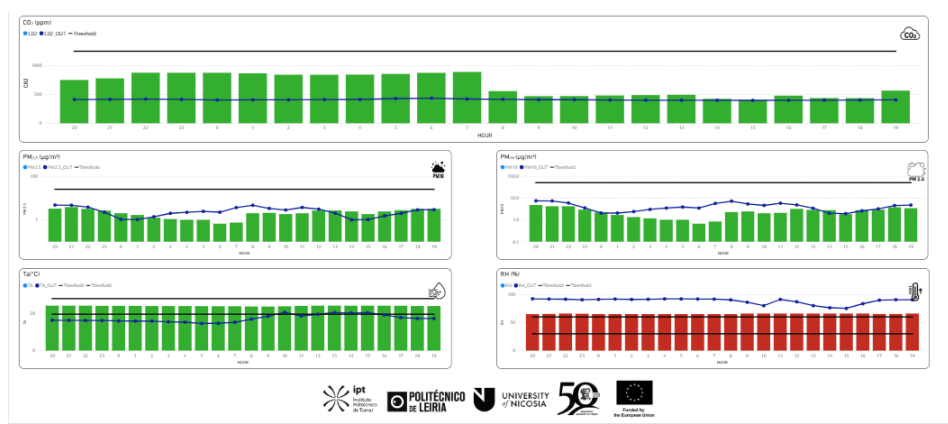


Figura 38 - Representação em tempo real, ao longo de 24 horas, dos principais parâmetros ambientais, com valores interiores em barras e exteriores em linha.

A relevância desta abordagem reside na capacidade de contextualizar os dados recolhidos, superando a mera apresentação de valores instantâneos. A integração de séries temporais permite discernir se um determinado registo se insere numa tendência prolongada, corresponde a um pico pontual ou manifesta-se de forma recorrente em determinados períodos do dia, conferindo maior profundidade interpretativa à análise ambiental da sala de aula. Esta conjugação entre imediatez e continuidade temporal fortalece a solidez das conclusões extraídas, facilitando igualmente a identificação de

padrões diários e a caracterização da relação entre as condições interiores e exteriores, aspetos determinantes para uma monitorização contínua e fundamentada.

De forma mais abrangente, as diferentes vistas do *dashboard* permitem transitar de uma consulta geral a uma análise pormenorizada do comportamento ambiental do espaço, articulando monitorização em tempo real, análise histórica e comparação entre ambos os ambientes. Esta estrutura não só simplifica a leitura e a interpretação dos dados, como também transforma a informação recolhida num instrumento operacional para a deteção de episódios críticos, o acompanhamento de padrões recorrentes e o suporte a decisões orientadas para a melhoria da ventilação e da gestão ambiental do espaço. Neste sentido, o *dashboard* consolida-se como um recurso de apoio contínuo, acessível e ancorado em evidências quantitativas, que reforça a utilidade prática dos dados monitorizados e potencia sua aplicação em contextos de gestão e intervenção.

4.3. Discussão

4.3.1. Implicações dos resultados para a gestão da QAI.

A comparação sistemática entre as condições interiores e exteriores confirma que, de forma geral, a sala DS.00.12B apresenta condições ambientais adequadas, embora se verifiquem episódios específicos que exigem maior atenção e controlo.

Em relação ao parâmetro CO₂, embora os valores médios se situem dentro dos limites recomendados, verificam-se picos pontuais elevados, associados a períodos de maior ocupação e ventilação insuficiente, tal como evidenciado pelos valores máximos registados. A análise temporal com resolução de minutos mostra que estes picos não são instantâneos, mantendo-se geralmente durante períodos contínuos de cerca de 20 a 60 minutos, concentrando-se sobretudo ao meio-dia e no final do período letivo. Não foram observadas concentrações elevadas sustentadas por várias horas consecutivas, o que indica que se tratam de situações pontuais e temporárias.

A literatura técnica e normativa contextualiza esta leitura, sendo que o quadro de categorias de qualidade do ar interior é definido pela EN 16798-1, que estabelece limites operacionais de 800, 1000 e 1400 ppm para a classificação do ambiente interior em salas de aula. Paralelamente, o denominado valor de 1000 ppm (número de Pettenkofer) continua a ser amplamente utilizado como referência prática em contextos educativos e de escritório (EN 16798-1:2019; PCE Instruments, 2024), enquanto a Portaria n.º 138-I/2021, estabelece 1250 ppm como limite de referência.

Assim, embora as médias observadas indiquem condições globalmente favoráveis, os registos pontuais superiores a 1500-2000 ppm evidenciam episódios de qualidade do ar moderada a baixa, justificando a necessidade de ações corretivas ao nível da ventilação.

Os efeitos funcionais dessas medições têm suporte empírico em estudos que relacionam a ventilação ao desempenho e à saúde. Em contextos universitários e escolares, concentrações sustentadas de CO₂ acima dos limites normativos têm sido associadas a insucesso académico, menor atenção e aumento das queixas de saúde; as conclusões são consistentes quando o CO₂ ultrapassa os 1000-1500 ppm durante atividades cognitivas exigentes (Rus et al., 2021; Toyinbo, 2023; Al-Jokhadar et al., 2023).

Valores médios baixos tendem a indicar condições de ventilação adequadas, enquanto aumentos pontuais geralmente estão associados a períodos de maior ocupação ou a uma redução temporária da renovação do ar (EN 16798-1:2019; ASHRAE, 2023).

Quanto à temperatura do ar, os valores mantiveram-se estáveis ao longo dos períodos analisados, dentro da faixa de conforto recomendada, evidenciando o efeito de amortecimento térmico do edifício face às variações exteriores.

A estabilidade das médias de temperatura do ar interior, próximas dos 21-22 °C, encontra-se em consonância com os intervalos de conforto térmico geralmente recomendados para espaços educativos. A literatura indica que temperaturas neste intervalo tendem a ser percecionadas como confortáveis pela maioria dos ocupantes (ANSI/ASHRAE 55-2020; Soler & Palau, 2022).

No entanto, os valores mínimos de 17 °C registados em ambos os períodos situam-se abaixo do limiar de conforto térmico de referência de 19 °C, citada na norma ANSI/ASHRAE 55-2010. Estes valores podem refletir situações pontuais de arrefecimento decorrentes de processos de ventilação ou de perdas térmicas, com potencial para gerar episódios localizados de desconforto térmico entre os ocupantes sedentários (Toyinbo, 2023; Soler & Palau, 2022). Contudo, importa salientar que, no presente estudo, não se efetuou um registo sistemático do número de ocupantes nem do estado operacional da ventilação natural. Esta limitação impede uma associação direta e inequívoca entre os valores observados e as condições específicas de ocupação e ventilação, devendo a interpretação dos resultados ser efetuada à luz desta condicionante.

A literatura especializada estabelece uma relação consistente entre o desempenho cognitivo e temperaturas ambientais moderadas e estáveis. Estudos atuais indicam que o intervalo ótimo para tarefas de atenção sustentada e memória de trabalho está compreendido entre 20 e 24,7 °C. Desvios para valores superiores ou inferiores a esse intervalo estão associados à fadiga, à diminuição da atenção e ao aumento dos tempos de resposta (Toyinbo, 2023).

Em relação à humidade relativa do ar, nos períodos monitorizados, os valores interiores situaram-se frequentemente próximos ou acima do limite superior de conforto, refletindo a forte influência das condições exteriores e a ausência de controlo ativo da humidade no espaço.

A literatura destaca que o controlo da humidade relativa do ar é inseparável da ventilação e do conforto percebido. A ventilação contribui para diluir os poluentes e, ao mesmo tempo, regula a humidade, favorecendo condições de bem-estar térmico (ASHRAE, 2023; European Commission, 2024). Neste contexto, a média interior de 66,83% sugere períodos com sensação de ambiente pesado, sobretudo em momentos de maior ocupação e renovação insuficiente do ar (Al-Jokhadar et al., 2023; Porras, 2025).

O vínculo entre a humidade elevada e o risco à saúde está em conformidade com a literatura. A acumulação de humidade promove o crescimento de bolores e a emissão de substâncias irritantes, estando também associada a sintomas como cefaleias, fadiga e redução da atenção em contextos educativos (Granados et al., 2024; Al-Jokhadar et al., 2023). A humidade exterior observada no campus explica a exposição da sala a níveis elevados, embora o facto de as médias interiores não replicarem esses máximos indique um efeito moderador da envolvente do edifício, ainda que nem sempre suficiente para garantir o conforto durante todo o período letivo.

No que se refere à norma portuguesa, a Portaria 138-G/2021 adota uma abordagem preventiva, associando a qualidade do ar ao controlo microbiológico e alinhando-se com a manutenção da humidade entre 40% e 60%. Nesse sentido, a média de 66,83% em 2024 posiciona a sala numa zona limítrofe, justificando ventilações mais frequentes, enquanto a média de 60,85% em 2025 se aproxima do intervalo recomendado. Adicionalmente, a literatura indica que condições inadequadas de humidade podem afetar o desempenho académico, manifestando-se em fadiga, menor concentração e absentismo (Al-Jokhadar et al., 2023). As orientações da ASHRAE reforçam ainda que a ventilação orientada pela procura, além de controlar o CO₂, contribui para regular a humidade relativa do ar quando aplicada de forma adequada (ASHRAE, 2023).

Em relação à monitorização de PM_{2,5}, os resultados evidenciam concentrações médias reduzidas no interior, inferiores às exteriores e abaixo dos valores de referência, indicando um ambiente globalmente protegido. No entanto, a ocorrência de picos pontuais revela vulnerabilidade a eventos específicos, como ressuspensão de partículas ou influência externa, o que exige medidas preventivas (Pérez-Moneo et al., 2025; Caciara et al., 2024).

A literatura alerta que, mesmo cumprindo os limites legais, reduções adicionais de PM_{2,5} trazem benefícios mensuráveis para a saúde e o desempenho. Em contexto universitário, a melhoria da qualidade do ar foi associada a melhores resultados cognitivos em testes de leitura, evidenciando o impacto direto da redução de partículas finas (Xu et al., 2024). Outros estudos apontam que exposições prolongadas, mesmo a concentrações consideradas aceitáveis, podem gerar efeitos subclínicos e comprometer a função respiratória e a atenção, recomendando manter o PM_{2,5} tão baixo quanto possível, sobretudo em ambientes educativos (Pérez-Moneo et al., 2025; Caciara et al., 2024). Estes achados são coerentes com os resultados observados, embora as médias sejam favoráveis, a gestão dos picos é essencial para evitar impactos em períodos críticos da atividade académica.

A relação entre o ar exterior e interior ajuda a interpretar a assimetria observada, sendo que o campus apresentou médias exteriores mais elevadas e maior variabilidade em 2025, compatíveis com influências urbanas e meteorológicas. Nestes casos, a qualidade do ar interior depende da envolvente do edifício, da ventilação e da filtragem (ASHRAE, 2023; Cedeño et al., 2022). Em termos operacionais, a literatura recomenda medidas como filtragem eficiente (HEPA ou MERV elevados), limpezas com métodos húmidos, controlo das aberturas durante picos externos e ventilação em períodos de melhor qualidade do ar, podendo ainda recorrer-se a purificadores portáteis em salas com elevada ocupação. (Pérez-Moneo et al., 2025; ASHRAE, 2023).

Quanto ao PM_{10} , os resultados indicam igualmente um desempenho favorável no interior, com médias reduzidas, embora se registem picos esporádicos que evidenciam eventos de ressuspensão ou intrusão de partículas do exterior. Estes episódios, embora não representativos da condição geral, demonstram a necessidade de controlo operacional e de estratégias de mitigação adequadas (Portaria 138-G/2021; ASHRAE, 2023; Caciara et al., 2024).

A literatura ajuda a interpretar essa assimetria, indicando que, em ambientes universitários urbanos, as fontes de PM_{10} combinam infiltração externa associada ao tráfego, obras e poeira mineral, com fontes internas ligadas ao movimento de pessoas, limpeza a seco e materiais presentes na sala. Como resultado, a linha de base interior tende a ser inferior à exterior quando existem boas condições de manutenção, embora permaneça sensível a eventos pontuais que elevam temporariamente as concentrações (Caciara et al., 2024; Meiss et al., 2021). No presente caso, as médias internas de 7,26 e 4,99 $\mu g/m^3$ confirmam essa condição de base protegida, enquanto o máximo de 318 $\mu g/m^3$ sugere um episódio anómalo compatível com intensa mobilização de poeira na sala ou entrada pontual do exterior. Assim, apesar dos picos, as médias exteriores permanecem abaixo do limite diário, embora com uma amplitude maior que exige atenção ao sincronizar as ventilações (Cedeño et al., 2022; ASHRAE, 2023).

Do ponto de vista da saúde e do desempenho funcional, as evidências comprovam que manter o PM_{10} muito abaixo dos limites legais reduz a irritação das vias respiratórias e o desconforto em populações sensíveis, e que a redução de partículas em geral, embora a ligação mais sólida tenha sido demonstrada para o $PM_{2,5}$, contribui para melhorar o conforto percebido e a capacidade de concentração durante as tarefas académicas (Pérez-Moneo et al., 2025; Caciara et al., 2024).

Por último, a avaliação da iluminação evidencia um comportamento fortemente dependente do controlo das persianas e do período do dia. Verificam-se situações de

sobreiluminação em presença de luz natural direta e insuficiência de níveis em períodos noturnos, bem como uma falta consistente de uniformidade, que constitui o principal fator de não conformidade. Este comportamento compromete o conforto visual e está em linha com a literatura, que destaca a importância da uniformidade e do controlo do encandeamento para o desempenho em ambientes educativos (Velásquez et al., 2023; Brink et al., 2023; Muvit, 2025).

Estudos de campo em contextos de IES indicam que o aumento da iluminação, sem controlo adequado, não garante melhorias no desempenho e pode afetar a concentração quando há encandeamento ou falta de homogeneidade (Brink, Kijnen, et al., 2023; Brink, Lechner, et al., 2023). A comparação normativa e empírica sugere que o controlo dinâmico agrega valor. Sistemas reguláveis e persianas geridas com base na iluminância em pontos de controlo periféricos reduzem o risco de sobreiluminação ao final da tarde e subiluminação matinal, mantendo a uniformidade como critério orientador. Esta ênfase na homogeneidade é consistente com as evidências que associam o conforto visual sustentado, mais do que os máximos de lux, a menor fadiga e melhor desempenho em tarefas prolongadas de leitura e escrita (Velásquez et al., 2023; Muvit, 2025). Portanto, a iluminação medida na sala em geral exige um ajuste ou harmonização fina entre persianas e luminárias e, previsivelmente, ajustes de densidade e fotometria para atingir de forma estável 300-500 lux com $U_0 \geq 0,60$, evitando simultaneamente os excessos que o pôr do sol introduz em salas com alta exposição solar. Esta abordagem equilibra conforto, saúde ocular e desempenho com o quadro normativo em vigor e responde às lições derivadas de pesquisas recentes em ambientes universitários (NP EN 12464-1:2017; Brink, Kijnen, et al., 2023; Brink, Lechner, et al., 2023; Velásquez et al., 2023; Muvit, 2025).

4.3.2. Limitações da monitorização e do *dashboard*

A implementação do sistema de monitorização e visualização de dados da qualidade do ar demonstrou ser uma solução eficaz e robusta para a gestão ambiental do edifício. A arquitetura, que combina a extração de dados via API com um *script* Python, o armazenamento numa base de dados SQL Server e a visualização interativa através do Power BI, atingiu com sucesso o objetivo de transformar dados brutos em informação acessível.

A capacidade de monitorizar parâmetros chave em tempo quase real e de analisar tendências históricas representa um avanço significativo na gestão proativa do ambiente interior. As vantagens identificadas, como a democratização dos dados e o suporte à decisão baseada em evidências, validam a utilidade da ferramenta. No entanto, é igualmente importante reconhecer as limitações inerentes ao sistema implementado, tanto a nível da monitorização como da própria plataforma de visualização.

Apesar do sucesso do projeto, existem várias limitações técnicas e conceituais que devem ser consideradas para uma avaliação completa do sistema:

- **Dependência de Terceiros e Conectividade:** A recolha de dados depende inteiramente da disponibilidade e estabilidade da API do IQAir. Qualquer falha, alteração nos termos de serviço ou interrupção no seu funcionamento impactaria diretamente a aquisição de dados, sem que haja uma fonte alternativa. Adicionalmente, o sistema requer uma ligação à Internet estável para que o *script* Python possa comunicar com a API.

- **Representatividade Espacial dos Dados:** A monitorização está limitada à localização física dos sensores instalados. Os dados, embora precisos para o ponto de medição, podem não representar a qualidade do ar de todo o edifício, existindo a possibilidade de microclimas em salas ou pisos não monitorizados.

- **Latência da Informação:** O sistema opera em "quase tempo real" e não de forma instantânea. Existe uma latência inerente ao processo, composta pelo intervalo de extração de 10 minutos do *script* Python e pelo ciclo de atualização do Power BI *Gateway*. Flutuações muito rápidas e de curta duração nos parâmetros ambientais podem não ser capturadas.

- **Foco em Análise Descritiva:** Conforme mencionado, o projeto foca-se na análise descritiva e não em modelos preditivos. O *dashboard* é excelente para entender o que aconteceu e o que está a acontecer, mas não possui a capacidade de prever condições futuras ou gerar alertas automáticos baseados em tendências projetadas.

- **Dependência do *Gateway On-Premises*:** A atualização automática dos dados no serviço Power BI depende criticamente do funcionamento contínuo do *On-premises data gateway*. Se o servidor que aloja o *gateway* estiver desligado ou perder a ligação à rede, o *dashboard* deixará de receber novos dados, afetando a sua utilidade para monitorização em tempo real.

4.4. Propostas para melhoria da qualidade do ambiente interior

Com base nos resultados obtidos e no quadro normativo e científico revisto, propõe-se uma estratégia integral e aplicável para melhorar a qualidade do ar interior e o conforto dos estudantes nas salas de aula das IES. A proposta está orientada para objetivos mensuráveis, combina medidas operacionais de baixo custo com intervenções de investimento gradual e baseia-se em boas práticas e normas reconhecidas (ASHRAE 55/62.1; EN 16798-1; NP EN 12464-1; Portaria 138-G/2021; EPBD UE 2024/1275; Directiva UE 2024/2881).

4.4.1 Objetivos e metas quantificáveis

1. Manter os níveis de $\text{CO}_2 \leq 1000$ durante aproximadamente 95 % do tempo letivo e evitar permanências > 1250 ppm. Ativar ações corretivas ao ultrapassar 800-1000 ppm.
2. Manter uma temperatura do ar média de 20-24,7 °C em 80% do tempo (critério PMV/PPD) e limitar os extremos < 18 °C e > 26 °C.
3. Operar preferencialmente com humidade relativa do ar entre 40-60 % e evitar permanências $> 65-70$ %.
4. Como meta operacional, manter $\text{PM}_{2,5} < 10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $\text{PM}_{10} < 20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ como objetivo aspiracional de alinhamento com a UE 2030, mesmo cumprindo os limites nacionais.
5. Garantir uma iluminação de 300-500 lux na superfície de trabalho com uniformidade $U_0 \geq 0,60$ de forma estável.

4.4.2 Medidas por horizonte temporal

a) Ações imediatas e de baixo custo entre 0 e 3 meses: As ações imediatas assentam, de forma transversal, na criação e disponibilização do *dashboard* de monitorização ambiental, que constitui o elemento central de apoio à decisão e operacionalização das medidas propostas. O acesso em tempo real aos indicadores de CO_2 , humidade relativa do ar, partículas e iluminação permite transformar recomendações genéricas em ações objetivas, mensuráveis e repetíveis, reduzindo a dependência de decisões subjetivas por parte dos utilizadores.

- Ventilação regulada em função da concentração de CO_2 . Instalar “semáforos” de CO_2 visíveis e protocolar: ventilação inicial por 5-10 minutos antes da aula; microventilações de 2-3 minutos a cada 20-30 minutos quando o CO_2 se aproximar de 800-1000 ppm; ventilação cruzada quando as condições externas permitirem. Esta operação conjunta também ajuda a redirecionar a HR do ar para 40-60 %.

- Gestão da humidade. Evitar permanências > 65-70 % com pulsos breves de ventilação e controlo do ganho de vapor em horas de alta ocupação, registar intervalos e horários de HR elevada para agir neles.

- Controlo de partículas por meio da limpeza. Substituir a limpeza a seco por limpeza húmida e aspiração com HEPA, programar a limpeza fora do horário letivo, colocar tapetes para reter o pó nas entradas, vedar fendas que geram recirculação de pó.

- Sincronização com as condições exteriores, suportada por informação em tempo real. A abertura de janelas deverá ser orientada pelos valores de partículas em suspensão (PM_{2,5} e PM₁₀) medidos no exterior, visualizados através do *dashboard*. Sempre que os níveis exteriores se encontrem elevados, a ventilação natural deve ser limitada ou substituída por ventilações curtas e pontuais, preferencialmente em períodos em que o *dashboard* indique melhor qualidade do ar no exterior.

- A disponibilização do *dashboard* nas salas de aula, associada a avisos visuais simples (por exemplo, códigos de cor ou alertas), permite apoiar esta decisão de forma objetiva, reduzindo a dependência de avaliações subjetivas por parte dos utilizadores.

- Iluminação operacional. Definir cenários simples por faixa horária: manhã com persianas em modo difusor e iluminação artificial homogénea; tarde com persianas parcialmente fechadas para evitar excesso de iluminação e encandeamento; noite com iluminação artificial otimizada em distribuição e nível para atingir ≥ 300 lx em toda a área útil.

- Formação rápida. Guia de “dez minutos” para professores sobre quando ventilar, como ler o semáforo de CO₂ e como ajustar persianas e luminárias e colocar lembretes discretos na sala de aula.

- Qualidade dos dados. Revisar e calibrar sensores, documentar e filtrar leituras anómalas ou inválidas, resultantes de falhas instrumentais ou de comunicação (por exemplo, registos de 0 ppm).

b) Medidas de ação moderada entre 3 e 12 meses

- Purificação portátil HEPA dimensionada. Selecionar equipamentos com CADR que proporcionem 4-6 ACH efetivos em salas de aula com ocupação densa ou próximas a fontes de poeira; operar em horários de pico e durante exames. Testes em IES mostram melhorias imediatas no desempenho cognitivo ao reduzir o PM interior.

- Sombra e controlo solar. Lâminas difusoras e ajustes de persianas para atenuar valores elevados de iluminância do fim da tarde e melhorar a uniformidade sem elevar o nível médio, o que reduz o UGR e a fadiga ocular.

- Redesenho da iluminação leve. Relocalização de algumas luminárias e/ou adição pontual de linhas LED com fotometria mais ampla para elevar $U_0 \geq 0,60$ em toda a área, mantendo 300-500 lx e evitando excedentes energéticos.

- Filtragem na climatização existente. Aumentar o MERV sempre que possível e estabelecer um calendário de manutenção dos filtros, verificar as entradas de ar afastadas de focos de poeira e tráfego.

- Protocolos escritos. Procedimentos operacionais normalizados para ventilação sob demanda, gestão de HR e limpeza com HEPA, incluindo responsáveis, tempos e limites de ativação.

c) Intervenções estruturais e de alto impacto com duração entre 12 e 36 meses

Ventilação mecânica com recuperação de calor (HRV-*Heat Recovery Ventilation*) e controlo por CO₂. Em salas de aula críticas, incorporar sistemas de fornecimento-extração com HRV e modulação por demanda (8-14 L·s⁻¹·pessoa) para manter < 1000-1250 ppm o tempo todo, com eficiência energética e redução de HR elevada persistente.

- Envolvente e paisagismo. Barreiras vegetais e revisão dos acessos para mitigar a intrusão de poeira; vedação de infiltrações que comprometem a uniformidade térmica e provocam acumulação de HR em cantos frios.

- Sistema de controlo e integração de dados. Consolidar a monitorização contínua de CO₂, temperatura do ar, HR e PM num painel de gestão com regras de alerta, histórico e rastreabilidade (Power BI), com possibilidade de integração com BIM/GIS num «gémeo digital» que permita decisões operacionais e manutenção preditiva à escala do campus.

- Atualização completa da iluminação. Projeto fotométrico para atingir de forma robusta 300-500 lx com $U_0 \geq 0,60$ e $UGR \leq 19$, incluindo regulação e “*daylight harvesting*” para estabilizar a experiência visual e reduzir o consumo.

As medidas propostas foram organizadas não apenas por horizonte temporal, mas também pelo seu impacto financeiro e grau de complexidade de implementação. As ações de curto prazo (0-3 meses) correspondem, maioritariamente, a intervenções de baixo custo, baseadas na otimização de comportamentos, utilização de informação em tempo real e ajustes operacionais, não exigindo obras nem investimentos estruturais.

As medidas de médio prazo (3-12 meses) implicam um investimento moderado, associado sobretudo à aquisição de equipamentos específicos (purificadores HEPA, melhorias pontuais na iluminação e na filtragem), enquanto as intervenções de longo prazo (12-36 meses) representam um impacto financeiro elevado, por envolverem soluções estruturais de ventilação mecânica, requalificação da envolvente e integração avançada de

sistemas. Esta abordagem faseada permite alinhar benefícios ambientais com a capacidade financeira da instituição.

A implementação das medidas é organizada de forma faseada, iniciando-se com a monitorização contínua dos parâmetros ambientais, seguida da análise periódica dos dados e da aplicação de ações corretivas sempre que necessário. Este cronograma permite acompanhar os resultados ao longo do tempo e ajustar as medidas às condições reais de utilização das salas.

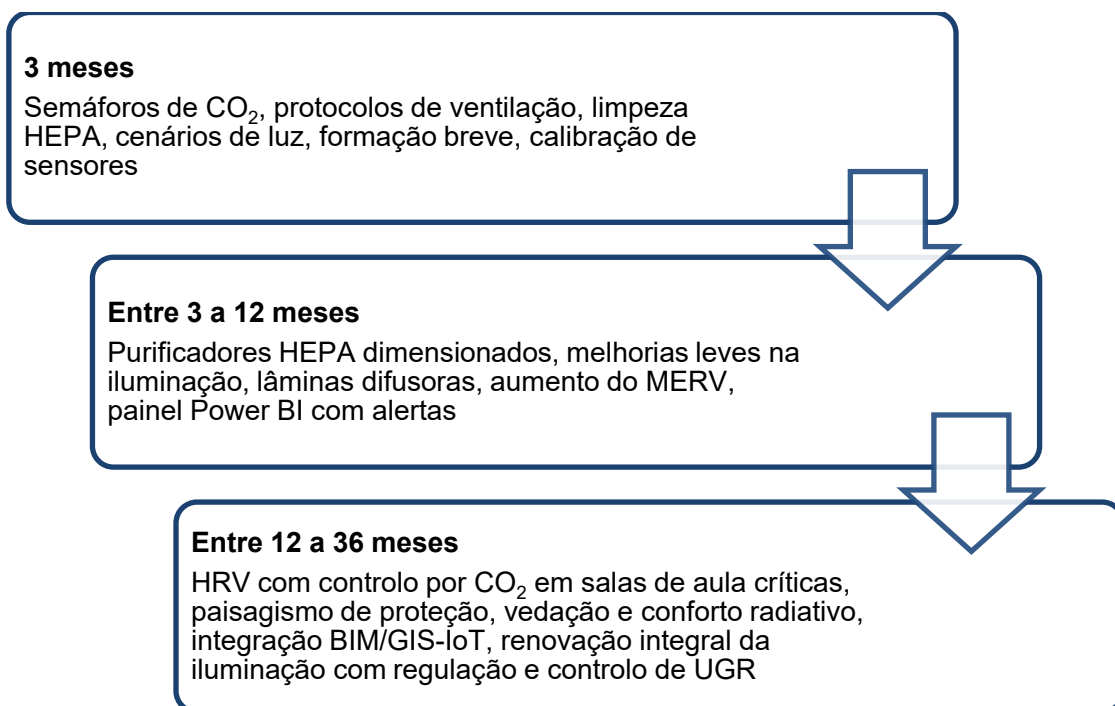


Figura 39. Cronograma de implementação das medidas de monitorização e correção.

Esta proposta transforma os resultados numa rota operacional e escalável, com metas claras, mecanismos de controlo e uma arquitetura de dados que facilita a tomada de decisões baseadas em dados. A sua aplicação é compatível com os requisitos legais e com as evidências científicas disponíveis, e foi concebida para melhorar de forma tangível a qualidade do ar interior e o conforto dos estudantes no contexto real da universidade em estudo.

4.4.3 Impacto esperado e justificação

Como já mencionado ao longo do estudo, o controlo da qualidade do ar interior oferece inúmeros benefícios, tais como os seguintes:

- Manter o CO₂ estável entre 1000 e 1250 ppm e reduzir os picos diminui os sintomas e melhora a atenção sustentada. (Rus et al., 2021; Toyinbo, 2023; Al-Jokhadar et al., 2023).

- Operar o HR em 40-60 % reduz os riscos higiénicos e os incómodos (ASHRAE, 2023; Granados et al., 2024).
- Manter baixos níveis de PM e gerir picos com HEPA e protocolos de limpeza traz benefícios respiratórios e cognitivos mensuráveis na população universitária (Xu et al., 2024; Pérez-Moneo et al., 2025).
- Estabilizar 300-500 lx, com $U_0 \geq 0,60$, e o controlo solar reduz o encandeamento e a fadiga visual, melhorando a leitura e a permanência na tarefa (Velásquez et al., 2023; Muvit, 2025).
- A integração de sensores com painéis de controlo e, numa fase madura, com um gémeo digital, melhora a resposta operacional e a transparência à escala do campus (Martino et al., 2024), cumprindo simultaneamente o quadro regulamentar português e europeu (Portaria 138-G/2021; EPBD UE 2024/1275; Directiva UE 2024/2881).

4.4.4 Governação, operação, acompanhamento e mitigação de riscos

A Figura 39 apresenta um modelo operacional integrado para a gestão da Qualidade da QAI e do conforto ambiental em salas de aula, estruturado como um ciclo contínuo de monitorização, avaliação e melhoria.

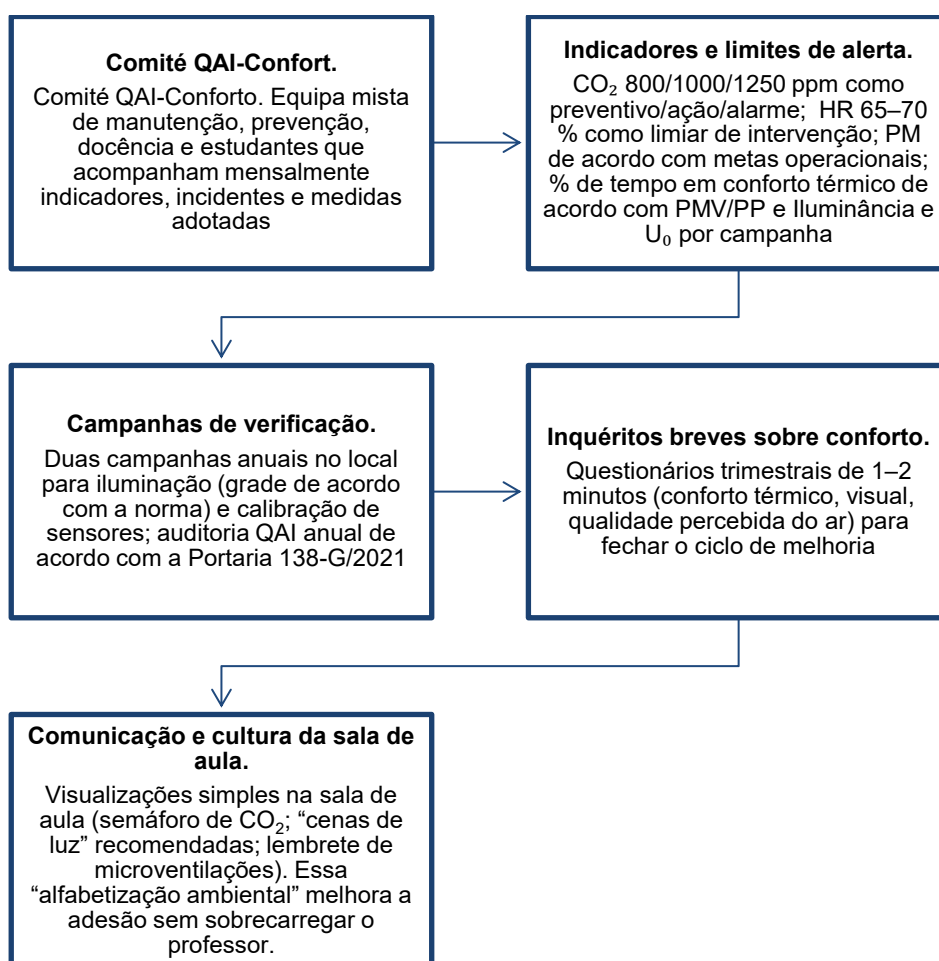


Figura 40. Modelo integrado de gestão da Qualidade da QAI e do conforto ambiental.

Este modelo assenta na definição prévia de indicadores-chave e de limites de alerta para CO₂, humidade relativa do ar, partículas em suspensão, conforto térmico e iluminância, permitindo a identificação atempada de situações de risco ou de não conformidade.

A monitorização regular destes indicadores é assegurada por um Comité QAI-Conforto, constituído por representantes da manutenção, da prevenção, da docência e dos estudantes, responsável pela análise periódica dos resultados, pelo acompanhamento de incidentes e pela proposta de medidas corretivas proporcionais. O funcionamento do sistema é complementado por campanhas técnicas de verificação, que incluem medições normalizadas de iluminância, calibração de sensores e auditorias anuais de QAI, bem como por inquéritos breves de perceção de conforto, que permitem integrar a avaliação técnica com a experiência dos utilizadores.

Paralelamente, o modelo incorpora estratégias simples de comunicação em sala de aula, como sinalização visual e recomendações operacionais claras, promovendo a consciencialização ambiental e a adoção de boas práticas, sem interferir na atividade letiva. Esta abordagem facilita a adesão dos utilizadores e reforça a eficácia das medidas implementadas.

A operacionalização do modelo exige, contudo, a antecipação de riscos que possam comprometer a sua eficácia e continuidade. Nesse sentido, foram identificados os principais riscos operacionais e definidas medidas de mitigação diretamente integradas no funcionamento do sistema:

Adesão operacional irregular. Mitigar com formação breve, sinais na sala de aula e automatização progressiva.

- Ruído causado pela ventilação natural ou purificadores. Selecionar equipamentos silenciosos e janelas de ventilação em pausas; avaliar os níveis sonoros.
- Custos energéticos. Compensar com HRV, regulação por demanda, controlo solar e «*daylight harvesting*» (aproveitamento da luz natural).
- Dados de baixa qualidade. Calibração programada e regras de validação para filtrar falhas (por exemplo, leituras de 0 ppm).

5. Conclusões e trabalhos futuros

O presente estudo permitiu avaliar, de forma integrada, as condições de qualidade do ar interior e exterior de uma sala de aula de uma Instituição de Ensino Superior, e demonstrar o potencial de uma plataforma de visualização interativa em Power BI como instrumento de apoio à gestão ambiental. De forma geral, os resultados evidenciam que o espaço monitorizado apresenta boas condições médias de qualidade do ar e conforto térmico, embora com limitações pontuais que exigem atenção.

As concentrações de CO₂ mantiveram-se, na maior parte do tempo, dentro dos limites recomendados, mas com picos associados a períodos de elevada ocupação ou ventilação insuficiente, evidenciando a necessidade de estratégias de ventilação mais ajustadas. A temperatura interior revelou-se estável e confortável, refletindo o efeito amortecedor do edifício, enquanto a humidade relativa, embora globalmente aceitável, operou frequentemente próxima do limite superior, sobretudo em dias de elevada humidade exterior. No caso das partículas (PM_{2,5} e PM₁₀), observaram-se médias reduzidas e sem impacto prolongado, ainda que com picos esporádicos associados a eventos pontuais.

O principal fator de não conformidade identificado foi a iluminação, que apresentou níveis excessivos de iluminância com luz natural e défice ou baixa uniformidade em períodos noturnos, comprometendo o conforto visual e evidenciando a necessidade de ajustes no controlo das persianas e no sistema de iluminação.

A análise conjunta dos dados interiores e exteriores permitiu compreender a influência do ambiente externo e definir prioridades de intervenção, confirmando que o ar exterior constitui, em geral, uma fonte adequada de renovação. Neste contexto, o sistema de monitorização revelou-se fundamental para identificar padrões, apoiar decisões e orientar medidas corretivas de forma objetiva.

Por sua vez, o *dashboard* desenvolvido em Power BI constitui um contributo central do estudo, ao permitir a visualização integrada e em tempo quase real dos parâmetros ambientais, facilitando a identificação de situações críticas e o acompanhamento contínuo das condições do espaço. Esta ferramenta demonstra potencial para apoiar a gestão ambiental em IES, promovendo decisões baseadas em dados e contribuindo para a melhoria contínua das condições de conforto e qualidade do ar interior.

No que respeita aos trabalhos futuros, recomenda-se o alargamento da monitorização a um período anual completo e a outros espaços da instituição, bem como a inclusão de novos parâmetros, como compostos orgânicos voláteis, ruído e indicadores microbiológicos. Sugere-se ainda o aprofundamento da análise da ventilação através de

mais episódios de decaimento de CO₂ e o desenvolvimento de soluções específicas para a iluminação. Adicionalmente, o *dashboard* poderá evoluir com funcionalidades como alertas automáticos, integração com sistemas de ventilação e ferramentas preditivas de apoio à decisão.

Bibliografía

- Adamopoulos, I., Syrou, N. F., Mijwil, M., Thapa, P., Ali, G., & Dávid, L. D. (2025). Quality of indoor air in educational institutions and adverse public health in Europe: A scoping review. *Electronic Journal of General Medicine*, 22(2), em632. <https://doi.org/10.29333/ejgm/15962>
- Al-Jokhadar, A., Alnusairat, S., Abubashem, Y., & Soudi, Y. (2023). The impact of indoor environmental quality (IEQ) in design studios on the comfort and academic performance of architecture students. *Buildings*, 13(11), 2883. <https://doi.org/10.3390/buildings13112883>
- Andrade, C., Stathopoulos, S., Mourato, S., Yamasaki, E. N., Paschalidou, A., Bernardo, H., Papaloizou, L., Charalambidou, I., Achilleos, S., Psistaki, K., Sarris, E., Carvalho, F., & Chaves, F. (2025). The role of interventions in enhancing indoor environmental quality in higher education institutions for student well-being and academic performance. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 45, 100611. <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2025.100611>
- Arias, S., & Ávila, D. (2025). Requerimientos de calidad ambiental interior en aulas de educación superior. *Revista En Ciencias de Los Ámbitos Antrópicos*, (6), eC1-eC16. <https://doi.org/10.33064/artificio620247040>
- ASHRAE. (2010). *ANSI/ASHRAE Standard 55-2010: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*. ASHRAE.
- ASHRAE. (2020). *ANSI/ASHRAE Standard 55-2020: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*. ASHRAE.
- ASHRAE. (2022). *Standard 62.1: Ventilation and Acceptable Indoor Air Quality*. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.
- ASHRAE. (2023). *Documento de Posicionamiento de ASHRAE sobre Calidad del Aire Interior (CAI)*. Comité de Dirección (BOD). https://www.ashrae.org/File%20Library/About/Position%20Documents/PD_Indoor-Air-Quality-2023-Spanish.pdf
- ASTM. (2017). *Standard E741-17: Standard Test Method for Determining Air Change in a Single Zone by Means of a Tracer Gas Dilution*. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/E0741-11R17>

- Ávila, L., Blanco, E., & Lizarazo, L. (2024). Contaminación bacteriana y fúngica del aire interior y su relación con el síndrome del edificio enfermo. *Salud UIS*, 56, e24028. <https://doi.org/10.18273/saluduis.56.e:24028>
- Batterman, S. (2017). Review and Extension of CO₂-Based Methods to Determine Ventilation Rates with Application to School Classrooms. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 14(2), 145. <https://doi.org/10.3390/ijerph14020145>
- Blanco, M., Gómez, I., & Mena, S. (2022). CO₂ y PM_{2.5} en la oficina de docentes del Departamento de Operaciones Unitarias. *ResearchGate*, 7(13), 27-35. <https://doi.org/10.5377/arquitectura.v7i13.14438>
- Brink, H. W., Lechner, S. C., Loomans, M. G., Mobach, M. P., & Kort, H. S. M. (2023). Understanding how indoor environmental classroom conditions influence academic performance in higher education. *Facilities*, 42(3/4), 185-200. (world). <https://doi.org/10.1108/F-12-2022-0164>
- Brink, H. W., Loomans, M. C., Mobach, M. P., & Kort, H. S. M. (2022). A systematic approach to quantify the influence of indoor environmental parameters on students' perceptions, responses, and short-term academic performance. *Indoor Air*, 32(10), e13116. <https://doi.org/10.1111/ina.13116>
- Caciora, T., Ilieș, A., Berdenov, Z., Al-Hyari, H. S., Ilieș, D. C., Safarov, B., Hassan, T. H., Herman, G. V., Hodor, N., Bilalov, B., & Peres, A. C. (2024). Comprehensive analysis of classroom microclimate in context to health-related national and international indoor air quality standards. *Frontiers in Public Health*, 12. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2024.1440376>
- Castell, N., Dauge, F. R., Schneider, P., Vogt, M., Lerner, U., Fishbain, B., Broday, D., & Bartonova, A. (2017). Can commercial low-cost sensor platforms contribute to air quality monitoring and exposure estimates? *Environment International*, 99, 293-302. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2016.12.007>
- Cedeño, M., Solano, T., Mora, D., & Chen Austin, M. (2022). Evaluación del desempeño de sistemas de ventilación en salones de clase: Estudio numérico en edificios universitarios en Panamá. *Revista Digital Novasinergia*, 5(1), 100-127. <https://doi.org/10.37135/ns.01.09.07>
- Chapellier, M. (2024). Ejemplos prácticos: Power BI aplicado al sector ambiental. *Comunidad ISM*. Consultado em 27 de junio de 2025, em

<https://www.comunidadism.es/ejemplos-practicos-power-bi-aplicado-al-sector-ambiental/>

- Chawla, H., Anand, P., Garg, K., Bhagat, N., Varmani, S. G., Bansal, T., McBain, A. J., & Marwah, R. G. (2023). A comprehensive review of microbial contamination in the indoor environment: Sources, sampling, health risks, and mitigation strategies. *Frontiers in Public Health*, 11. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2023.1285393>
- Constructora Brillas Agusti. (2021). Ventilación mecánica centros educativos. *Constructora Brillas Agusti - Construcción, Rehabilitación y Mantenimiento de Edificios*. Consultado em 23 de julio de 2025, em <https://brillasagusti.com/sistemas-de-ventilacion-mecanica-en-centros-educativos/>
- EPA. (2023). *Prácticas recomendadas para reducir la exposición a la contaminación en las escuelas cerca de las carreteras* [Overviews and Factsheets]. Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos. <https://www.epa.gov/system/files/documents/2023-02/420r23001.pdf>
- European Commission. (2024). *Acceptable indoor environmental quality and energy efficiency standards: Can buildings meet both (and for everyone)?* Consultado em 11 de junio de 2025, em <https://build-up.ec.europa.eu/en/resources-and-tools/articles/acceptable-indoor-environmental-quality-and-energy-efficiency>
- Felisi, J., Garrido, T., Querol, X., & Minguillón, M. (2021). *Guía de ventilación de espacios interiores*. Generalitat Valenciana - IDAEA-CSIC - MESURA. <https://www.idaea.csic.es/wp-content/uploads/2021/12/Guia-de-ventilacion-de-espacios-interiores.pdf>
- Fisk, W. J. (2017). The ventilation problem in schools: Literature review. *Indoor Air*, 27(6), 1039-1051. <https://doi.org/10.1111/ina.12403>
- Granados, J., Rivas, E., Soto, J., Ortiz, E., & Ramírez, V. (2024). Criterios mínimos del ambiente construido saludable. *Rev. Int. Contam. Ambie.*, 40, 741-758. <https://doi.org/https://doi.org/10.20937/RICA.55149>
- Guo, M., Yu, W., Sun, Y., Wang, L., Zhou, H., & Zhang, Y. (2023). Effects of Increasing Indoor Negative Air Ions on Cognitive Performance and Health of High Pure CO₂ Level-Exposed College Students. *Indoor Air*, 2023(1), 8298339. <https://doi.org/10.1155/2023/8298339>
- Haverinen-Shaughnessy, U., & Shaughnessy, R. J. (2015). Effects of Classroom Ventilation Rate and Temperature on Students' Test Scores. *PLOS ONE*, 10(8), e0136165. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0136165>

- ISM. (2025). *Curso Power BI para profesionales del sector ambiental*. Consultado em 27 de junio de 2025, em <https://www.ismedioambiente.com/programas-formativos/power-bi-para-profesionales-del-medio-ambiente/>
- ISO. (2007). *ISO 16000-8:2007: Indoor air—Part 8. Determination of local mean ages of air in buildings for characterizing ventilation conditions*. ISO.
- Martino, G., Meschini, S., Gasbarri, P., Accardo, D., Tagliabue, L. C., & Cacciaguerra, E. (2024). BIM, GIS and BI Tools for a university asset management system supporting space management, occupancy evaluation and optimization strategies. *Journal of Information Technology in Construction (ITcon)*, 29(50), 1128-1155. <https://doi.org/10.36680/j.itcon.2024.050>
- Meiss, A., Jimeno-Merino, H., Poza-Casado, I., Llorente-Álvarez, A., & Padilla-Marcos, M. Á. (2021). Indoor Air Quality in Naturally Ventilated Classrooms. Lessons Learned from a Case Study in a COVID-19 Scenario. *Sustainability*, 13(15), Article 15. <https://doi.org/10.3390/su13158446>
- Metropol. (2024). *Material particulado*. Consultado em 27 de junio de 2025, em https://www.metropol.gov.co/ambiental/calidad-del-aire/PublishingImages/Paginas/Generalidades/Principales-contaminantes/02-IMG_contaminantes.png
- Microsoft Power Platform. (s. f.). *Power BI: Visualización de datos*. Recuperado 11 de junio de 2025, de Consultado em 11 de junio de 2025, em <https://www.microsoft.com/es-es/power-platform/products/power-bi>
- Morales-Pinto, N., & Jiménez-Vargas, J. (2024). Calidad microbiológica del aire en servicios de alimentación de instituciones infantiles en Barranquilla—Colombia. *Vía innova*, 11(1), Article 1. <https://doi.org/10.23850/2422068X.5830>
- Mundielectro. (2024). *Diferencias Entre La Ventilación Natural Y La Ventilación Mecánica. Ventajas, Desventajas. - Mundielectro*. Consultado em 27 de junio de 2025, em <https://mundielectro.com/diferencias-entre-la-ventilacion-natural-y-la-ventilacion-mecanica-ventajas-desventajas/>
- Muvit. (2025). *La importancia de una buena iluminación en el estudio*. Consultado em 12 de junio de 2025, em <https://www.muvit.es/blog/iluminacion-inteligente/importancia-de-una-buena-iluminacion-en-el-estudio>
- Norma Portuguesa. (2017a). *NP EN 12464-1: Luz e iluminação. Iluminação dos locais de trabalho. Parte 1: Locais de trabalho interiores*. Instituto Português da Qualidade.

- Norma Portuguesa. (2017b). *NP EN 12464-2: Luz e iluminação. Iluminação dos locais de trabalho. Parte 2: Locais de trabalho no exterior*. Instituto Português da Qualidade.
- OMS. (2018). *WHO Housing and health guidelines*. OMS Press. Consultado em 27 de mayo de 2026, em <https://www.who.int/publications/i/item/9789241550376>
- PCE Instruments. (2024). *Medidor de CO2*. Consultado em 26 de junio de 2025, em https://www.pce-instruments.com/brasil/instrumento-de-medic%C3%A3o/medidor/medidor-de-co2-kat_162833.htm
- Pérez-Moneo, B., Aparicio Rodrigo, M., Redondas Marrero, M. a D., Sabariego Moreno, K., & Barbero Barrera, M. del M. (2025). Descripción de la calidad del aire y características ambientales en aulas de primaria de la Comunidad de Madrid. *Anales de Pediatría*, 102(3), 503792. <https://doi.org/10.1016/j.anpedi.2025.503792>
- Persily, A. K. (1997). Evaluating Building IAQ and Ventilation with Indoor Carbon Dioxide. *ASHRAE Transactions*, 103(2), 1-12. https://doi.org/https://www.aivc.org/sites/default/files/airbase_10530.pdf
- Porras, E. (2025). *Optimización del confort térmico y la calidad del aire interior en ambientes educativos*. Consultado em 12 de junio de 2025, em <https://www.acrlatinoamerica.com/mas-a-fondo/otros-enfoques/20675-optimizacion-del-confort-termico-y-la-calidad-del-aire-interior-en-ambientes-educativos.html>
- Portugal. Ministério do Ambiente e Ação Climática. (2020). *Decreto-Lei n.º 101-D/2020, de 7 de dezembro*. Diário da República, 1.ª série.
- Portugal. Ministério do Ambiente e Ação Climática. (2021). *Portaria n.º 138-G/2021, de 1 de julho*. Diário da República, 1.ª série.
- Portugal. Ministério do Ambiente e Ação Climática. (2022). *Despacho n.º 1618/2022, de 9 de fevereiro*. Diário da República, 1.ª série.
- Portugal. Ministério do Ambiente e do Ordenamento do Território. (2010). *Decreto-Lei n.º 102/2010, de 23 de Setembro*. Diário da República, 1.ª série.
- Proaño, H., & Mendoza. (2024). Influencia de la iluminación en el rendimiento de los estudiantes de electricidad del ISUCT en la jornada nocturna. *LATAM Revista Latinoamericana de Ciencias Sociales y Humanidades*, V(1), 2098-2113. <https://doi.org/https://doi.org/10.56712/latam.v5i1.1730>
- Ramírez, T., Plaza, R., & Rodríguez, J. (2023). Evaluación de la carga bacteriana del aire en centros educativos como proyecto didáctico. *Revista Eureka sobre Enseñanza*

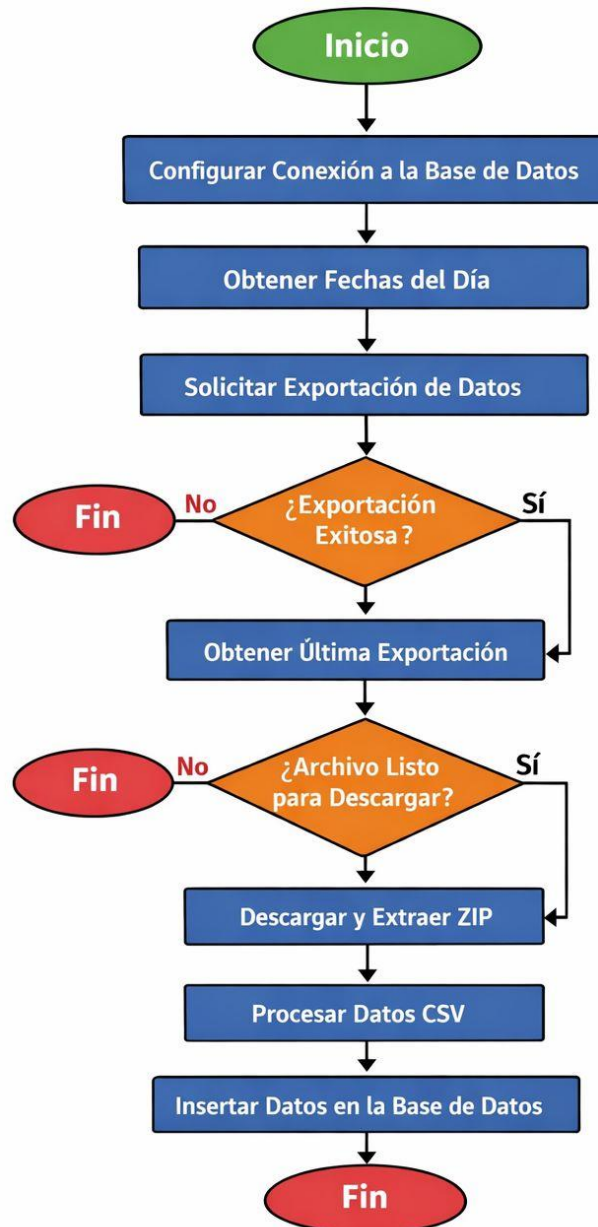
y *Divulgación de las Ciencias*, 20(2).
https://doi.org/10.25267/rev_eureka_ensen_divulg_cienc.2023.v20.i2.2203

- Rioja, S. (2022). *Planteamiento de una herramienta de seguimiento y control de proyectos de construcción de infraestructura vial soportado en Power Bi dentro de Joyco SAS B/C* [Tesis de Magíster, Universidad de los Andes].
<https://repositorio.uniandes.edu.co/server/api/core/bitstreams/cea372df-29d0-4eb3-8b76-130d199604bb/content>
- Ruas, J. (2023). *Indoor environmental quality in educational buildings: Assessment and strategies for improvement*. Universidade de Coimbra.
- Rus, T., Beu, D., & Ciugudeanu, C. (2021). *The impact of the indoor environmental quality on students' performance*. 51-61. GEOLINKS Conference Proceedings.
<https://doi.org/10.32008/GEOLINKS2021/B1/V3/05>
- Sherman, M. H. (1990). Tracer-gas techniques for measuring ventilation in a single zone. *Building and Environment*, 25(4), 365-374. [https://doi.org/10.1016/0360-1323\(90\)90010-O](https://doi.org/10.1016/0360-1323(90)90010-O)
- Soler, A., & Palau, A. (2022). Factores que inciden en el confort térmico humano. *S&P Sistemas de Ventilación*. Consultado en 26 de junio de 2025, en <https://www.solerpalau.com/es-es/blog/factores-que-inciden-en-el-confort-termico-humano/>
- Toyinbo, O. (2023). Indoor Environmental Quality, Pupils' Health, and Academic Performance-A Literature Review. *Buildings*, 13(9), Article 9.
<https://doi.org/10.3390/buildings13092172>
- Unión Europea. (2024). *Directiva (UE) 2024/2881 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de octubre de 2024, sobre la calidad del aire ambiente y a una atmósfera más limpia en Europa*. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=OJ:L_202402881
- Velásquez, C., Altamirano, J., Velásquez, C., & Espín, F. (2023). Influencia de los niveles de iluminación en el rendimiento de estudiantes de EGB dentro de procesos de evaluación. *Killkana Técnica*, 7(1), Article 1.
<https://doi.org/10.26871/killkanatecnica.v7i1.1451>
- Wargocki, P., Porras-Salazar, J. A., & Contreras-Espinoza, S. (2019). The relationship between classroom temperature and children's performance in school. *Building and Environment*, 157, 197-204. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.04.046>

- Wargocki, P., & Wyon, D. P. (2007). The Effects of Moderately Raised Classroom Temperatures and Classroom Ventilation Rate on the Performance of Schoolwork by Children (RP-1257). *HVAC&R Research*, 13(2), 193-220. <https://doi.org/10.1080/10789669.2007.10390951>
- Xu, J., Zhao, H., Zhang, Y., Yang, W., Wang, X., Geng, C., Li, Y., Guo, Y., Han, B., Bai, Z., Vedal, S., & Marshall, J. D. (2024). Reducing Indoor Particulate Air Pollution Improves Student Test Scores: A Randomized Double-Blind Crossover Study. *Environmental Science & Technology*, 58(19), 8207-8214. <https://doi.org/10.1021/acs.est.3c10372>

Anexo

Anexo I - Script de web scraping



Anexo II - Parâmetros avaliados

Tabela 19 - Período Setembro a Dezembro 2024

Parâmetro	Media	Mínimo	Máximo
CO ₂ interior (ppm)	684,18	394	2794
CO ₂ exterior (ppm)	424,92	391	534
T interior (°C)	21,75	17	26
T exterior (°C)	15,89	3	28
HR interior (%)	66,83	46	85
HR exterior (%)	79,38	46	100
PM _{2,5} interior (µg/m ³)	5,48	0	113
PM _{2,5} exterior (µg/m ³)	9,22	0	66
PM ₁₀ interior (µg/m ³)	7,26	0	318
PM ₁₀ exterior (µg/m ³)	14,88	0	104

Tabela 20 - Período de Fevereiro a Junho de 2025

Parâmetro	Media	Mínimo	Máximo
CO ₂ interior (ppm)	641,79	382	2474
CO ₂ exterior (ppm)	423,32	386	520
T interior (°C)	21,64	17	26
T exterior (°C)	15,33	4	34
HR interior (%)	62,49	0	76
HR exterior (%)	75,23	19	100
PM _{2,5} interior (µg/m ³)	4,19	0	27
PM _{2,5} exterior (µg/m ³)	7,11	0	104
PM ₁₀ interior (µg/m ³)	4,99	0	29
PM ₁₀ exterior (µg/m ³)	11,11	0	161

Anexo III - Medições de iluminância

Tabela 21 - Campanha de medição da iluminância

10/4/2024			
Tarefa 1	8:15 Hs		
1.1		Reunião no gabinete para levar os equipamentos para as salas	
1.2		Efetuar medições de acordo com a legislação em cada sala	
Medição 1	MANHÃ	SALA DS.00.09	SALA DS.00.12B
1.1		Medição com iluminação artificial e persianas abertas	
1.2		Medição com iluminação artificial e persianas fechadas	
Medição 2	TARDE	SALA DS.00.09	SALA DS.00.12B
2.1		Medição com iluminação artificial e persianas abertas	Medição com iluminação artificial e persianas abertas
2.2		Medição com iluminação artificial e persianas fechadas	Medição com iluminação artificial e persianas fechadas
2.3		Medição com iluminação desligada e persianas abertas	Medição com iluminação desligada e persianas abertas
Medição 3	NOITE	SALA DS.00.09	SALA DS.00.12B
3.1		Medição com iluminação artificial e persianas fechadas	Medição com iluminação artificial e persianas fechadas
12/4/2024			
Medição 4	MANHÃ	SALA DS.00.09	SALA DS.00.12B
4.1			Medição com iluminação artificial e persianas abertas
4.2			Medição com iluminação artificial e persianas fechadas
4.3		Medição com iluminação desligada e persianas abertas	Medição com iluminação desligada e persianas abertas