

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E CIÊNCIAS AMBIENTAIS
(PPGECIA)

DANILLO VIANA ANDRADE REIS

**QUALIDADE AMBIENTAL DE SALAS DE AULA BASEADA NA AVALIAÇÃO DO
CONFORTO TÉRMICO E DA QUALIDADE DO AR INTERIOR**

São Cristóvão (SE)

2023

DANILLO VIANA ANDRADE REIS

**QUALIDADE AMBIENTAL DE SALAS DE AULA BASEADA NA AVALIAÇÃO DO
CONFORTO TÉRMICO E DA QUALIDADE DO AR INTERIOR**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências Ambientais, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia e Ciências Ambientais.

Orientador: Prof. Dr. André Luis Dantas Ramos

São Cristóvão (SE)

2023

DANILLO VIANA ANDRADE REIS

**QUALIDADE AMBIENTAL DE SALAS DE AULA BASEADA NA AVALIAÇÃO DO
CONFORTO TÉRMICO E DA QUALIDADE DO AR INTERIOR**

Dissertação de Mestrado aprovada no Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências Ambientais da Universidade Federal de Sergipe em 27 de fevereiro de 2023

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. André Luis Dantas Ramos
(PPGECIA/UFS)

Profa. Dra. Carla Fernanda Barbosa Teixeira
(DAU/UFS)

Prof. Dr. José Jailton Marques
(PPGECIA/UFS)

Dedico esse trabalho à minha família e amigos, em especial à minha mãe Divaneide, meu pai João e meu irmão Itallo, que têm me apoiado de diversas maneiras ao longo dos anos e são partes fundamentais dessa e de outras conquistas.

AGRADECIMENTOS

Esse trabalho é o resultado de um esforço de muitas mãos.

Inicialmente, gostaria de agradecer ao meu orientador, professor André Luis Dantas Ramos, por todo o apoio e confiança desde as primeiras discussões sobre o que seria o trabalho proposto, até os ajustes finais. Também ao PPGECA, pela oportunidade de cursar uma pós-graduação em uma instituição pública de qualidade e com todo o suporte que o programa proporcionou; em especial aos professores José Jailton Marques, Jefferson Arlen Freitas e Marcelo da Rocha Alexandre, que participaram das bancas dos meus seminários e propuseram diversas sugestões para a melhoria desse trabalho. O agradecimento se estende à professora Carla Fernanda Barbosa Teixeira, do Departamento de Arquitetura e Urbanismo (DAU) da UFS, que participou da banca de defesa e propôs diversas contribuições, em especial nas seções relacionadas ao conforto térmico.

Também agradeço a todos que proporcionaram as ferramentas sem as quais a execução desse trabalho não seria possível. Ao IFS, em especial à Coordenação de Laboratórios de Edificações, Coordenação de Segurança do Trabalho e Direção Geral, representados pelo coordenador Rafael Batista dos Santos e professores Fabio Brandão Britto, Elber Ribeiro Gama e Francisco Luiz Gumes Lopes, que permitiram o empréstimo de equipamentos e me deram todo o suporte para a execução da pesquisa enquanto servidor estudante do Instituto. Ao Departamento de Arquitetura e Urbanismo da UFS e ao ITP, representados pelos professores Ítalo César Montalvão e Cláudio Dariva, que também auxiliaram na instrumentação do trabalho. Assim como o Departamento de Educação Básica da Secretaria Municipal de Educação de Aracaju e os diretores, coordenadores e professores das diversas escolas, públicas e privadas, que gentilmente abriram as portas para receber esse trabalho.

Além desses, tantas outras pessoas auxiliaram nesse trabalho de diversas outras formas, como a Sarah e o Camilo, parceiros de grupo de pesquisa; os colegas do PPGECA, com os quais compartilhei essa jornada do mestrado; a minha família e amigos, que me deram suporte das mais diversas formas; e todos aqueles que ajudaram a trilhar minha jornada até aqui. Aproveito ainda para deixar meus sinceros agradecimentos e homenagem àqueles que guiaram os primeiros passos na minha trajetória acadêmica nessa área, representados pelo professor José Resende (IFS), meu orientador de TCC que embarcou comigo nas pesquisas sobre o ambiente construído ainda na graduação e o professor Jeffrey Siegel (*University of Toronto*), referência na área, com quem tive meus primeiros contatos com temáticas do ambiente construído e que foi uma das principais inspirações para o desenvolvimento de trabalhos acadêmicos na área de qualidade do ar, conforto térmico e eficiência energética.

RESUMO

A melhoria das condições de qualidade interior das edificações é um desafio crescente na engenharia. O fato de vivermos cerca de 90% das nossas vidas dentro desse tipo de ambiente demonstra o quão significativa essas condições são para a nossa saúde e bem-estar. Nesse quesito, conforto térmico e qualidade do ar são aspectos determinantes, em especial para populações mais vulneráveis, como idosos e crianças. Os espaços escolares são locais de importância nesse âmbito, tanto pela proporção de crianças entre os usuários, quanto pela alta densidade de pessoas e tempo de permanência. Esse ponto foi demonstrado com maior clareza considerando a ampla discussão sobre a reabertura das escolas durante o período de pandemia da COVID-19. O presente trabalho visa avaliar as condições térmicas e de qualidade do ar de ambientes escolares em uma abordagem integrada, que permita a obtenção de um índice representativo da qualidade ambiental desses espaços. Para isso, foi realizado um monitoramento de variáveis ambientais de 16 salas de aula do município de Aracaju/SE, de modo a obter dados comparáveis aos valores de referência da literatura científica. Os resultados obtidos foram aplicados a equações construídas a partir da revisão literatura, resultando em um índice representativo normalizado da qualidade do ar e do conforto térmico. Esses índices foram ponderados em termos de importância de cada um desses critérios, obtendo-se ao final um índice referente à qualidade ambiental interior de cada sala estudada. Ainda foi realizada uma análise da ventilação dos espaços, com vistas a observar a possibilidade de aplicação de um protocolo de uso dos ambientes adequado a situações excepcionais, de preocupação com o risco de transmissão de infecções respiratórias. Os resultados indicaram uma grande discrepância entre as condições térmicas e de qualidade do ar entre os ambientes climatizados com condicionadores de ar e os não climatizados. Enquanto os ambientes com ar-condicionado indicaram condições de ventilação inadequadas na maior parte do monitoramento, os de ventilação natural se mantiveram adequados todo o tempo. Em contrapartida, todas as salas sem condicionadores de ar apresentaram condições térmicas inadequadas, com temperaturas acima do recomendável. Assim, há um balanceamento dos fatores no índice global, mas com predominância de qualidade para alguns ambientes climatizados, devido às consideráveis más condições térmicas das salas da outra tipologia. O tamanho, o posicionamento e outros quesitos relativos às janelas foram fatores observados de grande importância, tanto no ganho térmico, quanto na ventilação. Também foi possível observar quais salas poderiam operar de maneira adequada adotando-se um protocolo de uso voltado à renovação de ar. Nesse caso, mais uma vez as esquadrias foram determinantes nos resultados, com os ventiladores auxiliando nesse processo. Assim, pode-se concluir que foi possível a aplicação de uma metodologia de avaliação da qualidade global desses ambientes escolares e que esta traz bons indicativos para a tomada de decisão dos gestores. Esses resultados podem orientar a aplicação de recursos e protocolos de biossegurança mais assertivos e a discussão de políticas públicas voltadas à melhoria dos ambientes interiores escolares.

PALAVRAS-CHAVE: Conforto Térmico, Qualidade do Ar Interior, Escolas, Índice de Qualidade Ambiental Interior, Ventilação.

ABSTRACT

Improving indoor environmental quality conditions of buildings is a growing challenge in engineering. The fact that we live around 90% of our lives within this type of environment demonstrates how significant these conditions are for our health and well-being. In this regard, thermal comfort and air quality are key aspects, especially for more vulnerable populations, such as the elderly and children. School environments are places of concern in this context, due to the proportion of children among the users, as well as the high density of people and length of stay. This point was widely discussed while reopening schools during the COVID-19 pandemic. The present work aims to evaluate the thermal conditions and air quality of school environments in an integrated approach, which allows obtaining a representative index of the environmental quality of these spaces. So, environmental variables were monitored in 16 classrooms in the city of Aracaju/SE, in order to obtain data comparable to the reference values in the scientific literature. The results were applied equations from literature review, resulting in a normalized representative index of indoor air quality and thermal comfort from each classroom. These indexes were weighted in terms of the importance of each of these criteria, finally obtaining an index referring to the Indoor Environmental Quality of each classroom. An analysis of the ventilation of spaces was also carried out, with ways to observe the possibility of applying a protocol for the use of environments suitable for exceptional situations, of concern with the risk of transmission of respiratory infections. The results indicated a large discrepancy between the thermal conditions and air quality between the climate-controlled environments with air conditioners and the non-conditioned ones. While air-conditioned environments indicated inadequate ventilation conditions in most of the monitoring, those with natural ventilation remained adequate all the time. On the other hand, all rooms without air conditioners presented inadequate thermal conditions, with temperatures above the recommended level, while the other environments showed better conditions. Thus, there is a balance of factors in the global index, but with a predominance of quality for some air-conditioned environments, due to the considerable poor thermal conditions of the rooms of the other typology. The size, positioning and other factors related to the windows were factors of great importance, both in terms of thermal gain and ventilation. It was also possible to observe which rooms could operate properly under a protocol aimed at air renewal. Once again, windows were decisive in the results, with the fans helping in this process. Thus, we can conclude that it was possible to apply a methodology to evaluate the overall quality of these school environments and that this brings good indications for decision-making by managers. These results can guide the application of resources, more assertive biosafety protocols and the discussion of public policies aimed at improving indoor school environments.

KEYWORDS: Thermal Comfort, Indoor Air Quality, Schools, Indoor Environmental Quality Index, Ventilation

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Contaminantes mais comuns em ambientes escolares	24
Tabela 2 - Taxa de renovação de ar mínima recomendada pela ANSI/ASHRAE 62.1 (2022).	28
Tabela 3 - Taxa de renovação de ar mínima recomendada pela NBR 16401-3 (2008).	28
Tabela 4 – Índices climatológicos de Aracaju - Série Histórica de 1991 a 2020.	54
Tabela 5 – Sumário de dados dos condicionadores de ar.....	56
Tabela 6 – Sumário de dados dos ventiladores de parede.....	57
Tabela 7– Sumário de dados das janelas.....	58
Tabela 8 – Temperaturas e umidades internas e externas	63
Tabela 9 – Radiação solar, velocidade e direção do vento e chuva da estação A409.....	64
Tabela 10 – Tempo necessário calculado para chegar à concentração máxima definida	70
Tabela 11 – Taxas de ventilação mensurada e de projeto das salas..... condicionadas naturalmente	75
Tabela 12 – Taxas de ventilação mensurada e de projeto das salas..... condicionadas artificialmente	75
Tabela 13 – Área operável das esquadrias	76
Tabela 14 – Parâmetros utilizados elaboração do protocolo de uso das salas de..... aula com vistas à QAI	77
Tabela 15 – Protocolo simplificado visando a renovação do ar para a promoção da QAI.	78
Tabela 16 – Índice de qualidade do ar geral e específico de cada poluente.....	79
Tabela 17 – Índices de CT, QAI e qualidade ambiental global calculados.....	81

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Frequência de variáveis de entrada em estudos de QAI e conforto térmico.....	34
Figura 2 – Fluxograma da metodologia proposta.....	37
Figura 3 – Critérios para a seleção dos ambientes.....	39
Figura 4 – Localização dos ambientes monitorados.....	40
Figura 5 – Carta psicrométrica para o município de Aracaju/SE para..... ambientes não climatizados	50
Figura 6 – Carta psicrométrica para o município de Aracaju/SE para..... ambientes climatizados	51
Figuras 7a a 7f – Cartas solares para o município de Aracaju/SE, fachadas..... N, NE, E, SE, S e SW	53
Figuras 7g e 7h – Cartas solares para o município de Aracaju/SE, fachadas..... W e NW	54
Figura 8 – Faixas de horário com radiação solar direta ou sombreamento nos dias..... monitorados	59
Figura 9 – Temperatura do ar nas salas ocupadas.....	61
Figura 10 – Umidade relativa do ar nas salas ocupadas.....	62
Figura 11 – Ocupação das salas vs Tempo.....	66
Figura 12 – PMV e PPD das salas monitoradas.....	67
Figura 13 – Índice de Conforto Térmico vs Tempo.....	68
Figura 14 – Concentração de CO ₂ nas salas ocupadas.....	69
Figura 15 – Concentração de formaldeído nas salas ocupadas.....	71
Figura 16 – Concentração de material particulado 2.5 (MP _{2.5}) nas salas ocupadas.....	73
Figura 17 – Decaimento da concentração de CO ₂ nas salas monitoradas, exceto..... salas 11, 12 e 16	74
Figuras 18 e 19 – Decaimento da concentração de CO ₂ nas salas 12, 16 e 11..... respectivamente	74
Figura 20 – Índice de qualidade do ar devido à concentração de CO ₂ sob diferentes..... cenários	79
Figura 21 – Índices de qualidade ambiental calculados para o caso ‘d’ de priorização da QAI	81

Figura 22 – Índices de qualidade ambiental calculados para o caso ‘e’82	de priorização do CT
Figuras A1 a A6 – Planta de situação das salas 01 a 14, escala 1:5000.....95	
Figura A7 – Planta de situação das salas 15 e 16, escala 1:5000.....96	
Figura B1 a B3 – Planta baixas das salas 01 a 06, escala 1:250.....97	
Figuras B4 a B7 – Planta baixas das salas 07 a 13, escala 1:250.....98	
Figura B8 – Planta baixa das salas 15 e 16, escala 1:250.....99	
Figura C1 a C8 – Cortes das salas 01 a 06, escala 1:200.....100	
Figuras C9 a C17 – Cortes das salas 05 a 10, escala 1:200.....101	
Figuras C18 a C25 – Cortes das salas 11 a 16, escala 1:200.....102	
Figuras D1 e D2 – Detalhe dos dispositivos de sombreamento/máscaras.....103	de sombra 1 e 2, escala 1:250
Figuras D3 a D5 – Detalhe dos dispositivos de sombreamento/máscaras.....104	de sombra 3 a 5, escala 1:250
Figura E1 a E3 – Máscaras de sombra e cartas solares das salas.....105	01 (NE/SW) e 02 (NE)
Figuras E4 a E6 – Máscaras de sombra e cartas solares das salas.....106	02 (SW), 03 (S) e 04 (N)
Figura E7 a E9 – Máscaras de sombra e cartas solares das salas.....107	04 (E), 05 (E) e 06 (E)
Figura E10 a E12 – Máscaras de sombra e cartas solares das salas.....108	05 (W), 06 (W) e 07 (N)
Figura E13 a E15 – Máscaras de sombra e cartas solares das salas.....109	07 (N), 08 (S) e 09 (N)
Figura E16 a E18 – Máscaras de sombra e cartas solares das salas.....110	09 (N), 10 (S) e 11 (NW)
Figura E19 a E21 – Máscaras de sombra e cartas solares das salas.....111	12 (SE) e 13 (NW/SE)
Figura E22 a E24 – Máscaras de sombra e cartas solares das salas.....112	14 (NW/SE) e 15 (NE)
Figura E25 a E26 – Máscaras de sombra e cartas solares das salas.....113	15 (NW) e 16 (NW)

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Concentrações máximas recomendadas.....	25
Quadro 2 – Critérios para a seleção dos ambientes.....	41
Quadro 3 - Listagem e especificações dos equipamentos utilizados nos experimentos.....	42
Quadro 4 - Parâmetros e equações utilizadas no cálculo dos índices de qualidade do ar.....	47

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	14
2	OBJETIVOS.....	16
2.1	OBJETIVO GERAL.....	16
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	16
3	HIPÓTESE.....	17
4	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	18
4.1	AVALIAÇÃO DO CONFORTO TÉRMICO.....	20
4.2	AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DO AR INTERIOR.....	21
4.3	AVALIAÇÃO DA QUALIDADE AMBIENTAL.....	29
5	METODOLOGIA.....	36
5.1	AMOSTRAGEM E PROTOCOLO EXPERIMENTAL.....	39
5.2	AVALIAÇÃO DA QUALIDADE AMBIENTAL INTERIOR.....	43
5.2.1	Avaliação do Conforto Térmico.....	44
5.2.2	Avaliação da Qualidade do Ar Interior.....	45
5.2.3	Índice de Qualidade Ambiental (<i>IEQindex</i>).....	46
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	50
6.1	ASPECTOS BIOCLIMÁTICOS.....	50
6.2	ASPECTOS CONSTRUTIVOS.....	56
6.3	AVALIAÇÃO DO CONFORTO TÉRMICO.....	61
6.4	AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DO AR INTERIOR.....	69
6.4.1.	Concentração de Poluentes.....	69
6.4.2.	Ventilação.....	73
6.5	ÍNDICE DE QUALIDADE AMBIENTAL INTERIOR - <i>IEQindex</i>	79
7	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	84
	REFERÊNCIAS.....	87
	APÊNDICE A – PLANTAS DE SITUAÇÃO DAS SALAS ESTUDADAS.....	95
	APÊNDICE B – PLANTAS BAIXAS DAS SALAS ESTUDADAS.....	97
	APÊNDICE C – CORTES DAS SALAS ESTUDADAS.....	100
	APÊNDICE D – DISPOSITIVOS DE SOMBREAMENTO.....	103
	APÊNDICE E – MÁSCARAS DE SOMBRA E CARTAS SOLARES.....	105

1. INTRODUÇÃO

O estudo do conforto térmico e da qualidade do ar em ambientes educacionais tem se tornado cada vez mais importante dentro da engenharia. Esses aspectos afetam saúde, bem-estar e performance dos usuários desses ambientes. Diversas pesquisas apontam relação direta de más condições de qualidade do ar e conforto térmico com a redução na capacidade cognitiva e no aprendizado a curto e longo prazo de alunos (PULIMENTO *et al.*, 2020; WANG *et al.* 2021; BRINK *et al.*, 2021). Há ainda inúmeras evidências da correlação entre a baixa ventilação de salas de aula com a incidência de diversos problemas de saúde nos usuários desses ambientes, em especial asma e outras infecções respiratórias em crianças.

A qualidade do ar interior é um problema por vezes de difícil visualização, mas que é responsável por cerca de 4,1% do índice de mortalidade global, sendo o principal fator de risco para a morte prematura da população (*Global Burden Disease Collaborative Network - GBD*, 2020). Nesse quesito as crianças estão ainda entre os grupos mais vulneráveis da sociedade, considerando para isso que elas inalam mais ar por peso corporal em comparação aos adultos.

Esses aspectos passaram a ganhar maior visibilidade ao longo dos últimos anos, considerando o contexto ainda recente de pandemia devido à COVID-19. Nesse panorama as instituições de ensino se tornaram o centro de discussões, com pautas sobre o retorno ou não das atividades presenciais, o impacto do ensino remoto na aprendizagem, a eficiência e efetividade da aplicação de estratégias e protocolos de biossegurança, dentre outras questões.

Abordagens difusas sobre essa problemática e os frequentes conflitos entre estratégias de melhoria da qualidade do ar e de manutenção do conforto térmico evidenciaram a necessidade de um melhor entendimento geral da sociedade sobre essas questões. Estratégias como limitar o condicionamento das salas de aula somente ao uso da ventilação natural pode não ser adequado em termos de conforto térmico em alguns casos, ao tempo que o uso constante da climatização artificial nos ambientes pode promover condições consideravelmente inadequadas em termos de qualidade do ar. Nessa linha, é ressaltada a demanda por estudos que busquem suprimir lacunas na literatura científica e proponham soluções a esse tipo de problemática.

A implementação de estratégias de promoção do conforto térmico e qualidade do ar, no entanto, é algo que costuma passar pelo investimento na aquisição ou melhoria de sistemas de climatização e/ou ventilação, assim como no design e *retrofit* de aspectos e componentes arquitetônicos desses ambientes. No entanto, considerando as limitações de investimento financeiro nessas estratégias, em especial no setor público, faz-se necessário um melhor

diagnóstico das condições ambientais nas escolas para a definição das estratégias mais eficientes e mais adequadas, assim como propor bases para a priorização de investimentos.

O presente estudo atua nessa linha, ao propor a aplicação de um método de avaliação da qualidade ambiental dos ambientes escolares baseada no diagnóstico das condições de conforto térmico e qualidade do ar. O principal produto dessa pesquisa é a obtenção de um índice representativo dessa qualidade ambiental (*IEQindex*) que permita identificar as salas com maior e menor necessidade de intervenção para melhorias das condições físicas e de uso do espaço. Adicionalmente, é realizada uma investigação das condições atuais de ventilação das salas estudadas, de modo a fundamentar a elaboração de um protocolo de uso simplificado com vistas à manutenção de uma boa qualidade do ar interior, ao tempo em que o conforto térmico não é negligenciado. Esse protocolo apresenta ciclos de duração máxima recomendada por aula e intervalo mínimo para a ventilação, de modo a renovar todo o ar do ambiente.

A análise dos resultados baseia-se nas recomendações de qualidade de normas e instituições de referência nacionais e internacionais. Já a abordagem metodológica utilizada baseia-se no diagnóstico das condições ambientais locais por meio da medição direta de parâmetros de referência. Este é aplicado a um método de análise de multicritérios voltado à avaliação da qualidade ambiental de edificações.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Classificar o nível de qualidade ambiental de salas de aula por critérios de conforto térmico e qualidade do ar em um método integrado.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Avaliar as condições de conforto térmico e qualidade do ar de salas de aula sob recomendações normativas e de organizações de referência;
- b) Propor e aplicar um modelo de índice que reflita a qualidade ambiental interior baseada no conforto térmico e qualidade do ar;
- c) Avaliar os resultados dos índices de qualidade ambiental interior das salas de aula monitoradas sob aspectos construtivos e bioclimáticos;
- d) Propor um protocolo simplificado de uso das salas climatizadas voltado à promoção da qualidade do ar por meio da ventilação.

3. HIPÓTESE

O estudo proposto parte da hipótese de que as decisões sobre investimentos na melhoria das condições físicas das salas de aula, bem como as definições sobre uso e operação desses ambientes, podem ser embasadas em um escopo que considera conforto térmico e qualidade do ar sob uma ótica integrada e direta. Partindo dessa hipótese, é possível reduzir significativamente a subjetividade nas tomadas de decisão sobre o uso do ambiente escolar em termos de qualidade ambiental, de modo a promover condições de saúde e bem-estar mais adequadas aos usuários, considerando as recomendações da Organização Mundial de Saúde e organizações nacionais e internacionais de referência.

4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Estima-se que o ser humano passa cerca de 90% de toda a sua vida em ambientes fechados, no interior das edificações (US EPA, 2021). Assim, é nítida a demanda para que esses espaços propiciem condições adequadas de bem-estar ao usuário, seja em aspectos térmicos, acústicos, lumínicos dentre outros, todos sintetizados no conceito de ‘conforto ambiental’ (LAMBERTS, DUTRA e PEREIRA, 2014). Dentre esses principais aspectos do conforto ambiental, o conforto térmico e a qualidade do ar interior se destacam entre aqueles mais observados na literatura científica.

A qualidade do ar interior (QAI) é um aspecto relevante, em especial em termos de saúde, considerando que a exposição a poluentes nos ambientes interiores é de 2 a 5 vezes maior que nos ambientes externos, ocasionalmente chegando até a 100 vezes (US EPA, 2021). Os efeitos da má qualidade do ar atingem especialmente populações mais vulneráveis, como as crianças e idosos, já que, por exemplo, a proporção de ar inalado por uma criança em relação ao seu próprio peso corporal é consideravelmente maior que a de um adulto (SADRIZADEH *et al*, 2022).

Os ambientes escolares são locais cuja análise é pertinente nesse sentido, considerando que esses espaços frequentemente são compostos majoritariamente por crianças e proximidade entre os usuários é cerca de 4 vezes maior que outros tipos de edificações comerciais (SADRIZADEH *et al*, 2022). As más condições de qualidade do ar e conforto térmico nesses espaços geram efeitos negativos à capacidade cognitiva e à aprendizagem dos alunos a longo prazo (BRINK *et al.*, 2020), afetando diretamente a capacidade desses espaços de aprendizagem promoverem suas atividades-fim de maneira adequada. A má qualidade do ar é capaz ainda de produzir diversos efeitos negativos à saúde dos seus usuários, desde problemas temporários, como dor de cabeça, fadiga ou falta de ar, até doenças respiratórias e problemas como asma, que atingem 1 em cada 13 crianças em idade escolar (US EPA, 2021).

A Organização Mundial da Saúde (WORD HEALTH ORGANISATION - WHO, 2021a) lista impactos de poluentes químicos diversos na saúde das crianças, atingindo ainda os sistemas nervoso, cardiovascular, endócrino, podendo até ter efeitos cancerígenos. Pesquisas indicam inúmeras substâncias cancerígenas em salas de aula, que podem ter efeito cumulativo, com elevado número de ambientes fora dos padrões de qualidade do ar estabelecidos pela WHO (SZABADOS *et al.*, 2020). Dentre os contaminantes mais comuns em ambientes escolares, destacam-se: formaldeído, dióxido de nitrogênio (NO₂), materiais particulados (MP₁₀ e MP_{2.5}) e benzeno (WHO, 2021b).

Outro aspecto relevante em termos de qualidade do ar interior é o risco de transmissão de infecções respiratórias dentro das edificações, evidenciado pelo ainda recente contexto de pandemia da COVID-19. Nesse ponto, o vírus da COVID-19, o SARS-CoV-2, pode ser transmitido de diversas formas, como transmissão horizontal (gotículas, aerossóis e o contato com superfícies contaminadas), transmissão oral-fecal (inclusive pelo esgoto), transmissão por transplante de órgãos e procedimentos cirúrgicos ou transmissão vertical (grávida-feto) (RAHMAN *et al.*, 2020). Pesquisas mais recentes, no entanto, indicam que maior potencial de transmissibilidade entre a população geralmente se dá por via aérea, dentro dos ambientes fechados, por meio de partículas chamadas aerossóis (PRATHER *et al.*, 2021; LI *et al.*, 2021).

Os aerossóis são partículas expelidas pelas pessoas ao realizarem atividades como falar, espirrar ou tossir, que se distinguem das gotículas principalmente pelo tamanho das partículas (PRATHER *et al.*, 2021). Enquanto as gotículas são partículas maiores (da ordem de 100µm acima), que atingem no máximo 2 metros ao serem lançadas no ambiente e caem na superfície em segundos, aerossóis são partículas menores, que permanecem circulando desordenadamente nos ambientes por períodos que podem chegar a horas, até dias.

Essas características dos aerossóis evidenciam a importância da ventilação nos ambientes, como estratégia para a remoção de partículas com vírus dos ambientes internos para os externos (YAO *et al.*, 2020). Evidência disso é o alto índice de transmissibilidade da COVID-19 em ambientes pouco ventilados (LI *et al.*, 2021). Nesse sentido, diversas pesquisas vêm sendo desenvolvidas nesse enfoque, estimando o risco de transmissão do vírus no ambiente, seja por métodos estatísticos, modelagem matemática e simulação computacional (LESSLER *et al.* 2021; AIANO, 2021; JONES *et al.*, 2021; LELIEVELD *et al.*, 2020). Assim, a utilização da ventilação natural, como estratégia de promoção da qualidade do ar foi um ponto amplamente explorado durante a pandemia de COVID-19, cuja priorização é recomendada em relação às condições em situações de alto risco de transmissibilidade desse tipo de infecção (ATKINSON, 2009).

O uso da ventilação natural para a promoção da QAI altera as condições térmicas dos ambientes, frequentemente reduzindo a qualidade das condições de conforto térmico promovida aos usuários (ALONSO *et al.*, 2021). Esse fator foi evidenciado nos estudos de Miranda *et al.* (2022) e Alonso *et al.* (2021), que compararam o impacto do uso da ventilação natural na promoção do conforto térmico em ambientes escolares.

Cabe ressaltar que amplas revisões de literatura (ZOROMODIAN *et al.*, 2016) indicavam que a maioria desses ambientes educacionais promovem condições de conforto térmico fora da faixa de recomendação normativa. Ainda foram indicativos relevante da revisão o fato de os

usuários preferirem condições térmicas mais voltadas ao frio que ao calor e o ganho térmico acentuado observado em salas com janelas de grande dimensão, mas baixa ventilação devido às condições de operação.

4.1 AVALIAÇÃO DO CONFORTO TÉRMICO

Os principais métodos de referência para a avaliação do conforto térmico, no geral, se dividem em dois tipos de modelo: o estático e o adaptativo. O modelo estático foi desenvolvido por Fanger (1972) através de estudos realizados em câmaras climatizadas na Dinamarca, nas quais os indivíduos indicavam seu estado de conforto por meio de uma escala de 7 pontos. A aplicação desse estudo deu origem aos métodos do Voto Médio Predito (*Predicted Mean Vote - PMV*) e do Porcentagem de Pessoas Insatisfeitas (*Predicted Percentage of Dissatisfied - PPD*), baseado na análise das respostas da amostra analisada por Fanger. Ambos os métodos são normatizados pela ISO 7730 (2005), que indica de que maneira os mesmos devem ser aplicados e os seus resultados interpretados. Uma das principais limitações do método é que ele é válido apenas para ambientes climatizados e, portanto, não é recomendada a aplicação em outros tipos de ambientes. Os parâmetros necessários para a avaliação do conforto térmico no estado estático são taxa metabólica (M), nível de isolamento da vestimenta (Clo), temperatura do ar (t_{ar}), temperatura radiante (t_r), velocidade do ar (v_{ar}) e umidade relativa (UR) (ANSI/ASHRAE, 2020).

Já os modelos adaptativos surgiram do modelo adaptativo de *Humphreys* (1979) que indicava que a sensação térmica percebida pelas pessoas tende a se adaptar às condições térmicas locais, de modo que a sensação de conforto “varia de acordo com a estação e a temperatura que as pessoas estão acostumadas”. Por essa perspectiva, portanto, a modelagem do conforto térmico deve levar em consideração aspectos demográficos, sociais, construtivos, dentre outros, com maior ou menor enfoque nos diferentes aspectos levantados, a depender da referência. A ANSI/ASHRAE Standard 55-2020 apresenta abordagens de um modelo adaptativo considerando a abertura de janelas operáveis pelos usuários ou não, possibilidades de modificações nas vestimentas utilizadas pelos indivíduos, dentre outros fatores (ANSI/ASHRAE, 2020).

A ANSI/ASHRAE 55-2020 é a norma internacional de referência para o estudo do conforto térmico, de modo a indicar as condições aceitáveis de conforto térmico para a maioria dos usuários de um ambiente construído (ANSI/ASHRAE, 2020). A norma apresenta metodologias de avaliação, tanto para o modelo estático, quanto para o dinâmico. São apresentados métodos de avaliação baseados na aplicação de questionários e na medição de

parâmetros ambientais, aplicáveis de acordo com o tipo de climatização (artificial ou por ventilação natural), requisitos gerais (velocidade do ar, nível de isolamento da roupa, faixas de temperatura) e as variáveis utilizadas. Quanto aos métodos de avaliação baseados no monitoramento de parâmetros ambientais, a norma indica ainda orientações de requisitos dos equipamentos, posicionamento dentro dos ambientes estudados, período e frequência de medição. De modo geral, os parâmetros necessários para a avaliação ambiental de ambientes condicionados naturalmente pelo modelo adaptativo proposto são basicamente: as temperaturas do ar e a umidade relativa interna e externa.

No Brasil, a norma técnica vigente sobre o assunto é a NBR 16401-2 (ABNT, 2008a), que se baseia na versão de 2005 da ANSI/ASHRAE 55 (2005) e trata somente da avaliação de espaços com climatização artificial (ABNT, 2008a). Além da metodologia de avaliação, os métodos de medição e requisitos da instrumentação são apresentados seguindo a linha da norma internacional na qual se baseia.

A metodologia de medição das variáveis de conforto térmico indicadas na ANSI/ASHRAE 55-2020, além de serem pontuadas de maneira mais superficial na própria normativa internacional, são detalhados internacionalmente pela norma técnica ISO 7726:1998 (ISO, 1998) e nacionalmente pela Recomendação Normativa RN 03-2003 (ABRVA, 2003). Apesar de ambas fazerem referência a versões prévias da norma da ANSI/ASHRAE, estas permanecem em vigor, considerando que não houve grandes modificações na metodologia de medição ao longo desse tempo, e com algumas pequenas diferenças entre si, como a altura de instalação de alguns equipamentos utilizados. Cabe salientar que, seguindo a linha da NBR 16401-2, a RN 03-2003 trata dos métodos de medição voltados aos parâmetros necessários para a caracterização de ambientes climatizados artificialmente, de modo que a ISO 7726:1998, além de ser mais abrangente passou por um processo de revisão mais recente, em 2012.

4.2 AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DO AR INTERIOR

Do ponto de vista de avaliação da Qualidade do Ar Interior (QAI), de maneira geral, as principais normas de referência internacionais são as da série ISO 16.000 (ISO, 2004a, 2004b, 2007, 2012 e 2019) e a ANSI/ASHRAE 62.1 (2022). Enquanto as normas da ISO focam no monitoramento e avaliação de contaminantes dentro do ambiente construído, a da ANSI/ASHRAE foca no estudo da ventilação desses espaços.

As normas da série ISO 16.000 são focadas na avaliação da QAI devido à incidência de diversos contaminantes de referência, como o formaldeído, o dióxido de nitrogênio, o material particulado, dentre outros. Essas normas abordam diversas metodologias de medição de

concentração desses poluentes, instrumentação utilizada e especificações mínimas, critérios de locação dos equipamentos dentro das salas, número de amostras, dentre outras informações relevantes.

Já a ANSI/ASHRAE 62.1 (2022) inclui todo esse tipo de conteúdo, porém mais focado na investigação da ventilação ou na taxa de renovação de ar dos ambientes. A norma indica ainda outras informações, como periodicidade recomendada para a manutenção dos componentes dos equipamentos de climatização, concentrações máximas recomendáveis de diversos poluentes pelas principais normas de referência internacionais, métodos para o cálculo por balanço de massa para a redução da concentração de poluentes em um ambiente, taxas de ventilação recomendadas por característica de uso, dentre outros.

Dentro desse escopo, ainda pode-se destacar como legislação nacional a Resolução RE 09/2003, da Agência Nacional de Vigilância Sanitária - ANVISA (BRASIL, 2003), elaborada para revisar a Resolução RE 176/2000 (BRASIL, 2000) com os conhecimentos reunidos nos primeiros anos de implementação. A RE 09/2003 indica padrões de qualidade referenciais; poluentes químicos e biológicos, suas fontes e principais medidas de correção, e apresenta metodologia de monitoramento de dados ambientais aplicada a ambientes climatizados. Já algumas recomendações de métodos de medição, instrumentação e abrangência dos monitoramentos, dentre outros tópicos abordados na ANSI/ASHRAE 62.1-2019 também são indicadas na ABNT NBR 16401-3:2008 (ABNT, 2008b), que trata da qualidade do ar interior em ambientes climatizados, mas que não aborda diversas atualizações incluídas nas normativas internacionais devido à realidade imposta pelo contexto de pandemia devido à COVID-19.

Além das normas e resoluções de referência para o estudo da qualidade do ar interior em edificações públicas e comerciais, cabe salientar outras referências relevantes ao estudo proposto, a exemplo das publicações da *World Health Organisation - WHO* sobre o monitoramento e avaliação da qualidade do ar em ambientes escolares. Entre essas publicações podemos destacar um compilado de orientações de monitoramento da qualidade do ar em escolas (WHO, 2011) e uma série de publicações para a avaliação da concentração de contaminantes em ambientes educacionais com foco na mitigação de riscos à saúde de crianças e adolescentes (WHO, 2020, 2021a, 2021b, 2021c e 2021d).

A primeira publicação da WHO mencionada utiliza do conhecimento adquirido por programas de avaliação da qualidade do ar interior implementados em alguns países da Europa para a elaboração de uma metodologia de monitoramento de poluentes químicos, da taxa de renovação do ar e da presença de umidade e mofo em escolas (WHO, 2011).

Já as publicações mais recentes mencionadas percorrem um caminho para caracterizar o risco à saúde e bem-estar de crianças devido à exposição a contaminantes químicos no ambiente escolar. Essa série aborda uma ampla revisão de literatura sobre poluentes químicos típicos de ambientes escolares e riscos gerados às crianças e adolescentes (WHO, 2021b), avaliação dos riscos da exposição combinada de contaminantes (WHO, 2021a), metodologia para seleção de locais para a amostragem (WHO, 2021c), métodos para amostragem e análise de poluentes químicos (WHO, 2020), dentre outras questões relevantes.

A multiplicidade de poluentes químicos que podem estar presentes no ar e as limitações de investimento em instrumentação para monitoramentos mais abrangentes indica a necessidade de identificação, seleção e enfoque nos contaminantes de maior relevância para estudo. Para orientar essa seleção, uma das principais referências é o Guia de Qualidade do Ar Interior para Poluentes Seleccionados (WHO, 2010), no qual nove poluentes são apresentados, indicando informações como fontes típicas, concentrações de referência, riscos à saúde dos usuários, avaliação dos riscos e padrões de concentração máxima recomendável por tempo de exposição. Nesse guia os contaminantes abordados são formaldeído, naftaleno, dióxido de nitrogênio, hidrocarbonetos policíclicos aromáticos, radônio, tricloroetileno e tetracloroetileno.

Apesar de o guia ser referência para o estudo da qualidade do ar interior em edificações, não há um enfoque por tipo de edificação. Assim, se faz útil verificação de referências voltadas ao ambiente escolar. Nessa linha, a Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos - *United States Environmental Protection Agency* (US EPA, 2021) apresenta um guia de QAI voltado a ambientes escolares que indica, entre outros aspectos, poluentes típicos de ambientes escolares e suas possíveis fontes, problemas de saúde associados, instrumentação recomendada para o monitoramento e códigos e concentrações de referência. O guia da US EPA aborda tanto contaminantes biológicos (mofo, ácaros, pólen e outros) quanto químicos, dando maior destaque ao segundo grupo. São contaminantes químicos abordados pelo guia o dióxido de carbono (CO₂), monóxido de carbono (CO), material particulado fino (MP_{2.5}), óxidos de nitrogênio (NO e NO₂) e chumbo (Pb).

Um bom indicativo dos poluentes químicos de maior incidência em ambiente escolares vem da WHO (WHO, 2021b), que preparou uma ampla revisão da literatura em mais de 150 publicações sobre qualidade do ar em escolas na Europa entre 2012 e 2017. A revisão indicou que o contaminante de maior incidência nesses ambientes escolares é o formaldeído, seguido do dióxido de nitrogênio (NO₂), material particulado (MP₁₀) e material particulado fino (MP_{2.5}). A Tabela 1, obtida da publicação (WHO, 2021b, p. 21), indica a incidência identificada para os 30 contaminantes de referência selecionados.

Conhecidos os contaminantes de referência, as concentrações máximas recomendáveis indicadas pela literatura especializada se baseiam principalmente nas indicações da WHO (2010), no âmbito internacional, e da ABNT (2008) e CETESB (2015), no âmbito nacional. O Quadro 1 faz uma compilação dessas orientações para os contaminantes de referência, de acordo com o tempo de exposição do usuário, para cada um deles. Vale ressaltar que as referências não fazem distinção de concentração recomendada entre ambientes internos e externos, de modo que essas são aplicáveis a ambos os casos. Também é importante salientar que ainda que haja evidências na literatura sobre os riscos devido à exposição cumulativa de contaminantes diversos, ainda não há um consenso sobre como essa questão pode ser quantificada, apesar dos estudos recentes da WHO (2021a).

Tabela 1 - Contaminantes mais comuns em ambientes escolares.

No.	Substância	Número de registros	No.	Substância	Número de registros
1	Formaldeído	24	17	Limoneno	4
2	NO ₂	20	18	n-decano	4
3	MP10	19	19	Acetaldeído	3
4	MP2.5	17	20	BDE 47	3
5	Benzeno	11	21	Benzo(a)pireno	3
6	O ₃	10	22	Naftaleno	3
7	CO	7	Xx	o-xileno	3
8	m,p-xilenos	7	Xx	d-limoneno	2
9	Stireno	7	23	Fenantreno	2
10	Tolueno	7	24	Tricloroetileno	2
11	1,4-diclorobenzeno	6	25	DEP	2
12	Etilbenzeno	6	26	DiBP	2
13	Butil acetato	5	27	DnBP	2
14	Tetracloroetileno	5	28	Galaxolida	1
15	α -pineno	5	29	SO ₂	1
16	1,2,3-trimetilbenzeno	4	30	Tonalida	1

Fonte: Adaptado de World Health Organisation - WHO (2021b).

Vale observar que WHO (2021a) não considera o dióxido de carbono na sua listagem de poluentes de relevância sob critério risco de riscos à saúde dos usuários devido à exposição em ambientes interiores. A US EPA (2021) indica que os efeitos do CO₂ como gás asfíxiante, devido à supressão de oxigênio no ar, se iniciam a altas concentrações, na ordem de 15.000 partes por milhão – ppm, ao passo que a organização estadunidense de segurança e saúde ocupacional (*Occupational Safety and Health Administration* - OSHA, 2017) considera para o limite de não toxicidade concentrações de até 5.000 ppm. Já a ASHRAE (2022) indica pesquisas

apontando efeitos cognitivos associados à *síndrome do edifício doente* a concentrações na faixa de 1.000 ppm (SATISH et al. 2012; ALLEN et al. 2016; LEE et al. 2022), mas ressaltando que esse não é um consenso na literatura científica (ZHANG et al. 2021). Anteriormente, em termos indicativos da ventilação dos ambientes, a ANSI/ASHRAE Standard 62.1 (2019) recomendava que a concentração de CO₂ nos ambientes internos não excedesse em 700 ppm as concentrações externas, cujo entendimento era abrangentemente associado a uma concentração limite de 1.000 ppm

Quadro 1 - Concentrações máximas recomendadas.

Contaminante	WHO, 2021	ABNT, 2008	CETESB, 2015 (PF)	CETESB, 2015 (M2)
Formaldeído (HCHO)	0,1 mg/m ³ * [30 min]	20 ppb (27 mg/m ³) [8 horas]	-	-
Dióxido de nitrogênio (NO ₂)	25 µg/m ³ [24 horas] 10 µg/m ³ [anual]	100 µg/m ³ .	200 µg/m ³ [1 hora] 40 µg/m ³ [anual]	240 µg/m ³ [1 hora] 50 µg/m ³ [anual]
Material particulado (MP ₁₀)	45 µg/m ³ [24 horas] 15 µg/m ³ [anual]	50 mg/m ³ .	50 mg/m ³ [24 horas] 20 mg/m ³ [anual]	100 mg/m ³ [24 horas] 35 mg/m ³ [anual]
Material particulado fino (MP _{2.5})	15 µg/m ³ [24 horas] 5 µg/m ³ [anual]	-	25 mg/m ³ [24 horas] 10mg/m ³ [anual]	50 mg/m ³ [24 horas] 17 mg/m ³ [anual]
Ozônio (O ₃)	100 µg/m ³ [8 horas] 60 µg/m ³ [pico da estação]	100 µg/m ³ [8 horas]	100 µg/m ³ [8 horas]	130 µg/m ³ [8 horas]
Monóxido de carbono (CO)	4 mg/m ³ [24 horas]	9 ppm (10,31 mg/m ³) [24 horas]	9 ppm (10,31 mg/m ³) [24 horas]	11 ppm (12,6 mg/m ³) [24 horas]

Fonte: Adaptado de WHO (2021), ABNT (2008) e CETESB (2015).

¹ A concentração limite de formaldeído pela WHO é definida pela publicação do ano de 2010.

² Unidades de medida: mg/m³ - miligramas por metro cúbico; µg/m³ - microgramas por metro cúbico; ppb – partes por bilhão; ppm – partes por milhão.

O estudo da concentração de dióxido de carbono (CO₂) no âmbito da avaliação da qualidade do ar interior do ambiente construído apresenta, portanto, maior relevância como parâmetro relacionado à taxa de renovação do ar do que como contaminante químico propriamente dito. Isso porquê o CO₂ pode ser utilizado nesse tipo de estudo como *'tracer gas'*, ou gás traçador, um gás conhecido, presente no ambiente e passível de monitoramento, que

permite o cálculo da taxa de renovação de ar por meio de um balanço de massa (ETHERIDGE e SANDBERG, 1996). Sua variação da concentração ao longo do tempo, a contabilização das suas fontes de emissão e o conhecimento do volume do ambiente podem ser utilizados para estimar a taxa de renovação de ar em uma sala (CUI *et al.*, 2015). Ainda, a ASHRAE (2022) aponta ainda um histórico de publicações associando o índice de 1.000 ppm como limite recomendável de exposição de CO₂, como indicativo de qualidade da ventilação, em uma interpretação rasa de outras publicações da associação (ASHRAE, 2019), de modo que o posicionamento mais recente da associação ratifica a recomendação do cálculo efetivo da taxa de renovação de ar para a avaliação desse quesito (ANSI/ASHRAE, 2022).

Cui et al. (2015) fazem uma aplicação do procedimento de cálculo da taxa de ventilação pelo método do gás traçador utilizando para isso o balanço de massa indicado na equação (1), aplicável a zonas individuais. Como no experimento realizado o monitoramento ocorre sem a presença de qualquer indivíduo no ambiente, a taxa de emissão em relação ao tempo, $E(t)$, pode ser anulada na equação. Como o CO₂, diferente dos outros gases traçadores, possui uma concentração mínima diferente de ‘zero’, considerando que a concentração externa varia de 300 a 500 ppm, essa variável é adicionada à equação (2). Ainda, considerando que a relação da vazão pelo volume (Q/V) é considerada a taxa de renovação do ar (*Air Change Rate* - ACH, em hr^{-1}) e C_0 é a concentração inicial no ensaio, integrando-se a equação (2), obtém-se a equação (3).

$$V \frac{dC}{dt} + QCi = E(t) \quad (1)$$

$$V \frac{dC}{dt} + Q(Ci - Ce) = 0 \quad (2)$$

$$Ci - Ce = (C_0 - Ce) \cdot e^{-\frac{Q}{V}t} = (C_0 - Ce) \cdot e^{-ACH \cdot t} \quad (3)$$

$$ACH = \frac{(\sum_{j=1}^n t_j) \cdot (\sum_{j=1}^n \ln(Ci - Ce)) - n \cdot \sum_{j=1}^n t_j \cdot \ln(Ci - Ce)}{n \cdot \sum_{j=1}^n t_j^2 - \sum_{j=1}^n t_j} \quad (4)$$

Onde: V = volume da sala, em m³;

Q = fluxo de ar, em m³/s;

Ci = concentração de CO₂ na sala, em mg/m³;

Ce = concentração de CO₂ na área externa, em mg/m³;

$E(t)$ = taxa de emissão de CO₂ de fontes interiores, em mg/h;

ACH = taxa de renovação do ar, em hr^{-1} .

O princípio do método de decaimento da concentração baseada na equação fundamental pode então ser desenvolvido por dois métodos: o de dois pontos ou o de multipontos. Enquanto

o método de dois pontos considera somente a concentração inicial (C_0), final (C_f) e externa (C_e), o método multiponto considera a variação da concentração ao longo do tempo, utilizando para isso o princípio do método dos mínimos quadrados. A utilização do método multipontos, resulta em dados mais robustos, e utiliza os princípios do método dos mínimos quadrados no cálculo da taxa de renovação de ar. De forma análoga à equação da inclinação da curva no método dos mínimos quadrados, a equação (3) assume a forma da equação (4), considerando nesse caso 'n' como o número de pares de dados analisados. Essa equação pode ser mais bem visualizada a partir do gráfico linearizado do decaimento ($\ln(C_i - C_e)$ vs tempo), onde a inclinação deste representa a taxa de renovação de ar. Assim, com a equação da inclinação obtém-se a taxa de renovação do ar (hr^{-1}), ao passo que multiplicando-se essa taxa ao volume do ambiente, obtém-se a vazão de ar da sala.

A principal referência na avaliação da ventilação de ambientes construídos é a ANSI/ASHRAE 62.1 (2022). Essa norma indica índices de ventilação mínimos necessários para promover padrões de qualidade do ar adequados ao ser humano em termos de saúde e bem-estar. O documento apresenta os procedimentos de projeto, construção e manutenção de sistemas de ventilação mecânica, avaliação da ventilação de ambientes construídos e padrões de referência para diferentes tipos de ambientes. Dentre os procedimentos indicados pela norma, está incluso o cálculo da taxa de ventilação mínima adequada para ventilar diversos tipos de ambiente, sendo essa uma função da área e do número de ocupantes. Os fatores de multiplicação para ambientes escolares estão apresentados na Tabela 2.

Um dos principais pontos suprimidos da versão de 2022 da ANSI/ASHRAE 62.1 em relação às anteriores é a menção da concentração máxima sugerida de 1.000 ppm como indicativo da qualidade do ar interior. Um documento publicado pela associação (ASHRAE, 2022) esclarece essa e outras questões, indicando necessidade de cuidado com conclusões errôneas no uso da concentração de CO_2 como da qualidade da ventilação de um ambiente. O texto ressalta que uma só concentração não é parâmetro adequado para avaliar ambientes com características físicas e de ocupação diferentes. Nesse ponto, ressalta-se que a recomendação que a concentração interna se mantenha até 700 ppm acima da concentração externa foi mantida na versão de 2022 da norma. No documento informativo há ainda esclarecimentos sobre métodos de avaliação da ventilação baseados no monitoramento da concentração de CO_2 , o uso da concentração de CO_2 como indicador do risco de transmissão de COVID-19, dentre outros aspectos.

No âmbito nacional a norma que lida com a taxa de renovação do ar é a NBR 16401-3:2008 (ABNT, 2008b), que trata de qualidade do ar interior para sistemas centrais e unitários de ar-condicionado. A norma, que se baseia na ANSI/ASHRAE 62.1, indica três faixas de vazão eficaz mínima recomendada para diversos ambientes e indica método de cálculo da vazão mínima de projeto de maneira análoga à ANSI/ASHRAE (Tabela 3).

Além da NBR 16401-3:2008 é relevante a observação da Recomendação Normativa nº 176/2000 da Agência Nacional de Vigilância Sanitária - ANVISA (BRASIL, 2000), que indica como taxa de renovação do ar mínima para ambientes climatizados o índice de 27 m³/h/pessoa.

Tabela 2 - Taxa de renovação de ar mínima recomendada pela ANSI/ASHRAE 62.1 (2022).

Categoria de ocupação	Taxa de renovação de ar por pessoa		Taxa de renovação de ar por área		Classe do ar
	cfm/pessoa	L/s/pessoa	cfm/ft²	L/s.m²	
Ambientes Educacionais					
Salas de aula (arte)	10	5	0,18	0,9	2
Salas de aula (idades 5 a 8 anos)	10	5	0,12	0,6	1
Salas de aula (idades acima de 9 anos)	10	5	0,12	0,6	1
Laboratórios de computação	10	5	0,12	0,6	1

Fonte: Adaptado de ANSI/ASHRAE (2022).

Tabela 3 - Taxa de renovação de ar mínima recomendada pela NBR 16401-3 (2008).

Local	Nível 1		Nível 2		Nível 3	
	L/s.pessoa	L/s.m ²	L/s.pessoa	L/s.m ²	L/s.pessoa	L/s.m ²
Estabelecimentos de Ensino						
Sala de aula	5	0,6	6,3	0,8	7,5	0,9
Laboratório de informática	5	0,6	6,3	0,8	7,5	0,9
Laboratório de ciências	5	0,9	6,3	1,1	7,5	1,4

Fonte: Adaptado de ABNT (2008b).

Onde: cfm/pessoa = pés cúbicos por minuto por pessoa;

L/s/pessoa = litros por segundo por pessoa;

cfm/ft² = pés cúbicos por minuto por pés quadrados de área do ambiente;

L/s.m² = litros por segundo por metro quadrado de área do ambiente.

4.3 AVALIAÇÃO DA QUALIDADE AMBIENTAL

De acordo com a ANSI/ASHRAE (2010), a Qualidade Ambiental Interior é um conceito que diz respeito à “experiência percebida sobre o ambiente anterior de uma edificação que inclui aspectos de design, análise e operação de edificações com eficiência energética, saúde e conforto”. Essa qualidade ambiental do ambiente construído pode ser diagnosticada por inúmeros aspectos, sendo os mais frequentes o conforto térmico (CT), a qualidade do ar interior (QAI), o conforto acústico (CA) e o conforto visual ou lumínico (CV) (LOU e OU, 2019, LECCESE *et al.* 2021).

Já a avaliação da qualidade ambiental em termos quantitativos é encontrada na literatura por diversas terminologias, como ‘índices de qualidade ambiental’, ‘modelos de qualidade ambiental’, ‘sistema de pontuação’ e ‘sistema de classificação’ (HEINZERLING *et al.*, 2013). Esses modelos ou sistemas de avaliação são importantes por aspectos como possibilitar a criação de uma base de dados de referência (*benchmarking*) na comparação de ambientes diversos ou para orientar tomadas de decisão sobre o uso e operação de ambientes construídos.

Em termos de protocolos/normativas de instituições técnicas para normalização e acreditação, os dois principais documentos da literatura são o Protocolo para Medição de Performance para Edificações Comerciais (*Performance Measurement Protocols for Commercial Buildings - PMP*), da Sociedade Americana de Engenheiros de Aquecimento, Refrigeração e Ar Condicionado (*American Society Of Heating, Refrigerating And Air-Conditioning Engineers*) (ASHRAE/USGBC/CIBSE, 2010) e o Guia de Melhores Práticas de Protocolos de Medição de Desempenho (*Performance Measurement Protocols Best Practices Guide*), o EN15251:2007 do Comitê Europeu de Normalização (CEN, 2007).

O EN15251 (CEN, 2007) é uma norma que incorpora recomendações técnicas de diversas outras normas europeias e propõe a classificação das edificações, por parâmetros ambientais medidos ‘*in loco*’, quer seja com o uso de equipamentos, quer seja pela aplicação de formulários de satisfação aos usuários. Para ambos os métodos os parâmetros mensurados de cada critério ambiental são associados a uma escala de satisfação com quatro categorias. No caso das medições com equipamentos, o peso de cada critério é calculado a partir da porcentagem de tempo em que os ambientes estão em cada faixa de satisfação. Já no caso das medições pelos formulários, recomenda-se a associação o número de pessoas por metro quadrado de cada ambiente estudado com a frequência de respondentes em cada categoria de satisfação. Ainda existe debate sobre a pertinência ou não da normativa utilizar faixas de classificação para caracterizar os ambientes, considerando como isso influenciaria os tomadores

de decisão (OLESEN, 2007; NICOL e WILSON, 2011; HEINZERLING *et al.*, 2013). Ressalta-se ainda que as diretrizes indicadas na EN15251:2007 não descrevem detalhadamente como deve ser realizado o procedimento de avaliação da qualidade de ambientes construídos.

Alguns autores desenvolveram pesquisas para preencher essa lacuna na literatura (NCUBE e RIFFAT, 2012; OLESEN, 2007), assim como a Federação Europeia de Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado (*Federation of European Heating, Ventilation and Air Conditioning Associations - REHVA*) publicou o *Indoor Climate Quality Assessment guidebook* (CORGNATI *et al.* 2011), documento que embasa de maneira complementar a EN15251 no que tange à qualidade do ar e conforto térmico.

A REHVA detalha, entre outras informações, ‘o que e como medir’, ‘quais índices determinar’, como apresentar os resultados’ e ‘como classificar o nível de Qualidade Climática Interior (QCI)’ (CORGNATI *et al.* 2011). Assim, preenche-se parte da lacuna científica ao se apresentar uma metodologia mais detalhada para a análise do CT e QAI, mas ainda permanece uma deficiência nos aspectos visual e acústico.

Já o PMP (ASHRAE, 2010) é uma publicação que indica um apanhado de protocolos em 6 critérios ambientais (energia, água, conforto térmico, qualidade do ar interior, iluminação e acústica), com foco no embasamento de planos de manutenção. Dentre outros aspectos, o documento indica orientações sobre parâmetros mensurados, instrumentação, e métodos de avaliação associados a três níveis diferentes de complexidade/custo. No entanto, apesar do *Standard* indicar as metodologias para avaliar/classificar cada critério ambiental, não há a agregação para apenas um índice representativo da qualidade ambiental global. Apesar do guia receber elogios quanto ao panorama global da qualidade de uma edificação, alguns autores criticam seu uso como sistema de classificação estruturado, considerando lacunas apontadas quanto à instrumentação e limitações quanto às faixas de classificação utilizadas (KIM, 2012; HEINZERLING *et al.*, 2013).

A partir dessas publicações e da literatura construída por diversos autores, buscou-se o aperfeiçoamento e desenvolvimento de novas metodologias para a avaliação global da qualidade ambiental do ambiente construído. Os artigos de revisão de Lolli, Coruzzolo e Balugani (2022), Roumi *et al.* (2022) e Leccese *et al.* (2021) sumarizaram a base de conhecimento construído nas últimas décadas, destrinchando os métodos de aquisição dos dados, de avaliação e agregação dos resultados.

Os modelos para a obtenção dos índices de qualidade são desenvolvidos em duas etapas, sendo uma de medição e outra de geração do modelo de avaliação. Primeiramente, os aspectos são avaliados de maneira individual, identificando as condições ambientais por critério e, em

seguida, de forma agregada, utilizando um método que possibilite a comparação direta dos diferentes critérios (normalização), aplicando seus respectivos pesos (ponderação/elicitación) e agregando os resultados pela multiplicação dos índices individuais pelos pesos (LOLLI, CORUZZOLO e BALUGANI, 2022).

Esses modelos de avaliação da qualidade ambiental interior são concretizados através de duas etapas, sendo uma de medição e outra de geração do modelo de avaliação. Quanto à medição, esta pode ser objetiva, com a mensuração de parâmetros de referência (temperatura, umidade, concentração de poluentes) por meio de equipamentos, ou subjetiva, através da aplicação de formulários padronizados aos usuários dos ambientes (MIDDLEHURST *et al.*, 2018 e HEINZERLING *et al.*, 2013) ou a profissionais e pesquisadores da área (CHIANG e LAI, 2002). Há ainda a possibilidade da aplicação de ambas as estratégias concomitantemente para a aplicação no modelo (HEINZERLING *et al.*, 2013).

Já quanto à etapa de modelagem, esta também é subdividida primariamente em duas outras etapas. Na primeira é determinado o método ou modelo que irá agregar todas as variáveis avaliadas no estudo. Roumi *et al.* (2022), em sua revisão de literatura, identifica três tipos de modelos: o objetivo, o subjetivo-objetivo e o subjetivo.

Nos modelos objetivos, os dados obtidos das medições ambientais transformados em índices de satisfação normatizados e associados a cada critério são multiplicados por subíndices fixos representativos da relevância de cada um desses parâmetros (ROUMI *et al.*, 2022). Os índices de satisfação definidos para cada um dos critérios selecionados são determinados através de recomendações normativas e a normalização ocorre quando é criada uma escala de satisfação aplicada aos parâmetros, o que, por questões de simplificação, pode ocorrer através de um número definido de categorias. Em um monitoramento contínuo, em tempo real, os resultados normatizados são colocados em uma escala temporal que demonstra a variação dos índices em relação ao tempo de monitoramento, como ocorre no estudo de Marino *et al.* (2012). Os resultados dos índices normatizados são associados à fração de tempo em que cada índice ocorre, de modo a se considerar essa variação ao longo do monitoramento. Após isso, são determinados subíndices fixos associados a cada um dos critérios que posteriormente serão multiplicados pelos índices de satisfação normatizados para se obter o valor global do índice de qualidade ambiental. Observa-se na descrição dessa metodologia que não há subjetividade associada à coleta de dados e interpretação dos resultados, nem aos pesos atribuídos a cada parâmetro avaliado.

Os do tipo subjetivo-objetivo, por sua vez, buscam a associação das medições objetivas (equipamentos) e subjetivas (formulários), conforme introduzido por Mui e Chan (2005). Os

resultados dos formulários respondidos, na forma de porcentagem de pessoas insatisfeitas (*Percentage of People Dissatisfied - PPD*), foram associados com resultados do monitoramento contínuo das variáveis ambientais através de modelos de regressão linear de múltiplas variáveis. Metodologia similar foi aplicada no estudo de Zhang *et al.* (2022), no qual os autores normalizam os dados objetivos coletados continuamente e discretizam os resultados de modo a permitir uma comparação com os dados subjetivos. Essa correlação é feita através do método de árvore de decisões, para gerar um algoritmo numa aplicação de *Machine Learning*.

Já os modelos do tipo subjetivo utilizam apenas os resultados da aplicação de formulários para a modelagem do índice de qualidade ambiental. O estudo de Cheung *et al.* (2021) executa essa proposta ao aplicar um formulário pedindo a indicação do nível de satisfação ou insatisfação com 18 parâmetros relacionados à qualidade ambiental. Ao tempo que os resultados menos significativos são excluídos, os demais são aplicados em uma regressão linear para a geração da equação do modelo de qualidade ambiental.

Já quanto à atribuição de pesos à cada critério, cabe ressaltar uma grande variabilidade identificada em diferentes *reviews*. Os estudos aqui tratados possuem similaridades quanto aos critérios de elegibilidade no que tange a todos os artigos apresentarem (1) a análise de mais de um critério ambiental, (2) a representação de um método de referência ou índice de qualidade ambiental para ambientes construídos e (3) a apresentação dos índices de ponderação propostos para cada um dos critérios avaliados.

Lolli, Coruzzolo e Balugani (2022) fizeram uma revisão da literatura sobre a avaliação integrada da qualidade ambiental de edificações entre os anos 2000 e 2021. Os autores restringiram suas buscas a artigos que abordassem concomitantemente ao menos os critérios de conforto acústico, visual, térmico e de qualidade do ar, identificando entre outros aspectos os parâmetros avaliados pelos estudos e os métodos de ponderação utilizados. Os resultados apontaram para a predominância de abordagens baseados no *Analytical Hierarchy Approach* (AHP) e em regressões multilíneas. Para isso, além dos dados de monitoramento em tempo real de parâmetros ambientais, foram utilizados questionários de pós ocupação e avaliações de experts para fundamentar a atribuição de pesos a cada um dos critérios ambientais avaliados. É importante salientar que os autores identificaram uma relevante variabilidade no peso atribuído a cada critério, considerando a preponderante utilização da percepção do usuário nessa atribuição, o que é um indicativo da dificuldade de estabelecimento de um índice padrão de ponderação baseada na sensação indicada pelo usuário.

O *review* de Leccese *et al.* (2021) possui um enfoque na identificação dos pesos associados a cada critério de avaliação ambiental para a execução de um novo estudo em salas

de aula de Universidades da Itália. Os autores estudaram um total de 21 pesquisas que abordavam ao menos três dos quatro principais critérios de qualidade ambiental anterior (CT, QAI, CV e CA), e aplicaram formulários para 122.000 respondentes em 18 países. Foram identificados 8 diferentes métodos para a obtenção dos índices pelos formulários, sendo que os mais utilizados foram o *Analytical Hierarchic Process* (AHP) e diversos tipos de Regressão Linear e Não Linear. Os autores recalcularam os pesos obtidos em cada estudo para serem representativo apenas dos 4 critérios estudados e os reorganizaram de acordo com o uso-fim das edificações (escritórios, residenciais e escolas/universidades). O conforto térmico foi o critério com maior peso, enquanto a QAI o com a maior variabilidade, com medianas próximas de 0,28 e 0,24, respectivamente. Os autores ainda realizaram um estudo de caso, ao aplicar 1468 formulários em salas de aula de Pisa (Itália) de 2016 a 2019 em três etapas. Os índices de CT foram de 0,41, 0,42 e 0,43 e de QAI de 0,21, 0,12 e 0,17. Uma limitação adicional do estudo para a utilização em pesquisas mais recentes é que todos os artigos do review selecionados para a ponderação foram lançados previamente à pandemia de COVID-19.

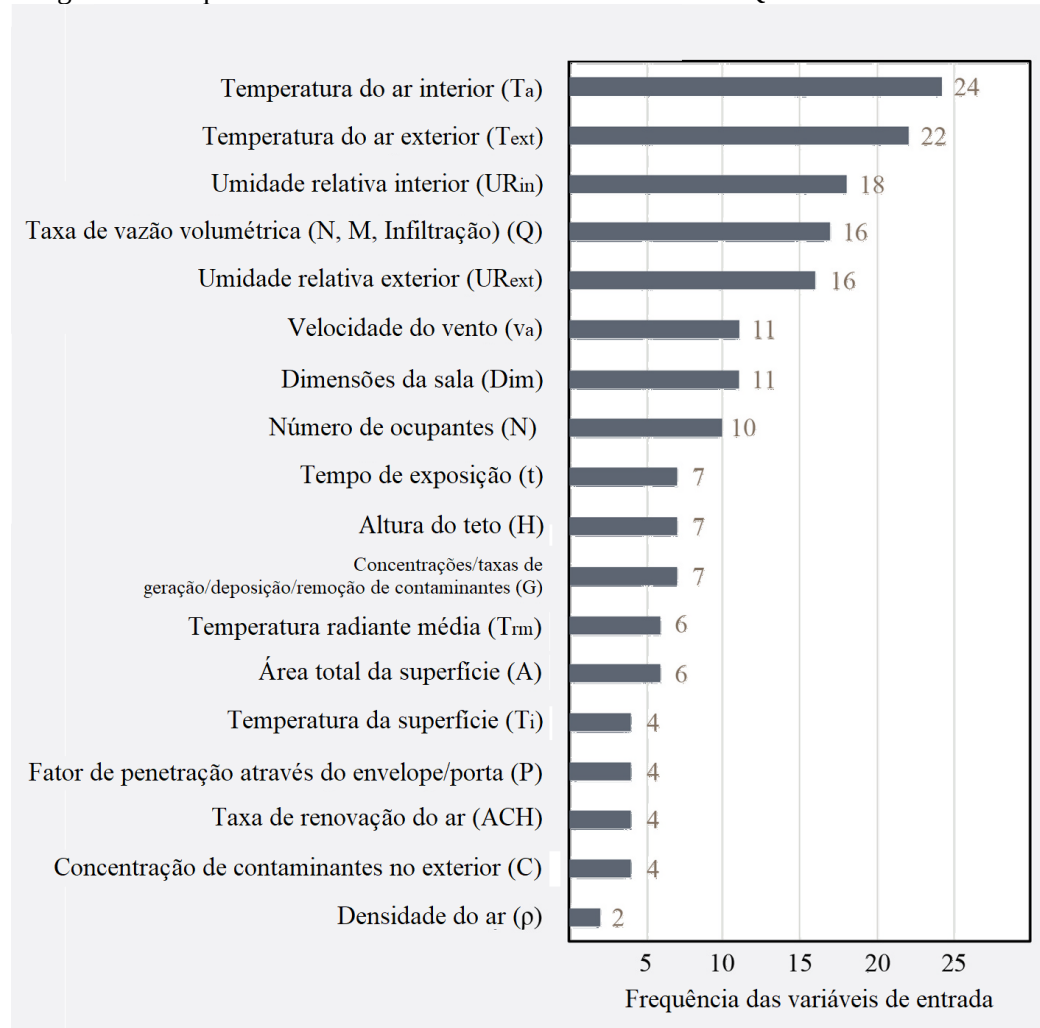
Considerando essa limitação, chamamos a atenção para um recente estudo de Zhang *et al.* (2022) que também aborda a ponderação dos critérios ambientais, numa aplicação voltada a duas edificações comerciais de Shanghai (China). Nele os autores fazem medições objetivas e subjetivas e obtêm os pesos através de uma aplicação do método de *Machine Learning* conhecido como *Information Gain Ratio*. Foi observada uma considerável divergência entre os dois locais avaliados, cuja principal justificativa atribuída pelo autor foi desproporção do número de respondentes que indicaram estar confortáveis consideravelmente superior aos desconfortáveis. Ressalta-se ainda que apesar do artigo ser recebido para publicação em maio de 2021, não há informação de quando o estudo foi realizado, nem há qualquer menção ao contexto pandêmico, o que poderia ser outro fator relevante para os resultados.

Uma proposição desse trabalho é o enfoque da análise do conforto térmico e da qualidade do ar interior como índices preponderantes para a qualidade ambiental dos ambientes escolares. Conforme observado na revisão de literatura de Lolli, Coruzzolo e Balugani (2022), estes são os índices de maior peso na maioria dos artigos sobre o assunto. Ressaltando-se ainda que a partir de 2020 os artigos passaram a atribuir maior peso à QAI no âmbito da avaliação ambiental, o que deve estar relacionado ao novo contexto de pandemia, que evidenciou a importância da ventilação na minimização de riscos de transmissão de infecções pelo ar.

Um fator que deve ser observado com cuidado na análise da QAI e do conforto térmico são as variáveis mais estudadas para a investigação desses critérios. Além das variáveis necessárias para a caracterização do conforto térmico e da qualidade do ar por meio das

metodologias utilizadas como referência por esse trabalho (PMV, PPD, taxa de renovação de ar e concentração de poluentes), é importante entender que outros parâmetros são preponderantes nos resultados obtidos de uma avaliação da qualidade ambiental. Ma *et al.* (2021) fez uma ampla revisão de literatura sobre variáveis e modelos para o conforto térmico e qualidade do ar de edificações.

Figura 1 - Frequência de variáveis de entrada em estudos de QAI e conforto térmico.



Fonte: Adaptado de Ma *et al.* (2021).

Dentro desse estudo os autores identificam a frequência de ocorrência de variáveis diversas em estudos com o enfoque integrativo, de modo que a Figura 1 representa esses dados para estudos envolvendo a metodologia de redes neurais. Conforme pode ser percebido, os aspectos levantados estão associados aos parâmetros levantados pelas metodologias de avaliação do conforto térmico e da qualidade do ar estão representados pelas variáveis da figura, o que corrobora com a metodologia proposta. Outros aspectos são também contemplados de maneira indireta e são indicativos de outras questões que devem ser levadas em consideração

na análise dos resultados obtidos, a exemplo do número de ocupantes, tempo de exposição, fator de penetração das paredes e janelas, área total da superfície.

5. METODOLOGIA

O presente estudo realiza uma avaliação da qualidade ambiental de salas de aula com enfoque na Qualidade do Ar Interior (QAI) e no Conforto Térmico (CT). Para isso, foi realizada uma medição de curto período de parâmetros ambientais associados à qualidade do ar e ao conforto térmico em 16 salas de aula de diferentes instituições. Esses dados obtidos foram tratados, aplicados aos modelos adaptados de avaliação da Qualidade Ambiental Interior, de modo a possibilitar a proposição de um índice representativo da qualidade de cada ambiente. Para a avaliação da qualidade dos resultados obtidos, os mesmos foram confrontados com uma análise dos aspectos arquitetônicos e climáticos associados ao período de monitoramento das salas de aula.

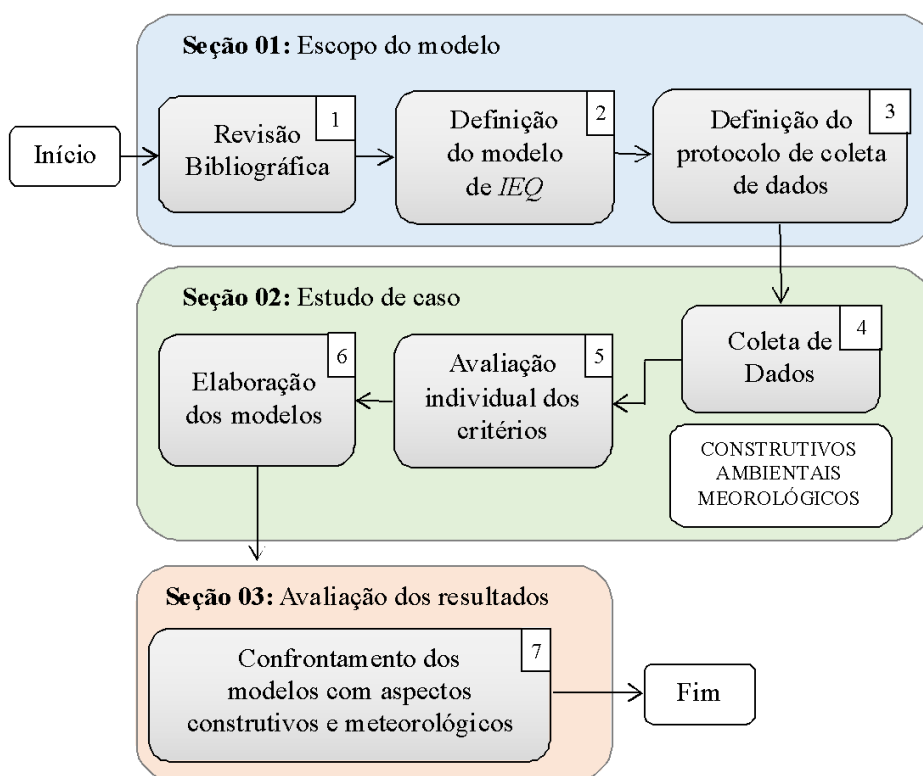
Quanto aos objetivos, o estudo proposto é uma pesquisa explicativa, que busca gerar conhecimento através de dados disponíveis e atualizados na literatura, somada a resultados experimentais coletados nas salas de aula estudadas. Já quanto aos procedimentos, é uma pesquisa mista, que possui características tanto de pesquisa bibliográfica quanto de pesquisa experimental (ANDRADE, 2009). A pesquisa inicia utilizando-se da revisão literatura para o embasamento da metodologia de análise proposta e das variáveis avaliadas e, no segundo momento, executa-se um procedimento metodológico com algumas variáveis controladas.

A metodologia proposta é descrita em três seções principais, subdivididas em sete etapas no total, conforme ilustrado no fluxograma da Figura 2. A primeira seção do trabalho teve como objetivo delinear o método de avaliação da qualidade ambiental aplicado nessa pesquisa. Para isso, seria importante definir primariamente os aspectos ambientais avaliados, o escopo do método de avaliação e as variáveis mensuradas no estudo. Esse estudo preliminar orientou a execução do estudo de caso da segunda seção. No estudo de caso, por sua vez, é realizada a aplicação da metodologia de avaliação da qualidade ambiental proposta com o uso de dados coletados nas salas estudadas comparados a parâmetros de referência. Já na última seção do trabalho é realizada uma avaliação dos resultados obtidos na seção anterior. Os índices de qualidade ambiental e a qualidade dos dados obtidos são discutidos, considerando-se aspectos construtivos, bioclimáticos e outros aspectos observados de relevância.

A primeira seção se inicia na etapa de revisão bibliográfica (1), onde foi realizada uma busca na literatura científica recente sobre métodos de avaliação da qualidade dos ambientes construídos e índices de qualidade ambiental interior (*Indoor Environmental Quality Index-IEQindex*). O foco dessa busca foi fundamentar a elaboração de um modelo de IEQ adequado para as especificidades do ambiente escolar e que contemplasse as atualizações mais recentes

sobre cada critério, em especial quanto à taxa de renovação do ar, devido ao panorama da recente pandemia de COVID-19. O acervo investigado incluiu referências normativas de medição e avaliação de qualidade ambiental interior; revisões de literatura sobre modelos de IEQ, normalização e ponderação dos critérios individuais; pesquisas e recomendações técnicas mais recentes sobre qualidade do ar interior; e estudos sobre IEQ, conforto térmico e qualidade do ar em ambientes escolares.

Figura 2 – Fluxograma da metodologia proposta.



Fonte: O Autor, 2023.

Com os resultados da revisão bibliográfica, elaborou-se o escopo da equação do índice de qualidade ambiental aplicado às salas de aula monitoradas (2), que passou inicialmente pela definição dos aspectos de qualidade avaliados nesse estudo, designados dentro da equação como critérios associados ao conforto térmico ou à qualidade do ar. Nessa pesquisa os critérios selecionados foram o índice de pessoas insatisfeitas (*Percentage of People Dissatisfied – PPD*), associado ao conforto térmico; e à concentração de dióxido de carbono (CO₂), formaldeído (HCHO) e material particulado 2.5 (MP_{2.5}), associados à qualidade do ar interior. Outro parâmetro levantado foi a taxa de renovação do ar, ou taxa de ventilação - critério não acoplado na equação, mas avaliado sob outros aspectos.

Com a definição dos aspectos levantados na segunda etapa e os demais parâmetros associados a cada um deles, é realizada a definição do protocolo de coleta de dados (3), etapa anterior à coleta de dados. Nesse ponto são definidas as variáveis levantadas, métodos e equipamentos utilizados e protocolos de medição das variáveis. As especificações e limitações dos equipamentos e recursos disponíveis também foram aspectos levados em consideração na definição da duração e frequência dos experimentos.

A seção do estudo de caso se inicia na etapa de coleta de dados (4). Nela, após definidos os ambientes estudados na pesquisa, levantou-se uma série de dados associados aos critérios ambientais descritos na etapa anterior, mas também a aspectos arquitetônicos/construtivos, climáticos e de equipamentos de refrigeração e ventilação. As recomendações bioclimáticas da NBR 15220-3 (2005) e do software '*Climate Consultant 6.0*' (SBSE, 2021) para o município de Aracaju/SE foram utilizadas para avaliar os resultados térmicos da avaliação executada. Já a ferramenta *Analysis SOL-AR* (LABEEE/UFSC, 2023) foi utilizada para a elaboração das máscaras de sombra das janelas das salas estudadas.

Os critérios definidos na etapa (3) são avaliados individualmente (5), conforme metodologia definida na etapa (2). Dessa forma, são produtos de saída obtidos nos resultados a variação ao longo do tempo do PPD e do índice de conforto térmico associado, assim como a variação das concentrações de CO₂, HCHO e MP_{2.5}. Os padrões de referência da ANSI/ASHRAE (2020, 2022), WHO (2021d, 2010) e ABNT (2008) associados a esses critérios são utilizados para a avaliação dos resultados obtidos. Também é produto esperado desse procedimento a taxa de ventilação de cada ambiente e o respectivo tempo necessário estimado para toda a renovação do ar. Já os dados construtivos e bioclimáticos levantados na etapa anterior são utilizados para fundamentar os resultados obtidos nos monitoramentos ambientais nas vertentes abordadas.

Na etapa seguinte é realizado o cálculo do índice de qualidade ambiental (*IEQindex*) associado à cada sala avaliada (6). A equação agregadora é composta de dois componentes principais: o índice normalizado da qualidade de cada critério e o respectivo peso associado. Esse índice normalizado refere-se ao produto da conversão dos resultados de cada um dos critérios em índices representativos da qualidade que variam de 0 a 100%, enquanto os pesos associados são obtidos da literatura científica recente. O resultado da agregação desses dois componentes por multiplicação é o *IEQindex*.

Já na última etapa, a avaliação dos resultados, refere-se ao confronto dos resultados dos modelos com outros aspectos levantados no trabalho (7), como dados construtivos, bioclimáticos e uso de equipamentos de climatização e ventilação. Diferente do que ocorre na

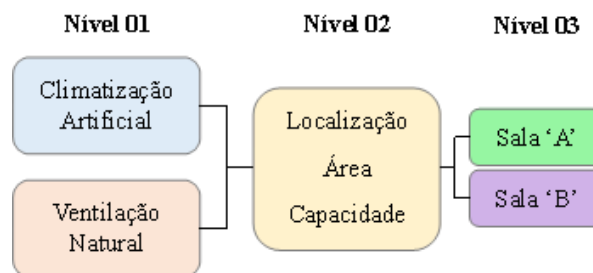
etapa (5), os aspectos são avaliados por uma abordagem mais ampla. Desse modo, evidencia-se como aspectos chave na interação entre as condições de conforto térmico e da qualidade do ar interior.

5.1 AMOSTRAGEM E PROTOCOLO EXPERIMENTAL

O critério de seleção de salas para o estudo se deu com o intuito de constituir uma amostra diversificada em termos de características físicas e de operação, mas com similaridades entre algumas unidades dessa amostra, de modo a melhor fundamentar a análise dos resultados. A Figura 3 ilustra os principais critérios levados em consideração na seleção das salas estudadas, dividindo-os em três níveis de decisão.

Inicialmente, as salas foram selecionadas de modo que a amostra fosse dividida meio-a-meio entre ambientes de climatização artificial, operando com condicionadores de ar, e de ventilação natural, sem ar-condicionado (*Nível 01*). Esse primeiro critério é representativo da influência do tipo de condicionamento tanto para o conforto térmico, quanto para a qualidade do ar interior. A seguir, buscou-se observar ambientes com características diversas em termos de localização dentro do município, área interna e capacidade de alunos, de modo que essas sejam características secundárias para observar na diversidade dos resultados obtidos (*Nível 02*).

Figura 3 – Critérios para a seleção dos ambientes.



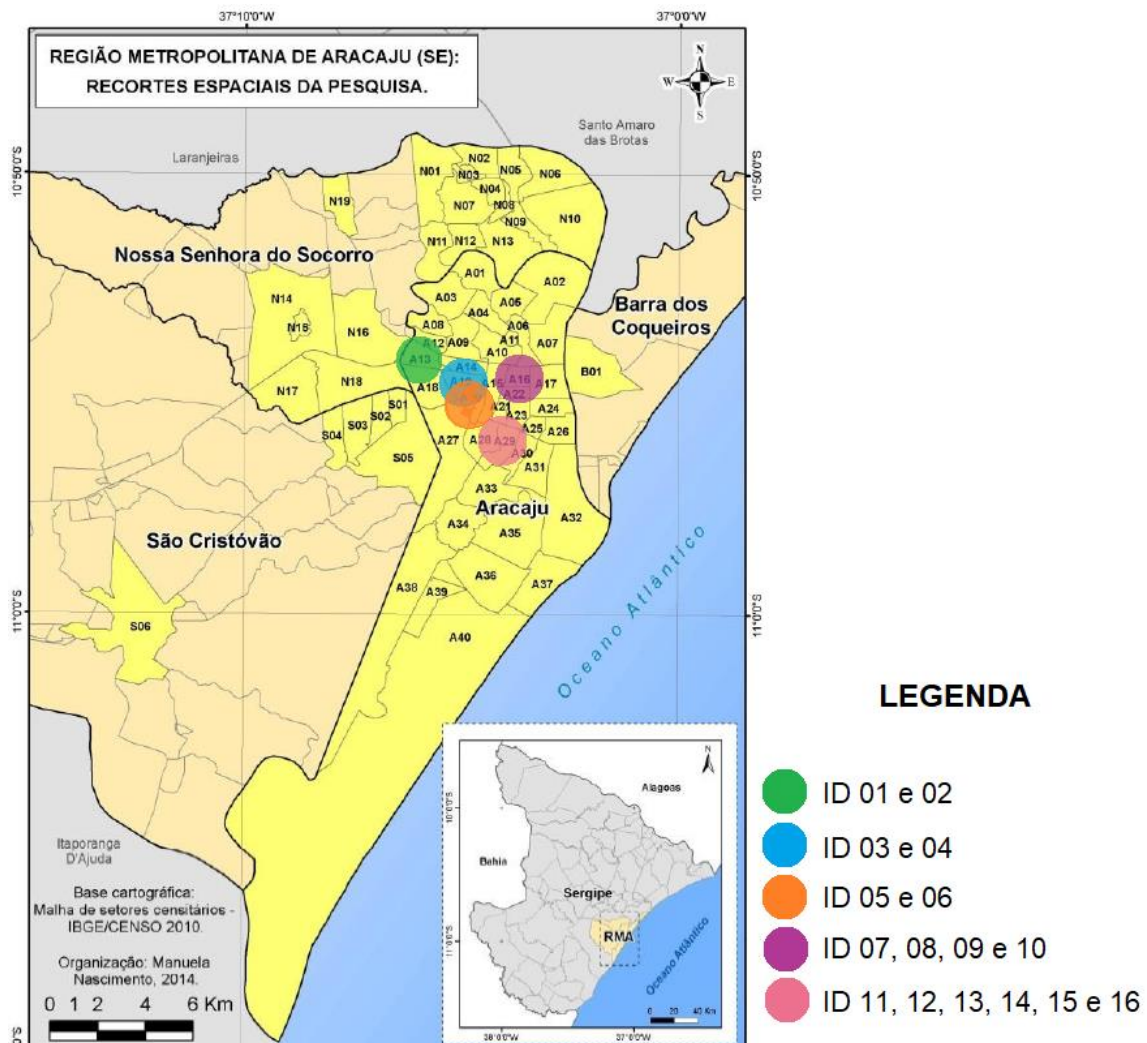
Fonte: O Autor, 2023.

Dentro desses grupos de critérios, buscou-se ainda que o espaço amostral fosse composto por pares de salas que compartilhassem similaridades nos níveis 01 e 02, mas distintas entre si principalmente pela disposição das esquadrias dentro do ambiente. Para isso, buscou-se monitorar salas de características similares dispostas frente-a-frente dentro da mesma edificação (*Nível 03*). Dessa maneira, verifica-se a influência de aspectos bioclimáticos e

construtivos nos resultados. Dessa forma, observa-se como o posicionamento de alguns elementos, como as esquadrias, se relacionam com as recomendações da literatura para a zona bioclimática onde o estudo foi desenvolvido.

Os ambientes estudados estão localizados em cinco bairros distintos do município de Aracaju: Novo Paraíso (A13), Olaria (A19), América (A20), Getúlio Vargas (A16) e Luzia (A29), conforme indicado na Figura 4. Já as informações sobre área, tipo de condicionamento e capacidade de cada sala são apresentadas no Quadro 2.

Figura 4 – Localização dos ambientes monitorados.



A avaliação da qualidade ambiental dessas salas de aula foi feita por meio de um monitoramento em duas etapas. Na primeira foi realizado o levantamento de dados ambientais durante um dia de aulas no turno da tarde. Já a segunda consistiu em um experimento de avaliação da ventilação, executado com as salas desocupadas. Quanto ao monitoramento com

as salas ocupadas, ressalta-se que se optou por uma avaliação de curta duração ao invés do monitoramento de longa duração. Isso porque o período de avaliação de 1 semana na frequência de registro de 5 em 5 minutos, recomendado pela WHO (2011), ISO (1996) e ASHRAE (2020) seria inviável, considerando-se que os equipamentos disponíveis não possuem dispositivo de registro automático de dados, de modo que esse procedimento é realizado de maneira manual e individual. Já o período da tarde foi selecionado considerando que o ganho térmico acumulado ao longo do dia faz com que esse seja o período mais crítico em termos de conforto térmico.

Quadro 2 – Critérios para a seleção dos ambientes.

ID	Tipo de Condicionamento		Localização	Área (m ²)	Capacidade (pessoas)
	Artificial	Natural			
1		X	A13	45,53	40
2		X	A13	45,53	30
3		X	A19	31,13	30
4		X	A19	26,88	26
5		X	A20	49,20	42
6		X	A20	48,30	29
7	X		A16	48,00	29
8	X		A16	48,00	41
9	X		A16	75,25	75
10	X		A16	75,25	30
11	X		A29	29,75	25
12	X		A29	20,13	18
13		X	A29	31,20	24
14		X	A29	31,20	22
15	X		A29	36,75	21
16	X		A29	30,48	20

Fonte: O Autor, 2023.

O Quadro 3 indica os equipamentos utilizados nessa pesquisa, os parâmetros mensuráveis por cada um deles, bem como suas especificações técnicas. O quadro está dividido entre equipamentos utilizados para o levantamento das variáveis associadas à qualidade ambiental mensurada nesse estudo e dispositivos utilizados de forma secundária na pesquisa. Nesse último caso, com o objetivo de levantar as dimensões dos ambientes e provocar o aumento proposital da concentração de CO₂ nas salas para o experimento da ventilação.

A medição das salas ocupadas utilizou os três primeiros equipamentos listados no Quadro 3 para monitorar os dados de temperatura (bulbo seco, bulbo úmido e globo), umidade e concentração de CO₂, HCHO e MP_{2.5}, desde a primeira até a última aula do turno. A especificação dos equipamentos utilizados e o procedimento de execução do monitoramento

com as salas ocupadas seguiu as especificações da ISO 7726 (1998) para o Conforto Térmico e da *World Health Organization - WHO* (2011) para a Qualidade do Ar Interior. Assim, os equipamentos foram instalados no centro das salas, a uma altura aproximada de 1,10 m e com o pesquisador posicionado na cadeira atrás dos instrumentos para a realização do registro de dados.

Quadro 3 - Listagem e especificações dos equipamentos utilizados nos experimentos.

EQUIPAMENTO	DESCRIÇÃO	PARÂMETROS MENSURADOS	ESPECIFICAÇÕES	TECNOLOGIA DE MEDIÇÃO
Parâmetros Fundamentais				
Termômetro de globo	Medidor de stress térmico, marca 3M, modelo QUESTemp 34°	Temp. de globo (°C) Temp. de bulbo seco (°C) Temp. de bulbo úmido (°C) Umidade relativa do ar (%)	Faixa de medição: - 0 a 120 °C de temp. - 0 a 95% UR Precisão: 0,5 °C / 0,5% Resolução: 0,1°C / 0,1 % UR	Sensores de temperatura de Platina RTD e sensor de umidade relativa
Medidor de CO ₂	Medidor de dióxido de carbono, marca AKSO, modelo CO277.	Concentração de CO ₂ (ppm)	Faixa de medição: - 0 a 5.000 ppm Precisão: - ± 5% da leitura ou ± 30 ppm Resolução: 1 ppm	Sensor capacitivo de precisão
Detector multigases	Medidor portátil de HCHO, COVs, MP ₁₀ e MP _{2.5} , marca Igeress	Conc. de formaldeído (mg/m ³) Conc. de COVs (mg/m ³) Conc. de MP ₁₀ (µg/m ³) Conc. de MP _{2.5} (µg/m ³)	Faixa de medição: - HCHO: 0 a 1.999 mg/m ³ - COVs: 0 a 9.999 mg/m ³ - MP 2.5/MP ₁₀ : 0 a 999 µg/ m ³ Resolução: - HCHO: 0.001 mg/m ³ - COVs: 0.001 mg/m ³ - MP 2.5/MP ₁₀ : 1 µg/ m ³	Sensores eletroquímico de formaldeído Sensor a laser de MP 2.5 Sensor de COV
Parâmetros Secundários				
Trena a laser	Trena a laser, marca All-sun, modelo EM60	Distância (m) Área (m ²) Volume (m ³)	Faixa de medição: 0,4 a 12 m Precisão: - ± (0,5% da leitura + 1 dígito) Resolução: 0,01 m	Sensor a laser
Cilindro de CO ₂	Cilindro pressurizado de Dióxido de Carbono (CO ₂), 4,5 kg	-	Regulador de pressão de 0 a 30 psi.	-

Fonte: O Autor, 2023.

Já a medição com as salas desocupadas consistiu primariamente em uma avaliação da taxa de decaimento de CO₂, após uma inserção proposital desse gás no ambiente, em método análogo ao descrito por *Cui et al.* (2015). Assim, inicialmente, as esquadrilhas das salas foram fechadas, equipamentos de climatização desativados e ventiladores ligados. Então, elevou-se a concentração de CO₂ do ambiente com a liberação do gás de um cilindro, preferencialmente até níveis próximos de 2500 ppmv. Em seguida, os dados do monitor de CO₂ começaram a ser

gravados por filmagem; as portas e janelas foram abertas; e o pesquisador saía imediatamente da sala, continuando a gravação até o CO₂ chegar a níveis próximos da concentração externa. Os dados registrados foram então transpostos para uma planilha eletrônica e calculou-se a taxa de renovação do ar através da curva de decaimento de concentração ao longo do tempo. Para tanto, foi feita a linearização dos dados considerado o intervalo delimitado superiormente pela concentração máxima decrescida de 600 ppm e inferiormente pela concentração de 600 ppm ou superior. A definição do ponto inicial do cálculo tem como objetivo evitar o período de transição em que, após a abertura das esquadrias a vazão de ar aumenta, mas ainda não é contínua. Nesse período ocorre o decaimento da concentração de CO₂, mas a curva não apresenta sua característica exponencial. Comportamento análogo sobre a vazão de ar ocorre quando a concentração interna se aproxima da concentração externa.

Ressalta-se que somente foi avaliada a configuração de uso das salas operando apenas com ventilação natural e ventiladores. Essa configuração foi testada primariamente para verificar o tempo necessário para a renovação de todo ar da sala, considerando este um sistema de mistura completa. Esse cálculo é útil na investigação de protocolos de uso dos ambientes em condições de alerta quanto aos riscos de transmissão de infecções respiratórias. Para a caracterização dos espaços climatizados na condição de uso dos condicionadores de ar seria necessária a realização de uma nova rodada de experimentos. No entanto, com a limitação da disponibilidade de gás nos cilindros utilizados, optou-se por priorizar a configuração sem o uso do ar-condicionado, pois essa já seria avaliada no monitoramento das salas durante a ocupação.

5.2 AVALIAÇÃO DA QUALIDADE AMBIENTAL INTERIOR

A avaliação da qualidade ambiental desenvolvida nesse estudo é baseada na abordagem de avaliação dos ambientes construídos por meio de uma análise multicritério, método comumente utilizado nesse tipo de estudo. Para isso, foi executada uma metodologia em duas etapas. A primeira consistiu em uma avaliação preliminar das condições de conforto térmico e qualidade do ar baseada nos parâmetros normativos e da *World Health Organization (WHO)*. Já na segunda, os dados do monitoramento foram compilados e aplicados a equações que resultaram em um índice representativo da qualidade de cada ambiente em termos de conforto térmico e qualidade do ar.

O índice de qualidade ambiental calculado segue uma abordagem de coleta de dados objetiva, onde os resultados são fruto da medição direta dos parâmetros ambientais de referência

com o auxílio de equipamentos, sem aplicação de formulários de satisfação aos usuários. Nesse procedimento, inicialmente, cada critério ambiental é avaliado de modo individual; então todos os resultados são convertidos a uma escala comum (normalização); então é definido um peso atribuído a cada critério a partir da revisão de literatura (ponderação) e o índice final é calculado multiplicando-se os valores normalizados com seus respectivos pesos (agregação). Esse processo é mais bem detalhado nas próximas subseções.

5.2.1 Avaliação do Conforto Térmico

A avaliação do conforto térmico iniciou com uma comparação da temperatura de bulbo seco e da umidade relativa do ar interior em relação às faixas recomendadas pela ABNT (2008) e Abrava (2003) para os dias de verão. Esses resultados são apresentados em forma de gráfico e são confrontados com os dados construtivos e bioclimáticos levantados anteriormente.

Para o cálculo do índice de conforto térmico utilizou-se como base os métodos PMV e PPD, conforme orientações da ANSI/ASHRAE 55 (2020) e da ISO 7730 (2005). Para isso, foi utilizado o método aplicado no monitoramento em tempo real de ambientes climatizados artificialmente (seção 5.3 da norma) para todas as salas de aula. Não foi aplicado o método para condicionamento natural, considerando a impossibilidade operacional de monitorar a temperatura e umidade interna e externa de forma síncrona. Por critérios de otimização da análise, os resultados de campo foram organizados em blocos com as médias de cada 20 minutos, de modo que fosse calculado o PMV e PPD para cada um desses blocos de horário.

A partir dos resultados dos monitoramentos, foram estimados os índices PMV e PPD para todas as salas avaliadas. Para isso a temperatura radiante foi calculada a partir da temperatura de bulbo seco, de bulbo úmido e velocidade do ar, considerando-se uma velocidade do ar de 0,1 m/s, já que essa não foi uma variável mensurável com os equipamentos disponíveis. A temperatura operativa foi calculada a partir da temperatura radiante e temperatura de bulbo seco. Já os índices de PMV e PPD foram estimados através do lançamento dos dados ambientais na ferramenta de análise do conforto térmico do Centro para o Ambiente Construído da *University of Berkeley (CBE THERMAL COMFORT TOOL, 2022)*. Os dados ambientais lançados na ferramenta foram: temperatura operativa, velocidade do ar, umidade relativa, taxa metabólica e isolamento da vestimenta. A taxa metabólica utilizada foi a correspondente à atividade de repouso e posição sentada (1 MET), enquanto o isolamento foi calculado para a

vestimenta mais frequente observada na pesquisa de campo (camisa de manga curta, calça, meia e tênis, adicionando ainda a roupa de baixo) (0,57 CLO).

5.2.2 Avaliação da Qualidade do Ar Interior

A avaliação da qualidade do ar passou pela análise da ventilação, baseada no cálculo da taxa de renovação de ar e pelo monitoramento da concentração de dióxido de carbono, formaldeído e MP 2.5.

A avaliação da ventilação pelo cálculo da renovação de ar é realizada pela comparação entre a ventilação mensurada *in loco* e a taxa de ventilação mínima recomendada pela ANSI/ASHRAE 62.1 (2022). A taxa de renovação de ar medida pelo experimento de decaimento da concentração de CO₂ foi calculada através do método de multipontos apresentado por Cui *et al.* (2015). Já a taxa de ventilação mínima de referência levou em consideração os parâmetros mínimos recomendados pela norma para salas de aula com estudantes acima de 9 anos de idade (5 L/s/pessoa e 0,6 L/s/m²).

O cálculo da ventilação descrita na norma baseou-se em uma aplicação do procedimento de taxa de ventilação descrito na seção 6.2 voltada ao cálculo da vazão de ar mínima de suprimento para a renovação de ambientes fechados. Nesse caso, o procedimento de avaliação da ventilação natural não é utilizado nesse estudo pois o foco desse método é o dimensionamento e disposição de esquadrias no ambiente, menos apropriado para avaliar a ventilação mensurada.

Ressalta-se que esses dados não foram computados no cálculo do índice de qualidade do ar das salas e são utilizados nesse estudo principalmente para calcular o tempo necessário para a renovação total do ar da sala, considerando para isso um sistema de mistura completa.

As concentrações de dióxido de carbono durante o monitoramento das salas ocupadas são comparadas graficamente com a concentração de 1.000 ppm, indicada na versão de 2019 da ANSI/ASHRAE 62.1, observando-se nesse ponto ainda as considerações mais recentes da própria ASHRAE (2022) em relação ao uso da concentração de CO₂ como indicativo da qualidade do ar interior, na qual a Associação traz considerações sobre o uso raso e equivocado do limite de 1.000 ppm como parâmetro absoluto na avaliação da ventilação dos ambientes. As concentrações de formaldeído foram comparadas graficamente ao limite de exposição da WHO (2010) de 0,100 mg/m³ para cada 30 minutos. Já as concentrações de material particulado 2.5

confrontadas com a média anual máxima recomendada de 5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ e de 24 h de 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ das mais recentes diretrizes da WHO (2021d).

A quantificação dos índices de qualidade do ar associados a cada uma das variáveis monitoradas nesse estudo considera concentração média de poluentes durante cada monitoramento, seguindo o procedimento dos artigos utilizados como referência (Mujan *et al.*, 2021; Sun *et al.*, 2022).

5.2.3 Índice de Qualidade ambiental (*IEQindex*)

O índice de qualidade ambiental proposto nesse estudo baseia-se na metodologia utilizada no estudo de Mujan *et al.* (2021), tanto para o conforto térmico (CT), quanto para a qualidade do ar interior (QAI).

No caso do conforto térmico o estudo utiliza um índice baseado na aplicação dos métodos PMV e PPD descritos pela ASHRAE 55 (2020) e ISO 7730 (2005). O método utilizado por Ncube e Riffat (2012), reproduzido nos trabalhos de Mujan *et al.* (2021), calcula o índice de conforto térmico como sendo a equação resultante da diminuição de 100% da porcentagem de pessoas insatisfeitas (5). O índice resultante da aplicação dessa equação já está normalizado com valores possíveis compreendidos entre 0 e 100%.

$$\text{CT} = 100 - \text{PPD}_{\text{CT}} \quad (5)$$

Onde: CT = Índice normalizado de conforto térmico;
PPD_{CT} = Percentual de pessoas insatisfeitas quanto ao conforto térmico;

Analogamente, para a obtenção do índice de qualidade do ar interior (QAI), é proposta uma conversão da porcentagem de pessoas insatisfeitas em relação a cada um dos poluentes avaliados através da equação 6, ao passo em que Mujan *et al.* (2021) avaliam as concentrações de CO₂, COVs totais e MP_{2.5}. De maneira análoga, essa pesquisa avalia CO₂, formaldeído e MP_{2.5}. Assim como foi feito na pesquisa de referência, as equações para cada um desses índices foram construídas seguindo o método proposto por Jokl (2000), que faz uma aplicação do conceito de decibéis, presente na medição da pressão sonora, à qualidade do ar. Essa aplicação considera que, ao converter a escala de concentração mensurada, encaixando os valores possíveis em uma nova escala de referência, o índice de pessoas insatisfeitas com a qualidade do ar assume um comportamento logarítmico. Essa escala pode ser recalculada para diversos gases com o mesmo comportamento dispersivo a partir da aplicação da equação (7).

$$QAI = 100 - PPD_{QAI} \quad (6)$$

$$PPD_{QAI} = a \cdot \log \left(\frac{C_i}{C_0} \right) \quad (7)$$

Onde: QAI = Índice normalizado de Qualidade do Ar Interior;
 PPD_{QAI} = Percentual de pessoas insatisfeitas quanto à Qualidade do Ar Interior;
 C_i = Concentração limite de exposição considerada;
 C_0 = Concentração de fundo/mínima do ambiente;

Nessa equação é calculado o índice de pessoas insatisfeitas para cada um dos gases avaliados, levando-se em consideração a concentração média mensurada do poluente e a concentração mínima de exposição, considerada aqui como a concentração externa. O índice a é calculado substituindo C_i pela concentração de exposição limite delimitada e considerando o índice de pessoas insatisfeitas de 100%. O Quadro 4 apresenta os parâmetros e equações utilizadas nesse estudo para o cálculo da porcentagem de pessoas insatisfeitas para cada critério de qualidade do ar.

O estudo propõe o cálculo do índice de qualidade para CO₂ utilizando três diferentes limites de concentração recomendados: 1.000, 5.000 e 15.000 ppm, caracterizados respectivamente pelos casos ‘a’, ‘b’ e ‘c’. Esses valores limites são respectivamente a concentração máxima recomendada na ANSI/ASHRAE 62.1 (2019), a concentração de início aos efeitos nocivos à saúde pela mesma norma (b) e a concentração indicativa de níveis tóxicos com efeitos como gás asfixiante (US EPA, 2021) (c), e resultam nas equações 8 a 10, respectivamente.

No caso do formaldeído (equação 11) a concentração máxima e o limite inferior foram obtidos de publicação da WHO (2010) nos indicativos de concentração máxima para o tempo de exposição de 30 minutos e concentração externa média. Já para o MP_{2.5}, a equação calculada (12) utilizou o limite de exposição recomendado por Mujan *et al.* (2021) e a menor concentração média obtida nos monitoramentos, considerando para isso que para esse poluente, de maneira geral, a concentração interior é inferior à exterior das edificações.

Quadro 4 – Parâmetros de referência e equações utilizadas no cálculo dos índices de qualidade do ar.

Poluente		Concentração		A	PPD	Equação
		Limite	Exterior			
CO ₂ (ppm)	A	1.000	430	272,82	$272,83 \times \log (C_i/430)$	(8)
	B	5.000	430	98,85	$98,85 \times \log (C_i/430)$	(9)
	C	15.000	430	64,82	$64,82 \times \log (C_i/430)$	(10)
HCHO (mg/m ³)		0,1	0,002	58,86	$58,85 \times \log (C_i/0,002)$	(11)
MP _{2.5} (µg/m ³)		150,4	0,2	34,38	$34,38 \times \log (C_i/0,2)$	(12)

Fonte: O Autor, 2023.

O índice de qualidade ambiental referente a cada sala estudada foi calculado a partir do agregamento dos índices de conforto térmico e qualidade ambiental em uma só equação. Assim, a equação 13 foi elaborada a partir da referência utilizada por Mujan *et al.* (2021) e Ncube e Riffat (2012), considerando para isso apenas as variáveis relativas ao conforto térmico e qualidade do ar interior.

$$IEQ_{index} = (CT \times \alpha) + (QAI \times \beta) \quad (13)$$

Onde: IEQ_{index} = Índice de Qualidade Ambiental geral
 α = Peso atribuído ao critério do Conforto Térmico;
 β = Peso atribuído ao critério da QAI,

O índice normalizado de QAI foi calculado a partir da equação (14), com os índices normalizados e ponderados atribuídos às concentrações médias de CO₂, formaldeído e MP_{2.5}. Os pesos referentes aos critérios de qualidade do ar foram definidos a partir do estudo desenvolvido por Sun *et al.* (2022), estudo esse que investigou a correlação dos níveis de concentração desses poluentes e a incidência de doenças respiratórias e alérgicas em crianças. No presente estudo foram utilizados para a atribuição de pesos apenas os índices relacionados às concentrações de CO₂, MP_{2.5} e formaldeído. Os demais poluentes foram desconsiderados e os pesos dos contaminantes avaliados nessa pesquisa recalculados, resultando nos índices de 0,327; 0,339 e 0,334 para $\beta_{(1)}$, $\beta_{(2)}$, e $\beta_{(3)}$, respectivamente.

$$QAI = (QAI_{(1)} \times \beta_{(1)}) + (QAI_{(2)} \times \beta_{(2)}) + (QAI_{(3)} \times \beta_{(3)}) \quad (14)$$

Onde: $QAI_{(1)}$ = Índice normalizado de QAI devido à concentração de CO₂;
 $QAI_{(2)}$ = Índice normalizado de QAI devido à concentração de formaldeído;
 $QAI_{(3)}$ = Índice normalizado de QAI devido à concentração de MP_{2.5};
 $\beta_{(1)}$ = Peso atribuído à QAI devido à concentração de CO₂;
 $\beta_{(2)}$ = Peso atribuído à QAI devido à concentração de formaldeído;
 $\beta_{(3)}$ = Peso atribuído à QAI devido à concentração de MP_{2.5}.

Em tempo, de maneira análoga ao que foi feito com os pesos do estudo de Sun *et al.* (2022), os pesos atribuídos ao conforto térmico e à qualidade ambiental na equação (13) foram extraídos do estudo de Mujan *et al.* (2021). No estudo que investiga tanto escritórios, quanto ambientes escolares, duas configurações de peso foram obtidas. A primeira considera a média dos resultados obtidos para todos os ambientes estudados, enquanto a segunda é o resultado do

cálculo apenas dos ambientes escolares. A distinção mais evidente dessas duas configurações é que, pela média geral, a QAI é privilegiada em relação ao CT, o que se inverte no segundo caso.

Desconsiderando-se os critérios térmico e lumínico avaliados nesse estudo, os pesos atribuídos para CT e QAI para a média dos ambientes e somente para os ambientes escolares são, $\alpha = 0,45$ e $0,55$, respectivamente, enquanto para a QAI, $\beta = 0,55$ e $0,45$, respectivamente. Ambas as condições foram testadas nesse trabalho.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo foi organizado em etapas distintas, de modo a facilitar o entendimento do leitor. Inicialmente são apresentados os principais aspectos bioclimáticos do local onde o estudo foi desenvolvido. Em seguida são apresentados os principais dados construtivos de cada um dos ambientes avaliados que possam ser significativos nos resultados dos experimentos executados. A seguir, são apresentados os resultados dos monitoramentos ambientais de cada critério de referência, seguido do cálculo dos índices de qualidade individuais e agregados por meio do índice de qualidade ambiental global (*IEQindex*).

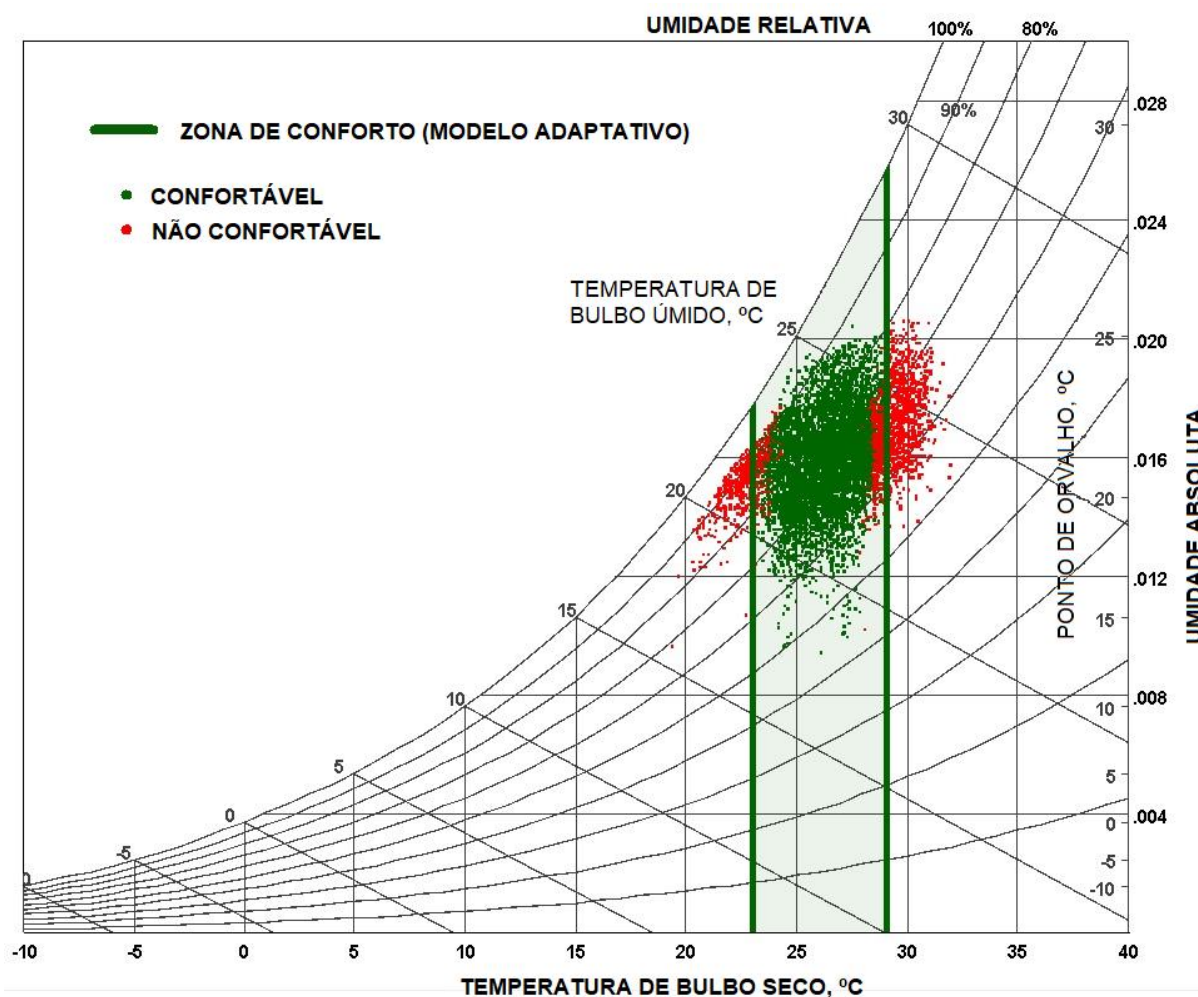
6.1 ASPECTOS BIOCLIMÁTICOS

Considerando o zoneamento bioclimático brasileiro, definido pela NBR 15220-3 (ABNT, 2005), o município de Aracaju está localizado na zona bioclimática 8, cuja principal estratégia de climatização passiva recomendada é a ventilação cruzada permanente. Para edificações localizadas nessa região, a norma recomenda grandes aberturas para ventilação, com o sombreamento desses elementos e o uso de materiais leves na envoltória. A ventilação cruzada permanente é principal estratégia de condicionamento passivo nas edificações dessa zona. No entanto, em alguns períodos do ano, as condições bioclimáticas tendem a atingir a região ‘K’ da carta bioclimática, onde o condicionamento artificial se faz necessário para promover condições adequadas de conforto térmico nas horas mais quentes do dia. Outras recomendações são a desumidificação dos ambientes através da renovação do ar por ventilação e a atenção aos ventos predominantes da região e do entorno.

A carta psicométrica para o município de Aracaju foi ainda construída utilizando-se o software ‘*Climate Consultant 6.0*’ (SBSE, 2021) e os dados climáticos do INMET para o período de 2000 a 2010, compilados por RORIZ (2012) e disponíveis no banco de dados de arquivos climáticos do software *Energy Plus* do *Climate.OneBuilding* (2023).

A Figura 5 indica a plotagem da carta psicométrica sob a ótica do modelo adaptativo, mais permissível quanto às questões ambientais para o conforto térmico. Observa-se que o condicionamento natural poderia promover condições adequadas de conforto térmico, cerca de 77% do ano. No restante do tempo o condicionamento natural não seria capaz de promover conforto térmico ao ambiente, o que corrobora com as observações da NBR 15220-3 para a zona bioclimática 8.

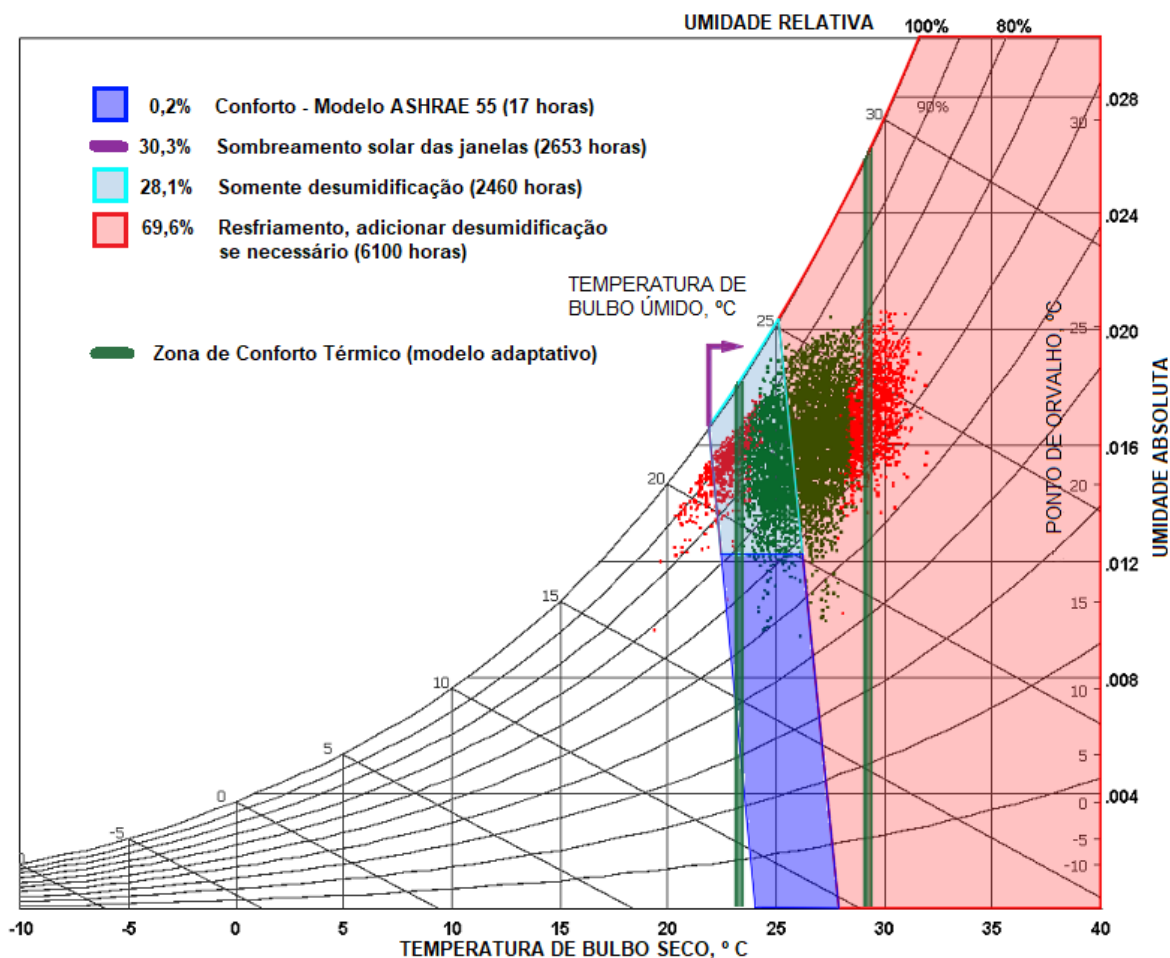
Figura 5 – Carta psicrométrica para o município de Aracaju/SE para ambientes não climatizados.



Fonte: Adaptado do 'Climate Consultant 6.0' (SBSE, 2021), com dados do INMET (2012), compilados pelo Climate.OneBuilding (2023).

Já a Figura 6 apresenta a carta bioclimática considerando a aplicação para ambientes com climatização artificial. Foi feito o ajuste no valor 'default' do índice de vestimenta para a configuração de roupas observada com maior frequência na visita às escolas ($I_{clo} = 0,57$) e a desconsideração das estratégias incapazes de promover condições conforto térmico acima de 2,5% do tempo. Nela, pelo modelo estático da ASHRAE 55 (2020), observa-se que em quase 70% do tempo o conforto térmico somente é atingido com o uso de climatização artificial. A desumidificação é segunda principal estratégia artificial e o sombreamento seria a estratégia de condicionamento natural que poderia auxiliar o CT na mesma região da desumidificação. Nessa condição, a utilização da ventilação natural ou ventilação forçada não são opções viáveis para a promoção do conforto térmico.

Figura 6 – Carta psicrométrica para o município de Aracaju/SE para ambientes climatizados.



Fonte: Adaptado do ‘*Climate Consultant 6.0*’ (SBSE, 2021), com dados do INMET (2012), compilados pelo *Climate.OneBuilding* (2023).

Para as condições apresentadas, o ‘*Climate Consultant*’ apresenta ainda uma listagem de recomendações relacionadas às estratégias bioclimáticas sugeridas, organizadas das mais às menos eficientes, tanto para as salas climatizadas, quanto para as não climatizadas.

Para salas de climatização artificial a primeira indicação é que edificações nesse clima sempre precisarão de ar-condicionado. No entanto estratégias de design podem ser utilizadas para a minimização da carga térmica de origem externa (1). Recomenda-se ainda a utilização de materiais com baixo peso próprio, aberturas operáveis, sombreamento de áreas externas e edificação elevada acima do solo (2); o uso de tetos altos bem como janelas altas e operáveis protegidas por beirais e lajes de cobertura (3); o dimensionamento da projeção de beirais e dispositivos de sombreamento compatíveis com a latitude de localização da edificação, de modo a reduzir a demanda de ar-condicionado (4); e a eliminação ou minimização do uso de

janelas na fachada Oeste, de modo a reduzir ganho térmico devido à ação do sol da tarde, especialmente no verão (5).

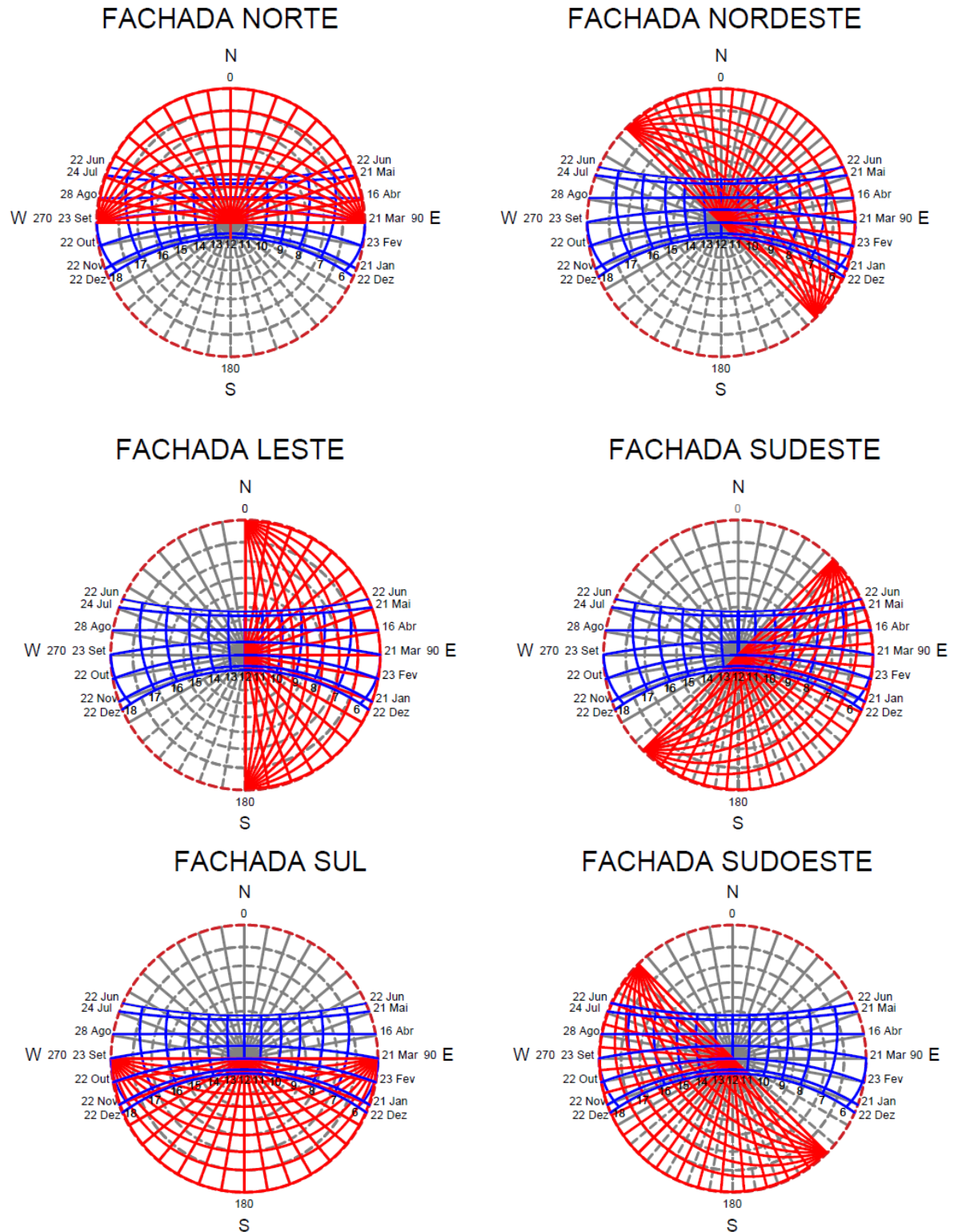
Já para as salas de ventilação natural o foco é a promoção da ventilação. O uso eficiente da ventilação natural é aspecto chave para minimização da demanda de ar-condicionado, considerando para isso um bom uso do sombreamento nas janelas, em especial na adoção de brises (1). Recomenda-se ainda: a orientação das paredes externas de modo a capturar o vento na sua direção predominante, com deflexão de até 45° (2); o alongamento da projeção da área construída da edificação de modo a maximizar os efeitos da ventilação cruzada (3); e o posicionamento das janelas e aberturas em paredes opostas da edificação, com as aberturas de saída da ventilação maiores que as de entrada, quando possível (4).

Essas orientações servem como embasamento para análise dos aspectos construtivos das salas de aula estudadas e para a correlação desses quesitos como os resultados de conforto térmico e qualidade do ar mensurados *'in loco'*.

Nessa linha, um aspecto relevante na análise dos aspectos construtivos, na seção a seguir, é o posicionamento das fachadas em relação à trajetória solar no local onde as unidades educacionais estão localizadas. As Figuras 7a a 7h indicam a máscara solar das diferentes posições de fachadas, desenhadas pelo autor à partir das informações obtidas da carta solar de Aracaju/SE, do software *Analysis SOL-AR* (Laboratório de Eficiência Energética da Universidade Federal de Santa Catarina – LABEEEE/UFSC, 2023). Nas figuras a linha em vermelho indica a área de incidência solar direta de cada fachada de acordo com a trajetória solar horária ao longo do ano.

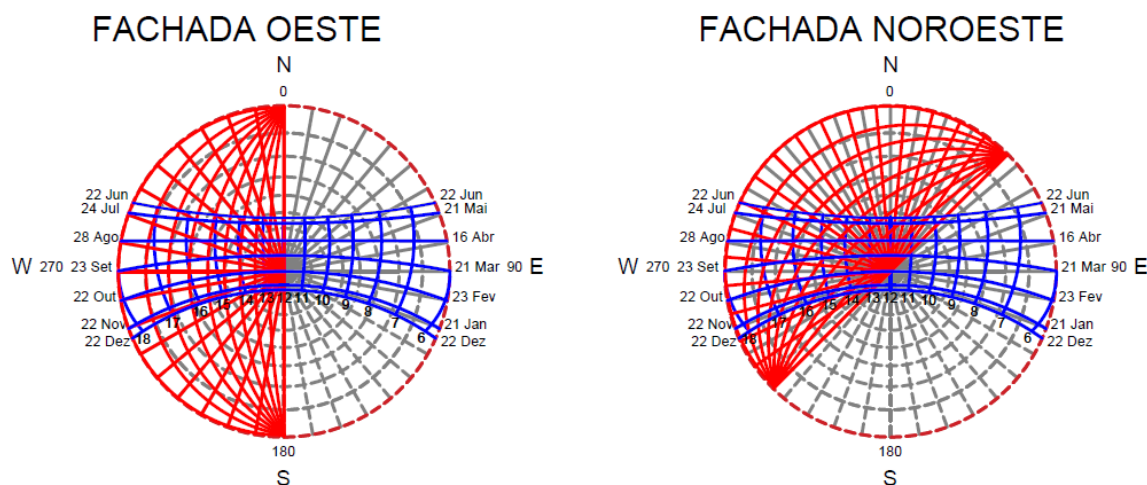
A fachada Norte (Fig. 7a) recebe a ação solar direta tanto pela manhã, quanto pela tarde, no Outono e Inverno. Na Fachada Nordeste (Fig. 7b), a irradiação solar ocorre somente pela manhã durante o verão e se estende até próximo das 14:30 em meados de junho. Alternativamente, a Sudoeste (Fig. 7f) a ação solar ocorre à partir do fim da manhã no verão e somente pela tarde durante o inverno. O sol incide sobre a fachada Leste nas manhãs de Outono e Verão (Fig. 7c) e nas tardes de Inverno e Primavera na Fachada Oeste (Fig. 5g). As fachadas Sudoeste (Fig. 7f) e noroeste (Fig. 7h) recebem a ação solar majoritariamente pela tarde, sendo a faixa de maior duração ocorre em dezembro a Sudoeste e em Junho a Noroeste. Finalmente, a Sul (Fig. 7e) a radiação solar ocorre durante todo o dia, tanto no Verão, quanto na Primavera, correspondente aos meses com maior número de horas de insolação.

Figuras 7a a 7f – Cartas solares para o município de Aracaju/SE, fachadas N, NE, E, SE, S e SW.



Fonte: O Autor, 2023, com base no *Analysis SOL-AR* (LABEEE/UFSC, 2023).

Figuras 7g e 7h – Cartas solares para o município de Aracaju/SE, fachadas W e NW.



Fonte: O Autor, 2023, com base no *Analysis SOL-AR* (LABEEE/UFSC, 2023).

Ainda, considerando que os monitoramentos executados ocorreram medições pontuais (*point in time*) ao longo de agosto de 2022 a janeiro de 2023, se faz necessário situar o contexto das medições em séries anual e/ou séries históricas. Para isso, utilizou-se os dados do INMET como referência. A Tabela 4 indica os índices climatológicos do município de Aracaju de parâmetros relacionados ao vento, à radiação solar e à temperatura externa na série histórica de 1991 a 2020.

Tabela 4 – Índices climatológicos de Aracaju - Série Histórica de 1991 a 2020.

Índices Climatológicos	Meses do Ano (1991 - 2020)											
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Ângulo result. do vento (°)	93,0	94,0	98,0	110,0	125,0	128,0	128,0	123,0	108,0	97,0	93,0	91,0
Direção predominante do vento	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E
Velocidade (m/s)	2,8	2,8	2,6	2,3	2,2	2,2	2,2	2,4	2,7	3,0	3,1	3,1
Insolação Total (horas)	275,5	243,1	255,3	224,2	205,5	179,6	189,7	212,5	238,8	274,1	275,5	287,4
Temp. média do ar (°C)	27,3	27,5	27,7	27,3	26,5	25,6	24,9	24,9	25,4	26,2	26,7	27,1
Temp. máxima do ar (°C)	30,6	30,8	30,9	30,4	29,6	28,6	27,9	27,9	28,4	29,2	29,8	30,2

Fonte: INMET (2022a).

Os dados do INMET, indicam que a direção predominante do vento (sua origem) se mantém durante todo o ano no quadrante Leste, com ângulo variando entre 91 e 128° (E, SE). Essa então é a principal posição recomendada para a instalação de janelas para a tomada de ar externo nos ambientes, de modo a maximizar a taxa de ventilação. Paralelamente, para a

promoção da ventilação cruzada recomenda-se a localização das aberturas de saída do ar nas fachadas opostas e a alturas maiores que permitam a saída do ar mais quente do ambiente por diferença de pressão. No entanto, deve-se observar a área de esquadrias nessa direção e o seu sombreamento, já que essa é também a posição do sol da tarde.

Atenta-se ainda que a insolação solar total é maior no período de outubro a janeiro, conforme destacado na Tabela 4, assim como os maiores índices de temperatura se concentram entre janeiro e abril. As condições térmicas desses períodos críticos, em uma situação ideal, devem guiar o dimensionamento e posicionamento dos elementos da envoltória das salas de aula (janelas, paredes e dispositivo de sombreamento).

6.2 ASPECTOS CONSTRUTIVOS

A avaliação dos aspectos construtivos dos ambientes estudados é estruturada nessa subseção discutindo-se as características de cada ambiente à cada instituição de ensino participantes da amostra analisada. É dado enfoque aos aspectos relacionados às estratégias bioclimáticas recomendadas na seção anterior, tanto em relação ao conforto térmico, quanto à promoção de ventilação para a qualidade do ar. Observou-se a disponibilidade de equipamentos de climatização e ventilação, o posicionamento da edificação e seus elementos construtivos no terreno, dimensões e sombreamento de janelas, edificações do entorno, dentre outros aspectos relevantes. Para isso, foram elaborados uma série de projetos que dão suporte às informações ressaltadas, sendo apresentados em sua integralidade nos apêndices desse trabalho.

Preliminarmente, observa-se que os ambientes estudados foram agrupados entre salas de condicionamento natural (sem condicionadores de ar) e de condicionamento artificial (com condicionadores de ar). Essa disponibilidade de equipamentos de climatização é uma distinção bastante relevante, inclusive considerando que somente a ventilação natural não é suficiente para promover conforto térmico em todo o período do ano, conforme salientado na seção anterior. Isto posto, apresenta-se as Tabelas 5 e 6, que indicam a quantidade e características técnicas dos condicionadores de ar e dos ventiladores de parede, respectivamente, nas salas de aula estudadas.

A partir da Tabela 5, observa-se que há uma proporcionalidade da capacidade dos condicionadores de ar das salas e suas respectivas áreas, se considerados todos os equipamentos de climatização dentro desses ambientes. No entanto, um dos condicionadores da sala 7 e da sala 9 não estava funcionando no dia em que o monitoramento foi realizado. Por esse motivo, estes não foram considerados no cálculo da capacidade instalada.

Levando isso em consideração, a proporção da capacidade instalada em relação à área dos ambientes e a ocupação máxima nos dias avaliados, as salas 8, 10 e 11 são aquelas com maior capacidade de climatização proporcional, enquanto as salas 9 e 16 estão entre as de menores índices.

Tabela 5 – Sumário de dados dos condicionadores de ar.

Sala	Área (m ²)	Ocupação (pessoas)	Condicionadores de Ar					
			Qtde	Capacidade (BTU/h)	Temp. Operação (°C)	Capacidade Instalada* (BTU/h)	<u>Capacidade Área</u> ((BTU/h)/m ²)	<u>Capacidade Ocupação</u> ((BTU/h)/pessoas)
7	48,00	23,00	1	24.000	(desligado)	30.000	625	1.304
			1	30.000	22			
8	48,00	27,00	1	24.000	24	48.000	1.000	1.778
			1	24.000	24			
9	75,25	31,00	1	30.000	*	30.000	399	968
			1	30.000	(desligado)			
10	75,25	24,00	1	30.000	20	60.000	797	2.500
			1	30.000	20			
11	29,75	16,00	1	24.000	23	24.000	807	1.500
12	20,13	17,00	1	18.000	24	18.000	894	1.059
15	36,75	14,00	1	18.000	18	18.000	490	1.286
16	30,48	19,00	1	18.000	21	18.000	591	947

Fonte: O Autor (2023).

Em tempo, a Tabela 6 apresenta dados levantados sobre o uso de ventiladores nos ambientes estudados, incluindo-se a quantidade e o direcionamento do fluxo do ar considerando os pontos cardeais e colaterais. Também é apresentado o posicionamento desses equipamentos em relação à direção predominante do vento (deflexão de até 45°) e às aberturas para tomada de ar, considerando o fluxo da ventilação cruzada, bem como de saída.

Além dos ventiladores instalados nas salas que não possuem condicionadores de ar, também são apresentados os dados dos ventiladores nas salas de climatização artificial. No entanto, durante o monitoramento, para as salas com condicionadores de ar, a ventilação mecânica não foi utilizada.

Quanto às salas de condicionamento natural, os dados da Tabela 6 indicam preliminarmente que as salas 5 e 6 são aquelas com maior número de ventiladores (4 unidades cada), enquanto a 1, 2 e 13 as com menos (2 unidades cada).

Tabela 6 – Sumário de dados dos ventiladores de parede.

Tabela 6 - Sumário de dados dos ventiladores de parede.									
Sala				Ventiladores					
ID	Área (m²)	Qtde	Direcionamento do fluxo de ar	Posicionamento em relação a					
				Dir. Pred. Vento		Abert. p/ tomada de ar		Abert. p/ saída de ar	
				Direção	Sentido	Direção	Sentido	Direção	Sentido
Condicionamento natural									
1	45,53	1	NW	Paralelo	Igual	Perpendicular	NA	Perpendicular	NA
		1	SE	Paralelo	Oposto	Perpendicular	NA	Perpendicular	NA
2	45,53	1	NW	Paralelo	Igual	Perpendicular	NA	Perpendicular	NA
		1	SE	Paralelo	Oposto	Perpendicular	NA	Perpendicular	NA
3	31,13	3	S	Perpendicular	NA	NA	NA	Paralelo	Igual
4	26,88	1	S	Perpendicular	NA	Perpendicular	NA	Paralelo	Igual
		2	N	Perpendicular	NA	Perpendicular	NA	Paralelo	Igual
5	49,20	1	N	Perpendicular	NA	Perpendicular	NA	Perpendicular	NA
		1	S	Perpendicular	NA	Perpendicular	NA	Perpendicular	NA
		1	E	Paralelo	Oposto	Paralelo	Oposto	Paralelo	Oposto
		1	W	Paralelo	Igual	Paralelo	Igual	Paralelo	Igual
		1	N	Perpendicular	NA	Perpendicular	NA	Perpendicular	NA
6	48,30	1	S	Perpendicular	NA	Perpendicular	NA	Perpendicular	NA
		1	E	Paralelo	Oposto	Paralelo	Oposto	Paralelo	Oposto
		1	W	Paralelo	Igual	Paralelo	Igual	Paralelo	Igual
13	31,20	1	NW	Paralelo	Igual	Paralelo	Igual	Paralelo	Igual
		1	NE	Perpendicular	NA	Perpendicular	NA	Perpendicular	NA
14	31,20	1	NW	Paralelo	Igual	Paralelo	Igual	Paralelo	Igual
		1	SW	Perpendicular	NA	Perpendicular	NA	Perpendicular	NA
		1	SE	Paralelo	Oposto	Paralelo	Oposto	Paralelo	Oposto
Condicionamento artificial									
9	75,25	1	N	Perpendicular	NA	NA	NA	Paralelo	Igual
12	20,13	1	NE	Perpendicular	NA	Perpendicular	NA	NA	NA
		1	SW	Perpendicular	NA	Perpendicular	NA	NA	NA
15	36,75	1	SW	Perpendicular	NA	Paralelo	Igual	Perpendicular	Oposto
16	30,48	2	NE	Perpendicular	NA	NA	NA	Perpendicular	Oposto

Fonte: O Autor (2023).

As salas 1, 2, 5, 6, 13 e 14 possuem um ventilador cada posicionado na mesma direção e sentido da direção predominante do vento (NW), o que auxilia na ventilação desses espaços. Em relação à posição comparada às aberturas de tomada de ar externo, somente as salas 5, 6, 13 e 14 possuem ventiladores posicionados na mesma direção e sentido. Em tempo, as salas 1 e 2 são as únicas que não possuem ventiladores voltados na direção de promoção à saída do ar. Os ventiladores posicionados nessas direções mencionadas ajudam a promover a ventilação nesses ambientes para a promoção da renovação do ar interior.

Sobre a ventilação e o ganho térmico devido à ação da radiação solar direta, ressalta-se a importância da verificação das dimensões e direção das janelas nas salas de aula. A Tabela 7

sumariza esses dados. Complementarmente, a Figura 8 apresenta os horários em que cada uma dessas janelas é sombreada ou recebe radiação solar direta nas respectivas datas em que cada monitoramento ambiental foi realizado. Para isso, foram elaboradas máscaras de sombra e cartas solares para cada uma dessas janelas (Apêndice E).

Tabela 7– Sumário de dados das janelas.

Sala	Janela	Qtde	Área	Área Total	<u>Ajan</u> <u>Asala</u>
Condicionamento natural					
1	01.NE.01 01.NE.02	2	2,96	5,92	0,13
	01.SW.01 01.SW.02	2	1,80	3,60	0,08
2	02.NE.01 02.NE.02	2	1,80	3,60	0,08
	02.SW.01 02.SW.02	2	2,96	5,92	0,13
3	03.S.01 03.S.02	2	1,50	3,00	0,10
4	04.N.01	1	1,50	1,50	0,06
	04.E.01	1	1,50	1,50	0,06
5	05.E.01 05.E.02	2	3,22	6,44	0,13
	05.W.01 05.W.02	2	4,35	8,69	0,18
6	06.E.01 06.E.02	2	3,22	6,44	0,13
	06.W.01 06.W.02	2	4,35	8,69	0,18
13	13.NW.01	1	6,84	6,84	0,22
	13.SE.01	1	3,04	3,04	0,10
14	14.NW.01	1	4,77	4,77	0,15
	14.SE.01	1	3,04	3,04	0,10
Condicionamento artificial					
7	07.N.01 07.N.02	2	3,62	7,24	0,15
8	08.S.01 08.S.02	2	3,62	7,24	0,15
9	09.N.01 09.N.02 09.N.03	3	3,60	10,80	0,14
10	10.S.01 10.S.02 10.S.03	3	3,60	10,80	0,14
11	11.NW.01	1	0,48	0,48	0,02
12	12.SE.01	1	3,00	3,00	0,15
15	15.NE.01 15.NE.02	2	3,28	6,55	0,18
	15.NW.01	1	3,45	3,45	0,09
16	16.NW.01	1	3,45	3,45	0,11

Fonte: O Autor (2023).

Da Tabela 7 podemos destacar inicialmente que nenhum dos ambientes estudados atingiu o índice mínimo recomendado de áreas de janelas da NBR 15220- 3:2005 de ao menos 40% da área de piso.

Entre as salas de condicionamento natural, a 13, 5 e 6 são aquelas com maior área proporcional de janelas (0,32, 0,31 e 0,31 respectivamente). Na faixa intermediária estão as salas 14, 1 e 2 (0,25, 0,21 e 0,21), enquanto as de menor área proporcional de janelas são as salas 4 e 3 (0,11 e 0,10).

Figura 8 – Faixas de horário com radiação solar direta ou sombreamento nos dias monitorados.

Sala	Janela	Qtde	Horário													
			6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17		
Condicionamento natural																
1	01.NE.01 01.NE.02	2														
	01.SW.01 01.SW.02	2														
2	02.NE.01 02.NE.02	2														
	02.SW.01 02.SW.02	2														
3	03.S.01 03.S.02	2														
4	04.N.01	1														
	04.E.01	1														
5	05.E.01 05.E.02	2														
	05.W.01 05.W.02	2														
6	06.E.01 06.E.02	2														
	06.W.01 06.W.02	2														
13	13.NW.01	1														
	13.SE.01	1														
14	14.NW.01	1														
	14.SE.01	1														
Condicionamento artificial																
7	07.N.01 07.N.02	2														
8	08.S.01 08.S.02	2														
9	09.N.01 09.N.02 09.N.03	3														
10	10.S.01 10.S.02 10.S.03	3														
11	11.NW.01	1														
12	12.SE.01	1														
15	15.NE.01 15.NE.02	2														
	15.NW.01	1														
16	16.NW.01	1														

Fonte: O Autor (2023).

As salas com maior proporção de janelas posicionadas nas fachadas de maior incidência do sol da tarde (oeste, noroeste e sudoeste) são as 13, 6, 5 e 14 (0,22, 0,18, 0,18 e 0,15, respectivamente). Entre essas a única que recebeu a radiação solar direta na tarde de monitoramento foi a da sala 13, e somente das 12:00 às 13:00. As salas 1 e 2, que também possuem janelas nessa fachada (0,13 e 0,08) recebem ação solar direta das 14:00 às 16:00 e das 16:00 às 17:00, respectivamente.

As salas 3 e 4 possuem janelas voltadas ao Sul e Norte, que recebem a ação solar direta durante todo o dia no outono e inverno, e na primavera e verão, respectivamente. No entanto, ao passo que a janela da sala 3 foi sombreada durante todo o dia, a da sala 4 recebeu a radiação direta em toda a manhã e tarde. O efeito do ganho térmico devido à ação solar, no entanto, deve ser minimizado devido à reduzida proporção da área de janela em relação à área de piso (0,06).

Já em relação às janelas localizadas nas fachadas que recebem a radiação solar direta somente durante a manhã, nas fachadas Leste, Sudeste e Nordeste, as com maior área proporcional de janela são as das salas 1, 5 e 6 (0,13), seguidas das salas 13 e 14 (0,10) e 2 e 4 (0,08 e 0,06). Entre essas as das salas 1, 6 e 5 são também aquelas com maior período de ação direta do sol (7:00 às 12:00 para as salas 1 e 6, e 7:00 às 12:00 para a sala 5). Para as demais salas, a 2 e 14 são ensolaradas das 9:00 às 12:00, enquanto as salas 4 e 13 das 6:00 às 8:00 e das 10:00 às 12:00, respectivamente.

Entre as salas com climatização artificial, a de maior área proporcional de janelas é a sala 15 (0,27). Isso representa aproximadamente o dobro da proporção das salas do grupo intermediário, as 7, 8 e 12, seguidas da 9 e 10, que possuem uma área proporcional de janelas de 0,15 e 0,14, respectivamente. Em contraposição, a sala 11 possui a menor área proporcional de janelas (0,02), seguida da sala 16 (0,11).

Nesse grupo apenas as salas 11, 15 e 16 possuem janelas voltadas às posições de predominância do sol da tarde. No entanto, ao passo que a janela da sala 11 recebe a ação solar direta durante todo esse turno, as das salas 15 e 16 são totalmente sombreadas, inclusive pela manhã.

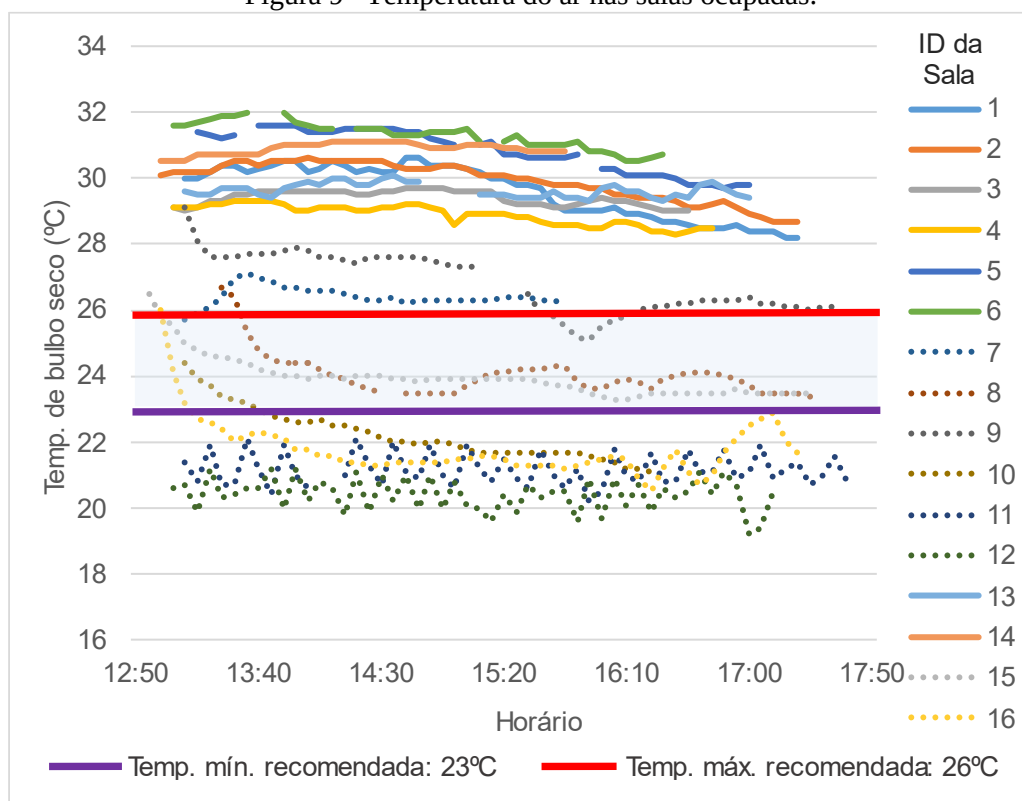
Em tempo, as salas 7 e 9, e 8 e 10 possuem janelas voltadas às posições de ação solar direta durante todo o dia, no outono e inverno, e primavera e verão, respectivamente. No entanto, dentre elas apenas a sala 9 recebe a ação do sol da manhã (6:00 às 11:00) e a 10 do sol da tarde (12:00 às 18:00).

Finalmente, as salas 12 e 15 possuem janelas posicionadas nas fachadas do sol da manhã. No entanto, ao passo que a sala 12 é totalmente sombreada, a sala 15 somente recebe a ação solar direta por duas horas (das 8:00 às 9:00 e das 11:00 às 12:00).

6.3 AVALIAÇÃO DO CONFORTO TÉRMICO

A avaliação do conforto térmico se inicia preliminarmente pela verificação da temperatura do ar (bulbo seco) ao longo do período monitorado. A Figura 9 ilustra essa variação de temperatura dos ambientes monitorados, comparando os resultados com a faixa de valores recomendados pela NBR 16401-2 (ABNT, 2008a) e RN 03 (ABRVA, 2003) para o verão, de 23 a 26°C.

Figura 9 – Temperatura do ar nas salas ocupadas.



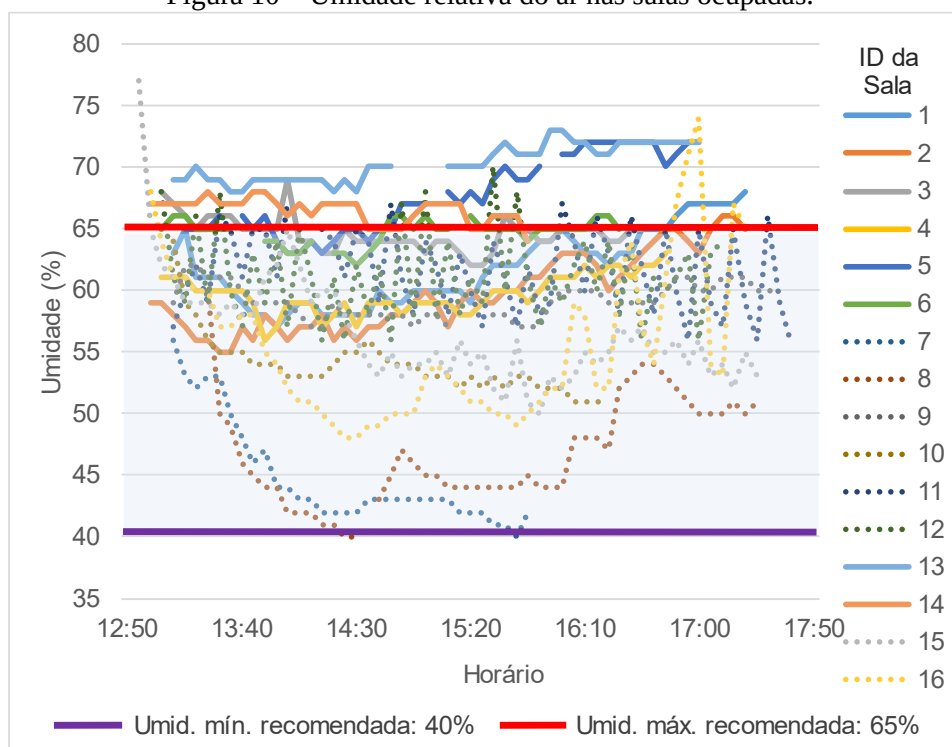
Fonte: O Autor, 2023.

As temperaturas mais altas registradas foram as das salas de ventilação natural, enquanto as menores foram de climatização artificial. De todo o grupo, apenas duas salas (ID 08 e 15) se mantiveram dentro da faixa de temperatura recomendada na maior parte do monitoramento. Ainda houve a situação de duas salas climatizadas (ID 7 e 9) com temperaturas acima da faixa recomendada.

Quando observado o requisito da umidade, ilustrado pela Figura 10, podemos perceber a maioria dos ambientes apresentando índices dentro da faixa recomendada pela NBR 16401-2 (ABNT, 2008a) e RN 03 (ABRAVA, 2003). As salas 5, 13 e 14 foram as únicas com umidade média acima do máximo recomendado de 65%, com a sala 3 ligeiramente dentro da faixa.

Considerando que a avaliação das condições ambientais nesse trabalho foi realizada por medições de curto período em datas distintas, faz-se necessário traçar um comparativo entre as condições ambientais internas e externas em cada dia monitorado. A Tabela 8 apresenta os dados de temperatura de bulbo seco (Tbs) e umidade relativa do ar (UR) do ambiente interior e do exterior. Já a Tabela 9 apresenta outros dados de relevância: radiação solar, velocidade do vento, direção do vento e índice pluviométrico.

Figura 10 – Umidade relativa do ar nas salas ocupadas.



Fonte: O Autor, 2023.

Cabe salientar que durante parte do período em que os experimentos foram executados (24/08/2022 a 02/09/2022), a estação A409 do INMET não apresentou registros de algumas variáveis. Entre as salas de condicionamento natural foi obtido o registro de dados de todos os aspectos ambientais, excetuando-se a umidade relativa exterior das salas 5, 6, 13 e 14. Já para os ambientes de condicionamento artificial o período em que a estação não esteve operando foi correspondente às datas de avaliações das salas 11, 12, 15 e 16. Observa-se ainda que todos os dados ambientais externos apresentados foram obtidos dos registros horários entre às 13:00 às 17:00, equivalente ao turno de monitoramento das salas.

A partir da Tabela 8, observa-se que as maiores médias de temperatura de bulbo seco exterior entre os ambientes de condicionamento natural foram respectivamente as das salas 14, 6 e 5, na faixa de 28 a 29°C. Já os ambientes de menores médias de temperatura exterior são as salas 2, 3 e 4, que variaram na faixa de 26 a 27°C no período avaliado. Em tempo, para as salas 1 e 13 as médias de temperatura externa estiveram na faixa intermediária, de 27,1 e 27,9°C, respectivamente.

Esse agrupamento das salas por faixas de temperatura seguiu lógica similar nos registros de temperatura interna. Assim como nas temperaturas externas, as salas de maior média de temperatura interna foram as ID 6, 14 e 5, respectivamente (faixas de 30 e 31°C). Dentre as

demais, a de maior temperatura interior é a sala 2, seguida das salas 1 e 13 empatadas, sala 3 e finalizando na sala 4.

Tabela 8 – Temperaturas e umidades internas e externas.

Sala	Data	INMET (Estação A409)				Interior		Tex-Tin (°C)	URex-URin (°C)		
		Tbs (°C)		UR (%)		Tbs (°C)				UR (%)	
Condicionamento Natural											
1	19/09/2022		27,1 / 22,8 / 28,6		60 / 52 / 74		29,6 / 28,2 / 30,6		62 / 53 / 74	-2,5	-2,2
2	20/09/2022		26,7 / 23,7 / 28,1		59 / 55 / 74		29,9 / 28,7 / 30,6		60 / 55 / 74	-3,2	-0,6
3	15/09/2022		26,5 / 24,8 / 28,2		64 / 60 / 97		29,4 / 29,0 / 29,7		65 / 60 / 97	-2,9	-1,4
4	16/09/2022		26,6 / 21,7 / 27,9		58 / 54 / 81		28,9 / 28,3 / 29,3		60 / 54 / 81	-2,3	-2
5	06/01/2023		28,3 / 24,8 / 29,7		-		30,8 / 29,7 / 31,6		68 / - / -	-2,5	-
6	09/01/2023		28,5 / 24,7 / 29,7		-		31,3 / 30,5 / 32,0		65 / - / -	-2,8	-
13	19/12/2022		27,9 / 22,8 / 29,2		-		29,6 / 29,3 / 30,1		70 / - / -	-1,7	-
14	11/01/2023		28,7 / 23,5 / 29,8		-		30,9 / 30,5 / 31,1		66 / - / -	-2,2	-
Condicionamento Artificial											
7	05/10/2022		27,2 / 24,9 / 28,9		64 / 50 / 76		26,4 / 25,7 / 27,1		45 / 50 / 76	0,8	19,2
8	26/09/2022		27,6 / 24,9 / 29,4		56 / 49 / 72		24,0 / 23,4 / 26,7		47 / 49 / 72	3,6	8,8
9	22/09/2022		27,1 / 23,5 / 28,7		67 / 61 / 98		26,8 / 25,1 / 29,1		59 / 61 / 98	0,3	7,8
10	20/10/2022		27,1 / 25,2 / 28,7		56 / 51 / 65		22,2 / 21,1 / 24,4		54 / 51 / 65	4,9	2,2
11	01/09/2022		-		-		21,2 / 20,2 / 22,1		62 / - / -	-	-
12	02/09/2022		-		-		20,4 / 19,2 / 21,2		61 / - / -	-	-
15	24/08/2022		-		-		24,0 / 23,3 / 26,5		57 / - / -	-	-
16	26/08/2022		-		-		21,8 / 20,5 / 26,0		56 / - / -	-	-

LEGENDA					
Temperatura de bulbo seco				UR	
Exterior	Cond. Natural	Cond. Artificial			
de 28 a 29°C	de 31 a 32°C	de 26 a 27°C		de 66 a 70%	
de 27 a 28°C	de 30 a 31°C	de 24 a 25°C		de 61 a 65%	
de 26 a 27°C	de 29 a 30°C	de 22 a 23°C		de 56 a 60%	
	de 28 a 29°C	de 21 a 22°C		de 51 a 55%	
		de 20 a 21°C		de 45 a 50%	

Fonte: O Autor, 2023, incluindo dados compilados do INMET (2022 e 2023).

Comparando-se os registros internos e externos, todos os ambientes registraram média de temperaturas internas superior às externas. As salas que indicam um maior ganho de temperatura foram, respectivamente, a 2, 3 e 6. Ao passo que o menor ganho de temperatura ocorreu para a sala 13, seguida das salas 14 e 4.

Já quando observadas as umidades, verifica-se que entre as salas de condicionamento natural não houve uma grande discrepância entre as médias interna e externa, variando de 0,6 a 2,2%. Já para as salas climatizadas o raciocínio não é tão claro, com diferenças entre a umidade interna e externa variando entre 2,2 e 19,2% nos quatro ambientes comparados.

Outras informações relevantes nessa análise são apresentadas na Tabela 9, que indicam as médias de radiação solar, velocidade do vento, direção do vento e índice pluviométrico da área externa nos dias monitorados.

Assim, verifica-se nessa tabela que entre as salas de condicionamento natural os maiores índices de radiação solar aconteceram respectivamente durante os monitoramentos das salas 6, 5, 14 e 13. Ao passo que os menores registros foram os das salas 1, 2, 3 e 4. Esses resultados corroboram com os resultados de temperatura exterior e interior, de modo que os dias com maiores médias de radiação solar tendem a apresentar maiores índices de temperatura exterior e interior, e vice-versa.

Entre as salas de condicionamento artificial há uma maior homogeneidade nas médias de radiação solar, variando em até 165,9 kJ/m² nas estações cujas informações foram registradas. Nesse caso, não foi observada uma associação tão evidente entre a radiação solar e a temperatura externa comparada entre as salas.

Tabela 9 – Radiação solar, velocidade e direção do vento e chuva da estação A409.

Tabela 5 - Radiação solar, velocidade e direção do vento e chuva da Estação A409.							
Sala	Data	INMET (Estação A409)					
		Radiação Solar (kJ/m²)	Vel. vento (m/s)	Dir. vento (°)	Chuva (mm)		
Condicionamento Natural							
1	19/09/2022		1571,3		1,8	134	0
2	20/09/2022		1746,7		3,4	75	0
3	15/09/2022		1806,2		4,2	78	0
4	16/09/2022		1808,2		3,2	78	0
5	06/01/2023		2112,8		4,6	80	0
6	09/01/2023		2127,6		4,1	78	0
13	19/12/2022		2061,0		2,6	72	0
14	11/01/2023		2090,4		5,0	81	0
Condicionamento Artificial							
7	05/10/2022		1665,6		3,8	77	0
8	26/09/2022		1791,7		1,4	117	0
9	22/09/2022		1704,8		4,9	76	0
10	20/10/2022		1831,5		3,3	75	0
11	01/09/2022		-		-	-	-
12	02/09/2022		-		-	-	-
15	24/08/2022		-		-	-	-
16	26/08/2022		-		-	-	-

LEGENDA			
Radiação Solar		Vel. vento	
	de 2.100 a 2.200 kJ/m ²		1 a 2 m/s
	de 2.000 a 2.100 kJ/m ²		2 a 3 m/s
	de 1.800 a 1.900 kJ/m ²		3 a 4 m/s
	de 1.700 a 1.800 kJ/m ²		4 a 5 m/s
	abaixo de 1.700 kJ/m ²		5,0 m/s

Fonte: Adaptado de INMET (2022 e 2023).

Quanto à velocidade do vento, as maiores médias ocorreram para as salas 14, 5, 3 e 6, respectivamente, enquanto os menores valores foram os das salas 1, 13, 4 e 2. Já entre as salas climatizadas, a maior média de velocidade do vento ocorreu no dia de monitoramento da sala 9, ao passo que a menor foi a da sala 8. Esses índices não demonstraram afinidade tão clara com a radiação solar, temperatura e umidade relativa do ar.

A direção do vento para a maioria das salas tendeu a variar próximo dos 80°, se aproximando da direção Leste e corroborando com a série histórica do INMET. As maiores discrepâncias ocorreram nos dias de monitoramento da sala 1, próxima da direção Sudeste (135°) e da sala 8, na tendência entre o Leste e Sudeste, ambos variando nas direções esperadas considerando as normais climatológicas.

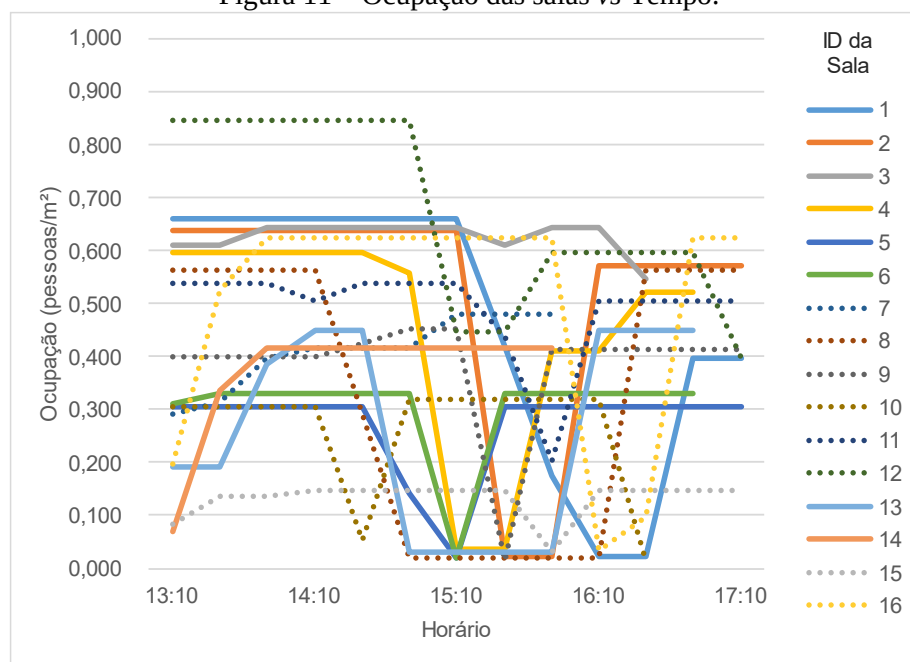
Atenta-se ainda que em nenhum dos dias cujos dados foram coletados ocorreu o evento de chuva, de modo que essa não foi uma variável relevante nas condições térmicas, em especial na umidade relativa do ar.

Além dessas informações, outro aspecto levado em consideração na análise dos resultados foi a taxa de ocupação dos ambientes durante os períodos de monitoramento. Considerando para isso que há o ganho térmico interno devido às trocas de calor dos indivíduos dentro das salas com o próprio ambiente. A Figura 11 apresenta um panorama da ocupação das salas em termos de número de pessoas por metro quadrado de área de piso. A variação dessa ocupação ao longo do tempo se dá principalmente pela ocorrência dos eventos de intervalo/recreio, troca de professores, aulas em outros locais (esportes e educação física) e entrada e saída de alunos por motivos diversos.

Quando observada a ocupação média das salas ao longo do tempo (Figura 11), os resultados não demonstram grande influência percebida na temperatura interior. Nesse ponto, salienta-se que as salas de menor temperatura interior (3 e 4) foram também a de maior ocupação. Já as de menor temperatura (6 e 14) estão também no grupo das de menor taxa de ocupação.

A análise desses dados, no entanto, produz um diagnóstico preliminar da relação entre os aspectos construtivos e de ocupação desses ambientes com a temperatura média dentro dessas salas. Para uma análise mais detalhada desses pontos é recomendável a execução de uma simulação termo energética desses ambientes, conforme indicado na NBR 15575-1:2013 e com software validado pela ASHRAE 140:2020.

Figura 11 – Ocupação das salas vs Tempo.



Fonte: O Autor, 2023.

O cálculo do PMV e PPD através da metodologia descrita na seção anterior foi organizado na Figura 12. Nela, cada quadrado representa as condições de conforto térmico um bloco de horário de 20 minutos, iniciando no bloco 1a, das 13:00 às 13:20, até o bloco 5c, das 17:40 às 18:00. A legenda abaixo da figura indica as faixas de sensação térmica atribuídas a cada bloco em escalas de cores, enquanto a média do índice de conforto de cada sala e a sensação térmica mais frequente são apresentados nas duas últimas colunas, respectivamente.

Observando-se a Figura 12, podemos perceber que das 16 salas, apenas 2 atingiram o índice máximo de desconforto recomendado pela ANSI/ASHRAE (2020) de 90% (8 e 7), ambas de climatização artificial. De modo geral, as salas de climatização artificial possuem melhores condições térmicas que as de condicionamento artificial, conforme ilustrado pelos índices de CT.

A partir da organização de dados da Figura 12 é possível observar ainda a similaridade das condições térmicas dos pares de sala de aula avaliados em cada escola. Exemplificando, os índices de conforto térmico das salas 7 e 8, localizadas no mesmo prédio, são similares, tendência também observada nas demais salas avaliadas nesse estudo.

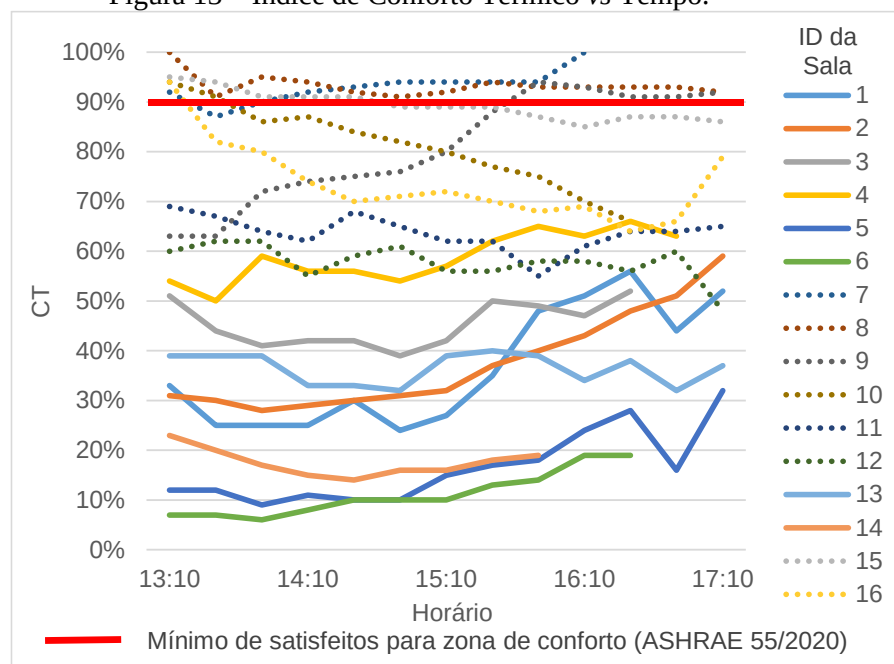
Os dados do PMV e PPD ao longo do tempo foram ainda transformados no índice de conforto térmico proposto por esse trabalho e organizados na Figura 13. Através dela e da comparação com o gráfico apresentado na Figura 11, podemos observar que não há uma relação clara entre o índice de conforto térmico dos ambientes e a variação da ocupação ao longo do tempo.

Figura 12 – PMV e PPD das salas monitoradas.

ID	1			2			3			4			5			Índice CT	Sensação Térmica
	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c		
Condicionamento natural																	
1													*	39%	Quente		
2													*	39%	Quente		
3													*	45%	Quente		
4												*	*	*	59%	Levemente Quente	
5												*	*	16%	Quente		
6										*	*	*	*	11%	Quente		
13											*	*	36%	Quente			
14									*	*	*	*	*	*	18%	Quente	
Condicionamento artificial																	
7									*	*	*	*	*	*	92%	Neutra	
8	*												*	93%	Neutra		
9													*	82%	Levemente Quente		
10										*	*	*	*	82%	Levemente Frio		
11														63%	Levemente Frio		
12												*	*	58%	Levemente Frio		
15													*	89%	Levemente Frio		
16														74%	Levemente Frio		
LEGENDA																	
	>	-3,5	e	≥	-2,5	Muito frio											
	>	-2,5	e	≥	-1,5	Frio											
	>	-1,5	e	≥	-0,5	Pouco frio											
	>	-0,5	e	≥	0,5	Neutro											
	>	0,5	e	≥	1,5	Pouco quente											
	>	1,5	e	≥	2,5	Quente											
	>	2,5	e	≥	3,5	Muito quente											

Fonte: O Autor, 2023.

Figura 13 – Índice de Conforto Térmico vs Tempo.



Fonte: O Autor, 2023.

6.4 AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DO AR INTERIOR

A avaliação da qualidade do ar interior está dividida em duas seções. Na primeira são apresentados os resultados das concentrações de dióxido de carbono (CO_2), formaldeído (HCHO) e material particulado 2.5 ($\text{MP}_{2.5}$) monitoradas no experimento realizado durante a ocupação desses espaços. A variação das concentrações formaldeído e $\text{MP}_{2.5}$ ao longo do tempo são confrontadas com os limites indicados pela WHO (2010 e 2021) e a concentração de CO_2 avaliada sob a ótica da ANSI/ASHRAE 62.1 (2019 e 2022). Esses resultados são a base para a obtenção dos índices de qualidade do ar utilizados no cálculo do índice de qualidade ambiental dos ambientes.

Por sua vez, a segunda seção aborda a ventilação das salas de aula, mensurada no experimento da curva de decaimento da concentração de CO_2 , análogo ao experimento descrito por Cui *et al.* (2015). São calculadas a taxa de renovação do ar (ventilação) e o tempo estimado para renovar o volume total de ar das salas. Apesar de não serem computados no cálculo dos índices de qualidade, esses dados são utilizados para investigar algumas premissas úteis na construção de protocolos de mitigação de riscos de exposição a contaminantes e transmissão de infecções respiratórias. A ANSI/ASHRAE 62.1 (2022) é ainda abordada nessa seção do trabalho na comparação da vazão mínima de ar de projeto, descrita pela norma, com as taxas de renovação do ar calculadas pelos dados do experimento realizado.

6.4.1 Concentração de Poluentes

A avaliação da qualidade do ar interior tem início na variação da concentração de CO_2 , conforme ilustrado na Figura 14. O gráfico ilustra com clareza um cenário de alta estabilidade, próximo da concentração externa para todas as salas com ventilação natural, todas bem abaixo do índice de 1.000 ppm mencionado na ANSI/ASHRAE 62.1 de 2019. O mesmo não ocorre nas salas de climatização artificial, que apresentam tendência de crescimento a partir do momento em que elas são ocupadas e nenhuma se mantém dentro da concentração limite. Os casos críticos são observados nas salas 1 e 2, as quais atingem níveis de concentração próximos de 5.500 ppmv, cerca de 5,5 vezes a concentração máxima recomendável.

Os resultados apresentados na Figura 14 foram utilizados para calcular os índices apresentados na Tabela 10, verificados para as salas equipadas com condicionadores de ar. A taxa de crescimento da concentração interna foi calculada por regressão linear utilizando-se os dados de crescimento das concentrações até o momento em que esse crescimento é interrompido. Ainda, calcula-se o tempo necessário para cada sala atingir as concentrações

limite recomendáveis, de 880 ppm e 1.000 ppm, considerando a taxa de crescimento calculada e a concentração inicial igual à externa.

Figura 14 – Concentração de CO₂ nas salas ocupadas.

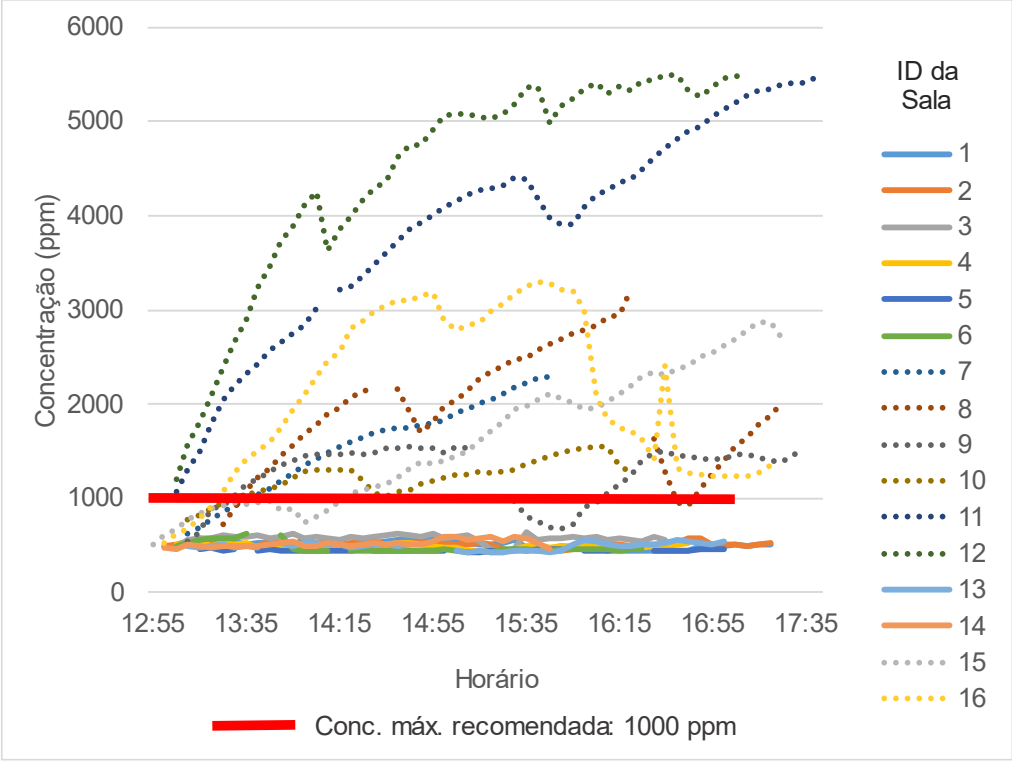


Tabela 10 – Tempo necessário calculado para chegar à concentração máxima definida.

Aspectos Chave	Sala							
	7	8	9	10	11	12	15	16
Tempo (min)	155	65	95	70	140	60	115	115
Diferença de concentração (ppm)	1656	1488	1010	528	3344	3055	1240	2664
Taxa de crescimento (ppm/min)	10,68	22,89	10,63	7,54	23,89	50,92	10,78	23,17
Tempo até 800 ppm (min)	35	16	35	49	15	7	34	16
Tempo até 1.000 ppm (min)	53	25	54	76	24	11	53	25

Fonte: O Autor, 2023.

Os dados da Tabela 10 ilustram que, para uma concentração máxima recomendada de 800 ppm, nenhuma das salas seria capaz de manter esse índice abaixo do limite por ao menos 50 minutos, duração média de uma aula na maioria das escolas estudadas. Nesse caso, a sala 10 aproxima-se dessa meta com 49 minutos. A situação mais crítica é a da sala 12, que chega ao limite em apenas 7 minutos. Já quando o limite é estendido para 1.000 ppm, 4 salas atingem ao menos 50 minutos, com destaque pra sala 10, que permanece abaixo do valor por 76 minutos. Esses dados são um indicativo que em situações de preocupação com a mitigação de risco de

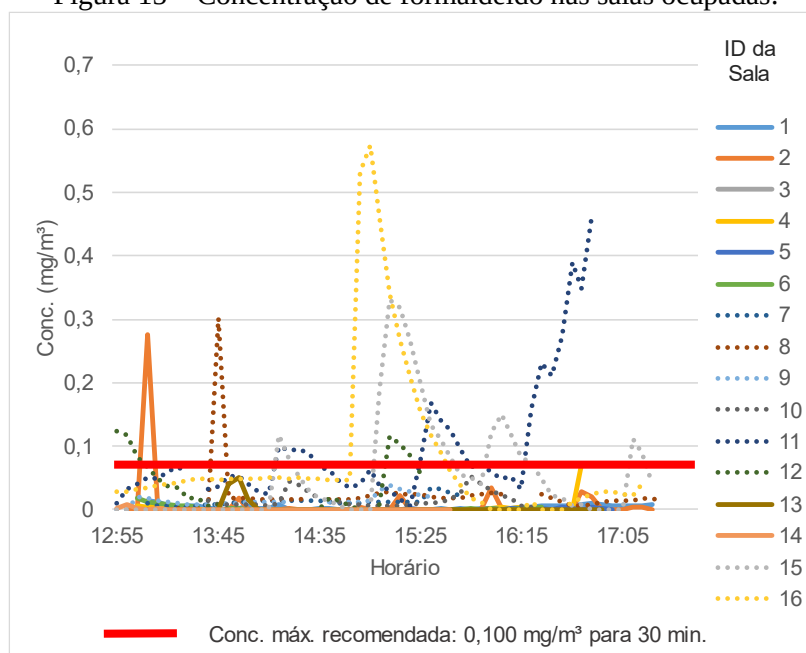
transmissão de infecções respiratórias, ao menos metade das salas de climatização artificial não seria capaz de se manter abaixo do limite recomendado por ao menos uma aula. Para as que são capazes de manter os níveis baixos por maior tempo, a adoção de um protocolo de abertura de esquadrias e acionamento de ventiladores em ciclos de renovação do ar à cada aula seria uma possibilidade capaz de manter o ciclo de renovação do ar a níveis mais próximos do recomendado.

A Figura 15 ilustra a variação da concentração de formaldeído nos ambientes estudados. Na maior parte do tempo todas as salas apresentaram níveis de concentração abaixo do limite recomendado. A concentração de todas as salas de ventilação natural teve concentração média próximo de 0 mg/m³, enquanto para as salas de climatização artificial a média das concentrações variou de 0,011 a 0,093 mg/m³, sendo os valores mais altos os das salas 11, 16 e 15, respectivamente, seguidos das salas 8 e 12. Houve picos de concentração acima do recomendado nos registros das salas 2, 8, 11, 12, 15 e 16. Desses ambientes o único de ventilação natural é a sala 2, enquanto os outros são condicionados artificialmente.

O aumento considerável nas concentrações das salas 2, 11, 12, 15 e 16 foram associados a eventos específicos observados nas salas durante os monitoramentos. Na sala 2 a concentração se eleva abruptamente quando a professora aplica um produto de limpeza no birô, decaindo também de maneira rápida, de modo que o evento só foi observado no registro das 13:10. A rápida redução na concentração do poluente pode ser resultado da ventilação das salas que operam sem climatização artificial, como é dado indício nas baixas concentrações de CO₂ desse tipo de sala, ilustrada na Figura 14.

Já os picos de concentração das salas 15 e 16 ocorrem durante o lanche dos alunos, que ocorreu dentro das salas de aula, como uma prática realizada após o início do contexto de pandemia da COVID-19. Nesse caso, os próprios alimentos consumidos pelos alunos são as prováveis fontes naturais do poluente, o que ocorre com algumas frutas e vegetais, carne, produtos lácteos, café e refrigerante. Enquanto na sala 15 a concentração permaneceu acima do recomendado por cerca de 40 minutos, 20 minutos após o fim do recreio, na sala 16 o tempo de exposição foi de 35 minutos, ambos acima do recomendado pela WHO (2010) A sala 16 ainda atingiu no seu pico uma concentração equivalente a quase seis vezes o máximo recomendado.

Figura 15 – Concentração de formaldeído nas salas ocupadas.



Fonte: O Autor, 2023.

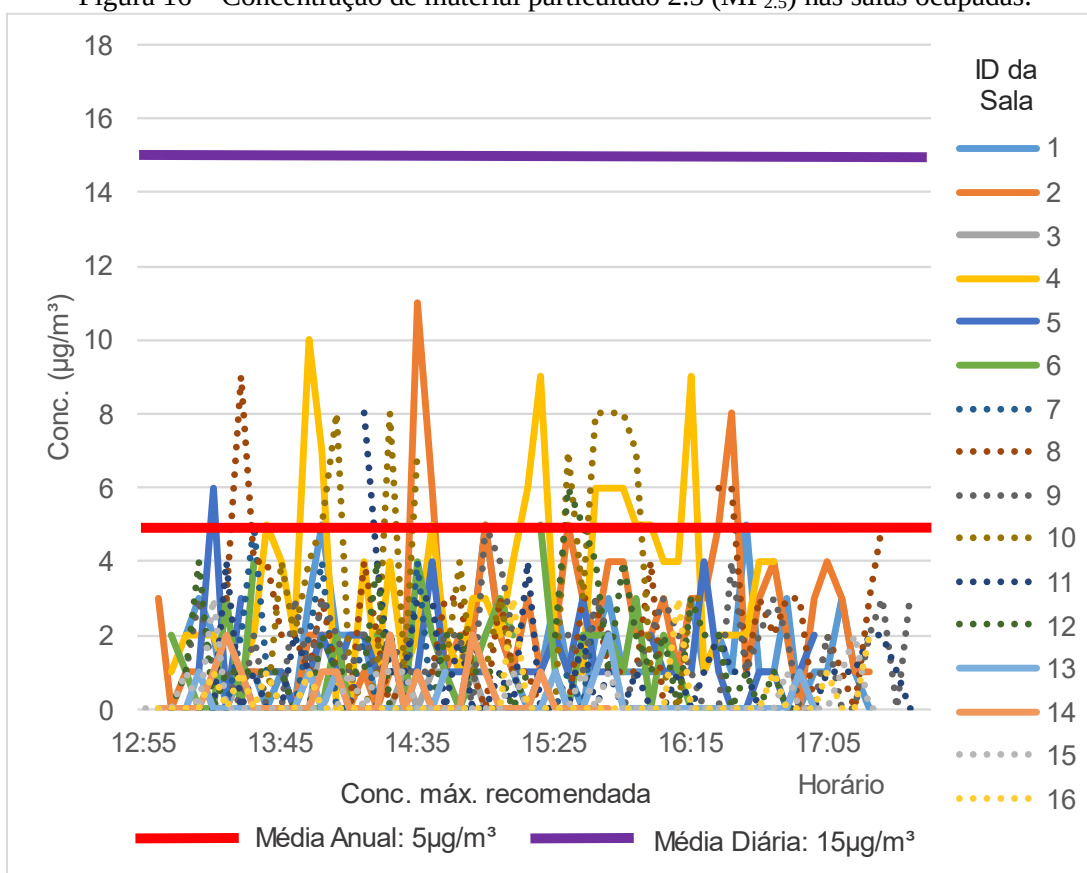
No caso das salas 11 e 12 os eventos de aumento ocorreram após a entrada de pessoas nesses ambientes. Enquanto na sala 12 isso ocorre no início da aula e na entrada de alunos durante o intervalo, na sala 11 isso foi observado duas vezes na entrada da professora na sala. Ainda foi verificado um aumento expressivo na concentração nos últimos 50 minutos de aula, onde não foi observado qualquer movimento atípico que justificasse o comportamento. Nesse último momento a concentração interna esteve acima do recomendado por um período equivalente a quase ao dobro do tempo de exposição máximo indicado pela WHO (2010), com concentrações chegando a quase 5 vezes da concentração máxima.

Cabe salientar que foi feita uma inspeção visual em todas as salas, observando-se possíveis fontes fixas de formaldeído emitidas pelos móveis e materiais de construção. No caso dos materiais de construção as únicas possíveis fontes relevantes observadas vieram de esquadrias de madeira de algumas salas. Já quanto aos móveis, as possíveis fontes mais evidentes foram os tampos das mesas dos alunos em MDP observados nas salas 1, 5, 6, 7, 8 e 10. Também foi observado o uso de MDP em outros móveis em proporção de quantidade muito menor, como em mesas de professores, quadros escolares em resina melamínica e na madeira compensada exposta em algumas cadeiras de auditório de uma das salas. O possível efeito da emissão de formaldeído pelo MDP das mesas dos alunos, no entanto, não se mostrou proeminente em nenhuma dessas salas.

Já os resultados do monitoramento da concentração de $MP_{2.5}$ são ilustrados na Figura 16. Nela é possível perceber uma alta variabilidade das concentrações mensuradas ao longo dos períodos de monitoramento, o que ocorreu tanto para salas de ventilação natural, quanto as de condicionamento artificial. Ao passo em que em nenhuma sala houve o registro de concentrações acima do limite diário indicado pela WHO (2021d) de $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$, sete salas apresentaram valores de pico acima da média anual recomendada, sendo que nenhuma apresentou média acima desse valor. O grupo das salas com maiores concentração de pico e maiores médias é composto pelas salas 2, 4, 8 e 10, sendo essas duas primeiras salas de condicionamento natural e as duas últimas condicionamento artificial.

Durante o monitoramento não foi observada qualquer atividade que pudesse ser fonte de níveis preocupantes de material particulado dentro das salas. Já a fonte externa mais provável para esse estudo é o material particulado produzido pelos veículos. No entanto a correlação das concentrações mensuradas de $MP_{2.5}$ com possíveis fontes não foi identificada com clareza nesse estudo.

Figura 16 – Concentração de material particulado 2.5 ($MP_{2.5}$) nas salas ocupadas.

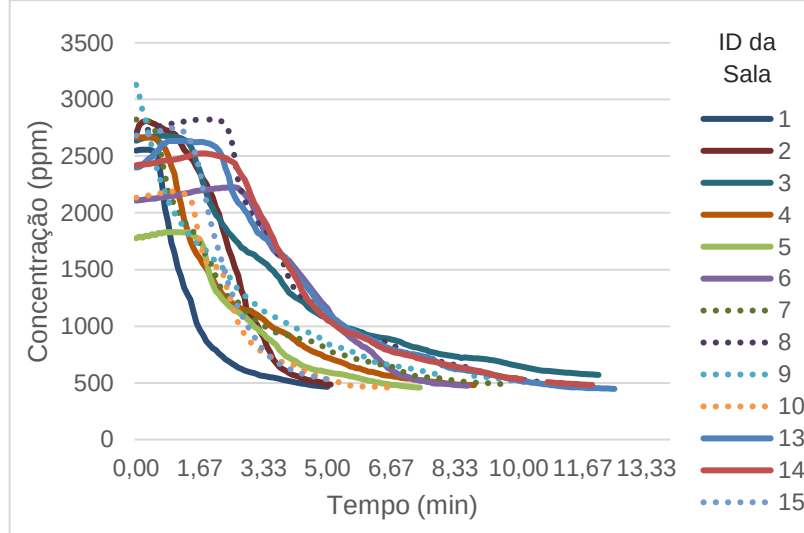


Fonte: O Autor, 2023.

6.4.2 Ventilação

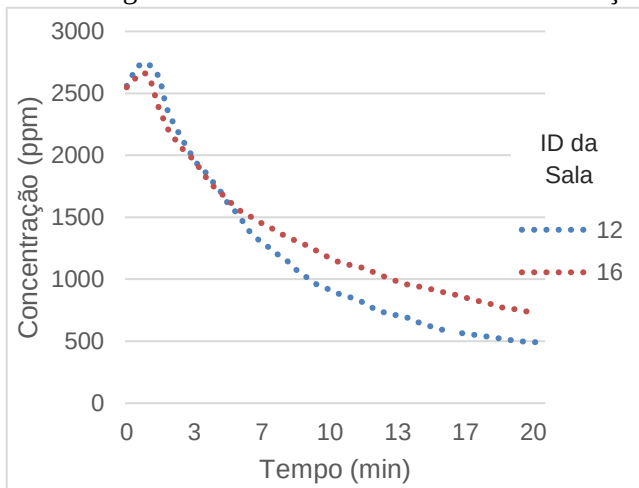
A ventilação, ou taxa de renovação do ar, foi um parâmetro calculado através do experimento de decaimento da concentração de dióxido de carbono (CO_2), em partes por milhão (ppm), baseado no método descrito por Cui *et al.* (2015). As Figuras 17, 18 e 19 ilustram a variação da concentração de CO_2 no período monitorado. Cabe ressaltar que como todo o registro de dados foi baseado na captura de vídeo efetuada sem o pesquisador estar dentro da sala, não há a contribuição adicional do CO_2 produzido pela respiração de uma pessoa, que teria de ser uma variável adicional a ser analisada nos resultados. Ainda, ressalta-se que configuração de início do registro de dados dos experimentos das salas avaliadas foi de esquadrias abertas, ventiladores ligados e sistema de climatização desligado.

Figura 17 – Decaimento da concentração de CO_2 nas salas monitoradas, exceto salas 11, 12 e 16.

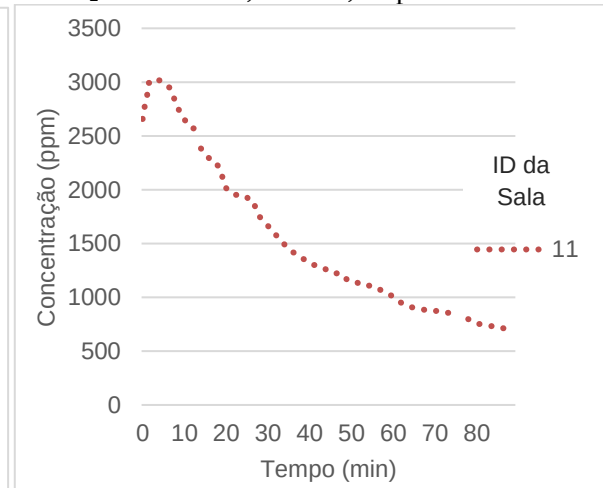


Fonte: O Autor, 2023.

Figuras 18 e 19 – Decaimento da concentração de CO_2 nas salas 12, 16 e 11, respectivamente.



Fonte: O Autor, 2023.



Fonte: O Autor, 2023.

O primeiro aspecto a ser observado na comparação das Figuras 17 a 19 é que as salas 11, 12 e 16 são as que levam maior tempo para reduzir a alta concentração de CO₂ a níveis próximos da concentração externa, com 80, 20 e 20 minutos respectivamente. Tempo esse consideravelmente superior ao tempo das demais salas, indicativo de piores índices de ventilação.

Os dados apresentados nas Figuras 17 a 19 foram utilizados para o cálculo das taxas de renovação do ar de cada uma das salas estudadas. Esses dados são apresentados aqui através das Tabelas 11 e 12, que representam os resultados dos experimentos das salas com e sem climatização artificial, respectivamente. Para comparação com os índices de referência normativos, são apresentadas as taxas de renovação do ar mínima calculadas pela multiplicação da área e do número de pessoas do ambiente pelos índices de ventilação demandada recomendados pela ANSI/ASHRAE 62.1. Além disso, calcula-se o tempo em minutos para a renovação de todo o ar de cada um dos ambientes, considerando por toda essa metodologia se dar em um sistema de mistura completa. Dessa faixa de dados avaliada também foi calculado o coeficiente de correlação de Pearson, R², como indicativo da qualidade da regressão realizada para cada caso.

Tabela 11 – Taxas de ventilação mensurada e de projeto das salas condicionadas naturalmente.

Parâmetro	Sala							
	1	2	3	4	5	6	13	14
Área (m ²)	45,53	45,53	31,13	26,88	49,2	48,3	31,2	31,2
Ocupação	30	29	20	16	15	16	14	13
Capacidade	40	30	30	26	42	29	24	22
Ventilação mínima (ASHRAE 62.1) (l/s)	Ocup	177,32	172,32	118,68	96,13	104,52	108,98	88,72
	Cap.	227,32	177,32	168,68	146,13	239,52	173,98	138,72
Ventilação Mensurada (l/s)	2322,82	2561,94	310,95	468,70	1979,69	1856,59	659,85	635,24
R ²	0,994	0,971	0,991	0,993	0,986	0,976	0,995	0,985
Tempo de renovação do ar (min)	0,95	0,86	4,17	2,39	1,53	1,60	2,63	2,73

Fonte: O Autor, 2023.

Esses resultados são melhor entendidos se confrontados com a área de aberturas em relação à posição predominante do vento. Assim, propõe-se a comparação com a área das esquadrias que podem ser abertas (área operável), calculadas baseando-se nas condições observadas durante o experimento (Tabela 13). Ressaltando-se nesse caso que a área das portas foi adicionada nos cálculos quando estas estiveram na posição perpendicular ao vento (direta

ou oposta), auxiliando na promoção da ventilação cruzada. Também foram considerados os combogós das salas 13 e 14. Esquadrias de correr tiveram área operável de 50% da área total, similar ao que foi considerado aos combogós, portas de 100% da área total, enquanto os basculantes foram analisados um a um.

Tabela 12 – Taxas de ventilação mensurada e de projeto das salas condicionadas artificialmente.

Parâmetro	Sala							
	7	8	9	10	11	12	15	16
Área (m ²)	48,00	48,00	75,25	75,25	29,75	20,13	36,75	30,48
Ocupação	23	27	31	24	16	17	14	19
Capacidade	29	41	75	30	25	18	21	20
Ventilação mínima (ASHRAE 62.1) (l/s)	Ocup	143,80	163,80	200,15	165,15	97,85	97,0801	92,05
	Cap.	173,80	233,80	420,15	195,15	142,85	102,08	127,05
Ventilação Mensurada (l/s)		906,37	989,55	1307,11	2883,55	659,85	635,24	1453,19
R ²		0,989	0,985	0,996	0,971	0,992	0,998	0,991
Tempo de renovação do ar (min)		3,03	2,77	2,84	1,29	12,77	5,68	1,10

Fonte: O Autor, 2023.

Os dados apresentados na Tabela 13 indicam as salas 1 e 2 com esquadrias com área operável na posição perpendicular direta e oposta à direção predominante do vento, favorável à ventilação cruzada. Essas, por sua vez, são as salas com maiores taxas de ventilação e menor tempo para renovação do ar. Já as salas 5 e 6 estão no segundo grupo das salas com melhor ventilação. Apesar da posição predominante do vento estar mais próxima da direção paralela às janelas, o fato de serem as salas com maior área de esquadrias, a grande extensão dessas, junto a esquadrias posicionadas em paredes opostas, são fatores que propiciam condições para ventilação cruzada. Em especial, considerando que esses ambientes são aqueles que possuem o maior número de ventiladores entre as salas estudadas, com um em cada direção. A sala 15, que completa o grupo, possui similaridades em relação às salas 1 e 2, considerando que uma das janelas recebe a ação direta do vento, enquanto as outras laterais possibilitam a ventilação cruzada.

Por outro lado, as salas 16 e 11, que são aquelas com piores índices de ventilação, somente possuem janelas com área operável em posições que não recebem ação direta do vento, fator esse que se repete na sala 12, a terceira com os piores índices de ventilação. Já as salas 3

e 7, que estão a seguir no grupo dos ambientes com menor renovação de ar, possuem janelas com área operável apenas na posição perpendicular oposta à posição predominante do vento.

Tabela 13 - Área operável das esquadrias.

ID	Área das Esquadrias								
	Total (m ²)	Operável (m ²)	Aop/Asala (m ² /m ²)	Operável (m ²)	Aop/Asala (m ² /m ²)	Operável (m ²)	Aop/Asala (m ² /m ²)	Operável (m ²)	Aop/Asala (m ² /m ²)
		a	b	c	d				
1	11,20	3,95	0,087	3,48	0,076	0,00	0,000	0,00	0,000
2	11,20	3,48	0,076	3,95	0,087	0,00	0,000	0,00	0,000
3	3,00	0,00	0,000	0	0,000	3,00	0,096	0,00	0,000
4	3,00	1,50	0,056	0	0,000	1,50	0,056	0,00	0,000
5	16,32	0,00	0,000	0	0,000	3,22	0,065	4,82	0,098
6	16,32	0,00	0,000	0	0,000	4,83	0,100	6,28	0,130
7	7,24	0,00	0,000	0	0,000	7,24	0,151	0,00	0,000
8	7,24	0,00	0,000	0	0,000	7,24	0,151	0,00	0,000
9	10,80	0,00	0,000	0	0,000	7,56	0,100	0,00	0,000
10	10,80	0,00	0,000	0	0,000	7,56	0,100	0,00	0,000
11	0,48	0,00	0,000	0	0,000	0,00	0,000	0,00	0,000
12	3,00	0,00	0,000	0	0,000	0,00	0,000	1,20	0,060
13	11,56	1,52	0,049	5,10	0,163	0,00	0,000	0,00	0,000
14	8,05	1,52	0,049	3,35	0,107	0,00	0,000	0,00	0,000
15	12,85	3,30	0,090	1,70	0,046	0,00	0,000	1,45	0,039
16	6,30	0,00	0,000	0	0,000	0,00	0,000	1,45	0,048

Fonte: O Autor, 2023.

¹ posição em relação à direção do vento: a – perpendicular direto; b – perpendicular oposta; c – paralelo; d – não sofre ação direta.

Os resultados apresentados nas tabelas anteriores foram compilados e reapresentados na Tabela 14, com a finalidade de reunir parâmetros para a elaboração da Tabela 15. Esta, por sua vez, é um protocolo orientativo simplificado demonstrando como os resultados desses experimentos podem ser utilizados para a definição da duração e quantidade seguida de aulas. Também é apresentado o intervalo mínimo recomendado entre uma aula e outra, para que esquadrias sejam abertas e ventiladores acionados, de modo a executar a total renovação do ar do ambiente e minimizar o risco de transmissão de doenças nessas salas de aula. Os parâmetros calculados na Tabela 14 são ainda analisados sobre duas abordagens: a primeira é mais conservadora, com uma concentração limite interna de 800 ppm [a] e a segunda, menos conservadora, de 1.000 ppm [b].

A Tabela 15 ilustra a análise dos dados considerando uma duração estimada por aula de 30 e 50 minutos. No cenário conservador [a], somente as salas 7, 9, 10 e 15 seriam capazes de

receber uma aula de 30 minutos por vez sob condições apropriadas, em um evento excepcional de redução da duração de aulas. Quando o período é estendido para 50 minutos, apenas a sala 10 atende aos parâmetros, considerando ainda que o tempo limite estimado (49 min) é suficientemente próximo da duração da aula.

Tabela 14 – Parâmetros utilizados elaboração do protocolo de uso das salas de aula com vistas à QAI.

ID	Área (m ²)	Ocupação avaliada (pessoas)	Densidade (pessoas/m ²)	Capacidade Instalada (pessoas)	Tempo estimado (min)		
					Concentração limite (ppm)		Renovação total do ar
					[a] 800	[b] 1.000	
7	48,00	23	0,479	29	35	53	3
8	48,00	27	0,563	41	16	25	3
9	75,25	31	0,412	75	35	54	3
10	75,25	24	0,319	30	49	76	1
11	29,75	16	0,538	25	15	24	13
12	20,13	17	0,845	18	7	11	6
15	36,75	14	0,381	21	34	53	1
16	30,48	19	0,623	20	16	25	11

Fonte: O Autor, 2023.

Tabela 15 – Protocolo simplificado visando a renovação do ar para a promoção da QAI.

ID	Protocolo simplificado de renovação do ar				
	Número de aulas seguidas				Intervalo mínimo recomendado (min)
	30 min.	50 min.	30 min.	50 min.	
	[a]		[b]		
7	1	na	1	1	5
8	na	na	na	na	5
9	1	na	1	1	5
10	1	1*	2	1	5
11	na	na	na	na	15
12	na	na	na	na	10
15	1	na	1	1	5
16	na	na	na	na	15

Fonte: O Autor, 2023.

Já no cenário menos conservador [b], as salas 7, 9 e 15 seriam capazes de receber uma aula de 30 ou 50 minutos por vez. Já a sala 10 poderia ter duas aulas de 30 minutos ou uma de 50 minutos. As salas 8, 11, 12 e 16 não atendem aos critérios de duração de aula avaliados em nenhum dos cenários e, portanto, precisariam implementar uma estratégia adicional para incrementar a ventilação desses ambientes ou reavaliar esses ambientes com um número menor de ocupantes.

Na Tabela 15 ressalta-se ainda que para todas as salas avaliadas que atendem ao menos uma das condições de operação propostas (7, 9, 10 e 15), recomenda-se que o acionamento da capacidade total ventilação aconteça por ao menos 5 minutos. Ademais, as salas 11 e 16 são aquelas que precisam de um intervalo maior de tempo para a renovação total do ar, sendo recomendado os 15 minutos.

6.5 ÍNDICE DE QUALIDADE AMBIENTAL INTERIOR - *IEQindex*

O índice de qualidade ambiental interior (*IEQindex*) de cada sala foi calculado a partir dos índices de qualidade normalizados para cada um dos critérios ambientais avaliados. Seguindo-se a metodologia descrita, inicialmente foi executado o cálculo do índice de qualidade de cada critério analisado individualmente. A Tabela 16 apresenta os resultados dos índices de qualidade do ar calculados para cada poluente, bem como o índice geral da qualidade do ar ponderado de acordo com os pesos indicados na metodologia da pesquisa. O índice relativo à concentração de CO₂ foi calculado para três limites de concentração considerados (1.000; 5.000 e 15.000 ppm) e a sua variação entre a amostra de salas analisada é ilustrada na Figura 20.

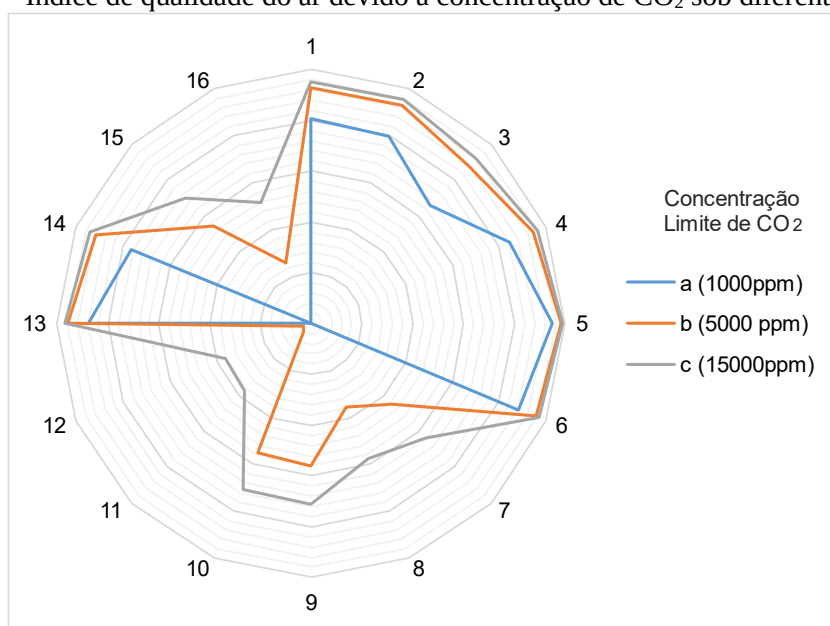
Tabela 16 – Índice de qualidade do ar geral e específico de cada poluente.

ID	QAI ₍₁₎ [CO ₂]			QAI ₍₂₎ [HCHO]	QAI ₍₃₎ [MP _{2,5}]	QAI GERAL
	a	b	C			
1	0,805	0,929	0,954	0,882	0,702	0,837
2	0,801	0,928	0,953	0,639	0,631	0,731
3	0,658	0,876	0,919	1,000	0,929	0,936
4	0,842	0,943	0,963	0,989	0,580	0,837
5	0,948	0,981	0,988	1,000	0,701	0,894
6	0,882	0,957	0,972	1,000	0,715	0,891
7	0,000	0,448	0,638	0,532	0,780	0,587
8	0,000	0,357	0,578	0,377	0,648	0,461
9	0,000	0,563	0,713	0,555	0,688	0,602
10	0,000	0,553	0,707	0,476	0,588	0,539
11	0,000	0,044	0,373	0,019	0,748	0,271
12	0,000	0,034	0,366	0,406	0,704	0,384
13	0,878	0,956	0,971	0,924	0,947	0,942
14	0,767	0,915	0,945	1,000	0,894	0,937
15	0,000	0,545	0,702	0,129	0,919	0,529
16	0,000	0,261	0,515	0,043	0,987	0,429

Fonte: O Autor, 2023.

A distribuição dos resultados dos índices relacionados à concentração de CO₂ (Figura 20) ilustra o caso ‘a’ como aquele com os menores valores, crescendo em ‘b’ e ‘c’, respectivamente. As salas de ventilação natural (1 a 6, 13 e 14) apresentaram índices variando entre 65,8 e 94,8%, no caso ‘a’ enquanto para o caso ‘b’ a variação foi de 87,6 a 98,1% e para o ‘c’ de 91,9 a 98,8%. Já para as salas de climatização artificial a variação foi de 3,4 a 56,3% no caso ‘b’ e de 36,6 a 71,3%. Na simulação dos ambientes climatizados utilizando a equação do caso ‘a’ todas as salas obtiveram índices iguais a ‘zero’, considerando para isso que todas as concentrações médias mensuradas foram acima de 1.000 ppm.

Figura 20 – Índice de qualidade do ar devido à concentração de CO₂ sob diferentes cenários.



Fonte: O Autor, 2023.

Os resultados dos índices de qualidade devido à concentração de CO₂ demonstram inicialmente que o limite superior utilizado no caso ‘a’ é inadequado para avaliar a qualidade dos ambientes climatizados estudados. Já para avaliar qual dos casos entre o ‘b’ e o ‘c’ é o mais apropriado, foi feito o cálculo da concentração média para um índice de qualidade de 80%, porcentagem mínima ideal utilizada no caso do conforto térmico (ANSI/ASHRAE, 2020), cuja metodologia de análise é análoga. Para os casos ‘b’ e ‘c’ os resultados são respectivamente 685 e 875 ppm. Ambos estão abaixo da concentração limite mencionada pela ANSI/ASHRAE 62.1 (1.000 ppm) e estão compreendidos na faixa de concentração típica mencionada pela norma (300 a 500 ppm acima da concentração externa). Assim, para esse estudo foi considerada a equação mais conservadora entre as duas que satisfazem às condições avaliadas, de modo que

o caso ‘b’ foi o selecionado para ser computado no índice de qualidade do ar apresentado na Tabela 16, seguindo a aplicação dos pesos apresentados na seção de metodologia.

A Tabela 17, por sua vez, apresenta os índices de qualidade referentes ao conforto térmico (CT), qualidade do ar (QAI) e qualidade ambiental geral dos ambientes (*IEQindex*). Os casos ‘c’ e ‘d’ ilustram os resultados obtidos após a atribuição do pesos de 0,45 e 0,55, respectivamente, para o CT, e 0,55 e 0,45 para QAI. Ao lado do índice resultante de cada caso é apresentada também a ordem de classificação da sala, considerando os maiores índices os primeiros colocados e os menores os últimos. Ainda são apresentadas as Figuras 21 e 22 com o objetivo de facilitar a visualização dos dados e a comparação dos resultados.

Tabela 17 – Índices de CT, QAI e qualidade ambiental global calculados.

ID	CT	QAI	IEQ			
			d		e	
			Índice	Ordem	Índice	Ordem
1	0,388	0,837	0,635	9	0,590	10
2	0,394	0,731	0,579	11	0,545	11
3	0,454	0,936	0,719	3	0,671	7
4	0,588	0,837	0,725	2	0,700	5
5	0,165	0,894	0,566	13	0,493	13
6	0,112	0,891	0,540	14	0,462	16
7	0,922	0,587	0,738	1	0,771	1
8	0,927	0,461	0,671	7	0,717	4
9	0,818	0,602	0,699	4	0,721	3
10	0,811	0,539	0,661	8	0,688	6
11	0,635	0,271	0,434	16	0,471	15
12	0,578	0,384	0,471	15	0,490	14
13	0,365	0,942	0,682	6	0,624	8
14	0,176	0,937	0,594	10	0,518	12
15	0,891	0,529	0,692	5	0,728	2
16	0,738	0,429	0,568	12	0,599	9

Fonte: O Autor, 2023.

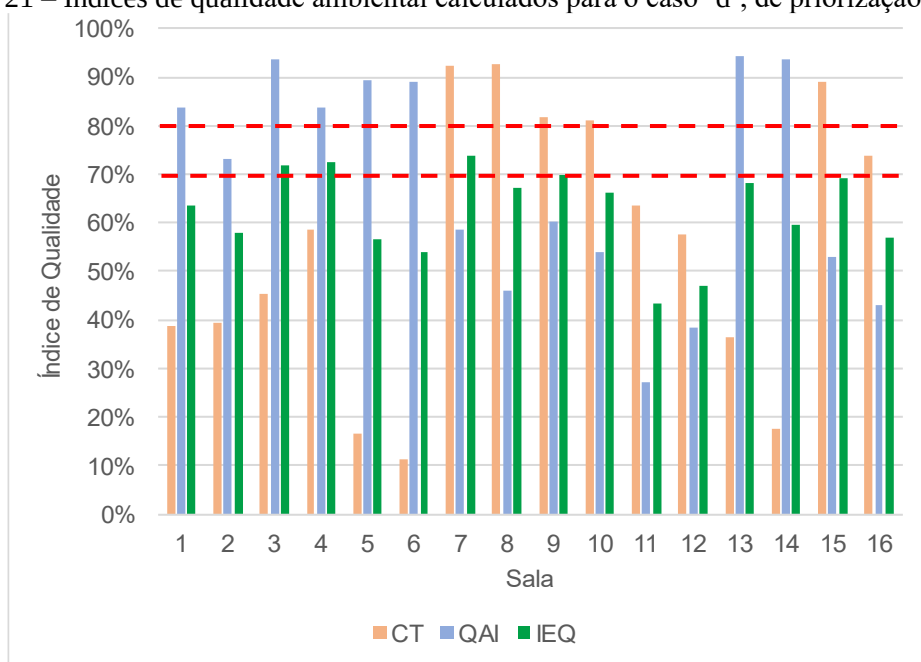
Para o caso ‘d’ os resultados apontam que nenhuma sala foi capaz de apresentar índices de satisfação global (*IEQindex*) acima dos 80%, com as salas 3, 4 e 7 ligeiramente acima do índice de 70%. Ainda, nenhuma sala atingiu esse nível em todos os critérios avaliados, sendo as salas 4, 7 e 9 aquelas que apresentaram os maiores índices mínimos de cada um dos três critérios, chegando próximo de 60% no critério mais mal avaliado desses ambientes (QAI). Essas são seguidas das salas 10 e 15, que possuem QAI próxima dos 55%.

Já os piores índices de satisfação global foram os apresentados pelas salas 11 e 12, resultado principalmente dessas apresentarem os piores índices de QAI do estudo. Chama a

atenção também os baixíssimos índices de conforto térmico das salas 5, 6 e 14 (16, 11 e 14%), que contribuem negativamente para a qualidade ambiental global.

No caso ‘e’ podemos observar que mais uma vez nenhuma sala foi capaz de atingir níveis de qualidade ambiental de 80%, sendo que apenas as salas 7, 8, 9 e 15 atingiram níveis de 70%. Essas, por sua vez, não foram capazes de atingir os mesmos níveis de qualidade do ar, variando de 46,1 a 60,2%. Quando observados os menores índices de cada sala, ordenando-os do maior para o menor, o comportamento se assemelha ao caso ‘d’, com as salas 4, 7 e 9 se destacando com os melhores índices, seguidos das salas 10 e 15.

Figura 21 – Índices de qualidade ambiental calculados para o caso ‘d’, de priorização da QAI.

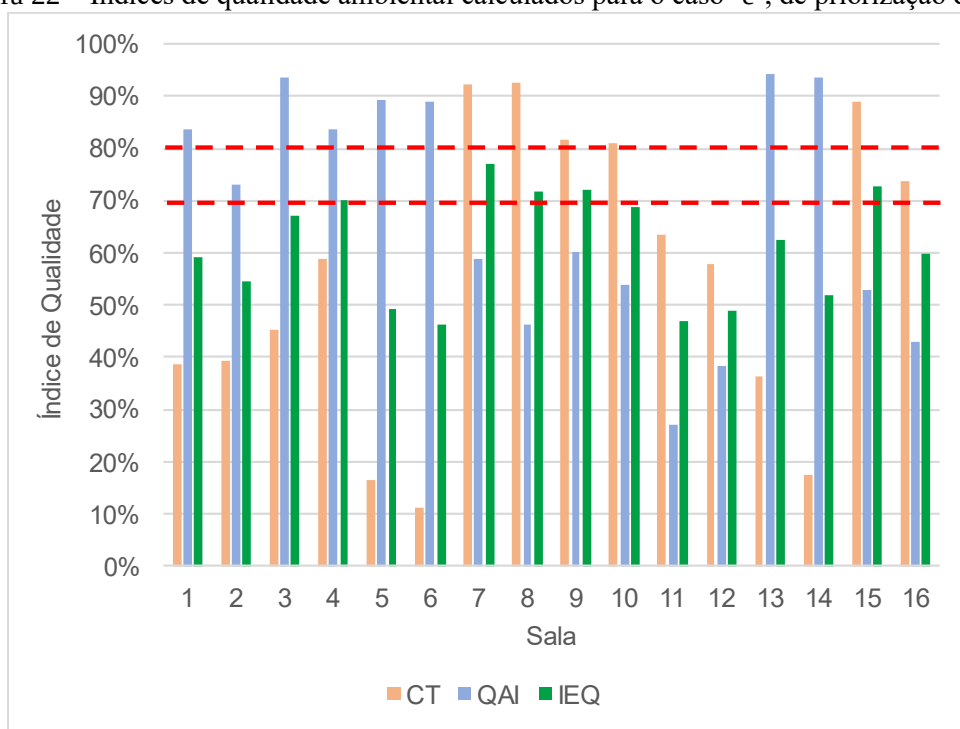


Fonte: O Autor, 2023.

Quanto aos piores índices de qualidade global, esses são apresentados pelas salas 5, 6, 11 e 12 (variando de 46 a 49%). Enquanto a redução do índice para as salas 5 e 6 foi motivada principalmente pelo conforto térmico, para as salas 11 e 12 isso ocorreu devido à qualidade do ar, de 27 e 38%, os menores entre as salas estudadas.

Analisando-se os resultados dos dois casos em conjunto, podemos apontar as salas 4, 7 e 9 como aquelas com melhor equilíbrio entre a qualidade ambiental geral e a de conforto térmico e qualidade do ar. Em ambas as situações os índices de qualidade se aproximam ou superam os 60% nos três critérios avaliados. Essas são seguidas das salas 10 e 15, tanto no caso ‘c’, quanto no caso ‘d’, com todos os índices próximos de 55%.

Figura 22 – Índices de qualidade ambiental calculados para o caso ‘e’, de priorização do CT.



Fonte: O Autor, 2023.

Já o destaque negativo é das salas 5, 6, 11 e 12, que estiveram no grupo dos menores índices globais em ambos os casos. Enquanto nas salas 5 e 6 isso é motivado principalmente pelo conforto térmico, nas salas 11 e 12 a insatisfação acontece tanto para o CT, quanto para a QAI. Em um segundo momento, cabe ressaltar as condições da sala 14, que também possui níveis bastante baixos de conforto térmico (18%), o que reduz a qualidade global, principalmente no caso ‘e’.

Assim, em uma aplicação do método proposto na avaliação de ambientes para selecionar aqueles que demandam maior nível de demanda de intervenção física para melhoria de qualidade, a sugestão seria priorizar as salas 5, 6, 11 e 12. Enquanto as salas 5 e 6 demandam enfoque em melhorias nas condições de conforto térmico, as salas 11 e 12 chamam a atenção nos dois quesitos, mas em especial a qualidade do ar interior.

7. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O método proposto de avaliação da qualidade ambiental global de salas de aula demonstrou uma considerável discrepância nas condições de conforto térmico e de qualidade do ar dos ambientes monitorados. Enquanto os ambientes com ventilação natural apresentaram condições favoráveis de QAI e desfavoráveis de CT, a tendência oposta ocorreu para os ambientes de climatização artificial.

Quanto ao conforto térmico, os resultados apontaram que a ventilação natural, por si só, não foi suficiente para proporcionar condições de conforto aceitáveis em nenhuma das salas estudadas. Esse é um efeito relativamente esperado, considerando que a NBR 15220-3 (2008) menciona o condicionamento natural, mesmo com a adoção das estratégias recomendadas, não é capaz de promover conforto térmico durante todo o tempo. Já entre as salas de climatização artificial, os índices foram consideravelmente melhores, levando-se em consideração ainda alguns ambientes com CT pouco mais frio ou quente do que as condições recomendadas. Esses resultados ressaltaram a importância da climatização artificial como estratégia para proporcionar conforto térmico aos ambientes, mas apontando a necessidade de observação ao dimensionamento adequado desses equipamentos para cada ambiente.

Por outro lado, as melhores condições de qualidade do ar ocorreram nas salas de ventilação natural, em detrimento dos ambientes com climatização artificial. Nelas, a troca de ar constante, mantida com as esquadrias abertas durante toda a ocupação, resultou nos melhores índices, influenciando ainda na rápida diluição de contaminantes quando observados eventos geradores dentro desses espaços. Já as salas com climatização artificial se mantiveram com esquadrias fechadas nos monitoramentos durante as aulas, dependendo primariamente dos equipamentos de climatização para a troca de ar. Há indícios que esse fator contribuiu negativamente nos resultados obtidos para esse critério, de modo que as concentrações monitoradas chegaram a índices equivalentes a cinco vezes e meia o valor máximo recomendado de 1.000 ppm.

A concentração de formaldeído e material particulado se manteve baixa na maior parte do monitoramento, o que é indicativo do número reduzido de fontes internas e externas para ambos os fatores. A maioria dos móveis das salas e materiais de construção são constituídos de materiais que não emitem formaldeído, de modo que a incidência desse contaminante no estudo foi mais atribuída a eventos diversos, como a aplicação de materiais de limpeza na higienização de móveis e lanche ocorrendo dentro de sala de aula. Já a concentração de material particulado, característica do processo de combustão em veículos, se manteve baixa em todas as salas em

relação aos limites de exposição de curta duração, o que é indicativo da distância desses locais para vias de grande tráfego nos horários avaliados e da não existências de fontes internas relevantes.

Os altos valores de taxa de renovação de ar, mensurados nos ambientes desocupados e com portas e janelas abertas, apontam para a possibilidade de associar ciclos de renovação do ar interior durante a operação das salas, de modo a melhorar as condições de QAI, em especial quando há algum risco de transmissão de infecções respiratórias. Essa estratégia, no entanto, não é aplicável a todos os casos, já que parte dos ambientes apresentam um crescimento na concentração de CO₂ tão rápido que inviabilizaria a implementação de ciclos de renovação do ar para reduzir as concentrações internas a níveis recomendados.

Quanto ao modelo de avaliação da qualidade ambiental interior (*IEQindex*) aplicado, foi observada uma convergência nos resultados obtidos das condições testadas, de priorização da qualidade do ar ou do conforto térmico. Como resultado, houve pouca variabilidade na listagem das salas que necessitam maior e menor atenção quanto na demanda de melhorias entre os dois casos avaliados, o que se mostra um aspecto importante de modo a reduzir as incertezas no processo de tomada de decisão. Assim, o principal objetivo proposto por esse trabalho foi alcançado.

Esses resultados, no entanto, não desfazem a observação que falta na literatura científica um *'framework'* padrão bem estabelecido que oriente o desenvolvimento desse tipo de pesquisa de modo mais abrangente e uniforme. Nesse ponto, as principais dificuldades dizem respeito ao estabelecimento dos pesos atribuídos a cada critério, em especial em estudos com maior número de salas amostradas, onde a aplicação de formulários aos usuários pode ser um processo extremamente massificante e pouco conclusivo. Também está aberta a discussão sobre o uso do dióxido de carbono como parâmetro da qualidade da ventilação do ambiente construído, considerando para isso um uso superficial dos parâmetros recomendados pela ASHRAE no diagnóstico apontado por diversas pesquisas, fator esse mencionado, inclusive, por documentação recente da própria Associação (ASHRAE, 2022b).

Ressalta-se ainda que as dificuldades operacionais, principalmente em termos de instrumentação, constituíram o agente que mais contribuiu para que uma análise de longo prazo não pudesse ser desenvolvida. Essa é uma limitação do trabalho que não desqualifica os resultados, considerando que a análise de curta duração executada levou em consideração as condições climáticas locais em cada dia de monitoramento. Desse modo, os resultados do diagnóstico nas condições dos dias de monitoramento devem ser analisados considerando as variações das condições climáticas características ao longo do ano. Mesmo com as limitações,

os resultados obtidos demonstraram com clareza aspectos observados na revisão de literatura executada, além de estabelecer parâmetros quantitativos que apontam para a ampliação do conhecimento sobre o assunto.

O aperfeiçoamento e aplicação mais abrangente da metodologia proposta pode abrir espaço para aplicações futuras diversas. O gestor de uma instituição de ensino em que todas as suas salas são avaliadas sob esse escopo poderá identificar as salas com condições mais desfavoráveis e priorizar investimentos de melhoria nesses espaços, reduzindo a subjetividade na tomada de decisão. De maneira análoga, tomadores de decisão, gestores governamentais e redes de ensino podem aplicar a metodologia proposta para avaliar diversos ambientes educacionais e definir condições mínimas de qualidade para o uso desses espaços. Na possibilidade da aplicação do método proposto em estudos com maior número de amostras, há ainda a possibilidade de construir um banco de dados dessas condições ambientais (*benchmarking*), possibilitando a fundamentação de diretrizes de políticas públicas para a promoção da qualidade ambiental de ambientes escolares. O banco de dados dentro do escopo de uma política pública permitiria, por exemplo, o acompanhamento da progressão (ou regressão) da qualidade ambiental desses ambientes ao longo do tempo e estabelecer parâmetros para o uso de fundos de investimento voltados à melhoria da qualidade do ambiente escolar.

Para pesquisas posteriores, sugere-se a realização de estudos avaliando: as condições ambientais de salas em períodos do ano e turno diversos; a composição com outros aspectos ambientais relevantes, como a iluminação, acústica e consumo energético; a influência da alteração de aspectos construtivos e de uso e operação das salas na condições de qualidade ambiental interior aferida; a simulação da eficiência de estratégias de melhorias das condições térmicas e de QAI; a avaliação e cálculo da taxa de ventilação durante a operação dos equipamentos de climatização; a proposição de sistemas auxiliares de renovação do ar, revendo a operação dos equipamentos de ar condicionado de parede e split; e a ampliação do número de unidades avaliadas nesse estudo, de modo a elaborar um banco de dados útil para o desenvolvimento de outras pesquisas nessa linha.

REFERÊNCIAS

2D SUN-PATH. Disponível em: <<http://andrewmarsh.com/software/sunpath3d-web/>>. Acesso em 19 jan. 2023.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16401-2:2008 - Instalações de ar-condicionados - Sistemas centrais e unitários. Parte 2: Parâmetros de conforto térmico.** Rio de Janeiro, 2018a.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16401-3:2008 - Instalações de ar-condicionados - Sistemas centrais e unitários. Parte 3: Qualidade do ar interior.** Rio de Janeiro, 2018b.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220-3:2005 - Desempenho térmico de edificações. Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social.** Rio de Janeiro, 2005.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575-1:2013 - Edificações habitacionais — Desempenho. Parte 1: Requisitos gerais.** Rio de Janeiro, 2013.

ABRVA - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE REFRIGERAÇÃO, AR CONDICIONADO, VENTILAÇÃO E AQUECIMENTO. **Recomendação Normativa RN 03 - 2003. Sistemas de condicionamento de ar para conforto:** Parâmetros de conforto térmico. 2003

AIANO, F., MENSAH, A. A., MCOWAT, K., OBI, C., VUSIRIKALA, A., POWELL, A. A., FLOOD, J., BOSOWSKI, J., LETLEY, L., JONES, S. AMIN-CHOWDHURY, Z. LACY, J., HAYDEN, I., ISMAIL, S. A., RAMSAY, M. E., LADHANI, S. N., SALIBA, V. COVID-19 outbreaks following full reopening of primary and secondary schools in England: Cross-sectional national surveillance.. **The Lancet Regional Health – Europe**, v. 6, 100120, ISSN 2666-7762, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.lanepe.2021.100120>.

ALLEN, J. G., MACNAUGHTON, P., SATISH, U., SANTANAM, S., VALLARINO, J., SPENGLER, J. D. Associations of Cognitive Function Scores with Carbon Dioxide, Ventilation, and Volatile Organic Compound Exposures in Office Workers: A Controlled Exposure Study of Green and Conventional Office Environments. **Environ Health Perspect.** v. 124(6), p. 805-812, 2016. doi: 10.1289/ehp.1510037.

ALONSO, A., LLANOS, J., ESCADÓN, R., SENDRA, J. J. Effects of the COVID-19 Pandemic on Indoor Air Quality and Thermal Comfort of Primary Schools in Winter in a Mediterranean Climate, March 2021. **Sustainability**, v. 13(5), 2699, ISSN 2071-1050, 2021. <https://doi.org/10.3390/su13052699>

ANDRADE, M. D. **Introdução à metodologia do trabalho científico: elaboração de trabalhos na graduação.** 9.ed. São Paulo: Atlas, 2009

ANSI/ASHRAE - AMERICAN NATIONAL STANDARD INSTITUTE / AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS - ANSI/ASHRAE Standard 62.1 - 2022. **Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality.** Atlanta, 2022a.

ANSI/ASHRAE - AMERICAN NATIONAL STANDARD INSTITUTE / AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS -

ANSI/ASHRAE Standard 62.1 - 2019. **Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality**. Atlanta, 2019.

ANSI/ASHRAE - AMERICAN NATIONAL STANDARD INSTITUTE / AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS - ANSI/ASHRAE Standard 55-2020. **Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy**. Atlanta, 2020.

ANSI/ASHRAE - AMERICAN NATIONAL STANDARD INSTITUTE / AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS - ANSI/ASHRAE Standard 55-2005. **Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy**. Atlanta, 2005.

ATKINSON, J., CHARTIER, Y., SILVA, C. L. P., JENSEN, P., LI, Y., SETO, W. H. Natural Ventilation for Infection Control in Health-Care Settings. **WHO Guidelines Approved by the Guidelines Review Committee**. Geneva: World Health Organization, 2009.

ASHRAE/USGBC/CIBSE - AMERICAN NATIONAL STANDARD INSTITUTE / AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS / US GREEN BUILDING COUNCIL / CHARTERED INSTITUTION OF BUILDING SERVICES ENGINEERS. **Performance Measurement Protocols for Commercial Buildings**. Atlanta, 2010.

ASHRAE - AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. **ASHRAE Position Document on Indoor Carbon Dioxide**. Georgia, 2022b.

BRASIL. Ministério da Saúde. Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA). **Resolução RE/ANVISA nº 9, de 16 de janeiro de 2003**. Brasília, 2003.

BRASIL. Ministério da Saúde. Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA). **Resolução RE/ANVISA nº 176, de 24 de outubro de 2000**. Brasília, 2000.

BRINK, H. W., LOOMANS, M. G. L. C., MOBACH, M. P., KORT, H. S. M. Classrooms' indoor environmental conditions affecting the academic achievement of students and teachers in higher education: A systematic literature review, **Indoor Air**, v. 31(2), p. 405-425, 2021 <https://doi.org/10.1111/ina.12745>.

CBE THERMAL COMFOT TOOL. Disponível em: <<https://comfort.cbe.berkeley.edu/>>, consultado em 01/11/2022.

CEN - EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 15251:2007 - Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics**. Brussels, 2007.

CETESB - COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Qualidade do ar no Estado de São Paulo 2014**. São Paulo, 2015.

CHEUNG, T., SCHIAVON, S., GRAHAM, L. T., THAM, K. W. Occupant satisfaction with the indoor environment in seven commercial buildings in Singapore. **Building and Environment**, v. 188, 107443, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107443>

CHIANG, C. M., CHOU, P. C., LAI, C. M., LI, Y. Y.. A methodology to assess the indoor environment in care centers for senior citizens, **Building and Environment**, v. 36, p. 561-568, ISSN 0360-1323, 2001.

CHIANG, C. M., LAI, C. M. A study on the comprehensive indicator of indoor environment assessment for occupants' health in Taiwan, **Building and Environment**, v. 37(4), p. 387-392, ISSN 0360-1323, 2002. [https://doi.org/10.1016/S0360-1323\(01\)00034-8](https://doi.org/10.1016/S0360-1323(01)00034-8).

CLIMATE.ONEBUILDING, 2023. Disponível em: <<https://climate.onebuilding.org/>>. Acesso em: 10 mar. 2023.

CORGNATI, S. P. (ed.), DA SILVA, M. G. (ed.), ANSALDI, R., ASADI, E., COSTA, J. J., FILIPPI, M., KACZMARCZYK, J., MELIKOV, A. K., OLESEN, B. W., POPIOLEK, Z., WARGOCKI, P. Indoor Climate Quality Assessment: Evaluation of indoor thermal and indoor air quality (REHVA Guidebooks; No. 14). **Federation of European Heating and Air-Conditioning Associations, REHVA**, 2011.

CUI, S., COHEN, M., STABAT, P., MARCHIO, D. CO2 tracer gas concentration decay method for measuring air change rate, **Building and Environment**, v. 84, p. 162-169, ISSN 0360-1323, 2014. <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.11.007>.

ETHERIDGE, D. W., SANDBERG, M. Building ventilation: theory and measurement, John **Wiley & Sons Chichester**, 1996.

FANGER, P. O. Thermal comfort: analysis and applications in environmental engineering. **McGraw-Hill Book Company**, 244. New York, 1972

GBD – THE GLOBAL BURDEN OF DISEASES NETWORK. Global burden of 87 risk factors in 204 countries and territories, 1990–2019: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2019, **Lancet**, v. 396, p. 1223-1249, ISSN 0140-6736, 2020. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(20\)30752-2](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(20)30752-2)

HEINZERLING, D., SCHIAVON, S., WEBSTER, T., ARENS, E. Indoor environmental quality assessment models: A literature review and a proposed weighting and classification scheme, **Building and Environment**, v. 70, p. 210-222, ISSN 0360-1323, 2013. <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.08.027>.

HUMPHREYS, M. A. The influence of season and ambient temperature on human clothing behaviour. **Indoor Climate**. Eds: Fanger and Valbjorn, Copenhagen, 1979

INMET - INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. Normais Climatológicas do Brasil 1991-2020. Direção Predominante do vento (Pontos cardiais e colaterais), 2022a. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/normais#>. Acesso em: 20 mai. 2022.

INMET - INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. **[Dados Meteorológicos]**. 2022. base de dados eletrônicos (portal). Tema: Histórico de dados meteorológicos, 2022b. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/dadoshistoricos>. Acesso em: 10 nov.2022.

ISO - INTERNATIONAL ORGANISATION FOR STANDARDIZATION - ISO 16000-1:2004. **Indoor air — Part 1: General aspects of sampling strategy**. Geneva, 2004a.

ISO - INTERNATIONAL ORGANISATION FOR STANDARDIZATION - ISO 16000-2:2004. **Indoor air — Part 2: Sampling strategy for formaldehyde**. Geneva, 2004b.

ISO - INTERNATIONAL ORGANISATION FOR STANDARDIZATION - ISO 16000-5:2007. **Indoor air — Part 5: Sampling strategy for volatile organic compounds (VOCs)**. Geneva, 2007.

ISO - INTERNATIONAL ORGANISATION FOR STANDARDIZATION - ISO 16000-26:2012. **Indoor air — Part 26: Sampling strategy for carbon dioxide (CO₂)**. Geneva, 2012.

ISO - INTERNATIONAL ORGANISATION FOR STANDARDIZATION - ISO 16000-37:2019. **Indoor air — Part 37: Measurement of PM_{2,5} mass concentration**. Geneva, 2019.

ISO - INTERNATIONAL ORGANISATION FOR STANDARDIZATION - ISO 7726:1998. **Ergonomics of the thermal environment — Instruments for measuring physical quantities**. Geneva, 1998.

ISO - INTERNATIONAL ORGANISATION FOR STANDARDIZATION - ISO 7730:2005. **Ergonomics of the thermal environment — Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria**. Geneva, 2005.

JONES, B., SHARPE, P., IDDON, C., HATHWAY, E. A., NOAKES, C. J., FITZGERALD, S. Modelling uncertainty in the relative risk of exposure to the SARS-CoV-2 virus by airborne aerosol transmission in well mixed indoor air. **Building and Environment**, v. 191, 107617, ISSN 0360-1323, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.107617>.

JOKL, M. V. Evaluation of indoor air quality using the decibel concept based on carbon dioxide and TVOC. **Building and Environment**, v. 35, p. 677-697, ISSN 0360-1323, 2000.

KIM, H. **Methodology for rating a building's overall performance based on the ASHRAE/CIBSE/USGBC performance measurement protocols for commercial buildings**. Tese (Doutorado em Arquitetura) - Office of Graduate Studies of Texas A&M University, College Station-TC, United States, 2012

LABEEE/UFSC - Laboratório de Eficiência Energética, Universidade Federal de Santa Catarina. Software: *Analysis SOL-AR* 6.2, 2023. Disponível em: < <https://labeee.ufsc.br/pt-br/downloads/softwares/analysis-sol-ar>>. Acesso em 03 de fev. 2023.

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. O. R. **Eficiência energética na arquitetura**. 3ª Edição. ed. [S.l.]: [s.n.], 2014.

LECCESE, F., ROCCA, M., SALVADORI, G., BELLONI, E., BURATTI, C. Towards a holistic approach to indoor environmental quality assessment: Weighting schemes to combine effects of multiple environmental factors. **Energy & Buildings**, v. 245, 111056, ISSN 0378-7788, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111056>

LEE, J., KIM, T. W., KOO, C. Integrated Approach to Evaluating the Effect of Indoor CO₂ Concentration on Human Cognitive Performance and Neural Responses in Office Environment. **J. Management in Engineering**, v. 28(1), 2022.

LELIEVELD, J., HELLEIS, F., BORRMANN, S., CHENG, Y., DREWNICK, F., HAUG, G., KLIMACH, T., SCIARE, J., SU, H., PÖSCHL, U. Model Calculations of Aerosol Transmission and Infection Risk of COVID-19 in Indoor Environments. **Int. J. Environ. Res. Public Health**, v. 17, 8114, 2020. <https://doi.org/10.3390/ijerph17218114>

LESSLER J., GRABOWSKI M. K., GRANTZ K. H., BADILLO-GOICOECHEA E., METCALF C. J. E., LUPTON-SMITH C., AZMAN A. S., STUART E. A. Household COVID-19 risk and in-person schooling. **Science**, v. 4, 372(6546), ISSN 1092-1097, 2021. doi: 10.1126/science.abh2939.

LI, Y., QIAN, H., HANG, J., CHEN, X., HONG, L., LIANG, P., LI, J., XIAO, S., WEI, J., LIU, L., KANG, M. Probable airborne transmission of SARS-CoV-2 in a poorly ventilated restaurant. **Building and Environment**, v. 196, 107788, ISSN 0360-1323, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.107788>.

LOLLI, F., CORUZZOLO, A. M., BALUGANI, E. The Indoor Environmental Quality: A TOPSIS-based approach with indirect elicitation of criteria weights. **Safety Science**, v. 148, 105652, ISSN 0925-7535, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2021.105652>.

LOU, H., OU, D. A comparative field study of indoor environmental quality in two types of open-plan offices: Open-plan administrative offices and open-plan research offices. **Build. Environ.**, v. 148, p. 394–404, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.11.022>.

MA, N., AVIV, D., GUO, H., BRAHAM, W. W. Measuring the right factors: A review of variables and models for thermal comfort and indoor air quality. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 135, 110436, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110436>

MARINO, C., NUCARA, A., PIETRAFESA, M. Proposal of comfort classification indexes suitable for both single environments and whole buildings **Building and Environment**, v. 57, p. 5867, 2012. doi:10.1016/j.buildenv.2012.04.012

MIRANDA, M. T., ROMERO, P., VALERO-AMARO, V., ARRANZ, J. I., MONTERO, I. Ventilation conditions and their influence on thermal comfort in examination classrooms in times of COVID-19. A case study in a Spanish area with Mediterranean climate. **International Journal of Hygiene and Environmental Health**, v. 240, 113910, ISSN 1438-4639, 2022. doi: 10.1016/j.ijheh.2021.113910

MIDDLEHURST, G., YAO, R. JIANG, L., CLEMENTS-CROOME, D., ADAMS, G.A preliminary study on post-occupancy evaluation of four office buildings in the UK based on the Analytic Hierarchy Process. **Intelligent Buildings International**, v. 10:4, p. 234-246, 2018. <https://doi.org/10.1080/17508975.2018.1495607>.

MUI, K. W., CHAN, W. T., A new indoor environmental quality equation for air-conditioned buildings. **Architectural Science Review**, v. 48(1), p. 41-46. <https://doi.org/10.3763/asre.2005.4806>

MUJAN, I., LICINA, D., KLJAJIC, M, CULIC, A, ALEKSANDAR, A. S.. Development of indoor environmental quality index using a low-cost monitoring platform. **Journal of Cleaner Production**, v. 312, 27846, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127846>.

NASCIMENTO, M. M. P, ARAUJO, H. M. A urbanização extensiva de Aracaju e a formação de novos aglomerados habitacionais: avaliação a partir da desagregação de dados dos CENSOS/IBGE. **Caderno de Geografia**, v. 28(52), p. 167-196, ISSN 2318-2962, 2018. <https://doi.org/10.5752/p.2318-2962.2018v28n52p1663>.

NCUBE, M., RIFFAT, S. Developing an indoor environment quality tool for assessment of mechanically ventilated office buildings in the UK - A preliminary study. **Build. Environ.**, v. 53, p. 26–33, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.01.003>.

NICOL, F., WILSON, M. A critique of European Standard EN 15251: Strengths, weaknesses and lessons for future standards. **Building Research and Information**, v. 39(2), p. 183-193, 2011. <https://doi.org/10.1080/09613218.2011.556824>

OLESEN, B. W. The philosophy behind EN15251: Indoor environmental criteria for design and calculation of energy performance of buildings. **Energy and buildings**. v. 39:7, p. 740-749, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2007.02.011>

OSHA - OCCUPATIONAL SAFETY AND HEALTH ADMINISTRATION. **Limits for air contaminants**. Washington, DC: Occupational Safety & Health Administration, U.S. Department of Labor, 2017. Disponível em: <www.osha.gov/laws-regs/regulations/standardnumber/1910/1910.1000TABLEZ1>. Acessado em 20 de fev. 2023.

PULIMENTO, M., PISCITELLI, P., COLAZZO, S., COLAO, A., MIANI, A. Indoor air quality at school and students' performance: Recommendations of the UNESCO Chair on Health Education and Sustainable Development & the Italian Society of Environmental Medicine (SIMA). **Health Promot. Perspect.**, v. 10(3), p. 169-174, 2020. doi: 10.34172/hpp.2020.29.

PRATHER K. A., MARR L. C., SCHOOLEY R. T., MCDIARMID M. A., WILSON M. E., MILTON D.K. Airborne transmission of SARS-CoV-2. **Science**, v. 370, p. 303-304, ISSN 0036-8075, 2020. doi: 10.1126/science.abf0521.

RAHMAN, H. S., AZIZ, M. S., HUSSEIN, R. H., OTHMAN, H. H., OMER, S. H. S., KHALID, E. S., ABDULRAHMAN, N. A., AMIN, K., ABDULLAH, R. The transmission modes and sources of COVID-19: A systematic review. **International Journal of Surgery Open**, v. 26, p. 125-135, ISSN 2405-8572, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.ijso.2020.08.017>.

ROUMI, S., ZHANG, F., STEWART, R., SANTAMOURIS, M.. Commercial building indoor environmental quality models: A critical review. **Energy & Buildings**, v. 363, 112083, ISSN 0378-7788, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112033>.

SADRIZADEH, S., YAO, R., YUAN, F., AWBI, H., BAHNFLETH, W., BI, Y., CAO, G., CROITORU, C., DEAR, R., HAGHIGHAT, F., KUMAR, P., MALAYERI, M., NASIRI, F., RUUD, M., SADEGHIAN, P., WARGOCKI, P., XIONG, J., YU, W., LI, B. Indoor air quality and health in schools: A critical review for developing the roadmap for the future school environment. **Journal of Building Engineering**, v. 57, 104908, ISSN 2352-7102, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.job.2022.104908>

SATISH, U., MENDELL, M. J., SHEKHAR, K., HOTCHI, T., SULLIVAN, D., STREUFERT, S., FISK, W.J. Is CO₂ an indoor pollutant? Direct effects of low-to-moderate CO₂ concentrations on human decision-making performance. **Environ Health Perspect.** v. 120(2), p. 1671-1677, 2012. doi: 10.1289/ehp.1104789.

SBSE – The Society of Building Science Educators. *Climate Consultant 6.0* (Build 17), 2021. Disponível em: <<https://www.sbse.org/resources/climate-consultant>>. Acesso em: 10 de mar. 2023

SZABADOS, M., CSÁKÓ, Z., KOTLÍK, B., KAZMAROVÁ, H., KOZAJDA, A., JUTRAZ, A., KUKEK, A., OTOREPEC, P., DONGIOVANNI, A., DI MAGGIO, A., FRAIRE, S., SZIGETI, T.. Indoor air quality and the associated health risk in primary school buildings in Central Europe - The InAirQ study. **Indoor Air**, v. 31, p. 989-1003, 2021. <https://doi.org/10.1111/ina.12802>.

US EPA - United States Environmental Protection Agency. **Reference Guide for Indoor Air Quality in Schools**. Disponível em: <<https://www.epa.gov/iaq-schools/reference-guide-indoor-air-quality-schools>>. Acessado em 02 dez. 2021.

WANG., C., ZHANG, F., WANG, J., DOYLE, J. K., HANCOCK, P. A., MAK, C. M., LIU, S.. How indoor environmental quality affects occupants' cognitive functions: A systematic review. **Building and Environment**, v. 193, p. 107647, ISSN 0360-1323, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.107647>.

WARGOCKI, P., MANDIN, C., WEI, W. The ALDREN-TAIL index, an Indicator of Indoor Environmental quality (IEQ) in buildings addressing health and well-being. IN: 16th International Conference on Indoor Air Quality and Climate (INDOOR AIR 2020): **Proceedings of a meeting held 1 November 2020, Online**. International Society of Indoor Air Quality and Climate, 2020.

WHO - WORLD HEALTH ORGANISATION. A screening tool for assessment of health risks from combined exposure to multiple chemicals in indoor air in public settings for children: methodological approach. Copenhagen: **WHO Regional Office for Europe**. 2021c.

WHO - WORLD HEALTH ORGANISATION. A screening tool for assessment of health risks from combined exposure to multiple chemicals in indoor air in public settings for children: methodological approach..Supplementary publication to the screening tool for assessment of health risks from combined exposure to multiple chemicals in indoor air in public settings for children Copenhagen: **WHO Regional Office for Europe**, 2021. Copenhagen: WHO Regional Office for Europe. 2021a.

WHO - WORLD HEALTH ORGANISATION. Literature review on chemical pollutants in indoor air in public settings for children and overview of their health effects with a focus on schools, kindergartens and day-care centres: supplementary publication to the screening tool for assessment of health risks from combined exposure to multiple chemicals in indoor air in public settings for children. Copenhagen: **WHO Regional Office for Europe**. 2021b.

WHO - WORLD HEALTH ORGANISATION. WHO Global Air Quality Guidelines: Particulate matter (PM2.5 and PM10), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. Copenhagen: **WHO Regional Office for Europe**. 2021d.

WHO - WORLD HEALTH ORGANISATION. Methods for monitoring indoor air quality in schools: report of a meeting, Bonn, Germany, 4-5 April 2011. **World Health Organization. Regional Office for Europe**. 2011. Disponível em: <<https://apps.who.int/iris/handle/10665/108596>>

WHO - WORLD HEALTH ORGANISATION. WHO Guidelines for indoor air quality: selected pollutants. Copenhagen: **WHO Regional Office for Europe**. 2010.

WHO - WORLD HEALTH ORGANISATION. Methods for sampling and analysis of chemical pollutants in indoor air. Supplementary publication to the screening tool for assessment of health risks from combined exposure to multiple chemicals in indoor air in public settings for children. Copenhagen: **WHO Regional Office for Europe**. 2020.

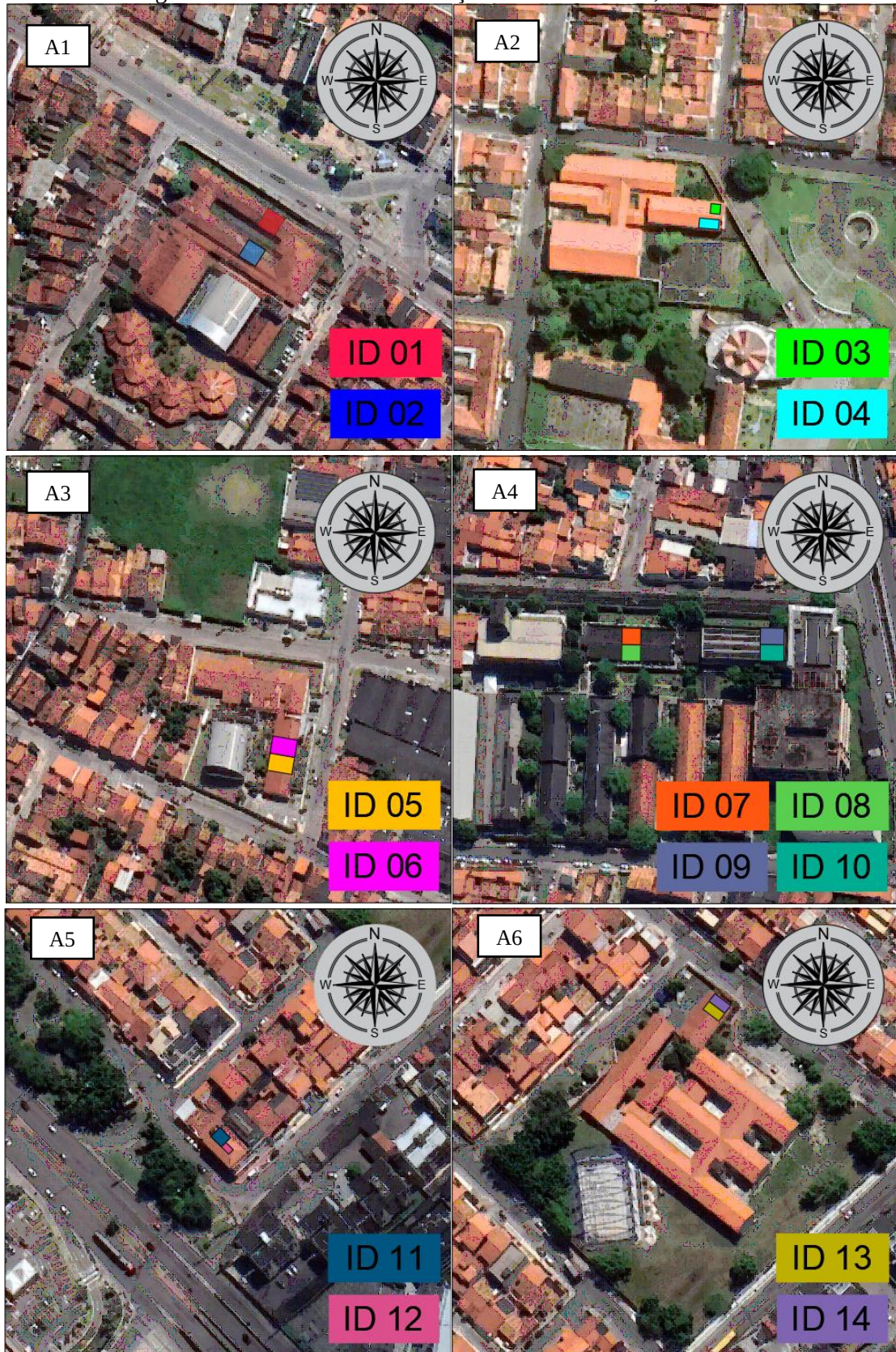
YAO, M., ZHANG, L., MA, J., ZHOU, L. On airborne transmission and control of SARS-Cov-2. **Science of The Total Environment**. v. 731, 139178, ISSN 0048-9697, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139178>.

ZHANG, Z., GENG, Y., WU, X., ZHOU, H., LIN, B. A method for determining the weight of objective indoor environment and subjective response based on information theory. **Building and Environment**. v. 207, 108426, ISSN 0360-1323, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108426>.

ZOMORODIAN, Z. S., TAHSILDOOST, M., HAFEZI, M. Thermal comfort in educational buildings: A review article. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 59, 895-906, ISSN 1364-0321, 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2016.01.033>

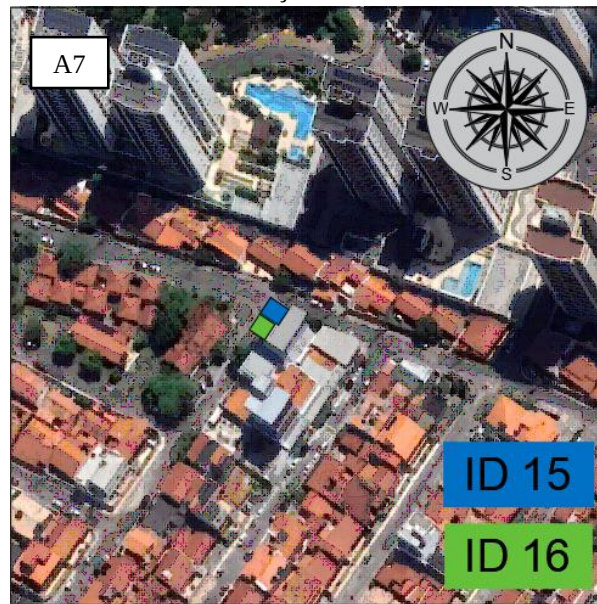
APÊNDICE A – PLANTAS DE SITUAÇÃO DAS SALAS ESTUDADAS

Figuras A1 a A6 – Planta de situação das salas 01 a 14, escala 1:5000.



Fonte: Adaptada de Google Earth (2023).

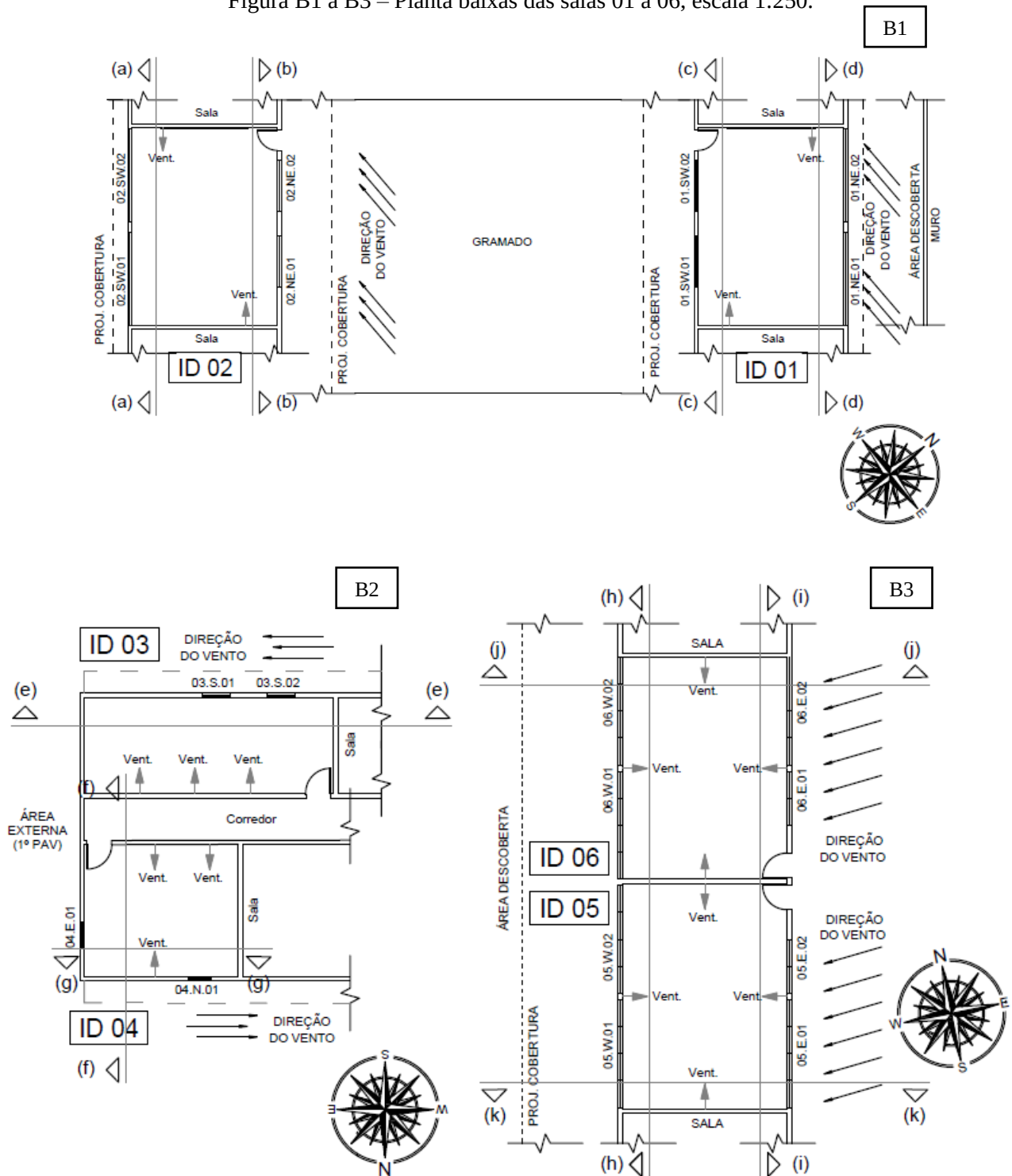
Figura A7 – Planta de situação das salas 15 e 16, escala 1:5000.



Fonte: Adaptada de *Google Earth* (2023)

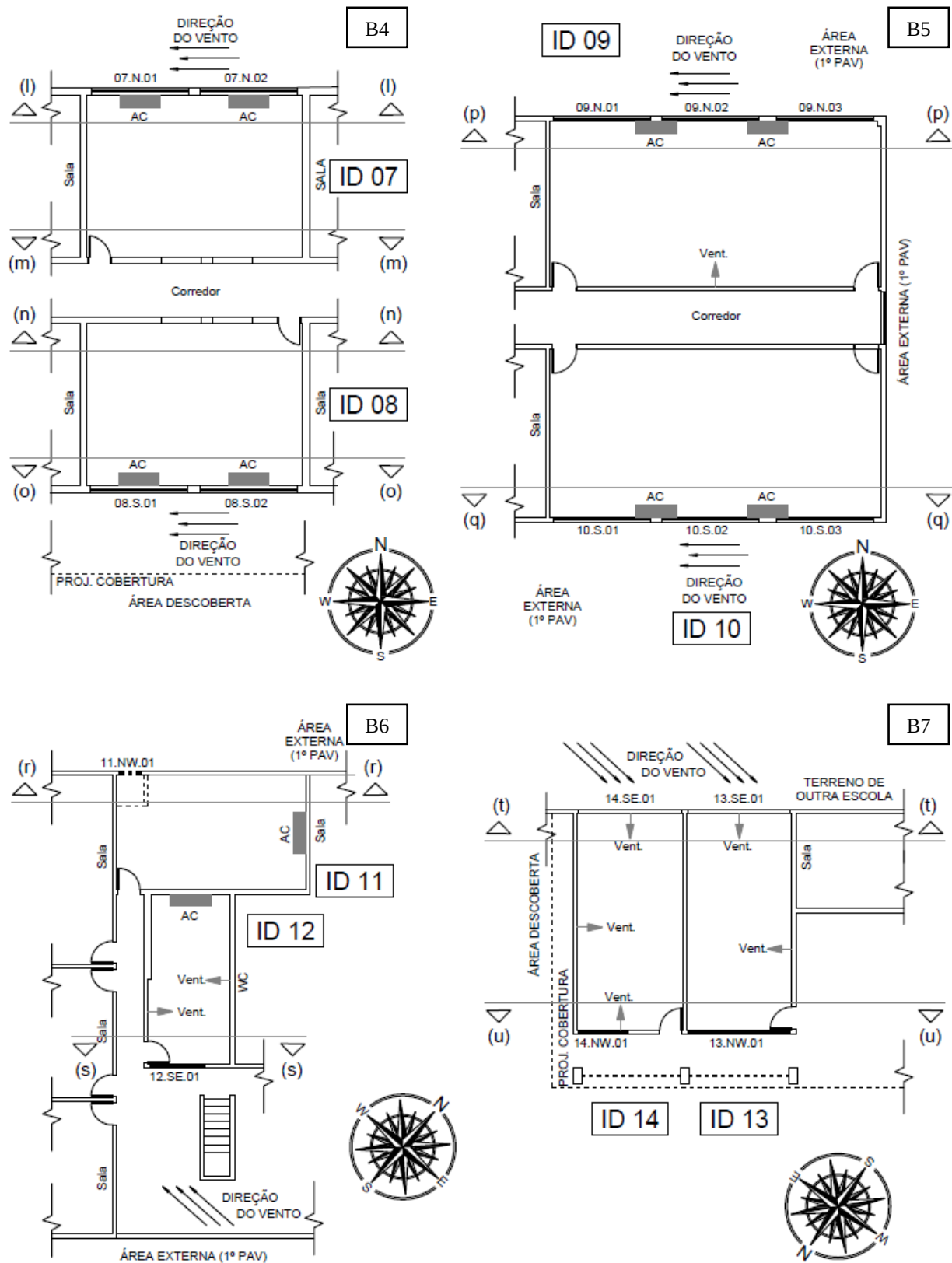
APÊNDICE B – PLANTAS BAIXAS DAS SALAS ESTUDADAS

Figura B1 a B3 – Planta baixas das salas 01 a 06, escala 1:250.



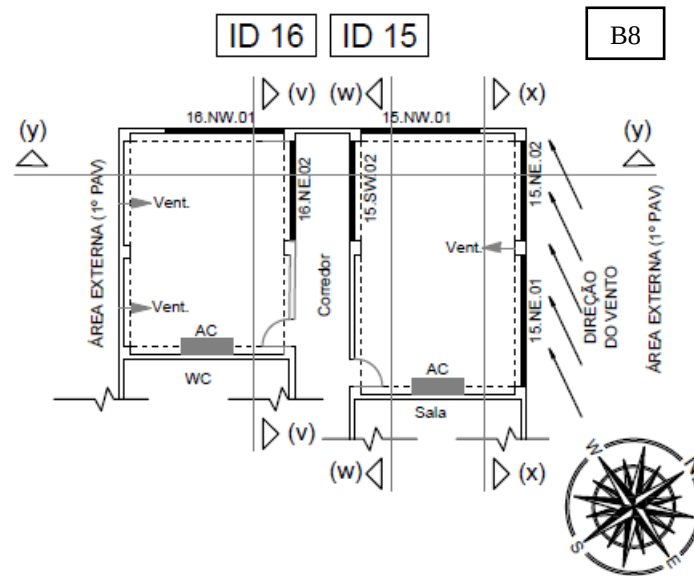
Fonte: O Autor, 2023.

Figuras B4 a B7 – Planta baixas das salas 07 a 13, escala 1:250.



Fonte: O Autor, 2023.

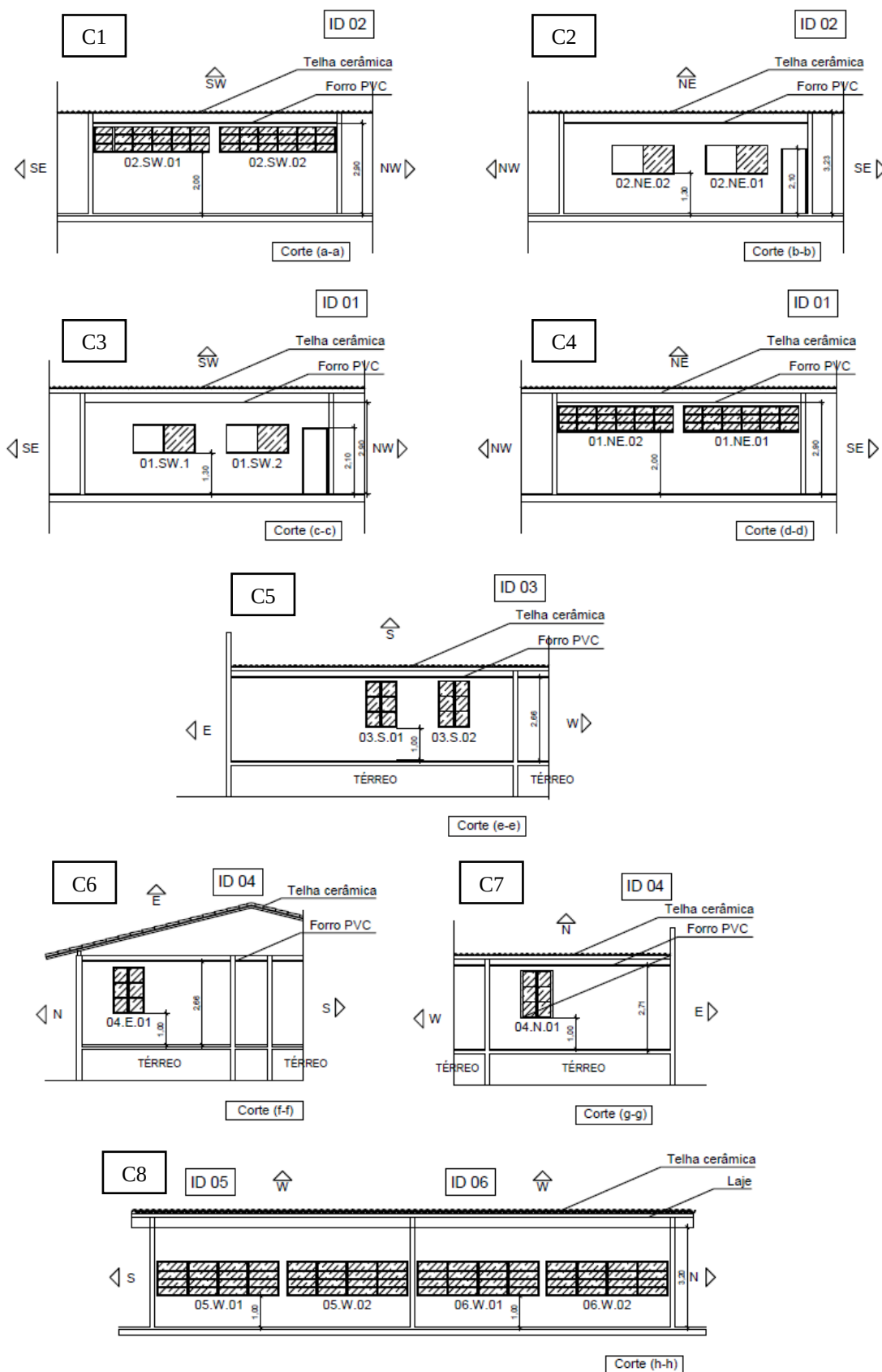
Figura B8 – Planta baixa das salas 15 e 16, escala 1:250.



Fonte: O Autor, 2023.

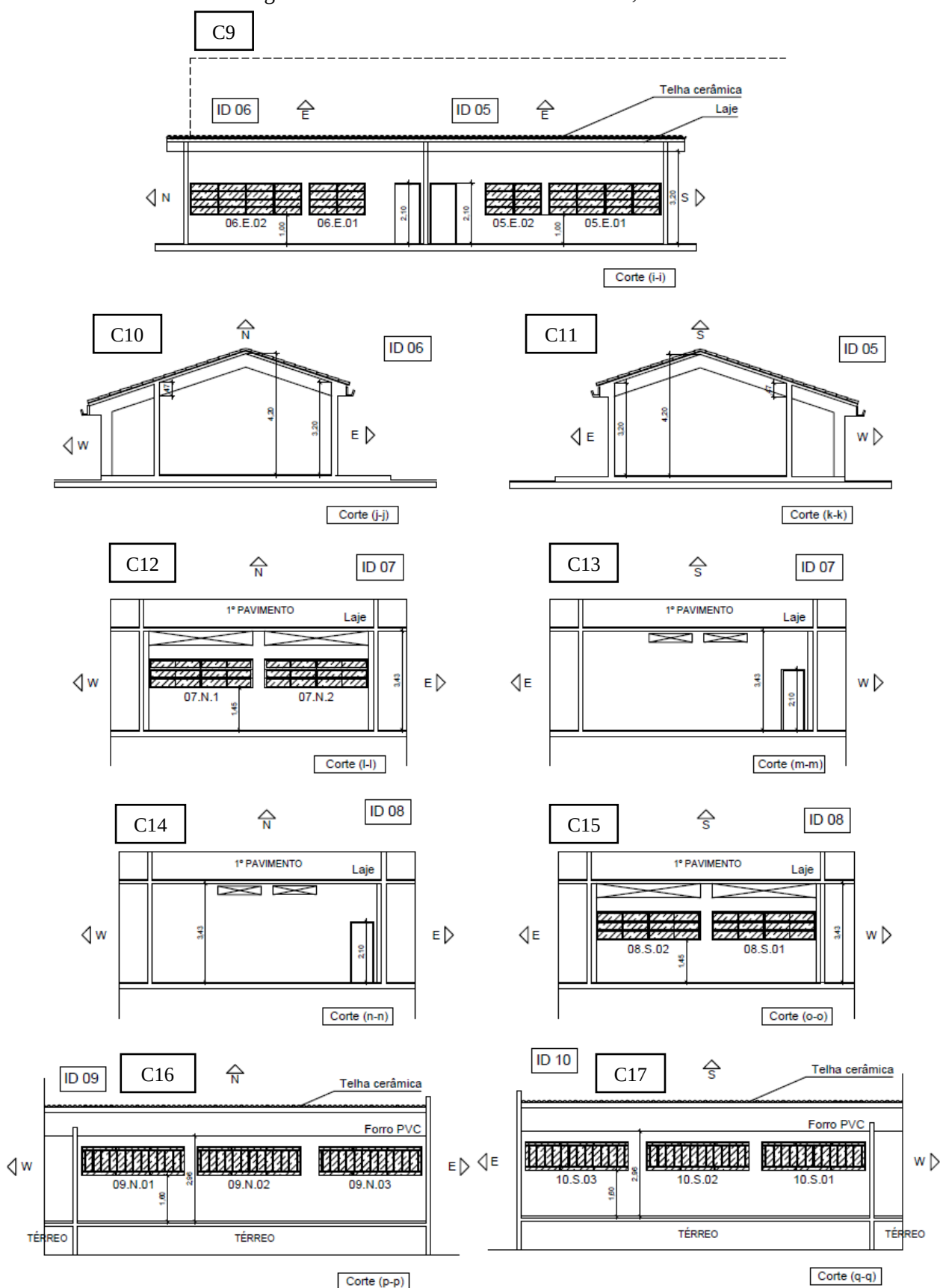
APÊNDICE C – CORTES DAS SALAS ESTUDADAS

Figura C1 a C8 – Cortes das salas 01 a 06, escala 1:200.



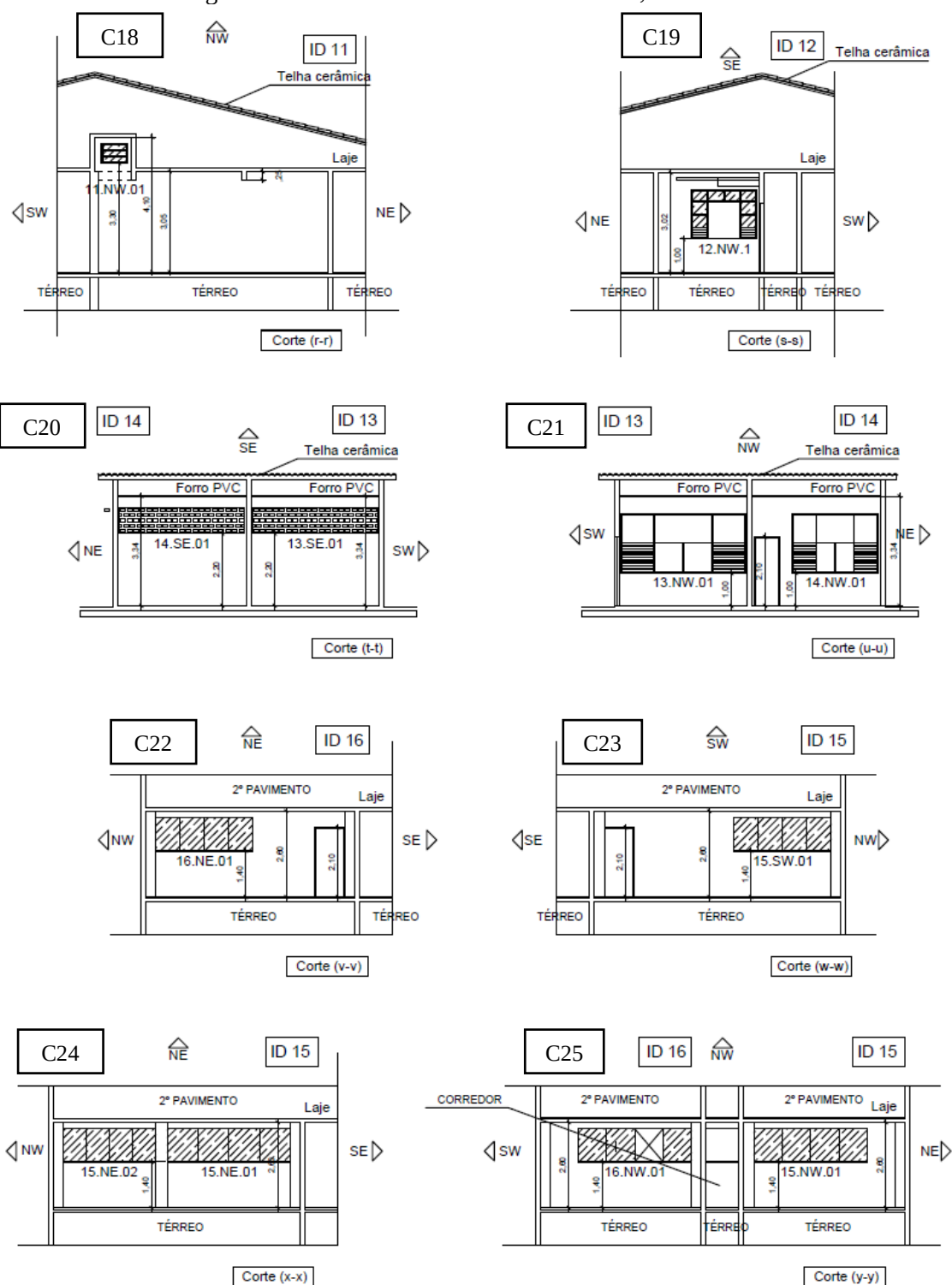
Fonte: O Autor, 2023.

Figuras C9 a C17 – Cortes das salas 05 a 10, escala 1:200.



Fonte: O Autor, 2023.

Figuras C18 a C25 – Cortes das salas 11 a 16, escala 1:200.



Fonte: O Autor, 2023.

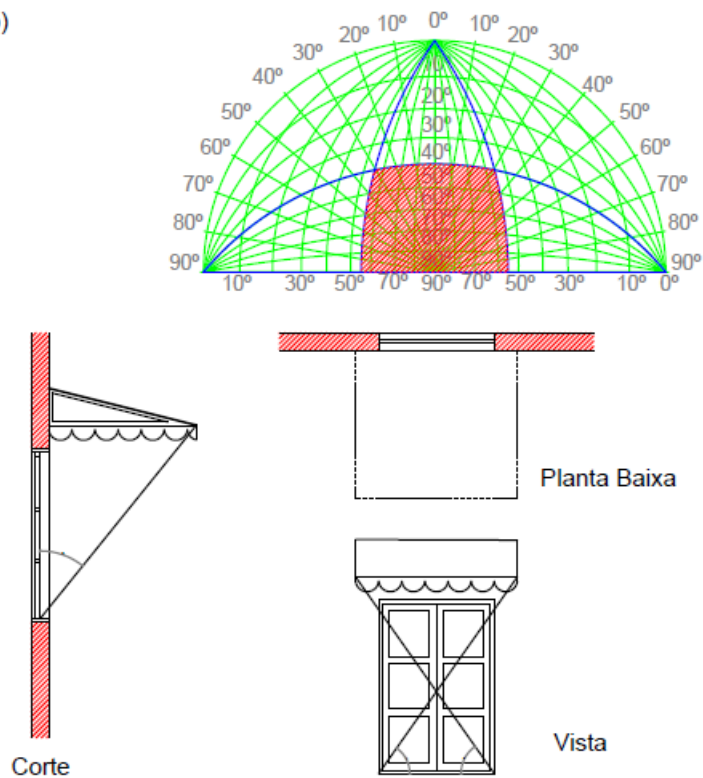
APÊNDICE D – DISPOSITIVOS DE SOMBREAMENTO

Figuras D1 e D2 – Detalhe dos dispositivos de sombreamento/máscaras de sombra 1 e 2, escala 1:250.

Dispositivo de
Sombreamento 01 - DS01
(toldo)

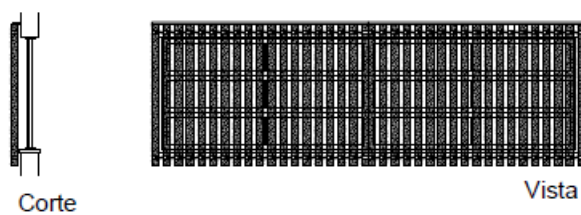
Máscara de Sombra

D1



Dispositivo de
Sombreamento 02 - DS02
(persianas)

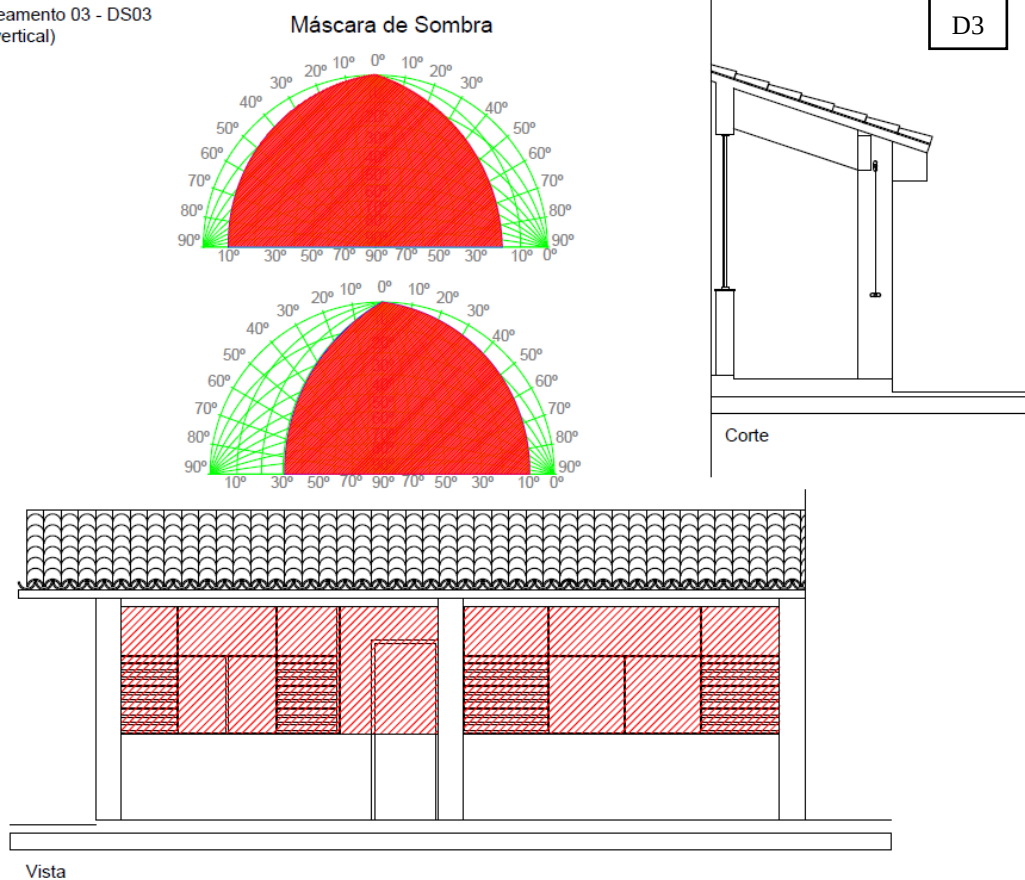
D2



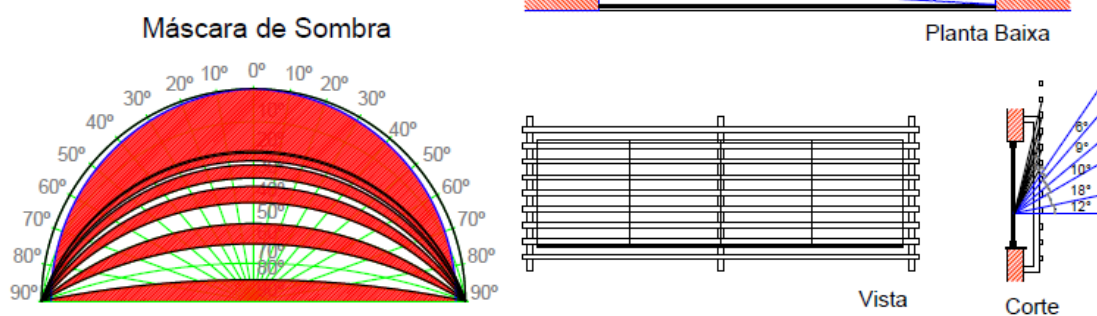
Fonte: O Autor, 2023.

Figuras D3 a D5 – Detalhe dos dispositivos de sombreamento/máscaras de sombra 3 a 5, escala 1:250.

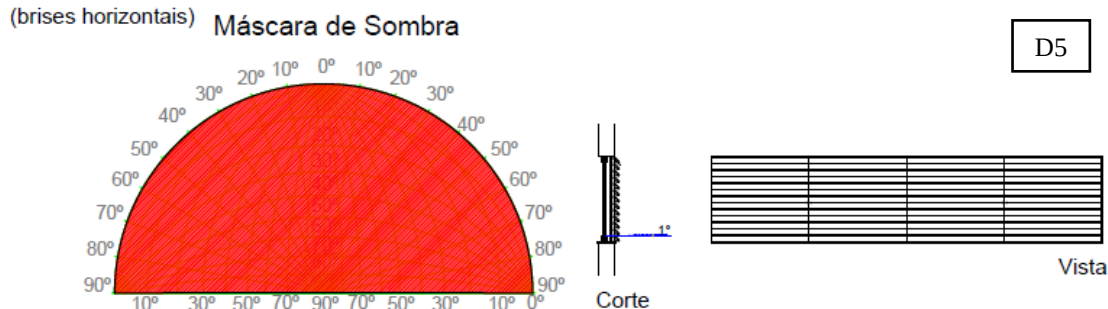
Dispositivo de
Sombreamento 03 - DS03
(toldo vertical)



Dispositivo de
Sombreamento 04 - DS04
(brises horizontais)

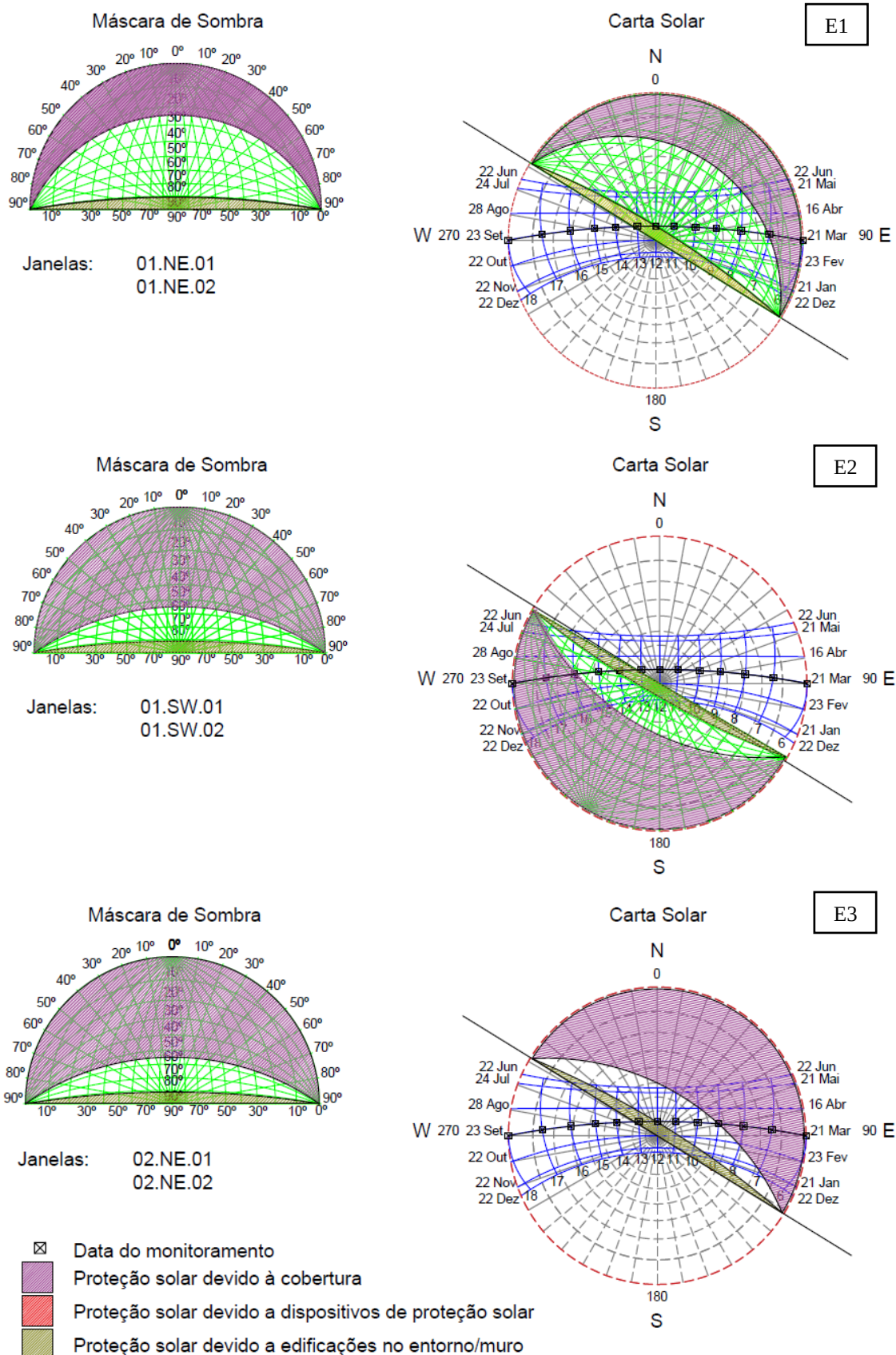


Dispositivo de
Sombreamento 05 - DS05
(brises horizontais)



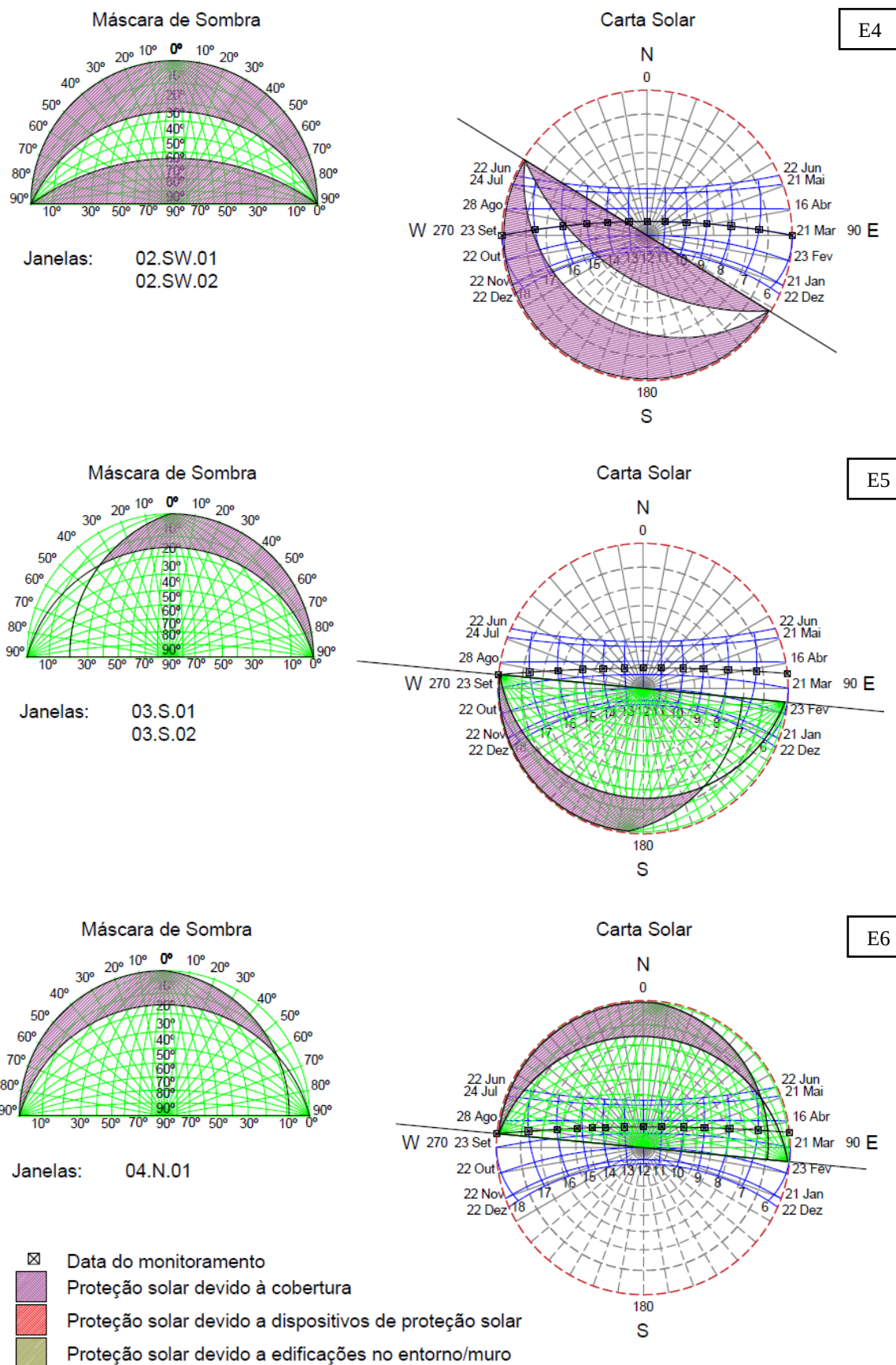
APÊNDICE E – MÁSCARAS DE SOMBRA E CARTAS SOLARES

Figura E1 a E3 – Máscaras de sombra e cartas solares das salas 01 (NE/SW) e 02 (NE).



Fonte: O Autor, 2023.

Figuras E4 a E6 – Máscaras de sombra e cartas solares das salas 02 (SW), 03 (S) e 04 (N).



Fonte: O Autor, 2023.

Figura E7 a E9 – Máscaras de sombra e cartas solares das salas 04 (E), 05 (E) e 06 (E).

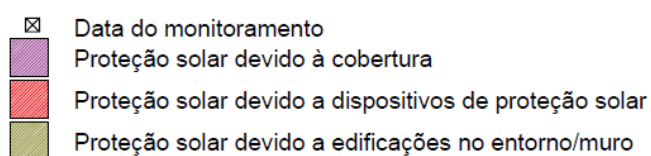
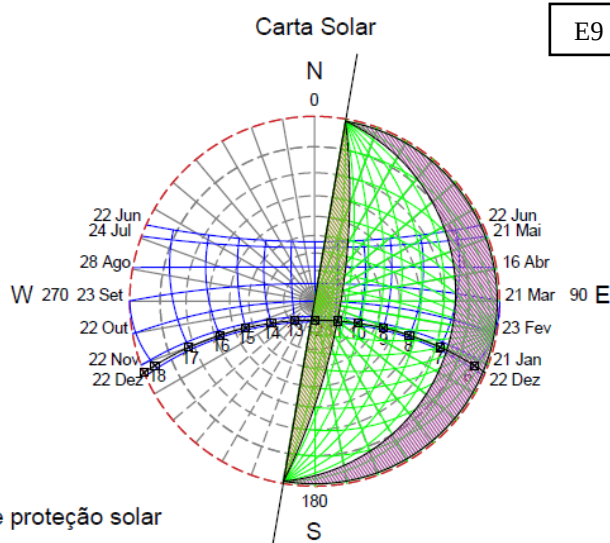
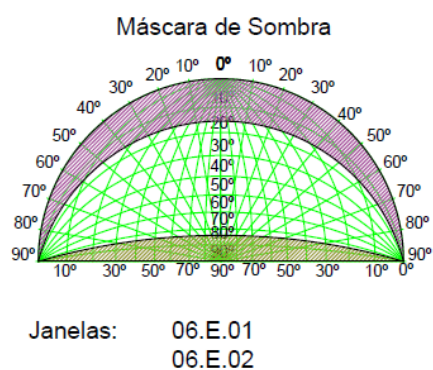
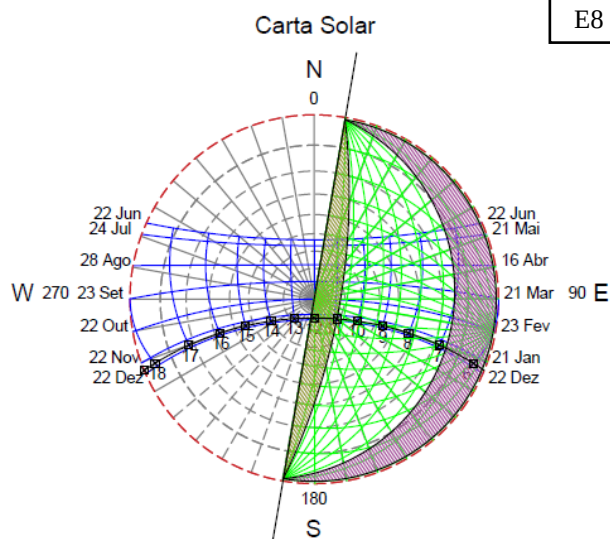
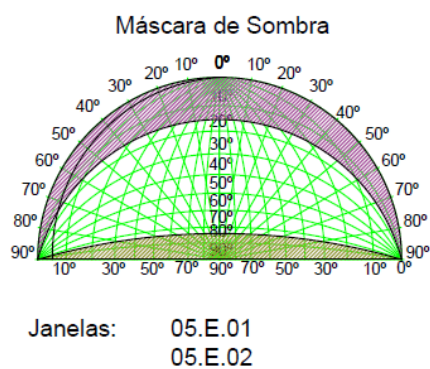
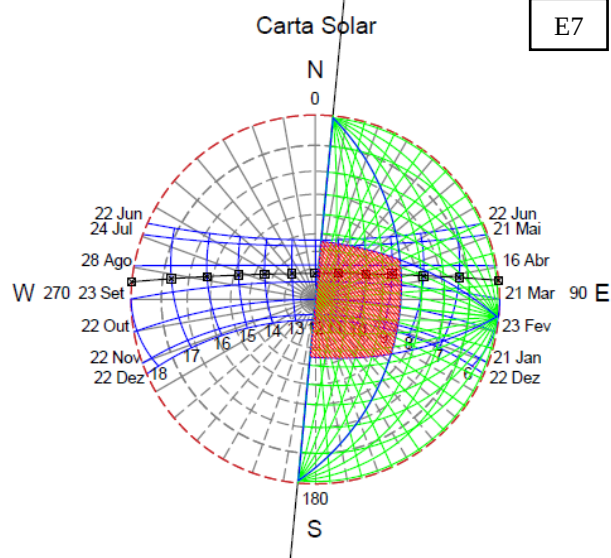
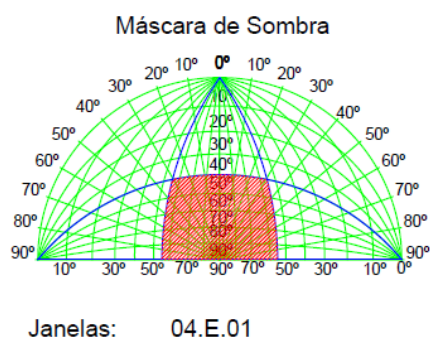
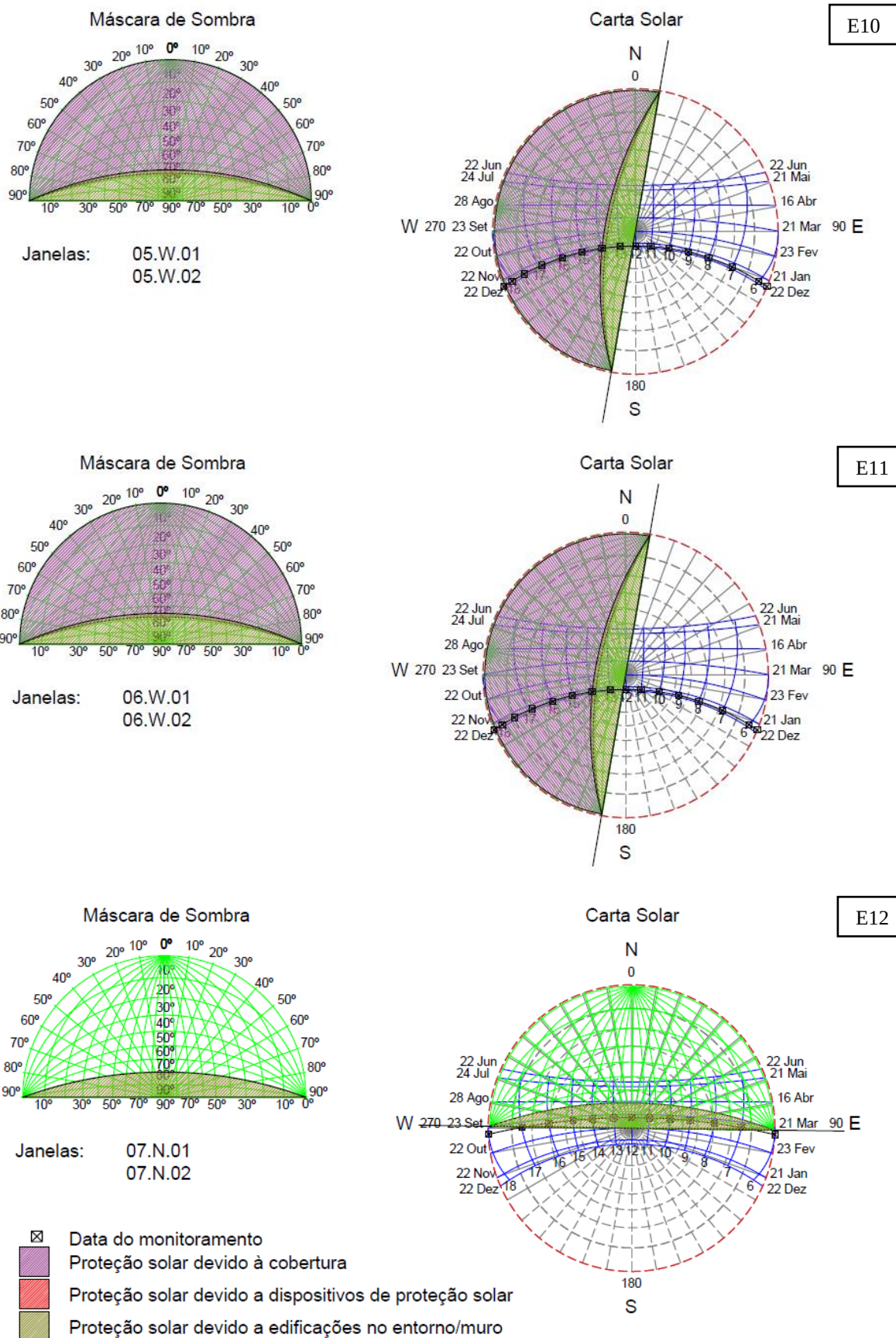
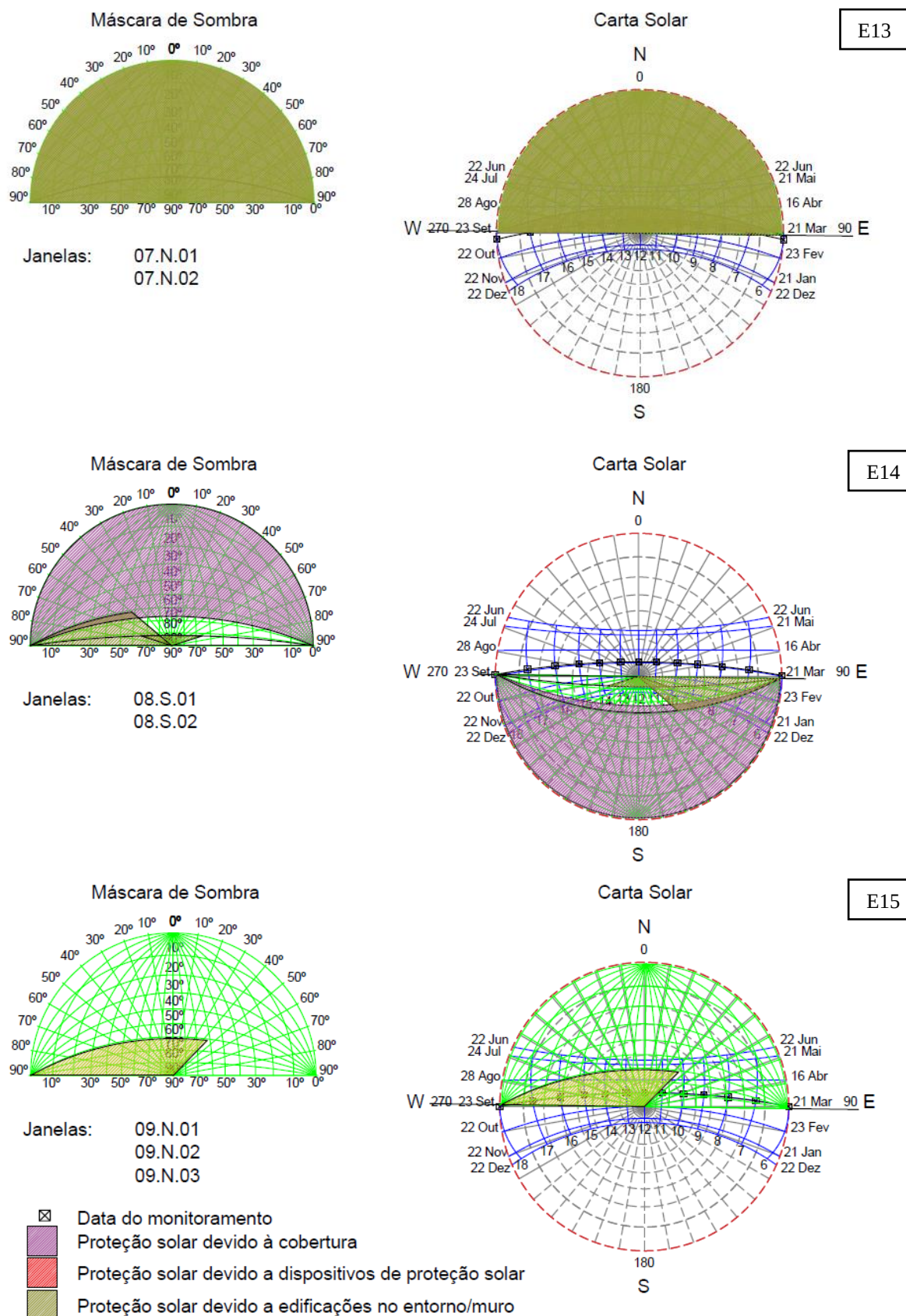


Figura E10 a E12 – Máscaras de sombra e cartas solares das salas 05 (W), 06 (W) e (07 (N).



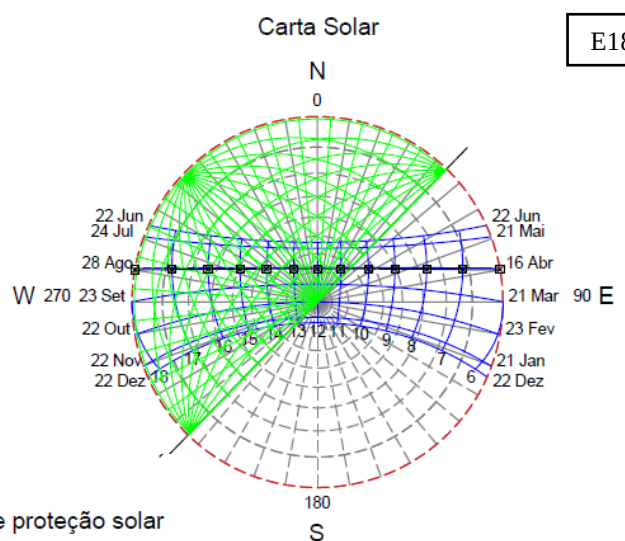
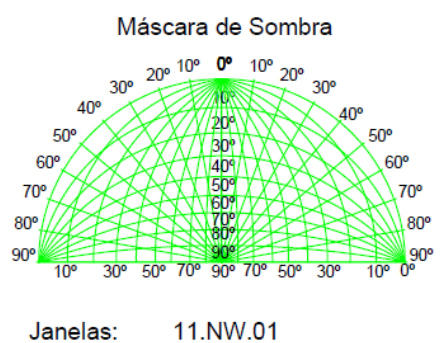
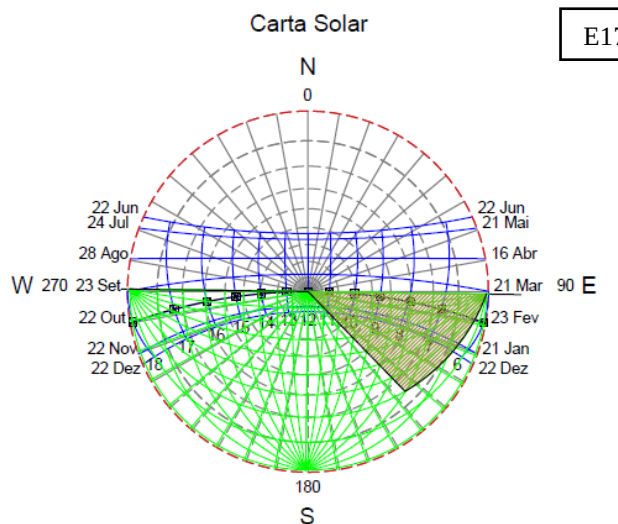
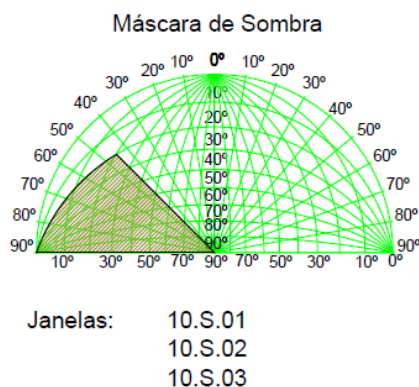
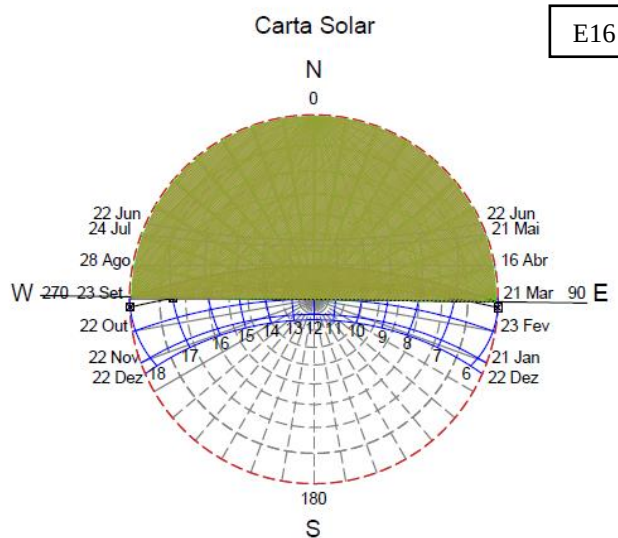
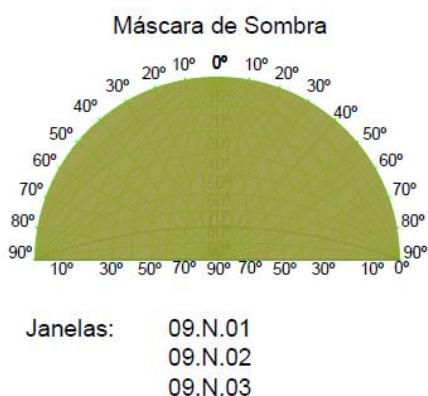
Fonte: O Autor, 2023.

Figura E13 a E15 – Máscaras de sombra e cartas solares das salas 07 (N), 08 (S) e 09 (N).



Fonte: O Autor, 2023.

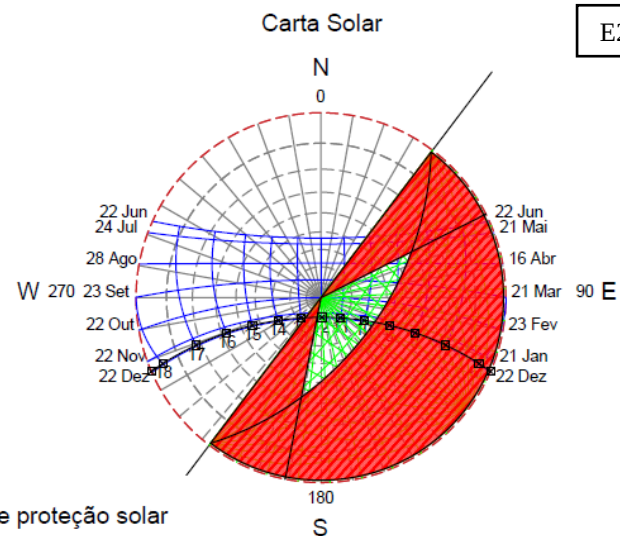
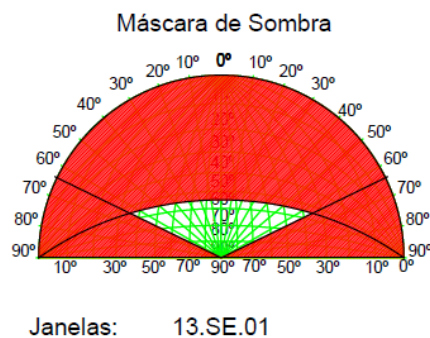
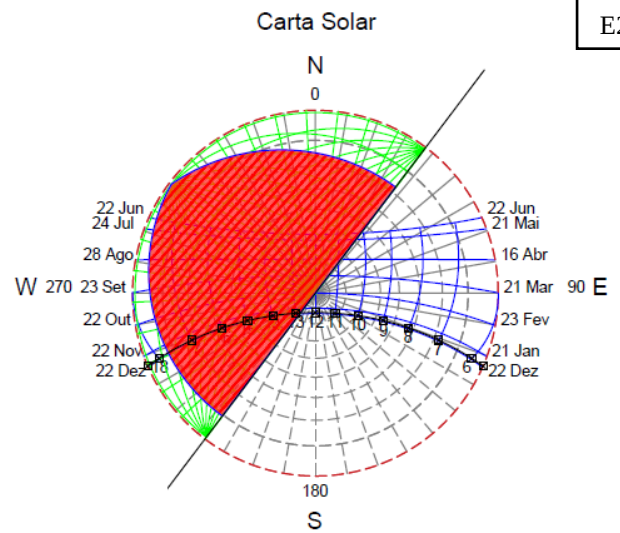
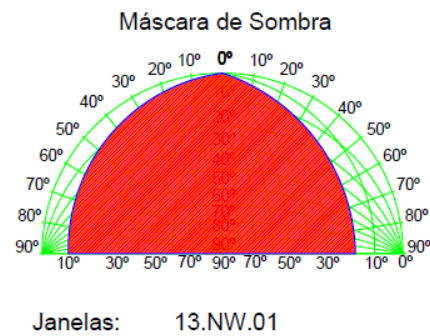
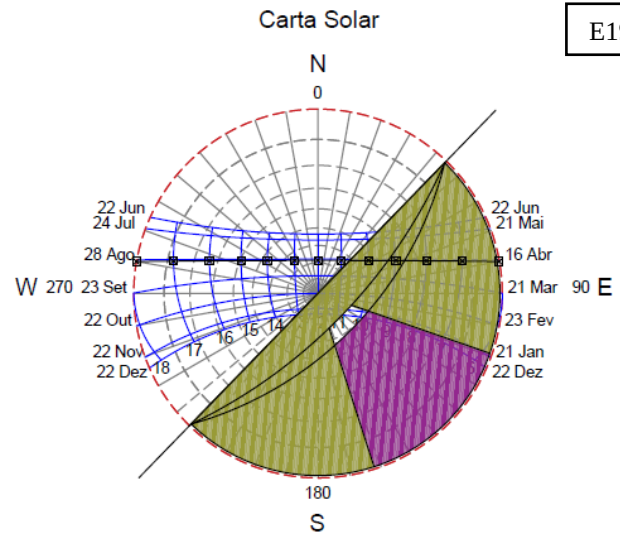
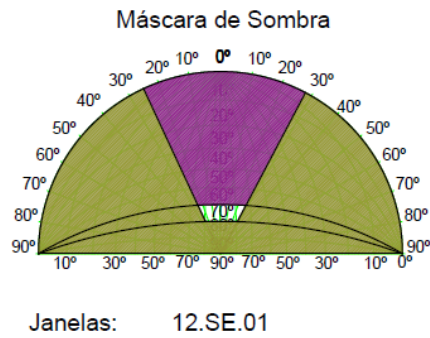
Figuras E16 a E18 – Máscaras de sombra e cartas solares das salas 09 (N), 10 (S) e 11 (NW).



- ☒ Data do monitoramento
- Proteção solar devido à cobertura
- Proteção solar devido a dispositivos de proteção solar
- Proteção solar devido a edificações no entorno/muro

Fonte: O Autor, 2023.

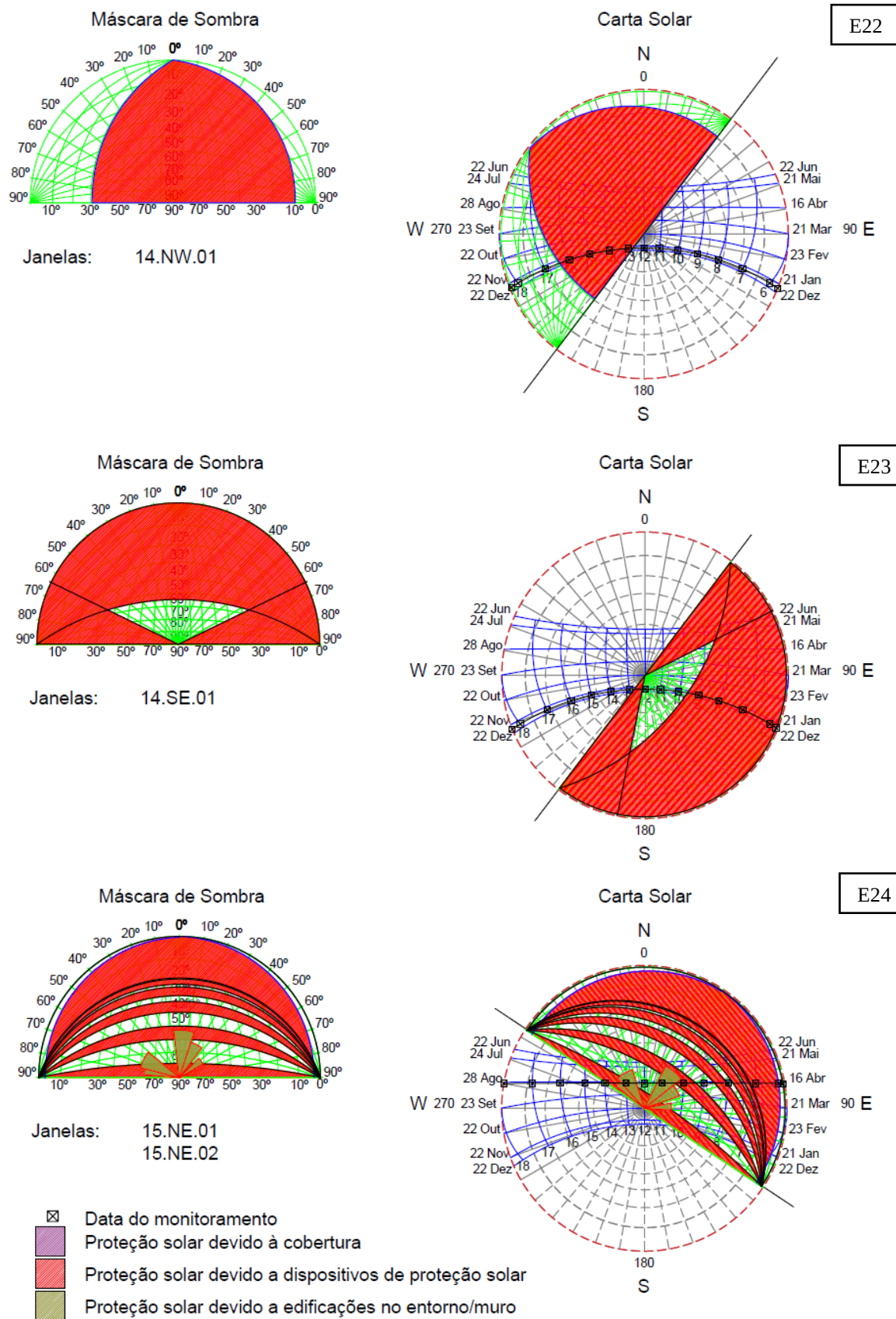
Figuras E19 a E21 – Máscaras de sombra e cartas solares das salas 12 (SE) e 13 (NW/SE).



- ☒ Data do monitoramento
- ☐ Proteção solar devido à cobertura
- ☐ Proteção solar devido a dispositivos de proteção solar
- ☐ Proteção solar devido a edificações no entorno/muro

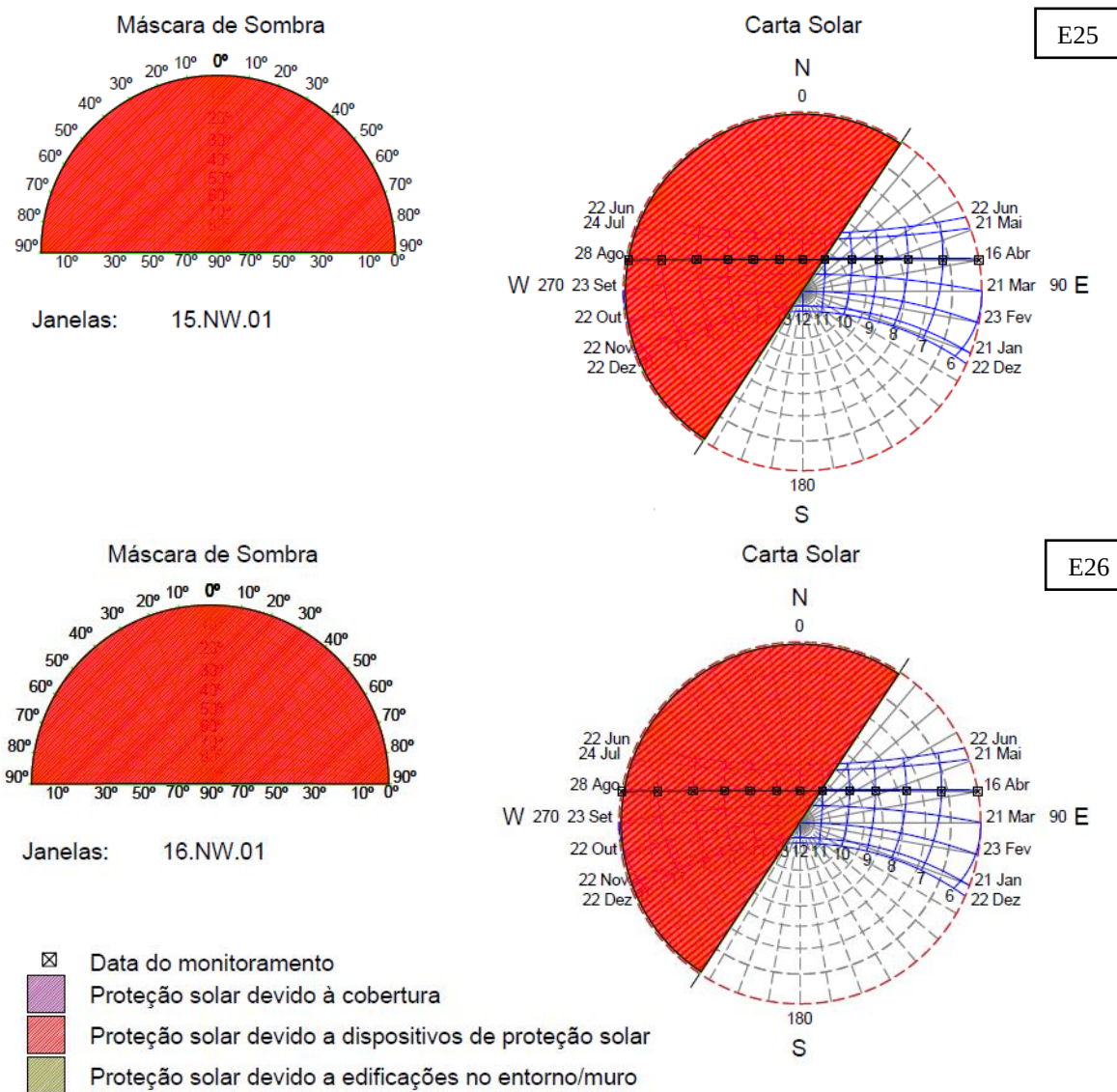
Fonte: O Autor, 2023.

Figuras E22 a E24 – Máscaras de sombra e cartas solares das salas 14 (NW/SE) e 15 (NE).



Fonte: O Autor, 2023.

Figuras E25 a E26 – Máscaras de sombra e cartas solares das salas 15 (NW) e 16 (NW).



Fonte: O Autor, 2023.