



UNIVERSIDADE  
ESTADUAL DE LONDRINA

---

PEDRO HENRIQUE BRUDER DECKER

**MEDIDA DA TAXA DE VENTILAÇÃO NATURAL EM SALAS  
DE AULA:  
APLICAÇÃO DE MÉTODOS DE GÁS TRAÇADOR COM CO<sub>2</sub>**

---

Londrina  
2023

PEDRO HENRIQUE BRUDER DECKER

**MEDIDA DA TAXA DE VENTILAÇÃO NATURAL EM SALAS  
DE AULA:  
APLICAÇÃO DE MÉTODOS DE GÁS TRAÇADOR COM CO<sub>2</sub>**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Estadual de Londrina, como requisito à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientadora: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Camila Gregório Atem

Londrina  
2023

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UEL

Decker, Pedro Henrique Bruder.

MEDIDA DA TAXA DE VENTILAÇÃO NATURAL EM SALAS DE AULA:  
Aplicação de métodos de gás traçador com CO<sub>2</sub> / Pedro Henrique Bruder  
Decker. - Londrina, 2023. 235 f.

Orientador: Camila Gregório Atem.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Estadual de Londrina, Centro de Tecnologia e Urbanismo, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2023. Inclui bibliografia.

1. Ventilação natural - Tese. 2. Taxa de ventilação - Tese. 3. Gás traçador  
Tese. 4. Decaimento da concentração - Tese. I. Atem, Camila Gregório . II.  
Universidade Estadual de Londrina. Centro de Tecnologia e Urbanismo. Programa  
de Pós-Graduação em Engenharia Civil. III. Título.

CDU 62

PEDRO HENRIQUE BRUDER DECKER

**MEDIDA DA TAXA DE VENTILAÇÃO NATURAL EM SALAS DE AULA  
APLICAÇÃO DE MÉTODOS DE GÁS TRAÇADOR COM CO<sub>2</sub>**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Estadual de Londrina - UEL, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof.<sup>a</sup> Orientadora: Dr.<sup>a</sup> Camila Gregório  
Atem  
Universidade Estadual de Londrina - UEL

---

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Thalita Gorban Ferreira Giglio  
Universidade Estadual de Londrina - UEL

---

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Marieli Azoia Lukiantchuki  
Universidade Estadual de Maringá - UEM

Londrina, 3 de maio de 2023.

## **AGRADECIMENTOS**

Expresso minha gratidão ao trabalhador brasileiro que financiou e remunerou meus estudos em uma universidade pública, gratuita e de excelência. Estendo minha gratidão à CAPES, agência de fomento responsável pela mediação.

Agradeço também às professoras Dr.<sup>a</sup> Thalita Gorban Ferreira Giglio e Dr.<sup>a</sup> Marieli Azoia Lukiantchuki, cujas observações e sugestões enriqueceram significativamente este estudo.

Agradeço aos meus pais, Ceni Mello Bruder Mendes e Isaias Decker, cujo apoio permitiu que me dedicasse integralmente ao programa de Mestrado. Sem eles, este trabalho não seria possível.

Agradeço à Nathalia Januário Buono, minha companheira de todos os momentos, pelo amor, apoio e carinho oferecidos ao longo da realização deste trabalho.

Também agradeço ao professor Dr. Luiz Henrique Dall'Antonia que gentilmente emprestou o cilindro de CO<sub>2</sub>, o que viabilizou a execução dos experimentos. Ao professor Dr. Lucas Santana da Cunha, agradeço à assessoria estatística, que permitiu a realização de análises e conclusões mais aprofundadas.

Por fim agradeço a imprescindível orientação prestada pela professora Dr.<sup>a</sup> Camila Gregório Atem, que esteve presente em todas as etapas de desenvolvimento deste trabalho, com incontáveis revisões, sugestões e direcionamentos.

DECKER, Pedro Henrique Bruder. **Medida da taxa de ventilação natural em salas de aula**: aplicação de métodos de gás traçador com CO<sub>2</sub>. 2023. 235 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2023.

## RESUMO

A ventilação de ambientes internos é relevante para o conforto térmico dos ocupantes, eficiência energética das edificações e tem papel fundamental na qualidade do ar interno (QAI). Um dos parâmetros mais importantes para a QAI é a taxa de renovação de ar, cuja determinação é complexa, em especial para recintos com ventilação natural e grandes áreas de abertura. Apesar dessas características serem comuns nos ambientes escolares brasileiros, este trabalho identificou carência de estudos que mediram a taxa de ventilação em salas de aula no país. A fim de preencher essa lacuna, mediu-se a taxa de renovação de ar de quatro salas de aula. Adotaram-se dois procedimentos para a execução dos ensaios. A partir do método do decaimento da concentração, conforme norma ISO 12569 (2017), com CO<sub>2</sub> injetado a partir de cilindro, mediu-se a taxa em cenários de ventilação cruzada, unilateral e de infiltração, com total de 72 experimentos; e durante 21 aulas, aproveitando do CO<sub>2</sub> gerado pela respiração dos ocupantes. Se identificou boa correlação entre os resultados obtidos pelos dois métodos. A taxa média registrada por configuração de abertura nos ensaios com cilindro variou entre 0,8 h<sup>-1</sup> para INF; 2,3 h<sup>-1</sup> para VU2; 8,5 h<sup>-1</sup> para VU1, 8,5 h<sup>-1</sup> para VC2 e 24,6 h<sup>-1</sup> para VC1. A taxa média de ventilação das aulas em que a ventilação era cruzada foi de 12,3 h<sup>-1</sup>, e quando unilateral, 4,3 h<sup>-1</sup>. Nota-se que não houve correspondência entre as configurações idealizadas e as configurações adotadas durante as aulas, pois os ocupantes não abriram as esquadrias basculantes em nenhum momento. A comparação das taxas medidas com a previsão de modelos analíticos simplificados existentes na literatura identificou baixa precisão das estimativas. Avaliou-se as taxas medidas como satisfatórias, mesmo em cenários com ventilação unilateral, desde que com áreas de abertura devidamente dimensionadas e operadas pelos ocupantes.

**Palavras-chave:** Ventilação natural; taxa de ventilação; gás carbônico; gás traçador; decaimento da concentração; salas de aula.

DECKER, Pedro Henrique Bruder. **Measurement of natural ventilation rates in classrooms**: application of tracer gas methods with CO<sub>2</sub>. 2023. 235 pp. Dissertation (Master's degree in Civil Engineering), Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2023.

## ABSTRACT

Ventilation of indoor environments is crucial for the thermal comfort of occupants, energy efficiency of buildings, and plays a vital role in indoor air quality (QAI). One of the most important parameters for QAI is the air exchange rate, the determination of which is complex, particularly for spaces with natural ventilation. In such cases, the most suitable methods are those based on tracer gases. Although these characteristics are common in Brazilian school environments, this study identified a lack of research measuring ventilation rates in classrooms in the country. To address this gap, air exchange rates were measured in four classrooms. Two procedures were adopted for conducting the tests. First, the rate was measured in scenarios of cross and unilateral ventilation, and infiltration, totaling seventy-two experiments by adopting the concentration decay method, according to ISO 12569 (2017) standard, with CO<sub>2</sub> injected from a cylinder; then, utilizing the CO<sub>2</sub> generated by occupants' respiration, it was measured during twenty-one classes. A good correlation was identified between the results obtained by the two methods. The average airflow rate recorded per opening configuration in the cylinder tests ranged from 0.8 h<sup>-1</sup> for INF, 2.3 h<sup>-1</sup> for VU2, 8.5 h<sup>-1</sup> for VU1, 8.5 h<sup>-1</sup> for VC2, to 24.6 h<sup>-1</sup> for VC1. The average ventilation rate for classrooms with cross-ventilation was 12.3 h<sup>-1</sup>, and for unilateral ventilation, it was 4.3 h<sup>-1</sup>. It is worth noting that there was no correspondence between the idealized configurations and the configurations adopted during the classes, as the occupants did not open the casement windows at any time. The comparison of the measured rates with the predictions of existing simplified analytical models in the literature identified a low precision of the estimates. The measured rates were assessed as satisfactory, even in scenarios with unilateral ventilation, provided that the opening areas were properly dimensioned and operated by the occupants.

**Keywords:** Natural ventilation; ventilation rates; carbon dioxide; tracer gas; concentration decay; classroom.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 01 – Efeito da ação dos ventos .....	20
Figura 02 – Zona de esteira gerada por um obstáculo .....	25
Figura 03 – Simulação do fluxo de ar entre blocos adjacentes .....	26
Figura 04 – Variação da velocidade do vento conforme a altura.....	27
Figura 05 – Exemplo do efeito da topografia no perfil do vento .....	27
Figura 06 – Aproveitamento para ventilação de esquadrias .....	30
Figura 07 – Métodos de cálculo de área livre para janelas basculantes e maxim-ar	30
Figura 08 – Área livre e área efetiva a partir de um orifício de borda viva .....	31
Figura 09 – Visão aérea do CTU e arredores.....	56
Figura 10 – Topografia dos arredores com obstáculos destacados em cinza.....	57
Figura 11 – Corte do CTU .....	58
Figura 12 – Fotografias das fachadas Norte, Sul, Leste e Oeste do CTU.....	58
Figura 13 – Planta baixa do térreo .....	59
Figura 14 – Planta baixa do primeiro pavimento .....	59
Figura 15 – Planta baixa do segundo pavimento .....	60
Figura 16 – Modelo 3D explodido das salas.....	61
Figura 17 – Interior da sala MM8.....	61
Figura 18 – Módulo de esquadria máximo-ar.....	61
Figura 19 – Módulo de esquadrias basculantes e porta.....	62
Figura 20 – Esquadrias da fachada Norte do bloco Norte.....	62
Figura 21 – Esquadrias da fachada Sul do bloco Norte .....	62
Figura 22 – Esquadrias da fachada.....	62
Figura 23 – Esquadrias da fachada Sul do bloco Sul.....	62
Figura 24 – Vão presente nas esquadrias máximo-ar .....	63
Figura 25 – Vão entre esquadria e estrutura de concreto .....	63
Figura 26 – Alavanca para operação das esquadrias basculantes .....	64
Figura 27 – Dimensões consideradas no modelo de cálculo da ESFA.....	66
Figura 28 – Distância entre o CTU e a estação meteorológica do IDR-PR.....	68
Figura 29 – Cilindro de CO <sub>2</sub> e válvulas.....	73
Figura 30 – Sensor NDIR de CO <sub>2</sub> com termo-higrômetro .....	74
Figura 31 – Conjunto de sensor de CO <sub>2</sub> e tripé metálico .....	74
Figura 32 – Ventilador portátil .....	75

Figura 33 – Fluxograma dos ensaios de decaimento com cilindro .....	78
Figura 34 – Posicionamento dos sensores de CO <sub>2</sub> da sala 1008 .....	80
Figura 35 – Fluxograma dos ensaios com CO <sub>2</sub> metabólico.....	83

## LISTA DE TABELAS

Tabela 01 – Coeficientes $k$ e $a$ para correção devido à rugosidade do terreno .....	28
Tabela 02 – Dimensões das salas de aula onde ocorreram as medições .....	60
Tabela 03 – Quadro de esquadrias organizado por sala de aula .....	65
Tabela 04 – Configurações de abertura nos ensaios com cilindro .....	67
Tabela 05 – Áreas de abertura para cada sala e configuração de abertura [m <sup>2</sup> ] .....	68
Tabela 06 – Procedimento de cálculo de $\Delta Cp$ em campo aberto .....	94
Tabela 07 – Estatísticas descritivas de $R^2$ da regressão multipontos .....	107
Tabela 08 – Incerteza calculada para os métodos 2 pontos e multipontos .....	109
Tabela 09 – Estatísticas descritivas de $N$ [h <sup>-1</sup> ] por configuração .....	111
Tabela 10 – Média, erro relativo e desvio padrão da taxa de ventilação por sala ...	117
Tabela 11 – Configurações de abertura registradas durante aulas .....	146
Tabela 12 – Estatísticas descritivas de $N_{95}$ [h <sup>-1</sup> ] por tipo de ventilação .....	149
Tabela 13 – Estatísticas descritivas de $N_{95}$ [h <sup>-1</sup> ] por configuração de abertura .....	150
Tabela 14 – Estatísticas descritivas de $N_{95}$ [h <sup>-1</sup> ] por sensor e tipo de ventilação ....	152
Tabela 15 – Capacidade das salas de aula .....	163

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 01 – Cd em função da direção do vento para janelas pivotantes .....	32
Gráfico 02 – Coeficientes de descarga obtidos pela aplicação da EN13141-1 .....	34
Gráfico 03 – Histograma de intensidade média horária do vento (2015-2020) .....	69
Gráfico 04 – Frequência de ocorrência por direção .....	69
Gráfico 05 – Intensidade média horária do vento por direção (2015-2020) .....	70
Gráfico 06 – Box-plot da intensidade média horária do vento por direção .....	70
Gráfico 07 – Intensidade média horária do vento (2015-2020) .....	71
Gráfico 08 – Intensidade média mensal do vento (2015-2020) .....	71
Gráfico 09 – Intensidade média anual do vento (2015-2020) .....	72
Gráfico 10 – Temperaturas registradas entre 1976 e 2019 .....	72
Gráfico 11 – Momento das etapas dos ensaios de decaimento com cilindro .....	79
Gráfico 12 – Período para aplicação da analogia à concentração estacionária .....	85
Gráfico 13 – Concentração de CO <sub>2</sub> , velocidade e direção do vento, dia 29/08/22 ....	99
Gráfico 14 – Concentração de CO <sub>2</sub> , velocidade e direção do vento, dia 22/08/22 ..	100
Gráfico 15 – $C(t)_{\text{médio}}$ dos ensaios de infiltração .....	101
Gráfico 16 – $\Delta C(t)/\Delta C(t_1)$ durante o decaimento, INF .....	101
Gráfico 17 – $\Delta C(t)/\Delta C(t_1)$ durante o decaimento, VC1 .....	102
Gráfico 18 – $\Delta C(t)/\Delta C(t_1)$ durante o decaimento, VC2 .....	102
Gráfico 19 – $\Delta C(t)/\Delta C(t_1)$ durante o decaimento, VU1 .....	103
Gráfico 20 – $\Delta C(t)/\Delta C(t_1)$ durante o decaimento, VU2 .....	103
Gráfico 21 – Visão geral dos ensaios de decaimento com cilindro .....	104
Gráfico 22 – Exemplo de amostra com taxa variada ao longo do decaimento .....	106
Gráfico 23 – Box-plot de R <sup>2</sup> da regressão linear de $\ln(\Delta C(t))$ por configuração .....	106
Gráfico 24 – Incerteza calculada para os métodos 2 pontos e multipontos .....	108
Gráfico 25 – Incerteza calculada para os métodos 2 pontos e multipontos .....	110
Gráfico 26 – Box-plot da taxa de ventilação por configuração de abertura .....	112
Gráfico 27 – Histogramas de frequência relativa de $N$ [h <sup>-1</sup> ] por configuração (X) ...	115
Gráfico 28 – Box-plot da taxa de ventilação ( $N$ ) [h <sup>-1</sup> ] por sala de aula .....	116
Gráfico 29 – Taxa de ventilação [h <sup>-1</sup> ] por sala e configuração de abertura .....	118
Gráfico 30 – Resultados do teste de Tukey para VC .....	119
Gráfico 31 – Resultados do teste de Tukey, para VC, fatores combinados .....	120
Gráfico 32 – Resultados teste de Tukey para VU .....	121

Gráfico 33 – Resultados teste de Tukey por sala para INF.....	122
Gráfico 34 – Taxa de ventilação por sensor.....	123
Gráfico 35 – Taxa de ventilação por sensor e configuração de abertura.....	124
Gráfico 36 – Velocidades do vento registradas por configuração de abertura.....	128
Gráfico 37 – Velocidades do vento registradas por sala.....	128
Gráfico 38 – Velocidades do vento registradas por sala e configuração.....	129
Gráfico 39 – $N$ [ $h^{-1}$ ] x $v_{urb}$ em diferentes cenários de abetura.....	130
Gráfico 40 – $N$ [ $h^{-1}$ ] x $v_{urb}$ em cenários de infiltração.....	132
Gráfico 41 – Taxa de ventilação x Velocidade do vento corrigida, VC.....	134
Gráfico 42 – Taxa de ventilação x Velocidade do vento corrigida, VU.....	134
Gráfico 43 – Intensidade [ $m/s$ ] e direção do vento durante ensaio de VC1 e VC2..	135
Gráfico 44 – Intensidade [ $m/s$ ] e direção do vento durante ensaio de VU1 e VU2..	136
Gráfico 45 – Taxa de ventilação por direção do vento.....	136
Gráfico 46 – Taxa de ventilação por ângulo de incidência do vento.....	137
Gráfico 47 – Taxa de ventilação x $\Delta T$ .....	138
Gráfico 48 – Dispersão de $N$ [ $h^{-1}$ ] por $A_{effs}$ [ $m^2$ ] (Lamberts).....	139
Gráfico 49 – Dispersão de $N$ [ $h^{-1}$ ] por $A_{effs}$ [ $m^2$ ] (ESFA).....	140
Gráfico 50 – Concentração de $CO_2$ e temperatura ao longo do dia 27/02/2023.....	143
Gráfico 51 – Box-plot $N_{95}$ [ $h^{-1}$ ] por tipo de ventilação.....	148
Gráfico 52 – Histograma da taxa de ventilação [ $h^{-1}$ ] para VC e VU.....	149
Gráfico 53 - Taxa de ventilação por configuração de abertura registrada.....	150
Gráfico 54 – $N_{95}$ [ $h^{-1}$ ] por sensor e tipo de ventilação.....	151
Gráfico 55 – Avaliação da uniformidade da concentração entre aparelhos.....	154
Gráfico 56 – Verificação do equilíbrio da concentração.....	155
Gráfico 57 – Box-plot da taxa de ventilação e sua incerteza calculada.....	156
Gráfico 58 – Erro relativo dos ensaios com $CO_2$ metabólico.....	157
Gráfico 59 – Avaliação da QAI conforme Allen et al. (2020) em cenários ideais.....	160
Gráfico 60 – Avaliação da QAI conforme Allen et al. (2020) uso real.....	162
Gráfico 61 – Fluxo de ar por pessoa [ $L/s$ ] calculado para ocupação máxima.....	163
Gráfico 62 – Fluxo de ar por pessoa [ $L/s$ ] calculado para ocupação restrita (2 m)..	164
Gráfico 63 – Fluxo de ar por pessoa [ $L/s$ ] para ocupação real.....	165
Gráfico 64 – $Cd$ calculado de acordo com o ângulo de abertura da esquadria.....	169
Gráfico 65 – $N$ medido e $N$ calculado, ventilação cruzada, ambiente urbano.....	171

Gráfico 66 – $N$ medido e $N$ calculado, ventilação cruzada, “uma casa” .....	172
Gráfico 67 – Comparação de $N$ com previsões para VU, $A_f$ Lamberts .....	176
Gráfico 68 – Comparação de $N$ com previsões para VU, $A_f$ ESFA .....	178

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>11</b>
1.1	OBJETIVO GERAL.....	14
1.2	OBJETIVO ESPECÍFICOS .....	14
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO .....	15
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>17</b>
2.1	MECANISMOS E ESTRATÉGIAS DE VENTILAÇÃO NATURAL .....	17
2.1.1	Efeito Chaminé .....	18
2.1.2	Ação dos Ventos .....	19
2.1.3	Ventilação Unilateral.....	22
2.2	FATORES QUE INFLUENCIAM A VENTILAÇÃO DE AMBIENTES INTERNOS.....	23
2.2.1	Velocidade do Vento e Coeficientes de Pressão.....	23
2.2.2	Áreas de Abertura e Coeficiente de Descarga .....	29
2.2.3	Temperatura Interna e Externa .....	35
2.3	CONFORTO TÉRMICO E EFICIÊNCIA ENERGÉTICA.....	36
2.4	QUALIDADE DO AR INTERNO .....	38
2.5	MÉTODOS PARA ESTIMAR OU MEDIR DE TAXAS DE VENTILAÇÃO.....	42
2.5.1	Modelos analíticos simplificados .....	42
2.5.2	Medida com Anemômetros.....	44
2.5.3	Ensaio em Escala .....	45
2.5.4	Simulações Computacionais .....	46
2.5.5	Gases Traçadores .....	50
<b>3</b>	<b>MÉTODO.....</b>	<b>55</b>
3.1	CARACTERIZAÇÃO DO EDIFÍCIO DE ESTUDO .....	56
3.2	CARACTERIZAÇÃO DO CLIMA.....	68
3.3	MATERIAIS .....	73
3.4	PROCEDIMENTO DOS EXPERIMENTOS .....	75
3.4.1	Ensaio de Decaimento com Cilindro.....	76
3.4.2	Ensaio com CO <sub>2</sub> Metabólico .....	82
3.5	TRATAMENTO DOS DADOS .....	86
3.5.1	Ensaio de Decaimento com Cilindro.....	86

3.5.2	Ensaaios com CO <sub>2</sub> Metabólico .....	91
3.6	COMPARAÇÃO COM MODELOS ANALÍTICOS .....	93
3.7	CRITÉRIOS PARA AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DO AR.....	95
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>97</b>
4.1	ENSAIOS DE DECAIMENTO COM CILINDRO .....	97
4.1.1	Visão Geral dos Ensaaios .....	98
4.1.2	Comparação dos Métodos de Decaimento Dois Pontos e Multipontos ..	105
4.1.3	Taxa de Ventilação por Configuração de Abertura.....	111
4.1.4	Taxa de ventilação por Sala de Aula .....	116
4.1.5	Taxa de Ventilação por Configuração de Abertura e Sala de Aula .....	118
4.1.6	Influência da Posição dos Sensores.....	123
4.1.7	Influência das Condições do Tempo .....	126
4.1.8	Influência das Áreas de Abertura na Taxa de Ventilação.....	139
4.2	ENSAIOS COM CO <sub>2</sub> METABÓLICO .....	142
4.2.1	Visão Geral dos Ensaaios .....	142
4.2.2	Comportamento dos Ocupantes.....	145
4.2.3	Taxa de Ventilação Durante as Aulas .....	148
4.2.4	Influência da Posição dos Sensores.....	151
4.2.5	Limitações e Potencial do Monitoramento Contínuo de CO <sub>2</sub> .....	154
4.3	AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DO AR .....	159
4.4	COMPARAÇÃO DAS MEDIÇÕES COM MODELOS ANALÍTICOS .....	167
4.4.1	Ventilação cruzada .....	170
4.4.2	Ventilação Unilateral.....	176
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>179</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>185</b>
	<b>APÊNDICES.....</b>	<b>192</b>
	<b>APÊNDICE A – ELEVAÇÕES DO EDIFÍCIO DE ESTUDO DE CASO .</b>	<b>193</b>
	<b>APÊNDICE B – FORMULÁRIO PARA ENSAIOS DE DECAIMENTO ..</b>	<b>195</b>
	<b>APÊNDICE C – ENSAIOS COM CILINDRO.....</b>	<b>196</b>
	<b>APÊNDICE D – ENSAIOS COM CO<sub>2</sub> METABÓLICO .....</b>	<b>232</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A ventilação natural em edificações pode atender a diferentes objetivos. Para Bittencourt e Cândido (2005), são três os principais: promover qualidade do ar interno, auxiliar na manutenção do conforto térmico dos ocupantes, e resfriar os edifícios. Etheridge e Sandberg (1996) dão ênfase ao aspecto da qualidade do ar, defendendo que o propósito geral da ventilação em edificações é fornecer ar fresco para a respiração.

No final de 2019 foram reportados os primeiros casos de uma nova doença respiratória, a COVID-19. Em poucos meses a doença se tornou uma pandemia, que persiste até o momento da escrita deste trabalho. Sua principal via de transmissão é aérea, ou seja, por contato com gotículas e aerossóis emitidos por indivíduos contaminados. Neste contexto, a área de estudo da ventilação de edificações ganhou atenção especial na comunidade acadêmica, já que diversos estudos, como o de Jones et al. (2020) indicam que a má ventilação tem relação com o aumento da probabilidade de contaminação pelo vírus SARS-CoV-2, causador da enfermidade.

O efeito da má qualidade do ar em edificações devido a ventilação insuficiente já era reconhecido muito antes da pandemia. O efeito prejudicial da ventilação inadequada já era discutido por cientistas como Lavoisier e Heyman no século XIX, o último inclusive tendo medido a concentração de CO<sub>2</sub> em salas de aula Estocolmo (SUNDELL, 2004). O problema ganhou destaque a partir da década de 70 do século XX, quando edificações extremamente vedadas ganharam espaço em países Europeus, por gerarem redução de custos com condicionamento artificial (SCHIRMER et al., 2011). Mais recentemente, em 1982, a Organização Mundial da Saúde reconheceu a chamada Síndrome dos Edifícios Doentes, estabelecendo relação com a ventilação inadequada.

Pandemias de infecções respiratórias como a enfrentada nos últimos anos podem ser evitadas ou mitigadas a partir da evolução dos sistemas de ventilação nas edificações. Morawska et al. (2021) defendem que assim como os sistemas de esgoto revolucionaram a qualidade de vida nas cidades, reduzindo índices de contaminação de diversas doenças, uma mudança de paradigma nos sistemas de ventilação pode revolucionar a forma que lidamos com infecções respiratórias.

Taxas de ventilação são um dos mais importantes parâmetros

relacionados à qualidade interna do ar. Há em diferentes países diversas normas que tratam de parâmetros de ventilação, a exemplo da norma estadunidense 62.1-2019 ASHRAE, que estabelece taxas mínimas de ventilação de acordo com o uso do ambiente e a idade dos ocupantes (ASHRAE, 2019).

Diversos métodos já foram propostos para determinação dessas taxas, porém sem padronização generalizada (MORAWSKA et al., 2021). Os mais aceitos pela comunidade acadêmica são baseados na medida da concentração de gases traçadores, com procedimentos descritos em normas como ASTM E741 (2017) e ISO 12569 (2017) (PERSILY, 2016; SANDBERG et al., 2008).

Gás traçador é uma substância que pode ser misturada ao ar e medida em baixíssimas concentrações. Ao se considerar uma distribuição uniforme do gás no ambiente, a partir dos princípios de balanço de massa, ou de análise do equilíbrio, é possível determinar sua taxa de ventilação, considerando que o traçador será retirado do ambiente junto com o ar (PERSILY, 1997).

Diversos gases são adequados para esse propósito. No passado o uso do SF<sub>6</sub> era convencional, porém devido a seu elevado potencial de efeito estufa seu uso tem sido desencorajado (ALMEIDA, BARREIRA e MOREIRA, 2020). De acordo com a ISO 12569 (2017), o SF<sub>6</sub> possui potencial de efeito estufa 23900 maior que o CO<sub>2</sub> para uma mesma massa. Cui et al. (2015) recomendam a adoção do CO<sub>2</sub> como gás traçador, por apresentar custo relativamente baixo e possuir menor impacto ambiental quando comparado a outros gases (PFT's, N<sub>2</sub>O, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, SF<sub>6</sub>).

Entretanto, a adoção do CO<sub>2</sub> demanda atenção com alguns pontos, já que, por estar presente na atmosfera, é necessário medir e considerar a concentração de fundo; além disso, por ser um subproduto do metabolismo humano, é necessário controlar a ocupação do recinto estudado. Apesar de demandar atenção com a ocupação do ambiente, é possível aproveitar o CO<sub>2</sub> gerado pelos ocupantes para alcançar as concentrações necessárias de gás para a execução do experimento, sem utilizar injeção artificial.

No passado os instrumentos necessários para a medição da concentração de CO<sub>2</sub> eram de difícil acesso, sendo necessário tomar amostras de ar em intervalos predefinidos para análise laboratorial. Hoje os sensores baseados na tecnologia de infravermelho não dispersivo (NDIR) são portáteis, podem registrar dados continuamente, além de possuir valor mais acessível.

O procedimento de implementação do sistema de medição com base

gás expelido pelos ocupantes é relativamente simples, e autores como Morawska et al. (2021) defendem a obrigatoriedade da instalação de sensores de qualidade do ar (não somente de CO<sub>2</sub>, mas principalmente) em diversos ambientes fechados, dentre eles salas de aula.

A existência de lacunas no conhecimento científico acerca do fenômeno da ventilação natural em edificações é destacada por diversos autores, em especial para ambientes com grandes áreas de abertura (FAN et al., 2021; HEISELBERG e SANDBERG, 2006; PERSILY, 2016).

O desempenho aerodinâmico de diferentes tipos de esquadrias ainda não é consenso na literatura, particularmente para aquelas que se projetam além do plano da parede, como esquadrias pivotantes e basculantes (SHARPE et al., 2021). Isso dificulta a padronização das áreas de abertura reportadas e a predição das taxas de ventilação a partir de modelos analíticos. Almeida, Barreira e Moreira (2020) também enfatizam a necessidade de estudos com maior número amostral para estabelecer o impacto da direção do vento e do gradiente entre temperaturas interna e externa nas taxas de ventilação.

Questões em aberto incluem a utilização de dados climáticos coletados em estações meteorológicas distantes do edifício de estudo de caso e a recomendação de novos ensaios de campo para investigar os erros associados à transposição dos dados de velocidade e direção do vento entre estação e edifício (FAN et al., 2021).

Demonstrada a relevância das taxas de ventilação em relação à saúde e conforto térmico dos ocupantes, e a dificuldade em se obter valores confiáveis a partir de modelos analítico, neste trabalho mediu-se a taxa de ventilação em 4 salas de aula do Centro de Tecnologia de Urbanismo da Universidade Estadual de Londrina, edificação composta por dois blocos e três pavimentos. São ambientes ventilados naturalmente por esquadrias basculantes e máximo-ar, além de uma porta.

O partido arquitetônico do edifício escolhido é um dos mais comuns nas instituições de ensino brasileiras (KOWALTOWSKI, 2011). Sua geometria complexa, e a presença de obstáculos ao seu redor implica maiores incertezas em estimativas da ventilação a partir de modelos analíticos, o que reforça a necessidade da execução dos ensaios experimentais.

Cinco cenários predeterminados de ventilação foram estudados pelo método do decaimento de CO<sub>2</sub> como gás traçador: dois de ventilação cruzada, dois

de ventilação unilateral e um de infiltração, num total de 72 experimentos. Além disso, calculou-se a taxa de ventilação para um dos recintos a partir do monitoramento da concentração de CO<sub>2</sub> durante as aulas, com objetivo de avaliar as condições reais de uso.

A medida das taxas de ventilação tem potencial para guiar o planejamento de edifícios futuros com sistemas de ventilação mais eficientes, reduzindo a chance de propagação de diversas doenças transmissíveis pelo ar (MORAWSKA et al., 2021). Os resultados também são de grande valia para estudos relacionados ao conforto térmico das edificações, ponto de relevância para construções situadas em solo brasileiro, já que a ventilação natural é uma estratégia bioclimática recomendada para 7 das 8 zonas bioclimáticas de país de acordo com a NBR 15.220 (ABNT, 2005).

Os dados obtidos, além de elucidar condições de ventilação que podem ser estendidas a diversas outras instituições de ensino com condições similares no país, também possibilitam o estudo comparativo com simulações computacionais, viabilizando calibrações de simulações futuras.

## 1.1 OBJETIVO GERAL

Analisar o desempenho da ventilação natural em ambientes escolares a partir da mensuração das taxas de ventilação de salas de aula dotadas de janelas basculantes e máximo-ar, a partir de métodos de gases traçadores conforme a norma ISO-12569 (2017).

## 1.2 OBJETIVO ESPECÍFICOS

Medir a taxa de ventilação de quatro salas a partir do método de decaimento de CO<sub>2</sub> como gás traçador para cenários ideais de ventilação: ventilação cruzada, unilateral e infiltração.

Calcular a taxa de ventilação de uma sala a partir do monitoramento da ocupação e concentração de CO<sub>2</sub> durante as aulas, sem interferência na configuração de aberturas determinadas pelos ocupantes, pela estratégia da concentração estacionária.

Identificar estratégias eficientes de ventilação natural para auxiliar a

execução de edifícios escolares com melhor qualidade do ar.

Avaliar a relevância do comportamento dos usuários em relação à operação das esquadrias nas taxas de renovação de ar.

Comparar taxas de ventilação obtidas por meio de métodos de gases traçadores com previsões obtidas a partir de modelos analíticos simplificados.

### 1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Após esta seção introdutória, este trabalho está dividido nas seguintes seções:

A revisão bibliográfica, apresentada no item 2, fornece o referencial teórico necessário para mensurar a taxa de ventilação em edificações. Inicialmente, discutem-se os mecanismos e estratégias de ventilação natural, como efeito chaminé, ação dos ventos e ventilação unilateral. Em seguida, abordam-se os fatores que influenciam a ventilação de ambientes internos, incluindo velocidade do vento e coeficientes de pressão, áreas de abertura e coeficiente de descarga, e temperatura interna e externa. A importância da coleta desses dados é destacada pelas implicações no conforto térmico e desempenho energético, bem como na qualidade do ar interno. Dentre os diversos métodos para estimar ou medir taxas de ventilação, o de decaimento de CO<sub>2</sub> como gás traçador foi selecionado, sendo discutidas também outras abordagens, como modelos analíticos simplificados, medidas com anemômetros, ensaios em escala e simulações computacionais.

Na seção de método, item 3, se apresenta e discute todos os procedimentos experimentais adotados, desde a etapa de planejamento até a de tratamento dos dados, incluindo caracterização fiel da edificação de estudo e o clima. Parte dos ensaios propostos utilizarão CO<sub>2</sub> a partir de cilindros, enquanto outros aproveitarão do gás expelido pela respiração dos ocupantes. Pretende-se que a partir dessa seção seja possível reproduzir os ensaios.

No item 4, são apresentados os resultados e discussões desta pesquisa. Os resultados alcançados contribuem para a compreensão da ventilação natural em salas de aula, especialmente no contexto brasileiro, e fornecem embasamento relevante para futuras pesquisas na área. Além de apresentadas as taxas de ventilação registradas em diferentes configurações de abertura, e durante o uso real dos recintos; avaliam-se pontos como a adequação e precisão de diferentes

métodos de medição, influência do número e posicionamento de sensores utilizados, das áreas de abertura e condições do tempo, além de comparações com modelos analíticos.

Finalmente, no item 5, apresentam-se as conclusões desta pesquisa, enfatizando as contribuições significativas e o impacto prático dos resultados obtidos. Além disso, são propostas sugestões para futuros estudos no campo da ventilação natural em edificações e são oferecidas recomendações projetuais voltadas para edifícios educacionais, com o objetivo de otimizar a ventilação natural e melhorar a qualidade do ar no ambiente, proporcionando condições mais adequadas para os ocupantes.

Ainda estão disponíveis quatro apêndices. No **Apêndice A** encontram-se elevações do edifício, para melhor caracterizá-lo. Em seguida, no **Apêndice B** apresenta-se exemplo do formulário utilizado para organizar os dados dos 72 ensaios de decaimento com cilindro; o **Apêndice C** elenca gráficos da concentração de CO<sub>2</sub> ao longo do tempo para cada desses ensaios, além do registro da intensidade e direção do vento durante cada intervalo de medição. Por fim, o **Apêndice D** apresenta gráficos da concentração de CO<sub>2</sub> e temperatura ao longo das medições com o gás metabólico, e contém informações sobre a ocupação e configuração de abertura adotada cada aula.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A ventilação de ambientes internos é um fenômeno complexo, em especial em situações com ventilação natural através de grandes aberturas no envelope da edificação. Por depender de diversos fatores, para estudá-lo, é importante revisar conceitos relacionados a diferentes áreas, como mecânica dos fluidos, arquitetura, clima e engenharia. Esta revisão está dividida em 5 partes, que abordam diferentes pontos essenciais para a compreensão dos fenômenos envolvidos.

Na primeira parte, em 2.1, apresentam-se os principais mecanismos responsáveis pelo movimento do ar (ação dos ventos e efeito chaminé) e diferentes estratégias conhecidas de ventilação (cruzada, unilateral, torres de ventilação).

Em seguida, em 2.2, discutem-se os principais fatores que influenciam a ventilação nas edificações, como condições climáticas, geometria do ambiente, áreas de abertura, tipos de esquadria e disposição de obstáculos internos e externos.

Em 2.3, destaca-se o potencial da aplicação da ventilação natural em prol da melhora do desempenho termoenergético de edificações. Trata-se de uma estratégia passiva para manutenção do conforto térmico, especialmente adequada ao clima da maioria do território brasileiro.

No item 2.4, aborda-se a importância da ventilação natural na manutenção da qualidade do ar interno, com ênfase em seu papel na redução da probabilidade de transmissão de doenças respiratórias e na remoção de contaminantes internos.

Por fim, o item 2.5 aborda os principais métodos utilizados historicamente para medir e estimar taxas de ventilação, e justifica a escolha do método baseado em gás traçador adotado neste estudo, que será discutido em mais detalhes

### 2.1 MECANISMOS E ESTRATÉGIAS DE VENTILAÇÃO NATURAL

Os ambientes internos podem trocar ar com o exterior por meio de aberturas projetadas com esse propósito, ou por vazamentos não proposital. Dá-se o nome de infiltração (ou exfiltração) às trocas de ar não intencionais, como as que ocorrem por frestas nas esquadrias, através do forro, e outros caminhos diversos; e

de ventilação ao deslocamento do ar através das aberturas propositais (PERSILY, 2016).

O ar se movimenta devido a diferenças de pressão estática e dinâmica entre diferentes pontos do espaço, geradas por dois fenômenos: ação dos ventos e efeito chaminé. Massas de ar em temperaturas distintas apresentam diferentes densidades, o que induz o deslocamento do fluido, que gera o chamado efeito chaminé; enquanto isso, a ação do vento gera diferentes coeficientes de pressão no envelope das edificações. Esses mecanismos serão apresentados nas subseções seguintes, bem como as principais estratégias deles dependentes.

### 2.1.1 Efeito Chaminé

À ventilação gerada pela diferença de temperatura do ar, dá-se o nome de efeito chaminé. O ar aquecido tende a ascender, por possuir densidade mais baixa. Diferentes estratégias de ventilação se aproveitam desse fenômeno, que depende da diferença entre a temperatura interna e externa. Frota e Schiffer (2001) apresentam uma fórmula básica, advinda da analogia hidráulica, para estimar o fluxo de ar proporcionado pelo efeito chaminé ( $Q_c$ ) [ $m^3/s$ ], considerando aberturas de mesma dimensão, transcrita na equação 1.

$$Q_c = 0,14 * A * \sqrt{H * \Delta T} \quad (1)$$

, onde  $A$  é a menor entre as áreas de entrada e saída [ $m^2$ ],  $H$  é a distância vertical entre os centros das aberturas de entrada e saída de ar [ $m$ ], e  $\Delta T$  a diferença de temperatura entre ar externo e interno [ $^{\circ}C$ ]. A equação empírica, apesar de não descrever o fenômeno na sua totalidade, é útil para a compreensão dos principais parâmetros envolvidos, e, para Frota e Schiffer (2001), é válida para edifícios de usos mais gerais, como habitações, escolas e escritórios.

Quanto maior a diferença de altura entre as aberturas de entrada e saída de ar, maior o fluxo proporcionado pelo efeito chaminé. Por isso, estratégias que visam aproveitar desse mecanismo são mais eficientes ao localizar aberturas próximas ao piso e ao teto, ou ao construir estruturas verticais para aumentar essa distância. Caso a temperatura interna seja superior à externa, situação mais usual para aplicação do mecanismo, o ar adentra o ambiente pelas aberturas situadas abaixo do nível de pressão neutra, cuja localização depende das dimensões e localização das aberturas (FEW, 2021).

Também é importante que haja gradiente significativo de temperatura entre ambiente interno e externo para que o fenômeno ocorra, ou que esse gradiente seja induzido por estratégias como chaminés solares, que utilizam a radiação solar para aumentar o gradiente.

Caso a temperatura interna seja inferior à externa, situação frequentemente desejável em ambientes de clima quente, pode ocorrer o chamado efeito chaminé reverso, quando ar externo mais quente adentra o edifício por aberturas situadas acima do nível de pressão neutra, e o ar interno sai por aberturas mais baixas (MIJORSKI; CAMMELLI, 2016).

O uso de estratégias baseadas no efeito chaminé apresenta uma vantagem quando comparadas àquelas que dependem da ação dos ventos, descrita na seção seguinte: o fluxo de ar gerado é mais constante (AHMED, KUMAR e MOTTET, 2021). Em um mesmo ambiente, com a mesma configuração de aberturas, a intensidade do fluxo gerado será predominantemente influenciada pela variação entre as temperaturas interna e externa, sem depender da ação imprevisível dos ventos. Entretanto, a magnitude das taxas da ventilação geradas pela adoção do efeito chaminé é inferior quando comparadas as geradas pelo vento, o que pode inviabilizar sua aplicação (ZHANG et al., 2021). Além disso, Jreijiry, Husaunndee e Inard (2007) apontam que climas frios apresentam maior potencial para a utilização do efeito chaminé.

### 2.1.2 Ação dos Ventos

A ação dos ventos nos edifícios induz a criação de zonas de sobrepressão e subpressão. A fachada da edificação em que o vento incide tende a ficar sujeita a pressões positivas, enquanto a fachada oposta a pressões negativas, como ilustra a **Figura 1**. O fluxo do ar ocorre das regiões com maior para regiões com menor pressão (FROTA e SCHIFFER, 2001).

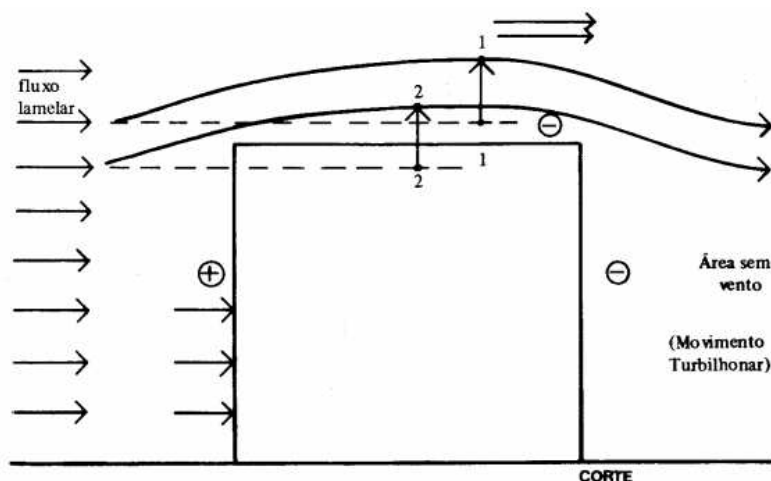
A intensidade do fluxo de ar gerado pela ação dos ventos depende de diversos fatores, e pode ter seu valor estimado pela equação 2 a seguir (SHARPE et al., 2021).

$$Q_v = A_f \times C_d \times \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \quad (2)$$

, onde  $Q_v$  é o fluxo de ar gerado pela ação dos ventos [m<sup>3</sup>/s],  $A_f$  é área

livre [m<sup>2</sup>],  $C_d$  é o coeficiente adimensional de descarga,  $\rho$  é a densidade do ar [kg/m<sup>3</sup>] e  $\Delta P$  é a variação da pressão estática através da abertura. Essa equação é conhecida como “equação do orifício” (HEISELBERG; SANDBERG, 2006)

**Figura 1** – Efeito da ação dos ventos



Fonte: Frota e Schiffer (2001, p. 127)

Em estudos de ventilação é comum descrever o mesmo fenômeno utilizando o conceito de coeficientes de pressão ( $C_p$ ), conforme a equação 3. A modificação é útil, pois diferente da variação da pressão estática  $\Delta P$ , o coeficiente de pressão independe da velocidade do vento, o que permite calcular o fluxo de ar para diferentes intensidades do vento com um único coeficiente.

$$Q_v = A_{effs} \times v_{cor.} \times \sqrt{\Delta C_p} \quad (3)$$

, onde  $A_{effs}$  é a área efetiva de múltiplas aberturas em série [m<sup>2</sup>],  $v_{cor.}$  é a velocidade do vento na abertura de entrada [m/s], e  $\Delta C_p$  é a diferença entre os coeficientes de pressão das fachadas.

O conceito de  $A_{effs}$  será aprofundado na seção 2.2.2, que demonstra que pode ser complexo computar as áreas de abertura com precisão. De forma simplificada, trata-se de ponderação entre as áreas de entrada e saída de ar, contabilizando a influência do  $C_d$ .

A determinação da distribuição dos coeficientes de pressão no envelope dos edifícios é um dos principais desafios para a aplicação das equações 2 e 3, já que varia de acordo com características geométricas do edifício, presença de eventuais obstáculos e direção do vento. A seção 2.2.1 discute em detalhes os conceitos de velocidade do vento e coeficientes de pressão, enquanto o item 2.5.1 apresenta limitações desse e de outros modelos analíticos para o cálculo de taxas de

ventilação.

Será abordado que a aplicação desse tipo de modelo não retorna resultados confiáveis das taxas de ventilação dos ambientes, devido aos diversos parâmetros que influenciam o fenômeno, como variações dos coeficientes de pressão e descarga, porém são úteis para a compreensão dos mecanismos que o regem (PERSILY, 2016).

A principal e mais comum estratégia de ventilação que se baseia na ação dos ventos é a chamada ventilação cruzada, que consiste em localizar aberturas situadas em fachadas adjacentes ou opostas, de forma a aproveitar ao máximo as diferenças entre os coeficientes de pressão gerados pelo vento, com janelas comuns operáveis pelos usuários. Portanto, o posicionamento das aberturas deve ser estratégico, considerando a direção dos ventos predominantes.

Para Lamberts, Dutra e Pereira (2013), a ventilação cruzada se constitui em uma das mais importantes estratégias de ventilação natural, e é capaz de produzir elevadas taxas de ventilação caso sejam adequadas as condições climáticas e do local de aplicação – bastante superiores quando comparadas às geradas pelo efeito chaminé e ventilação unilateral (discutida na seção 2.1.3).

A ventilação cruzada quase não apresenta custos operacionais, entretanto seu uso não é recomendado em ambientes com altos níveis de poluição sonora e atmosférica, situações em que pode ser necessário sistema mecânico de ventilação (AHMED; KUMAR; MOTTET, 2021).

Outras estratégias baseadas na ação dos ventos são torres ou captadores de vento, que consistem basicamente em posicionar aberturas em locais mais altos da edificação, ou construir estruturas elevadas para captar vento com maior velocidade. Bittencourt e Cândido (2010) demonstram que essas podem atuar como coletores ou extratores de vento, de acordo com a direção do vento incidente, apresentando eficiências similares, enquanto Lukiantchuki (2010) chega a conclusão similar para *sheds* que atuam como captadores de vento. Será demonstrado na seção 2.2 que a velocidade do vento é afetada por diversos fatores, dentre eles a altura em relação ao solo e presença de obstáculos. O uso desse tipo de estratégia é especialmente interessante em locais com obstáculos próximos que obstruem o vento de partes mais baixas da edificação.

### 2.1.3 Ventilação Unilateral

Outra estratégia comum de ventilação é a unilateral, que ocorre quando um recinto possui janelas apenas em um dos lados. Quando a janela está situada próxima à chamada linha neutra de pressão do edifício, nem a ação dos ventos nem o efeito chaminé são aproveitados de forma eficiente, uma vez que as diferenças de pressão geradas pelo vento no envelope do edifício não são aproveitadas para induzir fluxo de ar, e não há posicionamento de janelas com grande distância vertical entre si para proporcionar o efeito chaminé (ZHANG et al., 2021). Neste caso, Swami e Chandra (1988) indicam que o mecanismo responsável pela troca de ar é a difusão turbulenta.

Warren e Parkins (1985) apresentam a seguinte equação semiempírica para estimar a taxa de ventilação de um ambiente ventilado por uma única janela.

$$Q_{uni} = 0,025 \times A \times v \quad (4)$$

, onde  $A$  é a área da abertura [ $m^2$ ] (conceito discutido mais à frente),  $Q_{uni}$  é o fluxo de ar por ventilação unilateral [ $m^3/s$ ] e  $v$  é a velocidade do vento na abertura [ $m/s$ ]. Nota-se que os autores não apresentam uma definição clara da área adotada.

O valor da constante 0,025 é apresentado pelos autores como uma estimativa bastante conservadora, e ressaltam que o fluxo de ar nesta situação é uma função não linear da multiplicação entre área livre e velocidade do vento.

Enquanto isso, Swami e Chandra (1988) adotam a constante 0,05 para calcular o fluxo de ar a partir de equação similar, e chamam atenção para que se corrija a velocidade do vento para a altura do teto de cada pavimento em edificações de múltiplos pavimentos, e até a altura do beiral em edificações térreas.

Adicionalmente, maior incerteza está presente no cálculo no caso de janelas pivotantes e basculantes. Também é destacado o fato de que essa estratégia geralmente é inadequada para o resfriamento passivo de edificações no verão, pois promover baixas taxas de ventilação, muito inferiores quando em comparação à ventilação cruzada.

Elementos construtivos ou mesmo vegetação podem ser utilizados para direcionar, induzir ou bloquear a passagem de vento, com objetivo de aumentar as taxas de ventilação obtidas. Janelas de abrir, por exemplo, podem ser projetadas

com posição de abertura fixa para o exterior, buscando criar um direcionamento do ar incidente para o ambiente. Outros exemplos de aplicação de elementos direcionadores, tanto em situações de ventilação unilateral quanto cruzada são platibandas e beirais (LAMBERTS, DUTRA e PEREIRA, 2013). Isso indica que elementos arquitetônicos como proteções solares podem influenciar no fluxo de ar dos ambientes internos, que estão presentes no edifício de estudo de caso deste trabalho.

## 2.2 FATORES QUE INFLUENCIAM A VENTILAÇÃO DE AMBIENTES INTERNOS

Como apresentado nas seções anteriores, diversos fatores influenciam a ventilação nos ambientes internos. A partir das equações 1 a 4 é possível identificar algumas das principais variáveis de interesse: áreas de abertura, coeficiente de descarga, velocidade do vento, coeficientes de pressão das fachadas, diferença de altura entre aberturas e diferença entre temperatura interna e externa.

Cada uma dessas variáveis será brevemente discutida a seguir, já que podem, por sua vez, ser afetadas por outros fatores, o que demonstra a complexidade do fenômeno. Antes, é preciso ressaltar que as equações não descrevem a totalidade do fenômeno da ventilação. As equações 2 e 3 consideram o vento laminar e paralelo à superfície, o que pode ser – em parte do tempo - uma boa aproximação para campos abertos, mas não é o caso de ambientes urbanos, onde o vento é turbulento, sujeito a flutuações na velocidade e direção (GOUGH et al., 2018).

### 2.2.1 Velocidade do Vento e Coeficientes de Pressão

Como apresentado nas na equação 2, o fluxo de ar gerado pela ação dos ventos depende da variação da pressão estática através das aberturas. Como esta variável é de difícil obtenção, e varia de acordo com a intensidade do vento, é útil descrever o fenômeno de acordo com a equação 3, que calcula o fluxo a partir de coeficientes de pressão e da velocidade do vento.

De início, fica claro que a intensidade do fluxo gerado pela ação dos ventos é proporcional à velocidade, e por consequência, à taxa de ventilação dos ambientes com ventilação natural, em especial cruzada. Diversos fatores que influenciam a intensidade que de fato atinge os edifícios são discutidos mais à frente nesta seção. Abre-se um parêntese para ressaltar que a velocidade do vento não

influencia as taxas de ventilação por efeito chaminé, portanto mesmo em condições com vento estagnado, neste tipo de ventilação ainda haverá alguma taxa de troca de ar com o ambiente externo.

Já para compreender os coeficientes de pressão ( $C_p$ ) é necessária breve revisão sobre o conceito. O coeficiente de pressão de um ponto em uma superfície é definido como a razão entre a pressão dinâmica neste ponto ( $P_x$ ) [Pa], pela pressão dinâmica do fluxo (do vento, neste caso) não perturbado ( $P_d$ ) [Pa], conforme a equação 5 (CÓSTOLA, 2006).

$$C_p = \frac{P_x}{P_d} \quad (5)$$

A pressão dinâmica do fluxo não perturbado, por sua vez, pode ser calculada pela equação 6.

$$P_d = \frac{\rho v^2}{2} \quad (6)$$

, onde  $\rho$  e  $v$  são, respectivamente, densidade do ar [kg/m<sup>3</sup>] e velocidade do fluxo [m/s], termos previamente apresentados. A densidade do ar varia de acordo com a pressão atmosférica e temperatura, tendo valor aproximado de 1,225 g/m<sup>3</sup> para 1 atm. e 15 °C.

A distribuição das pressões dinâmicas no envelope do edifício pode ser medida com sensores de pressão distribuídos no edifício, entretanto esse tipo de ensaio é geralmente conduzido em modelos em escala, em túneis de vento. Existem alguns programas e bancos de dados disponíveis, que apresentam a variação dos coeficientes de pressão para diferentes tipos e formas de edifício, em diferentes cenários de rugosidade do terreno, como o da Tokyo Polytechnic University (2007).

Com base neste banco de dados, Cóstola (2006) avalia que pequenas variações no ângulo de incidência do vento, da ordem de 5°, geram diferenças significativas na distribuição desses coeficientes de pressão. Sendo assim, a direção do vento é um dos parâmetros de interesse ao se avaliar a taxas de ventilação. As proporções entre altura, largura e profundidade do edifício, bem como tipo de cobertura também podem influenciar no comportamento do fluxo de ar através e ao redor das edificações.

Para edifícios de plantas retangulares, sem obstruções, os coeficientes de pressão podem ser calculados por equações semiempíricas, como as apresentadas por Swami e Chandra (1988) para edificações de pequeno porte, e por Walker e Wilson (1994) para edifícios altos. Essas equações estão implementadas em

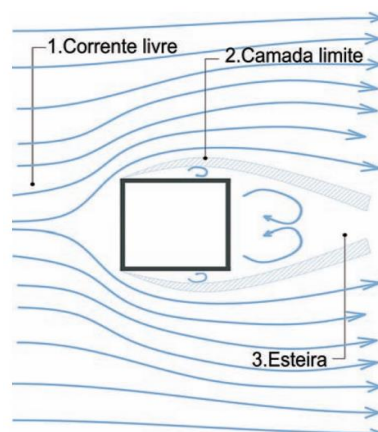
alguns softwares que realizam cálculos da taxa de ventilação a partir de modelos de rede de fluxo de ar (*Airflow Network*), como EnergyPlus, apresentado na seção 2.5.4.

O uso desses resultados aproximados de coeficientes de pressão pode ser útil para gerar resultados preliminares, porém os dados disponíveis são referentes a edifícios de configurações bastante específicas e simples, e na maioria das vezes não consideram obstáculos. São escassos os dados para edifícios com geometrias complexas, ou com detalhes que possam afetar movimento do ar, como brises, o que dificulta a previsão da ventilação por meio dessas equações nessas casos.

De qualquer forma, a distribuição dos coeficientes de pressão está fundamentalmente relacionada tanto com a geometria do edifício, quanto com as características do fluxo de ar que de fato incidente. Vários fatores podem influenciar a velocidade e direção do vento incidente, por exemplo obstáculos diversos. Para compreender a influência de obstáculos sobre o vento, é importante conhecer suas características de escoamento. O fluxo de ar pode ser laminar ou turbulento, o que pode ser avaliado a partir do número de Reynolds ( $Re$ ), a razão das forças inerciais pelas forças viscosas que atuam em determinado ponto do fluido. Quanto maior o valor de  $Re$ , mais turbulento é o fluxo.

O vento sem a influência de obstáculos tende a se deslocar de forma lamelar. Ao atingir um obstáculo cria-se a chamada camada limite, onde há separação do fluxo lamelar, e criação de uma zona turbulenta, também chamada de esteira de vento, como ilustra a **Figura 2** a seguir. Edifícios localizados na chamada zona de esteira, onde o movimento do ar é turbulento, terão a taxa de ventilação devido à ação dos ventos reduzida.

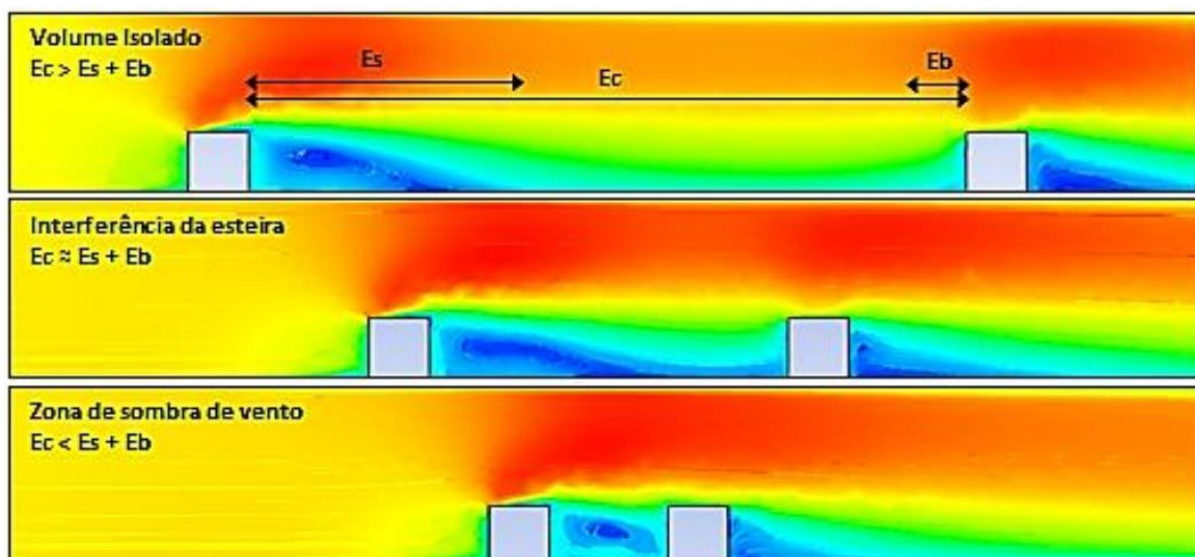
**Figura 2** – Zona de esteira gerada por um obstáculo



Fonte: Bittencourt e Cândido (2010).

A **Figura 3** a seguir apresenta o comportamento do fluxo de ar entre dois edifícios com diferentes afastamentos, a partir de estudo que adotou simulações computacionais.

**Figura 3** – Simulação do fluxo de ar entre blocos adjacentes



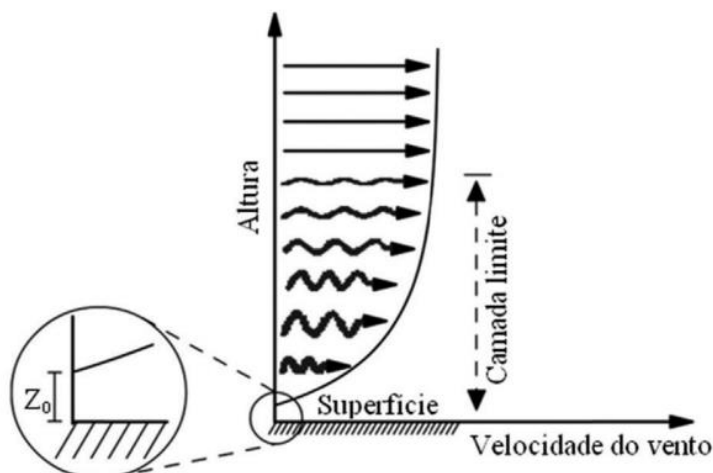
Fonte: Lee et al. (1980) apud Sales (2016).

Quando a distância entre os blocos é insuficiente, há redução na intensidade do vento incidente, e redução da variação entre os coeficientes de pressão das fachadas, o que pode reduzir a taxa de ventilação dos diferentes recintos de edificações que adotam esse partido arquitetônico.

Evidentemente a velocidade e direção do vento apresentam grandes variações de acordo com o clima do local da edificação. Análise preliminar das condições de ventilação da região onde se localiza uma edificação pode ser feita a partir de dados coletados em estações meteorológicas próximas, como de aeroportos, de relativo fácil acesso. Porém, esse tipo de estação geralmente coleta dados à altura padrão de 10 metros, em campo aberto e plano, o que pode ser bastante diferente das condições de rugosidade em que se localiza a edificação.

A própria rugosidade do terreno interfere nas condições de ventilação de um ambiente. Mesmo em terrenos planos e com poucos obstáculos, a velocidade do vento é reduzida nas proximidades do solo, atingindo valor nulo na altura  $Z_0$ , uma medida da rugosidade do terreno (LIRA et al., 2017). O fenômeno é apresentado na **Figura 4** a seguir.

**Figura 4** – Variação da velocidade do vento conforme a altura



Fonte: Lira, et al. (2017, p.79).

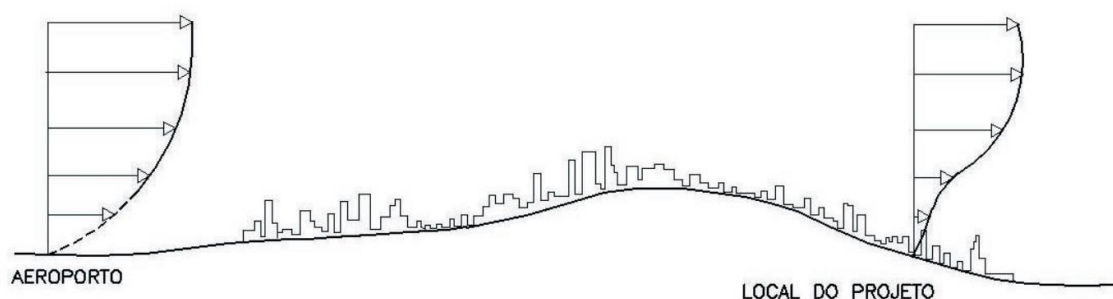
Esse fenômeno ocorre pelo fato do ar se comportar como fluido newtoniano real, com tensão cisalhante não nula; o solo atua como camada limite, onde forças de atrito entre fluido e superfície reduzem as velocidades externas até o repouso total, em gradiente (FREIRE, 1990).

Grandes centros urbanos possuem muitos obstáculos, que reduzem significativamente a intensidade nas proximidades do solo, e geram grandes flutuações na direção do vento, com valores mais altos de rugosidade. Em ambientes com menos obstáculos, como os campos abertos, a velocidade será menos afetada, e o fluxo menos turbulento.

Em ambientes urbanos, principalmente em regiões densamente edificadas, até mesmo a direção das ruas pode ser um fator relevante, com tendência de direcionamento do fluxo no sentido longitudinal das vias como (CHANG, ZHANG e CAI, 2016).

Além disso, variações de relevo, como presença de morros, vales ou depressões também afetam o perfil dos ventos, como ilustra a **Figura 5**.

**Figura 5** – Exemplo do efeito da topografia no perfil do vento



Fonte: Cóstola (2006).

Com isso em vista, a extrapolação de dados de estações meteorológicas próximas pode ser problemática. Há na literatura equações empíricas que se propõem a realizar correção da velocidade do vento de acordo com coeficientes de rugosidade do terreno e a altura de tomada de dados, como apresentado por Lamberts, Dutra e Pereira (2013) com base na equação 7 a seguir.

$$\frac{v}{v_{10m}} = kz^a \quad (7)$$

, onde  $v$  é a velocidade do vento corrigida para a altura da abertura de entrada [m/s],  $v_{10m}$  é a velocidade do vento na altura padrão de 10 m [m/s],  $z$  é altura da abertura de entrada [m], e  $k$  e  $a$  são coeficientes adimensionais de correção de acordo com a rugosidade do terreno; os autores apresentam valores típicos para algumas situações hipotéticas de rugosidade, apresentados à título de exemplificação na **Tabela 1**.

**Tabela 1** – Coeficientes  $k$  e  $a$  para correção devido à rugosidade do terreno

<b>Condição de rugosidade</b>	<b><math>k</math></b>	<b><math>a</math></b>
campo aberto plano	0,86	0,17
campo com algumas barreiras	0,52	0,20
ambiente urbano	0,35	0,25
centro da cidade	0,21	0,33

**Fonte:** autor, adaptado de Lamberts, Dutra e Pereira (2013, p. 175).

É preciso ter em mente, porém, que qualquer forma de extrapolação dos dados originais geram incertezas, principalmente com base em coeficientes determinados de forma qualitativa.

Dessa forma, idealmente os dados meteorológicos devem preferencialmente ser coletados nas proximidades da edificação estudada, para medir o real comportamento do vento no sítio de interesse. Como as condições de ventilação podem variar significativamente ao longo das estações, é recomendável coletar dados por pelo menos um ano. Alguns anos atrás essa proposta não teria nenhum cunho prático, devido ao difícil acesso a equipamentos para a coleta desses dados. Hoje existem no mercado estações meteorológicas portáteis relativamente acessíveis, além de ser possível desenvolver sistemas de monitoramento de baixo custo.

Neste contexto, plataformas baseadas em microcontroladores, como Arduino, podem ser uma opção viável e econômica para o desenvolvimento desses sistemas de monitoramento. Com a utilização de sensores apropriados e programação adequada, é possível criar estações meteorológicas personalizadas e

adaptadas às necessidades específicas do projeto. Entretanto deve-se ter rigor quanto à precisão e calibração dos sensores empregados.

Mesmo ao coletar dados nas proximidades do local de interesse, é preciso analisar a possível interferência de obstáculos. Edifícios, árvores, arbustos e outros anteparos podem atuar como barreiras por distâncias até algumas vezes maior que sua altura (TROEN e PETERSEN, 1989). Até a própria edificação de interesse interfere no fluxo. Sendo assim, caso sejam realizadas medições no local, deve-se localizar o equipamento de forma a minimizar a influência de obstáculos.

Coletados dados de velocidade e direção do vento, uma forma recorrente para tratamento estatístico é a elaboração de rosas-dos-ventos, que podem conter informações acerca da intensidade média do vento por direção, e frequência de ocorrência (LAMBERTS, DUTRA E PEREIRA, 2013).

Os dados ainda podem ser classificados de acordo com a estação, já que para diversos climas há variações significativa do comportamento dos ventos ao longo do ano. Ainda é preciso considerar que mesmo em curtos intervalos de tempo há variações significativas das condições climáticas, além disso existem os períodos de calmaria, onde praticamente não há movimento do ar por ação do vento (TROEN e PETERSEN, 1989).

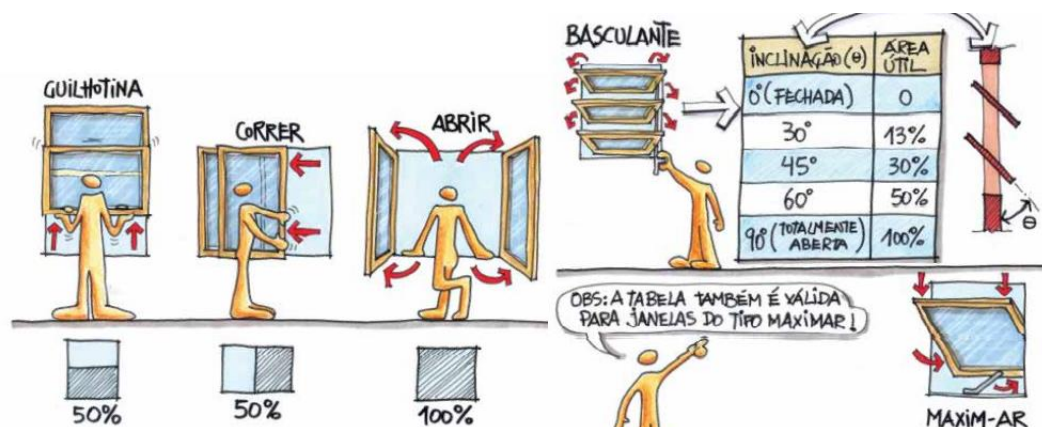
### 2.2.2 Áreas de Abertura e Coeficiente de Descarga

Apresentados os principais fatores que influenciam a velocidade do vento nas aberturas e o coeficiente de pressão das fachadas, discute-se o conceito de áreas de abertura, que apesar de em primeiro momento parecer simples, demanda alguma explanação. Jones et al. (2016) encontraram diversas inconsistências ao conduziram revisão sobre a terminologia (em língua inglesa) de áreas de abertura em estudos de ventilação, normas e softwares. Os autores definem os seguintes termos (traduzidos): área livre ( $A_f$ , *free area*), área efetiva ( $A_{eff}$ , *effective area*), área equivalente ( $A_{eq}$ , *equivalent area*) e área efetiva para múltiplas aberturas em série ( $A_{effs}$ , *effective area of multiple openings in series*).

A “área livre” ( $A_f$ ) é definida como a área livre ao fluxo de ar de uma abertura. Em português é comum a utilização da terminologia “área útil”, aparentemente com o mesmo significado, termo adotado por Lamberts, Dutra e Pereira (2013). Essa dimensão depende do tipo de esquadria adotado; cada tipo de

porta e janela apresenta um percentual diferente de aproveitamento. Uma janela de abrir de duas folhas, por exemplo, pode ser aberta quase totalmente, apresentando grande aproveitamento para ventilação, enquanto uma janela de correr com duas folhas em momento algum pode ser aberta em mais de 50% de sua área total, como ilustra a **Figura 6** a seguir.

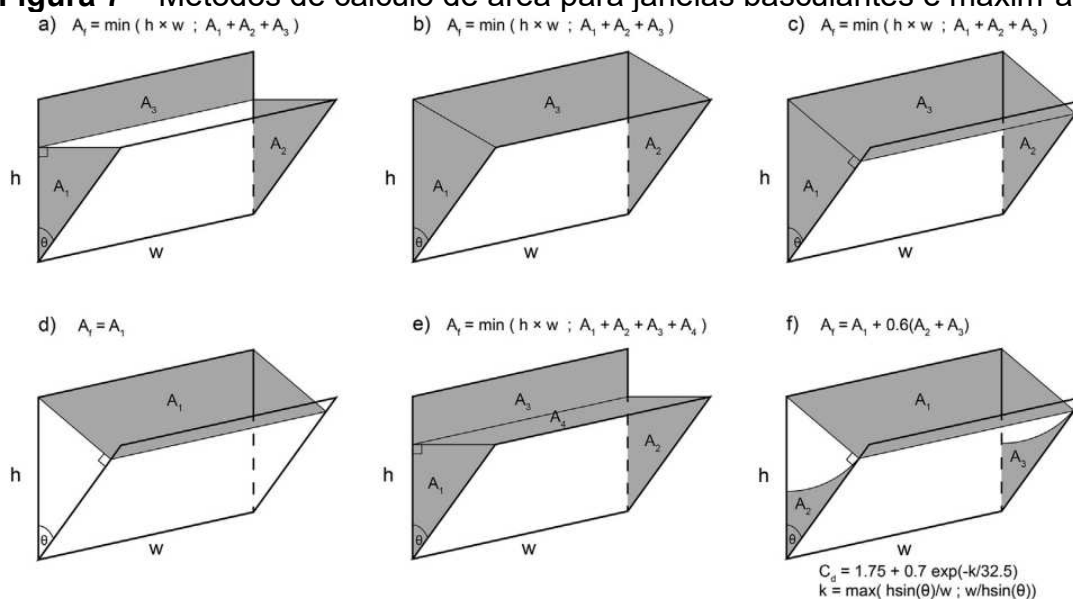
**Figura 6** – Aproveitamento para ventilação de esquadrias



Fonte: Lamberts, Pereira e Dutra (2013, p. 177).

A determinação da área em primeiro momento pode parecer trivial, mas na verdade demanda algum aprofundamento. Para janelas de correr ou abrir, simplesmente medir a área livre com uma trena pode ser adequado, porém isso é diferente para outros tipos de esquadria, como janelas basculantes ou maxim-ar, onde a(s) folha(s) da esquadria atuam como obstáculo ao fluxo de ar, Sharpe et al. (2021) relatam a aplicação de diferentes métodos para a obtenção da área livre, como demonstra a **Figura 7**.

**Figura 7** – Métodos de cálculo de área para janelas basculantes e maxim-ar



Fonte: Sharpe et al. (2021).

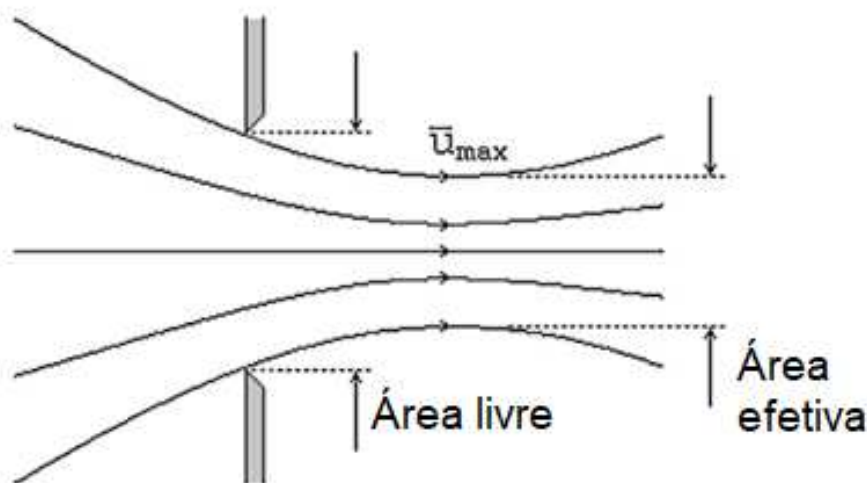
Os resultados para a área obtidos a partir dos diferentes métodos são significativamente discrepantes. Nota-se que mais a frente neste trabalho esse ângulo de inclinação será denotado por  $\alpha$ .

Por conta desse tipo de problema com a definição da área livre, Jones et al. (2016) defendem a utilização do conceito de “área efetiva” ( $A_{eff}$ ) para a caracterização de esquadrias, tanto por fabricantes quanto em estudos de ventilação. Esse valor é calculado conforme a equação 8 a seguir, a partir da multiplicação da área livre da abertura pelo coeficiente de descarga ( $C_d$ ), utilizado para ponderar o efeito da constrição das linhas de fluxo de um fluido ao passar por um orifício.

$$A_{eff} = A_f C_d \quad (8)$$

A **Figura 8** representa o fluxo de ar através de um orifício de borda viva; ocorre o fenômeno da constrição do fluxo, de forma que a área pela qual o ar de fato atravessa a abertura, a área efetiva ( $A_{eff}$ ), é menor do que a área geométrica real da abertura, a área livre ( $A_f$ ). A área efetiva é correspondente à região de maior constrição do fluxo, que também terá a maior velocidade.

**Figura 8** – Área livre e área efetiva a partir de um orifício de borda viva



Fonte: Adaptado de Jones et al. (2016).

O tipo de esquadria ainda influencia o coeficiente de descarga da abertura, de forma que, para Heiselberg e Sandberg (2006), esse não pode ser tratado como constante, mesmo para gerar resultados aproximados a partir de equações empíricas, como fazem muitos estudos sobre ventilação como Frota e Schiffer (2001), Lamberts, Dutra e Pereira (2013) e Jones et al. (2016).

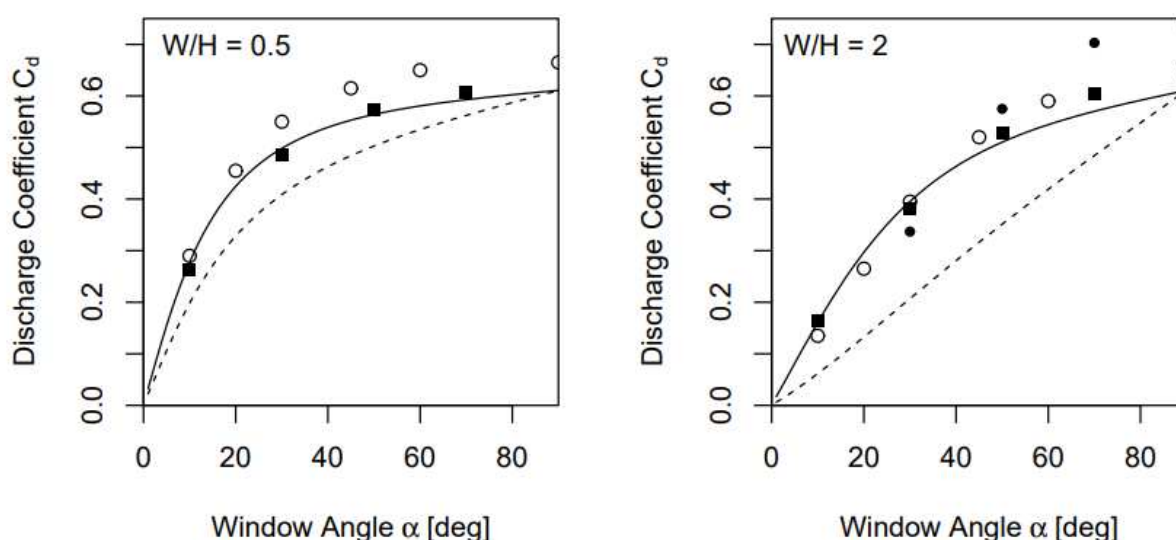
Karava, Stathopoulos e Athienitis (2004) em revisão acerca de coeficientes de descarga reforçam que esses valores apresentam grande variação em

função do formato e orientação das aberturas, direção do vento, número de Reynolds e da porosidade do recinto, definida como a razão entre áreas de abertura e área da parede. Heiselberg e Sandberg (2006) ainda apontam situações com esquadrias pivotantes como especialmente complexas para a determinação do  $C_d$ , já que a própria esquadria atua como obstáculo ao fluxo de ar.

O **Gráfico 1** apresenta resultados do estudo de Hult, Iaccarino e Fischer (2012), em que se demonstra a variação do  $C_d$  em função do ângulo de abertura  $\alpha$  para esquadrias pivotantes. Os pontos correspondem a resultados obtidos a partir de simulações em CFD, quadrados representam esquadrias “lisas”, e círculos, detalhadas; enquanto isso, as linhas representam parametrizações realizadas no software EnergyPlus com pontos representando resultados obtidos a partir de simulações em CFD (círculos esquadrias detalhadas, quadrados esquadrias “lisas”), e linhas a parametrizações no software EnergyPlus, assumindo que  $C_d$  para o vento a  $90^\circ$  é igual a 0,61.

Nota-se diferença até entre esquadrias lisas e esquadrias detalhadas, principalmente para a menor proporção entre largura e altura analisada ( $W/H=0,5$ ). Principalmente para esquadrias mais largas, há significativa variação entre o  $C_d$  parametrizado originalmente pelo EnergyPlus (linha tracejada) e os valores simulados via CFD. A parametrização proposta pelos autores (linha contínua) se aproxima mais das simulações.

**Gráfico 1** –  $C_d$  em função da direção do vento para janelas pivotantes



**Fonte:** Hult, Iaccarino e Fischer (2012).

Pode-se observar, portanto, que até a própria obtenção do coeficiente de descarga das esquadrias pode ser problemática, e importante fonte de incerteza,

principalmente ao se adotar valores constantes para todas as esquadrias. Isso ilustra a complexidade envolvida no fenômeno da ventilação natural e indica a dificuldade em se produzir modelos de cálculos adequados a todas as possíveis situações climáticas.

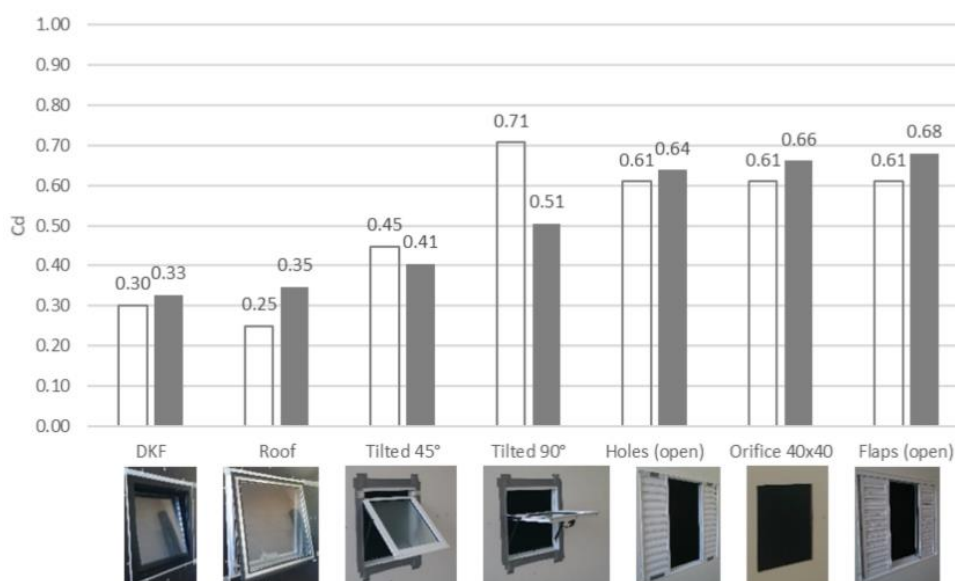
O valor de  $A_{eff}$  pode ser obtido com mais precisão a partir de ensaios laboratoriais com as esquadrias. Um dos possíveis procedimentos é apresentado na parte 1 da norma EN 13141, em que a esquadria é posicionada em uma câmara selada, onde o fluxo de ar é gerado somente por ventiladores (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, 2019). Com auxílio de sensores de pressão, mede-se instantaneamente valores da variação da pressão através da abertura ( $\Delta P$ ) para diferentes fluxos de ar ( $Q$ ) controlados. A equação 9 a seguir é utilizada para determinar o valor de  $A_{eff}$ , que se trata de combinação das equações 2 e 8.

$$Q_v = A_{eff} \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \quad (9)$$

É importante notar que a partir dessa definição, a  $A_{eff}$  varia conforme a variação da pressão através da aberturas, portanto é recomendado que os resultados apresentem a variação da  $A_{eff}$  para as pressões usuais esperadas, geralmente entre 0 e 10 Pa (EDUCATION AND SKILLS FUNDING AGENCY e DANIELS, 2018). Ainda assim, deve-se considerar que as condições desse tipo de ensaio não são idênticas às encontradas por edificações reais, já que em nesse tipo de ensaio o fluxo de ar gerado por aparato mecânico não possui outros caminhos para seguir além da esquadria, enquanto na prática o vento passa através e envolve a edificação.

Fernandes et al. (2020) apresentam resultados obtidos a partir da execução desse ensaio para diferentes esquadrias comuns no Brasil e Alemanha. O **Gráfico 2** a seguir apresenta o valor médio do coeficiente de descarga para cada modelo avaliado, comparando resultados dos ensaios (barras cinzas) com valores prévios apresentados na literatura (barras brancas). Ressalta-se que esses valores são referentes somente a situações de ventilação cruzada.

Esse tipo de ensaio demanda estrutura complexa e ainda é pouco difundido, implicando alto custo, porém autores como Sharpe et al. (2021) e Jones et al. (2016) defendem se tratar de opção adequada para a determinação de uma área padronizada para esquadrias.

**Gráfico 2** – Coeficientes de descarga obtidos pela aplicação da EN13141-1

Fonte: Fernandes et al. (2020).

Seguindo a definição das terminologias de abertura, Jones et al. (2016) nomeiam “área equivalente” ( $A_{eq}$ ) como aquela de um orifício circular hipotético de borda viva que permita a passagem do ar na mesma taxa que a abertura em questão, exercida a mesma diferença de pressão, conceito um pouco mais abstrato, apresentado na equação 10 a seguir.

$$A_{eq} = \frac{A_{eff}}{C_{d0}} \quad (10)$$

, onde  $C_{d0}$  é o coeficiente de descarga do orifício circular de borda viva, com valor de 0,61. Já Lamberts, Dutra e Pereira (2013) tratam o termo “área equivalente” como o valor que pondera as áreas de entrada e saída da ventilação, enquanto Jones et al. (2016) utilizam para o mesmo conceito a nomenclatura “área efetiva de múltiplas aberturas em série” ( $A_{effs}$ ), que será adotada neste trabalho. A ponderação de áreas para aberturas em série é realizada conforme a equação 11.

$$A_{effs} = \frac{1}{\sqrt{\sum_i^n \left(\frac{1}{A_{effi}}\right)^2}} \quad (11)$$

, onde  $A_{effi}$  é a área efetiva dividida por sua fachada. Caso não haja uma abertura intermediária, caso da seção experimental desse trabalho,  $n=2$ , e  $A_{eff1}$  e  $A_{eff2}$  são o somatório das áreas efetivas de ventilação de cada fachada com aberturas, ou seja,

De volta à equação 3, verifica-se que o fluxo de ar gerado pela ação

dos ventos é, teoricamente, diretamente proporcional à área de abertura. É preciso, porém, definir com clareza que essa área é a  $A_{effs}$ , definida pela equação 11.

Também é necessário considerar que para aberturas de grandes dimensões a aplicação desse tipo de equação é especialmente impreciso, como aponta Etheridge (2015), já que o fluxo através da abertura não é necessariamente unidirecional, de forma que, ainda que seja possível determinar valores de coeficiente de descarga para essas aberturas, o valor pode não ser apropriado para calcular taxas de ventilação.

É preciso considerar, portanto, que utilizar dados climáticos para estimar taxas de ventilação somente a partir das equações apresentadas retorna resultados pouco confiáveis.

### 2.2.3 Temperatura Interna e Externa

Como explicitado na equação 1, a variação entre a temperatura interna e externa influencia a intensidade do fluxo de ar gerado pelo efeito chaminé. Não é segredo que essas grandezas estão intrinsecamente relacionadas ao clima do local da edificação. Ambos os parâmetros podem ser influenciados por diversos fatores.

A temperatura externa apresenta variações ao longo do dia e das estações do ano, sendo influenciada por diversos aspectos. Fatores como a incidência solar, a presença de nuvens, a umidade do ar, a altitude e a latitude do local afetam diretamente a temperatura externa. Adicionalmente, elementos relacionados às escalas micro e mesoclimáticas, como a presença de vegetação, corpos d'água, o grau de urbanização, entre outros, também possuem impacto relevante nas condições em que as edificações estarão submetidas.

A temperatura interna, por outro lado, varia de acordo com as propriedades térmicas dos elementos construtivos da edificação, como a capacidade térmica, resistência térmica, absorvância solar, além de fatores como condições de contato com o solo, iluminação artificial, uso de equipamentos eletrônicos, além da geração de calor metabólico pelos ocupantes, que depende das características de uso dos espaços internos.

O próprio sistema de ventilação possui impacto significativo no gradiente entre temperaturas interna e externa, já que promove a substituição do ar,

permitindo ingresso de massa de ar à temperatura exterior, o que será abordado em detalhes na subseção seguinte.

Outras estratégias de projeto, como sombreamentos, orientação solar do edifício, e até mesmo posicionamento em relação aos ventos dominantes também possuem impacto significativo nas variações de temperatura do edifício ao longo do ano.

Isso ilustra que diversas características influenciam o atraso térmico da edificação, de forma que seu desempenho térmico varia tanto de acordo com características inerentes a diferentes sistemas e materiais construtivos, quanto conforme estratégias projetuais.

### 2.3 CONFORTO TÉRMICO E EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

O conforto ambiental em uma edificação pode ser bastante influenciado, positiva ou negativamente, pelas estratégias de ventilação adotadas em seu projeto. Aproveitar as condições climáticas do local de implantação pode permitir a construção de edifícios mais eficientes do ponto de vista energético, reduzindo a necessidade de uso de medidas de climatização artificial. A ventilação natural é somente um dos possíveis instrumentos bioclimáticos para a construção de edifícios confortáveis e eficientes (LAMBERTS, DUTRA e PEREIRA, 2013).

O ar em movimento em contato com a pele promove trocas de calor por convecção, e facilita a evaporação do suor, o que gera sensação de resfriamento, que aumenta com a velocidade do ar, de forma que ambientes bem ventilados podem proporcionar conforto térmico mesmo em temperaturas mais elevadas.

É importante ressaltar que há grandes variações entre os diversos climas, com diferentes estratégias bioclimáticas aplicáveis de acordo com suas especificidades, que dependem de fatores como temperaturas médias, máximas e mínimas, velocidade e direção dos ventos, intensidade de radiação solar, características térmicas do terreno, umidade relativa e absoluta do ar, entre outros.

Também é relevante pontuar que o conforto térmico é subjetivo, inclusive variando de acordo com o clima do local onde se vive. Diversos estudos, como o de Ahmed, Kumar e Mottet (2021) e Daghigh, Adam e Sahari (2009), mostram que pessoas residentes em locais mais quentes toleram temperaturas mais altas nos ambientes internos. Ocupantes de edifícios com sistemas naturais de

condicionamento também toleram uma faixa mais ampla de temperaturas, quando em comparação com ocupantes de edifícios com climatização artificial (LAMBERTS, DUTRA e PEREIRA, 2013).

No Brasil a avaliação do conforto térmico dos é geralmente feita seguindo a norma estadunidense ASHRAE 55, com última revisão de 2017, ou conforme a ISO 7730/2005, sem uma norma nacional específica. Apesar de existirem referências normativas, seus focos são ambientes com climatização artificial, e desenvolvidas em climas bastante distintos dos brasileiros.

Atualmente está em processo revisão a norma NBR 16401-2, que tratará do tema conforto térmico, contando com método para determinação das condições térmicas aceitáveis em ambientes com ventilação natural. Ademais, são relevantes para a discussão as normas NBR 15575, conhecida como norma de desempenho, que apresenta requisitos para propriedades térmicas dos materiais de acordo com a zona bioclimática e o tipo de edificação, e a NBR 15220-3, que será mencionada a seguir.

Lamberts, Dutra e Pereira (2013) revisaram metodologias bioclimáticas de diversos autores, e julgaram a carta de Givoni (1992) a mais adequada à realidade brasileira. A ventilação natural é recomendada como estratégia para temperaturas a partir de 20 °C até cerca de 32 °C, a depender da umidade do ar, sendo aplicável desde umidades relativas de cerca de 20% até a saturação.

A estratégia de ventilação natural diurna é especialmente adequada a climas quentes e úmidos. Em locais mais áridos, onde há maior amplitude térmica entre dia e noite, a ventilação noturna é mais interessante, evitando a entrada de ar externo demasiadamente quente ao longo do dia, e aproveitando o ar mais frio noturno para remover carga térmica da edificação. A ventilação noturna é especialmente eficaz em edifícios com alta massa térmica, que conseguem armazenar o resfriamento noturno e liberá-lo durante o dia, contribuindo para o conforto térmico dos ocupantes.

A ventilação natural, seja diurna ou noturna apresenta enorme potencial de aplicação para os climas brasileiros. Das atuais 8 zonas bioclimáticas definidas pela NBR 15220-3, que também apresenta diretrizes construtivas (foco em habitações unifamiliares), 7 possuem recomendação para uso da ventilação como estratégia bioclimática para o conforto térmico (correspondendo a 99,2% do território) (ABNT, 2005). A ventilação natural é, após o sombreamento, a estratégia bioclimática mais importante para o Brasil (Lamberts, Dutra e Pereira, 2013). Reitera-se que

mesmo quando indesejável do ponto de vista do conforto térmico, a troca de ar do ambiente com o exterior é necessária por questões de salubridade, o que é discutido mais a fundo no item 2.4.

Em contraste, em países de clima mais frio, onde sistemas de aquecimento artificial são essenciais para garantir o conforto térmico, a tendência é a vedação dos envelopes das edificações, visando minimizar trocas de ar com o exterior, e consequentes perdas de calor. Nesse contexto, caso medidas adicionais não sejam tomadas, como adoção de sistemas de ventilação mecânica, ou mesmo sistemas de filtragem do ar, é prejudicada a qualidade do ar interno, já que se reduz a retirada e diluição de diversos contaminantes internos.

Sendo assim, fica claro que estratégias de projeto devem ser adaptadas às condições climáticas locais, buscando equilibrar conforto térmico, qualidade do ar interno e eficiência energética de acordo com as características e necessidades específicas de cada região.

A divergência nas características climáticas afeta o enfoque da comunidade acadêmica no tema da qualidade do ar interno em países de clima frio, visto que tais problemas são mais prevalentes em regiões onde a vedação das edificações é comum, conforme discutido anteriormente. No Brasil, a escassez de estudos relacionados à medição de taxas de ventilação é notável. No entanto, com a emergência da pandemia de COVID-19, o tema ganhou maior relevância e atenção, evidenciando a necessidade de investigações adicionais para compreender e abordar adequadamente questões relacionadas à qualidade do ar interno e ventilação em diferentes contextos climáticos.

## 2.4 QUALIDADE DO AR INTERNO

Além da relevância no aspecto térmico, a ventilação natural também possui importante papel na manutenção da salubridade dos ambientes. Quando há baixas taxas de ventilação, contaminantes diversos ( $\text{CO}_2$ , CO,  $\text{NO}_2$ , compostos orgânicos voláteis, matéria particulada, radônio, formaldeído, pólen, vírus, bactérias, fungos, entre outros) gerados nos ambientes internos se concentram e acumulam no ar dentro das edificações. Sundell et al. (2011) destacam que taxas adequadas de ventilação são cruciais para manter a saúde e o bem-estar dos ocupantes, já que reduzem a exposição a tais substâncias potencialmente nocivas.

Baixas taxas de ventilação estão associadas à prevalência da Síndrome do Edifício Doente (SED), reconhecida desde 1982 pela Organização Mundial da Saúde (OMS); os ocupantes dos chamados edifícios doentes estão mais propensos ao surgimento de sintomas respiratórios e perda de produtividade (SCHIRMER et al., 2011).

Em revisão acerca da SED em escritórios, Seppänen, Fisk e Lei (2006) demonstram que ambientes ventilados naturalmente apresentam menor prevalência da síndrome quando em comparação a recintos com condicionamento artificial. No contexto dos ambientes escolares, Fisk (2017) enfatiza que taxas inadequadas de ventilação podem afetar negativamente a saúde e o desempenho dos alunos, aumentando o risco de problemas respiratórios, alergias e doenças infecciosas.

Batterman et al. (2017) identificaram que, mesmo em edifícios escolares recém-construídos nos Estados Unidos, as taxas de ventilação podem ser insuficientes para garantir um ambiente saudável e produtivo, o que reforça a necessidade de melhorar a concepção e a operação dos sistemas de ventilação nas escolas. É preciso sempre ter em mente o clima local da execução dos ensaios, neste caso, em escolas estadunidenses, portanto, conforme previamente discuto, é importante cautela em extrapolar conclusões para escolas brasileiras.

Embora a qualidade do ar interno tenha sido objeto de estudo há décadas, com autores como Yaglou, Riley e Coggins (1936) já na década de 1930 discutindo taxas mínimas de ventilação relacionadas à concentração de odores, a área adquiriu novo protagonismo na comunidade acadêmica em 2020, devido ao surgimento da pandemia de COVID-19.

Como a doença é transmitida principalmente por gotículas presentes em aerossóis, que podem permanecer por longos períodos em suspensão ambientes fechados com taxa inadequada de ventilação são especialmente suscetíveis à propagação da doença (JONES et al., 2020). Morawska et al. (2021) defendem mudança de paradigma no projeto de edifícios, ressaltando que prevenir infecções respiratórias é um problema tratável a partir da evolução dos sistemas de ventilação.

Ao proporcionar ventilação adequada, permite-se o fornecimento de ar fresco para a respiração dos ocupantes, bem como a retirada e diluição dos contaminantes gerados no ambiente interno (ETHERIDGE e SANDBERG, 1996).

Em diferentes países diversas normas recomendam taxas mínimas

de ventilação para ambientes internos, como a suíça SIA382/1, a austríaca ON6000-3, a europeia EN13799, a alemã DIN1946-2 e a estadunidense ASHRAE 62, mencionando algumas, com estudos indicando que taxas de ventilação acima das mínimas estabelecidas pelas normas estão associadas a ambientes mais saudáveis e produtivos (CHENARI, CARRILHO e SILVA, 2016).

Diferentes unidades são utilizadas nessas normas para determinar para taxas mínimas de ventilação. A maior parte apresenta exigências de fluxo de ar por pessoa (l/s/pessoa, m<sup>3</sup>/h/pessoa) parâmetro considerado chave para a avaliação da probabilidade do risco de transmissão de doenças respiratórias (BUONANNO, STABILE e MORAWSKA, 2020). Isso significa que um mesmo recinto pode possuir ventilação adequada ou não dependendo do seu número de ocupantes. Locais com grande concentração de indivíduos necessitam de mais ventilação para remover os contaminantes gerados.

Chenari, Carrilho e Silva (2016) revisaram taxas recomendadas pelas supracitadas normas. Os resultados são apresentados em faixas, visto que dependem dos diferentes possíveis usos dos edifícios. Não há consenso. Enquanto a SIA382/1 recomenda taxa variando entre 12 e 30 m<sup>3</sup>/h por pessoa, a americana ASHRAE 62.1 determina valores mínimos entre 29 e 36 m<sup>3</sup>/h por pessoa, a DIN 1946-2 entre 20 e 60 m<sup>3</sup>/h por pessoa.

No contexto da pandemia de COVID-19, em 2021 a OMS apresentou documento com diretrizes para a ventilação de escolas, recomendando taxa mínima de ventilação de 36 m<sup>3</sup>/h, com base na norma EN 16798-1 (WHO, 2021). Allen et. al (2020) apresentaram classificação da taxa de ventilação em salas de aula em número de trocas de ar por hora, parâmetro conveniente, uma vez que permite comparar o desempenho de diferentes recintos. Deve-se ter claro, porém, que tal classificação possui limitações inerentes, pois não considera o número de ocupantes do recinto.

Outras referências ainda trazem concentrações de CO<sub>2</sub> atingidas nos ambientes internos durante os períodos de ocupação para avaliar a qualidade do ar interno, como a PN-EN 13799 (2008), que define de forma arbitrária quatro categorias de qualidade do ar: alta qualidade, máximo de 350 ppm acima da concentração de CO<sub>2</sub> externa; média qualidade, até 500 ppm; qualidade moderada, até 800 ppm e de baixa qualidade quando as concentrações superam 1200 ppm acima do fundo (NOWAK, NOWAK-DZIESZKO e MARCINOWSKI, 2018).

Enquanto isso, Lowther et al. (2021) apresentam revisão acerca do

impacto de diferentes concentrações de CO<sub>2</sub> durante os períodos ocupados na saúde dos ocupantes, e concluem que concentrações absolutas inferiores a 1000 ppm indicam, de forma geral, qualidade do ar boa a excelente, entre 1000 ppm e 1500 ppm qualidade aceitável, e acima de 1500 ppm uma baixa qualidade do ar interno.

É importante salientar que as concentrações mencionadas servem como indicadores da qualidade do ar, uma vez que estão relacionadas a diferentes taxas de ventilação e características de ocupação dos espaços. Contudo, isso não implica que as concentrações de CO<sub>2</sub> isoladas sejam prejudiciais à saúde. As concentrações de gás carbônico são utilizadas como um parâmetro para avaliar a eficácia da ventilação de recintos ocupados por múltiplos indivíduos. Essa abordagem só é possível devido ao fato de o gás ser subproduto do metabolismo humano. A concentração limite de exposição ao CO<sub>2</sub> é de 5000 ppm, valor muito acima do atingido nos ambientes internos, mesmo que mal ventilados (ISO, 2017).

Outro parâmetro muito utilizado como taxa de ventilação é o número de trocas de ar por hora ( $N$ ), equivalente à divisão do fluxo de ar pelo volume do recinto. Sua unidade é h<sup>-1</sup>, sendo comum a substituição pelo acrônimo ACH (do inglês *air changes per hour*). Este conceito é útil para comparar a taxa de ventilação de ambientes com volumes distintos, e pode ser aplicado como forma de medir a eficiência de diferentes estratégias de ventilação.

Entretanto, é necessário ter cuidado com seu significado, pois uma taxa igual a 1 ACH não significa que todo o ar do recinto é trocado a cada uma hora, na verdade, caso haja mistura perfeita do ar fresco – o que segundo Heiselberg e Sandberg (2006) geralmente não é o caso para recintos com grandes áreas de abertura – , somente cerca de 63% do ar do recinto terá sido trocado (HITCHIN e WILSON, 1967).

Além disso, em ambientes urbanos e grandes edificações, é possível que parte do ar supostamente fresco que ingressa no edifício estar de alguma forma contaminado. Ainda assim, este é um parâmetro chave, que será empregado neste trabalho.

É importante ressaltar que não somente taxas de ventilação são relevantes para a qualidade interna do ar. Há diversos fatores influentes, como umidade relativa do ar, e a própria qualidade do ar externo, também comumente inadequada em grandes centros urbanos (SAKIYAMA et al., 2020). É importante ressaltar que em ambientes escolares estudos como o de Kalimeri et al. (2016)

registraram, além de taxas de ventilação aquém do recomendado, elevadas concentrações de poluentes, como formaldeído, benzeno, limoneno e radônio, que são reduzidas ao se promover maior renovação de ar com o meio externo.

Ainda assim, tendo em vista que as taxas de ventilação são apenas um dos parâmetros que podem ser utilizados para avaliar a qualidade do ar interno, fica clara a importância de conhecê-las de forma confiável, seja da ótica do desempenho térmico das edificações, ou da saúde dos ocupantes.

Diferentes métodos podem ser utilizados para determiná-las, com precisões variáveis, os quais serão discutidos na seção a seguir.

## 2.5 MÉTODOS PARA ESTIMAR OU MEDIR DE TAXAS DE VENTILAÇÃO

É possível estimar taxas de ventilação por meio de diferentes métodos, cada um com suas características e aplicações. Nesta seção são apresentados e brevemente discutidos os métodos mais utilizados para medir ou estimar taxas de ventilação em edificações; pretende-se justificar a escolha dos métodos de medição aplicados neste trabalho, baseados em gases traçadores, que são apresentados com maior profundidade.

### 2.5.1 Modelos analíticos simplificados

As equações 1 a 4, apresentadas na seção 2.1 deste trabalho podem ser utilizadas para estimar a taxa de ventilação dos ambientes a partir de suas características geométricas e condições climáticas, porém os resultados devem ser interpretados com cautela, por motivos aprofundados neste item.

Uma vantagem desse tipo de modelo, é o de demandar pouco ou nenhum esforço experimental. As características geométricas dos ambientes podem ser facilmente medidas com auxílio de trena metálica, ou ainda em estágios preliminares, ou estudos menos rigorosos, podem ser adotados valores coletados em projeto.

Dados climáticos de estações meteorológicas próximas estão disponíveis em muitas grandes cidades, e demandam de tratamento relativamente simples. Ou seja, as equações podem ser aplicadas em estágios preliminares de projeto, e podem analisar um grande volume de ambientes em curto período, o que

se mostrou útil como forma de avaliar a de forma ágil segurança da reocupação de ambientes escolares no contexto da pandemia de COVID-19 (DECKER e ATEM, 2022).

Entretanto, deve-se ter muita cautela com as conclusões tomadas a partir desse tipo de estudo, já que a determinação dos vários parâmetros envolvidos nas equações está associada a incertezas significativas, que se acumulam.

De início, é preciso ter em vista que as equações 1 a 4, destinadas à estimativa do fluxo de ar em diferentes situações, não capturam a totalidade do física do complexo fenômeno da ventilação natural.

As equações 2 e 3 são advinda da mecânica dos fluídos, e são largamente utilizadas para medir a vazão de líquidos através de orifícios, fenômeno mais simples do que a ventilação em ambientes internos, e mais frequentemente sob condições de fluxo constante (HEISELBERG e SANDBERG, 2006).

Suas aplicações partem de diversos pressupostos, como de que as pressões são constantes e uniformes ao longo das aberturas, e de que toda a energia cinética do ar que entra na edificação é dissipada, ou seja, de que não há contato entre os fluxos que entram e saem das edificações (SHARPE et al., 2021). O fluxo de ar é, portanto, considerado como estável, com intensidade uniforme ao longo do tempo (ETHERIDGE, 2015).

Tais condições geralmente são atendidas para recintos com pequenas áreas de abertura, com trocas de ar a partir de frestas, em que o fluxo de ar se mostra perpendicular às fachadas, independente da direção do vento (HEISELBERG e SANDBERG, 2006). Essas condições, entretanto, geralmente não são atendidas em ambientes com grandes áreas de abertura, situação em que a direção do fluxo de ar interno está sujeita às condições externas.

No caso de ventilação unilateral, a equação 4 pode ser aplicada, porém trata-se de relação semiempírica, de forma ser difícil generalizá-la para diferentes condições climáticas e variados tipos de esquadria e edificações. Há relatos na literatura da baixa precisão desse modelo, com forte tendência a subestimar a taxa de ventilação, com desvios de até 90% em relação aos valores medidos, ou seja, até uma ordem de magnitude (FAN et al., 2021).

É importante ressaltar que existem outros modelos analíticos que se propõe a calcular o fluxo de ar a partir de diferentes características do recinto e das condições climáticas, porém modelos mais sofisticados dependem de parâmetros

ainda mais específicos, como coeficientes que devem ser avaliados individualmente para cada edifício, esforço que por si só desencoraja a adoção dessas estratégias.

Ressalvas similares são válidas para o cálculo do fluxo de ar gerado pelo efeito chaminé a partir da equação 1, também sujeito a grandes imprecisões. Além disso, é importante ressaltar que o efeito chaminé e a ação dos ventos ocorrem de forma simultânea, com intensidades que variam de acordo com as diversas características das edificações, clima e seus arredores. A combinação da influência dos diferentes mecanismos não pode ser realizada por uma soma trivial dos efeitos, uma vez que a ação dos ventos e o efeito chaminé podem atuar de maneira sinérgica ou antagonista (ZHANG et al., 2021).

Por fim, deve-se ter claro que esses modelos possuem relevância, por permitir análise breve das condições gerais de ventilação dos ambientes, tendo sido propostas e empregadas por diversos autores, como Lamberts, Dutra e Pereira (2013), Jones et al. (2016) e Frota e Schiffer (2001).

### 2.5.2 Medida com Anemômetros

Este método calcula o fluxo de ar a partir da medida da velocidade do ar que passa pelas aberturas do recinto, e das áreas de abertura. Entretanto, somente em situações controladas fornece precisão razoável, como recintos mecanicamente ventilados por um único duto de ar de pequenas dimensões. Ambientes com sistemas complexos de ventilação mecânica já não devem ter sua taxa de ventilação avaliada a partir desse tipo de medição, visto que o método inerentemente não considera trocas de ar devido à infiltração de diversas fontes (OKUYAMA; ONISHI, 2012).

Em ambientes com ventilação natural, a precisão é ainda mais comprometida, já que a velocidade do ar não é uniforme ao longo da abertura, e varia constantemente em intensidade e direção. Além disso, a própria determinação das áreas de abertura pode ser problemática, como discutido no item 2.2.2. A **Figura 8** também ilustra como seria crucial o ponto de localização dos sensores, dado que a velocidade do ar varia não somente no plano da abertura, como ganha velocidade ao passar por uma restrição, devido ao efeito Venturi (CÓSTOLA, 2006).

Mesmo ensaios com múltiplos anemômetros ultrassônicos localizados em aberturas submetidas à ação dos ventos, equipamentos capazes de medir a velocidade e direção do vento (nos eixos x, y e z) com alta precisão, não obtiveram

sucesso em medir o fluxo de ar com precisão comparável a outros métodos já estabelecidos, apresentados mais à frente (YANG, 2004).

### 2.5.3 Ensaios em Escala

Os ensaios em escala podem ser realizados em túneis de vento ou em equipamentos hidráulicos, também conhecido como mesas d'água. Apresentam vantagem de possibilitar ambiente controlado para as medidas, porém estão sujeitos à perda de informação em relação ao fenômeno real, e os sensores podem afetar o comportamento do fluxo de forma indesejada (GOUGH et al., 2018).

O principal desafio em realizar experimentos em escala reduzida é manter a similaridade entre o modelo e a realidade, o que envolve diversos fatores, como reprodução das características da vizinhança. A manutenção da similaridade dos fenômenos físicos depende da possibilidade de modificar a velocidade do fluxo, ou de se alterar a viscosidade do meio ensaiado, de acordo com a proporção geométrica adotada (CÓSTOLA, 2006).

Manter a similaridade pode exigir aumentar as velocidades do fluxo de ar para valores além dos limites comportados por alguns túneis de vento. Nesses casos, a utilização de mesas d'água pode ser indicada, já que devido a maior viscosidade do fluido, a velocidade pode ser menor (TOLEDO, 2006). Conforme Toledo (2006), existem diferentes métodos para quantificar o fluxo de ar a partir desses ensaios, como método óptico, método do tufo, e método do traçador.

Em estudo comparando a velocidade média do fluxo de ar entre simulações em CFD, abordadas na seção seguinte, e ensaios em mesas d'água, Xavier et al. (2020) encontraram discrepâncias significativas, porém ressaltam que a ferramenta tem grande potencial de uso na área de ensino, em virtude de demonstrar de forma visual e clara conceitos da mecânica dos fluidos aplicados à ventilação natural.

Entretanto, os autores julgam o método da mesa d'água inadequado para investigações mais aprofundadas, onde, por exemplo, se deseje determinar coeficientes de pressão e descarga, caso em que simulações em fluidodinâmica computacional (CFD) abordadas na seção seguinte, são recomendadas (XAVIER et al., 2020).

#### 2.5.4 Simulações Computacionais

É viável calcular taxas de ventilação utilizando diversas estratégias que envolvem simulações computacionais. Levando em conta o significativo esforço experimental exigido para obter esses dados em campo, recorrer a simulações computacionais pode ser uma alternativa vantajosa em termos de tempo e custo. Além disso, quando o edifício ainda está em fase de projeto, as simulações computacionais se mostram particularmente úteis como ferramenta preditiva, auxiliando na tomada de decisões e no planejamento de estratégias adequadas de ventilação antes da construção efetiva do edifício.

Existem modelos semiempíricos de cálculo desde a década de 1950, baseados nas equações de conservação, massa e momento, além das hipóteses de camada-limite e turbulência (LOOMANS, 1998). Os primeiros modelos eram relativamente simples, soluções válidas para situações com condições climáticas constantes, sem considerar características transientes, e, portanto, com aplicabilidade restrita.

Hoje diversos tipos de simulação já foram propostos e aplicados. Sakiyama et al. (2020) dividem as simulações em três principais tipos: modelos de rede multizona, modelos zonais e fluidodinâmica computacional (CFD).

Modelos de rede multizona são capazes de considerar a interação entre diferentes ambientes de um edifício, porém apresentam temperatura do ar uniforme em cada recinto, enquanto modelos zonais já dividem os ambientes em células, o que melhora a consideração das distribuições da temperatura do ar. Enquanto isso, simulações em CFD são bastante mais complexas, discutidas em detalhes mais a frente nesta seção.

Para Sakiyama et al. (2020), atualmente duas estratégias de modelagem da ventilação merecem destaque: as baseadas em redes de fluxo de ar (*Airflow Network*), e as baseadas em fluidodinâmica computacional.

Dentre softwares que aplicam o modelo de redes de fluxo de ar, os autores identificaram o programa EnergyPlus como o mais comum, adotado em 70% dos estudos revisados. O software é amplamente utilizado em estudos de desempenho termoenergético de edificações, também é capaz de realizar simulações de ventilação natural a partir de um modelo zonal.

Como apresentado, modelos zonais consideram a estratificação das

temperaturas internas, além de permitir modelar diferentes fluxos de calor, porém ainda são muito simplificados em relação ao estudado com CFD, discretizados em número muito menor de células.

Ainda assim, as simulações via EnergyPlus consideram diversos parâmetros, e calculam simultaneamente ação dos ventos e efeito chaminé (GU, 2007). Sua aplicação gera resultados muito mais adequados do que a simples previsão a partir das equações algébricas para intensidades médias do vento e diferenças típicas de temperatura, já que o programa simula as condições climáticas das 8760 horas do ano (SAKIYAMA et al., 2020).

Para simular a ventilação natural, além de modelar cuidadosamente o edifício (incluindo materiais de construção e suas propriedades térmicas) e as áreas de abertura, incluindo informações sobre coeficiente de descarga, coeficientes referentes à infiltração, proporção entre altura e largura, tipos de esquadria, determinar padrões de ocupação, entre outros, é necessário fornecer dados referentes à distribuição dos coeficientes de pressão para diferentes ângulos de incidência do vento.

Para edifícios retangulares simples, esses coeficientes podem ser calculados automaticamente pelo programa, porém para outras configurações é necessário inserir manualmente esses dados, o que é um dos principais desafios para obter dados de ventilação. Para edificações de pequeno porte, o programa aplica a equação de Swami e Chandra (1988) para determinar a distribuição dos coeficientes de pressão, e para edificações de grande porte o cálculo é baseado na fórmula de Walker e Wilson (1994) (PEREIRA et al., 2013).

Existem diferentes bancos de dados com resultados provenientes de ensaios em túnel de vento, considerando diferentes condições de ocupação da vizinhança. Entretanto, a maioria dos dados disponíveis são referentes a edificações isoladas, de geometria simples, geralmente retangular. Em edificações com formato complexo, ou com muitos obstáculos nas adjacências, os dados de distribuição dos coeficientes de pressão são limitados, e a aplicabilidade dos modelos de cálculo é questionável. Além disso, Etheridge (2015) aponta que a maior parte dos dados de coeficiente de pressão disponíveis foram calculados a partir de ensaios em modelos sem aberturas, o que pode acarretar erros ao se aplicar esses coeficientes em ambientes ventilados por janelas de grandes dimensões, uma vez que sua presença afeta o comportamento aerodinâmico da edificação.

Sendo assim, fica clara a limitação do software na predição de taxas de ventilação, em especial para edifícios com geometrias complexas, ou expostos a obstáculos diversos. Ainda assim, uma grande vantagem da aplicação do software EnergyPlus é o fato da ventilação ser modelada em conjunto com diversos outros parâmetros de interesse, como temperaturas operativas, trocas de calor, consumo de energia, entre outros.

Uma possibilidade mais precisa é obter a distribuição dos coeficientes de pressão através de simulações em Fluidodinâmica computacional (CFD), mas essas por si próprias já são mais complexas e podem fornecer informações mais detalhadas sobre o movimento do ar nos ambientes internos do que a própria simulação via EnergyPlus.

As simulações em CFD se baseiam nas leis da física de princípio de conservação de massa, princípio de conservação de energia e na segunda lei de Newton, descritas pelas equações de Navier-Stokes (ANDERSON, 1995). Existem vários softwares disponíveis baseados nestes princípios, alguns dos mais aplicados em estudos de ventilação de ambientes internos são: Ansys Fluent, Ansys CFX, DesignBuilder CFD e PHOENICS (SAKIYAMA et al., 2020).

Um dos principais desafios para a aplicação do CFD é o fenômeno da turbulência. Calcular o movimento turbulento a partir da resolução direta das equações de Navier-Stokes (*Direct Numerical Simulation*, DNS) ainda é muito custoso do ponto de vista computacional, por isso são comumente aplicados modelos de turbulência.

A abordagem mais aplicada em estudos de ventilação é a de simulações baseadas na técnica RANS (do inglês *Reynolds-averaged Navier-Stokes equations*), cuja ideia básica é a decomposição dos valores instantâneos em valores médios e flutuantes ao longo do tempo (RAMPONI e BLOCKEN, 2012). Aplicando a técnica RANS ainda é possível aplicar diferentes modelos de turbulência, como RNS (*Reynolds Stress Model*), de segunda ordem, ou k- $\epsilon$  padrão, de primeira ordem, entre outros (CÓSTOLA e ALUCCI, 2011).

Outras técnicas mais sofisticadas podem ser alternativas ao RANS, como simular somente turbilhões de grandes dimensões (*Large Eddy Simulation*, LES), que historicamente apresenta resultados adequados com dados experimentais, porém ainda demanda grande poder computacional; ou ainda a técnica DES (*Detached Eddy Simulation*), que combina RANS e LES. Ambas as estratégias mais

sofisticadas resultam na obtenção de simulações – e coeficientes de pressão – mais precisas, mas ainda possuem uso restrito (CÓSTOLA e ALUCCI, 2011).

Qualquer que seja a técnica aplicada, a modelagem necessária é complexa. Existem diversas variáveis envolvidas, desde a construção da geometria, até refinamento de malha, definição dimensão de domínios, definição de condições de contorno, como rugosidade do solo e paredes, entre outros. A modelagem das condições da vizinhança também pode ser um desafio.

Ao se trabalhar com esse tipo de simulação, é preciso identificar as possíveis origens dos erros, no estágio de validação. É comum sua divisão em dois principais tipos, erros e incertezas da modelagem (devido à simplificação de fenômenos físicos, de incertezas nas condições de contorno físicas e geométricas, uso de dados experimentais prévios, etc.), e erros numéricos (de arredondamento, devido à discretização temporal e espacial, problemas de convergência, entre outros) (FRANKE et al., 2007).

Trabalhos como o de Cóstola e Alucci (2011) demonstram que configurações incorretas nas simulações em CFD podem levar a desvios consideráveis, de até 50% em termos absolutos. Os autores chamam atenção para a importância do teste de independência da malha, bem como a necessidade de descrever em detalhes os parâmetros adotados nas simulações, para que seja possível validá-las (ou descartá-las).

A comparação dos dados obtidos a partir de simulações em CFD, como a distribuição dos coeficientes de pressão, ou mesmo a taxa de ventilação em si, com resultados de outras técnicas pode auxiliar na verificação de sua validade. Autores como Lukiantchuki et al. (2018), por exemplo, compararam resultados de distribuição dos coeficientes de pressão num edifício provenientes de simulações em CFD de edifício com coberturas em sheds, com pressões medidas em modelo em escala em túnel de vento, encontrando variações de menos de 10% entre os métodos.

Mesmo que as boas práticas de simulação sejam aplicadas, é importante que se validem os dados, principalmente em comparação com ensaios em túneis de vento, ou com base em medições em edificações reais, o que Cóstola e Alucci (2011) apontam como uma das lacunas a serem preenchidas em estudos de ventilação. Este trabalho se propõe a gerar dados de taxa de ventilação, que poderão ser comparados com diferentes simulações computacionais, tanto via Energyplus, quanto via CFD.

### 2.5.5 Gases Traçadores

Gases traçadores são substâncias que podem ser misturadas ao ar de um ambiente e medidas em baixíssima quantidade para estudar o movimento do ar. Para Persily (2016), métodos baseados em gases traçadores são os únicos que geram resultados robustos para a taxa de renovação de ar de ambientes internos. São, portanto, estratégias de medição já consolidadas, contando com referências normativas internacionais.

As normas ISO 12569 (2017) e ASTM E741 (2017) descrevem três principais métodos de ensaio para obter taxas de ventilação a partir de gases traçadores, em ordem de complexidade: decaimento da concentração, injeção constante e concentração constante. Todas as estratégias se baseiam na equação da continuidade e no princípio da manutenção do balanço de massa do gás traçador no recinto.

Um dos pressupostos dessas técnicas é a manutenção da uniformidade na concentração dos gases na zona de medição, o que é mais simples em ambientes pequenos e com baixas taxas de ventilação, mas complexo para ambientes com grandes dimensões ou grandes áreas de abertura, que proporcionam muitas trocas de ar por hora (PERSILY, 2016). Além disso, consideram que o ar que ingressa no recinto se mistura perfeitamente, ou seja, de forma instantânea e homogênea, o que pode acarretar imprecisão nos resultados. As três técnicas são aplicáveis a ambientes de zona única, ou seja, que trocam ar somente com o exterior, isolado de outras zonas (SHERMAN, 1990).

Um quarto ligado a um corredor, por exemplo, não poderia ser considerado um ambiente de zona única, por haver troca de ar com outros cômodos da edificação. Persily (2008) ressalta que, caso os métodos de gases traçadores sejam aplicados nesse tipo de recinto, a taxa obtida ainda pode ser proveitosa para avaliar as características do fluxo do ar no ambiente, mas não é equivalente à troca de ar com o exterior. Existem métodos para medir a taxa de ventilação em ambiente com várias zonas, mas são mais complexos e não foram suficientemente validados (OKUYAMA e ONISHI, 2012).

Para Sherman et al. (2014) a técnica de injeção constante não é apropriada para ambientes com grandes aberturas e alto número de trocas de ar por hora. Essa técnica se baseia no fornecimento de gás à taxa constante no ambiente

por longos períodos, demanda de instrumentação complexa, e consome relativamente grandes quantias de traçador.

Técnicas de concentração constante demandam de equipamento ainda mais sofisticado, já que é necessário injetar gás a taxas variáveis no ambiente para a manutenção da concentração. Para isso é necessário além de tubulações, sistema automatizado que registra a concentração e em tempo real ajusta a injeção do traçador, o que inviabilizou sua aplicação neste trabalho.

Enquanto isso, a aplicação da técnica do decaimento da concentração é mais simples, sem deixar de prover resultados robustos, sendo adequado para investigações a nível de pesquisa, mesmo com pequeno número amostral (SHERMAN, WALKER e LUNDEN, 2014). Para a execução desse tipo de ensaio, são estritamente necessários somente uma fonte do gás traçador, geralmente estocado em cilindros, e sensores para o registro da concentração do gás no recinto ao longo do tempo; materiais de obtenção e custo viáveis para a execução desta pesquisa.

A técnica do decaimento consiste na introdução de pequeno volume de gás traçador no ambiente, seguida de mistura adequada do ar interno para assegurar concentração uniforme na sala. Em seguida, portas e janelas devem ser mantidas nas configurações desejadas para o experimento, e a concentração do gás registrada em diferentes pontos do ambiente ao longo do período do ensaio. A partir do intervalo de tempo que leva para a concentração do gás decair, é possível calcular a taxa de renovação de ar. Detalhes do procedimento estão descritos na seção 3.4, e do tratamento de dados na seção 3.5.

Cui et al. (2015) e Remion, Moujalled e El Mankibi (2019) endossam a aplicabilidade dessa técnica, mesmo para ambientes sujeitos à variação da taxa de ventilação durante o experimento, como aqueles ventilados naturalmente. O método de medição por decaimento também é menos nocivo ao meio ambiente quando comparado aos de injeção e concentração constante, que demandam volume muito maior de emissão de gases (CUI et al., 2015).

É indicado utilizar vários sensores no ambiente, para permitir a coleta de dados em diferentes pontos, e utilizar média entre os resultados obtidos para alcançar taxa de ventilação fidedigna (CUI et al., 2015). Os autores também destacam que valores mais baixos são esperados de sensores posicionados nos cantos dos ambientes, o que pode indicar a presença das chamadas zonas mortas, nas quais o

ar não se mistura adequadamente. O uso de vários sensores também é útil para facilitar a verificação da uniformidade da concentração do gás no recinto.

Conforme a ASTM E741 (2017) e a leitura de cada sensor não deve variar mais de 10% em relação à média caso se almeje precisão de 10% dos valores obtidos.

Mesmo em ambiente com ventilação mecânica e taxa controlada, Van Buggenhout et al. (2009) verificaram variações de até 86% nos resultados de taxa de ventilação obtidos pelo método do decaimento acordo com o posicionamento do sensor (a partir de ensaios com 36 sensores em câmara de testes controlada). Caso haja sistema mecânico de ventilação, os autores recomendam posicionar sensores próximos aos dutos de saída de ar, em virtude de terem identificado que nestas posições os resultados são mais próximos à média do recinto.

Diversos gases podem ser utilizados como traçador, como SF<sub>6</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, PFT's, NO, CH<sub>4</sub>, entre outros. Alguns são nocivos à saúde, nocivos ao meio ambiente ou mesmo explosivos. O estudo de caso desta pesquisa será realizado com o gás CO<sub>2</sub> como traçador, que além de mais acessível, também é menos nocivo ao meio ambiente quando comparado ao SF<sub>6</sub> e PFT's, que possuem elevadíssimo potencial de efeito estufa (CUI et al., 2015).

As concentrações de CO<sub>2</sub> necessárias para a aplicação do método do decaimento são inferiores ao limite de exposição para a saúde dos ocupantes, o que garante a segurança do procedimento. Persily (1997) e Lowther et al. (2021) indicam que pessoas podem permanecer por até 8 horas em concentrações de até 5000 ppm sem prejuízos à saúde, o que permitiria a condução de experimentos mesmo em ambientes ocupados.

Isso não significa que ambientes que atinjam esta concentração sem injeção artificial estejam em condições adequadas de ventilação, já que, como discutido na seção 2.4, os níveis de CO<sub>2</sub> atingidos durante os períodos de ocupação dos ambientes estão relacionados à sua taxa de ventilação.

Entretanto, é preciso considerar que o CO<sub>2</sub> é um dos subprodutos do metabolismo humano, de forma que a presença de indivíduos no recinto durante o experimento afeta os resultados obtidos. Senso assim, ao se utilizar o CO<sub>2</sub> é importante controlar a ocupação do recinto.

Apesar disso, a presença de ocupantes pode ser aproveitada em prol do ensaio, uma vez que é possível aproveitar o CO<sub>2</sub> produzido pelo metabolismo dos

ocupantes como fonte de gás traçador no lugar de um cilindro, em analogia à três técnicas com cilindro (decaimento, injeção e concentração constantes), com diversos exemplos de aplicação na literatura (KABIRIKOPAEI e LAU, 2020; ZHANG et al., 2015; PEI, YIN e LIU, 2016).

Esse tipo de adaptação é especialmente adequada a ambientes ocupados por múltiplos indivíduos por horas consecutivas, como salas de aula ou escritórios, pois durante o período de ocupação o gás gerado pelo metabolismo se acumula, e durante os intervalos, como almoço ou depois das aulas ou trabalho os ocupantes deixam o ambiente, resultando em períodos de decaimento de CO<sub>2</sub> a partir dos quais a taxa de renovação do ar pode ser medida, sem sequer a necessidade de injetar o gás traçador no ambiente de forma artificial (TRAN et al., 2017).

A adoção do gás carbônico merece atenção também pelo fato de estar presente na atmosfera, portanto sua concentração de fundo deve ser medida em ambiente externo próximo ao local do experimento. Outra possível fonte de incerteza advinda da adoção deste gás é seu potencial de adsorção em superfícies, ainda que em baixas porcentagens (RODRIGUES, 2017).

Outro ponto importante, relacionado às limitações do método de medição aplicado, é que as salas a serem estudadas podem ser consideradas zonas únicas, ou seja, trocam ar somente com o exterior, sem ligação com outros ambientes internos (ASTM, 2017; ISO, 2017).

Em diversos casos, pode haver infiltração entre ambientes adjacentes através do teto ou forro. No entanto, considerando as características construtivas específicas do edifício analisado, essa via de infiltração é pouco provável, considerando que lajes mistas com capeamento superior de concreto separam os pavimentos. Ainda assim, a presença de ocupantes em outros recintos da edificação pode introduzir uma fonte de incerteza nos dados, uma vez que é possível que o CO<sub>2</sub> expelido por esses indivíduos possa ingressar no ambiente em estudo.

Esta seção e seus subitens evidenciam a existência de diversos métodos para medir as taxas de ventilação, sendo aqueles baseados na medição da concentração de gases traçadores no ambiente considerados os mais confiáveis, apesar de suas limitações (SANDBERG et al., 2008).

Dentre as diferentes estratégias de medição que envolvem gases traçadores, duas foram empregadas neste trabalho: a do decaimento de CO<sub>2</sub>, conduzida a partir da injeção do gás contido em cilindro em salas desocupadas, em

configurações predeterminadas, por demandar de instrumentação acessível e fornecer resultados robustos (SHERMAN, WALKER e LUNDEN, 2014); e o monitoramento da concentração de CO<sub>2</sub> residual do metabolismo dos ocupantes ao longo das aulas, nas condições reais de uso, calculando a taxa de ventilação a partir da concentração atingida e das características de ocupação.

### 3 MÉTODO

Nesta seção, dividida em 5 partes, apresenta-se em detalhes o método adotado para a campanha experimental deste trabalho, ensaios de decaimento de CO<sub>2</sub> como gás traçador.

De início, em 3.1, descreve-se em detalhes o edifício de estudo de caso, o Centro de Tecnologia e Urbanismo da Universidade Estadual de Londrina (CTU), e quatro de suas salas de aula onde ocorreram os ensaios. Como previamente apresentado, diversos fatores podem influenciar a taxa de ventilação dos ambientes internos, portanto diversas informações são apresentadas, como: implantação e geometria do edifício, descrição dos arredores, relevo do terreno de implantação, tipologia de esquadrias, áreas de abertura, geometria e configurações de abertura das salas de aula estudadas.

Em continuidade, no item 3.2 apresentam-se dados climáticos. Características como distribuição temporal da intensidade e direção do vento são elencadas, com base em dados registrados em estação meteorológica distante 5 quilômetros do edifício. Também são apresentados dados da série histórica entre 1976 e 2019 de temperatura, coletados na mesma estação.

Antes de tratar dos procedimentos dos ensaios propriamente ditos, no item 3.3, descreve-se em detalhes o aparato necessário, como cilindro de gás, válvulas, sensor de CO<sub>2</sub>, além de equipamentos auxiliares.

Os experimentos empregaram a técnica do decaimento de CO<sub>2</sub> como gás traçador. Parte dos ensaios foi conduzida com gás carbônico injetado no ambiente a partir de cilindro, sem ocupantes, conforme a norma ISO 12569 (2017), neste caso em configurações predeterminadas de abertura das esquadrias. Outros ensaios aproveitaram do CO<sub>2</sub> metabólico dos alunos durante as aulas como fonte de gás traçador, na situação real de uso. Em 3.4 apresenta-se em detalhes o planejamento e procedimento experimental adotado para ambas as estratégias.

Em continuidade, a subseção 3.5 detalha o procedimento de tratamento dos dados provenientes dos ensaios para a obtenção da taxa de ventilação média de cada amostra, sua incerteza, além de descrever a metodologia empregada na análise desses dados. Também se apresenta, no item 3.6, procedimento adotado para comparar as taxas de ventilação obtidas a partir dos experimentos com a previsão de modelos analíticos simplificados.

Por fim, em 3.7 apresentam-se os critérios adotados para avaliar a qualidade do ar interno das salas de aula com base as taxas de ventilação medidas.

### 3.1 CARACTERIZAÇÃO DO EDIFÍCIO DE ESTUDO

O estudo de caso foi conduzido em salas de aula do Centro de Tecnologia e Urbanismo da Universidade Estadual de Londrina. O edifício, situado nas coordenadas S 23°19'35.9" W 51°11'54.0", dentro do campus da UEL, é composto por dois blocos – Norte e Sul, ligados por bloco de circulação, em formato de “H”.

O azimute da fachada Norte é de 3°. Cada bloco possui 72,8 m de comprimento, 12,3 m de largura e 12,0 m de altura, e estão distanciados 17,0 m entre si. A área total construída do edifício é de 5.836 m<sup>2</sup>; o sistema construtivo é composto por pilares e vigas de concreto armado aparente, com lajes maciças, e vedações verticais em alvenaria.

A **Figura 9** a seguir apresenta visão aérea do edifício, circulado em vermelho, e seus arredores. É possível observar a presença de diversos obstáculos nas proximidades. Os edifícios com mais de um andar estão destacados em laranja, e os térreos em amarelo.

**Figura 9** – Visão aérea do CTU e arredores

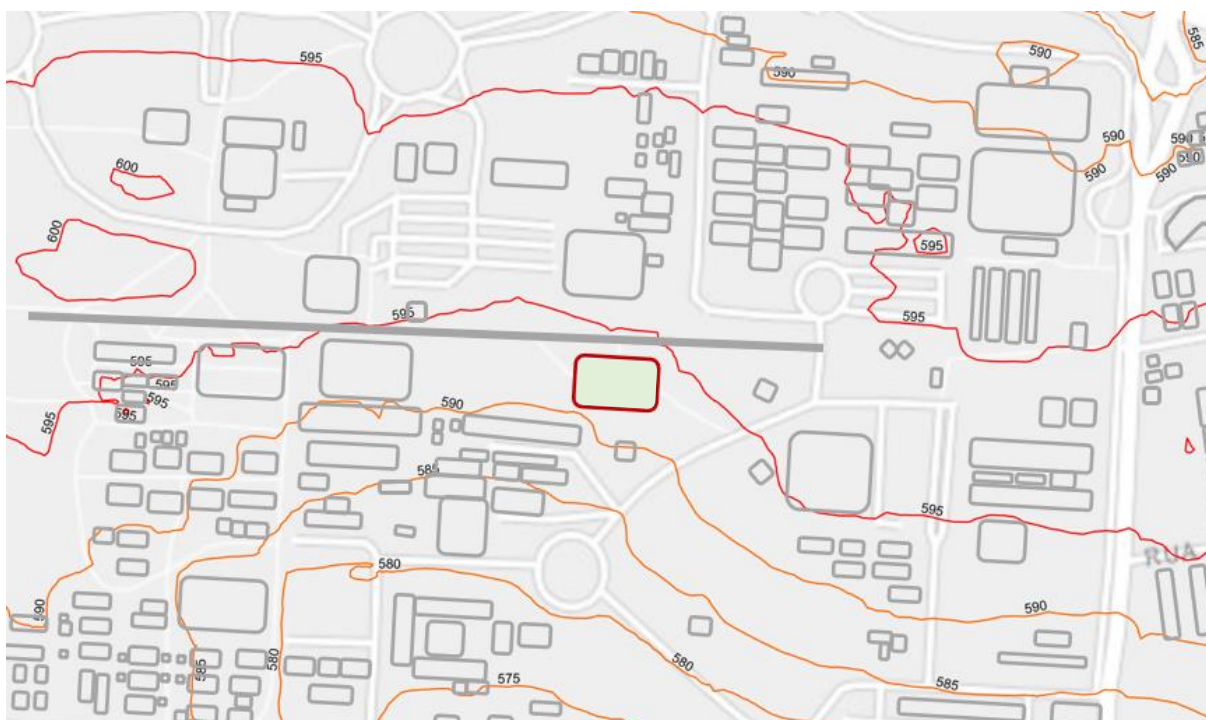


Fonte: autor, adaptado de Siglon (2022)

Imediatamente a Norte da edificação existe um calçadão, destacado pela linha verde, e a cerca de 50 metros existe um pequeno bosque denso, destacado em azul. A Sul existe um bosque menos denso, composto por árvores com copas altas. Os obstáculos mais próximos estão localizados a Sudoeste, são um estacionamento térreo com cobertura metálica e pequenos edifícios de um pavimento. Imediatamente em frente a fachada leste há presença de árvores de pequeno porte e arbustos.

Também é importante considerar que a própria topografia do terreno pode influenciar o comportamento do vento. A **Figura 10** apresenta as curvas de nível a cada cinco metros dos arredores do edifício, destacado em vermelho. O edifício está situado a altitude de 593 metros. A Norte a altitude do terreno chega a um máximo de 598 metros a cerca de 50 metros de edifício; a Sul a altitude diminui gradualmente nas proximidades, até atingir um vale a aproximadamente 510 metros de altitude a cerca de 1 km, já fora da área representada pela figura. A altitude é aproximadamente constante na direção Leste-Oeste nos arredores.

**Figura 10** – Topografia dos arredores com obstáculos destacados em cinza



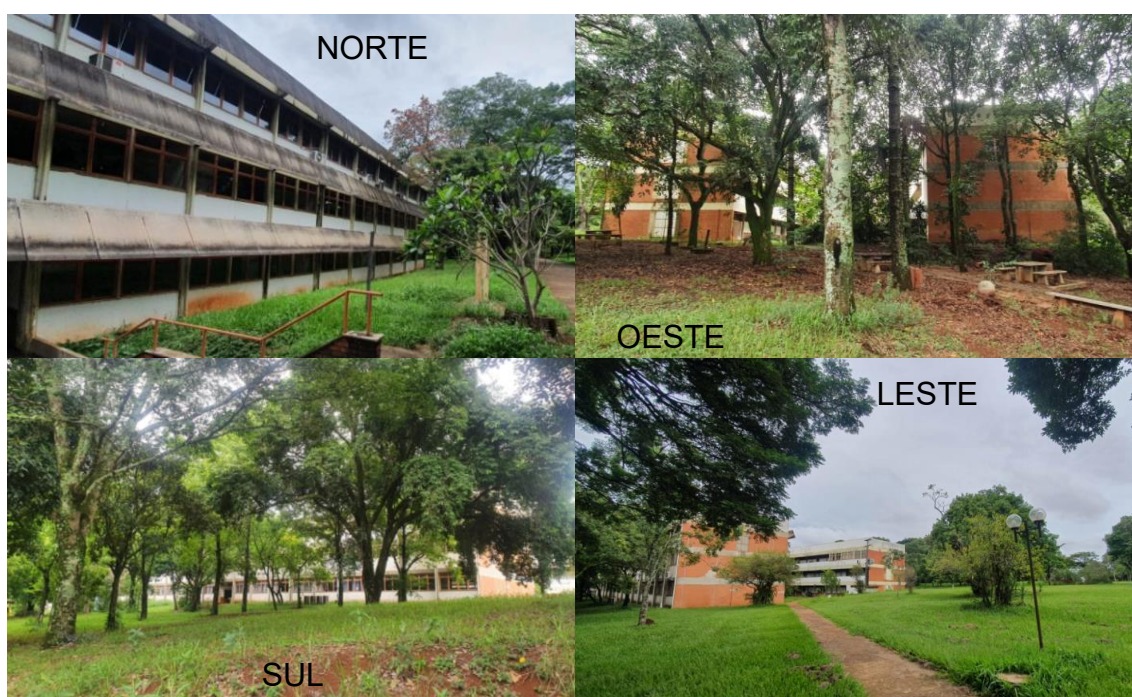
Fonte: autor, adaptado de Siglon (2022)

A **Figura 11** a seguir evidencia a diferença de nível entre o CTU e o calçadão a Norte da edificação. Essa diferença de cota ao longo do eixo do edifício, atingindo quase 2 metros no extremo Oeste, iniciando com cerca de 1 metro no extremo Leste.

**Figura 11 – Corte do CTU**

Fonte: o próprio autor (2022).

Além das imagens aéreas e cortes do projeto, a **Figura 12** a seguir apresenta fotografias das fachadas, para garantir uma caracterização fidedigna, tanto do edifício quanto dos arredores. Para mais detalhes, as elevações do edifício estão disponíveis no **Apêndice A**.

**Figura 12 – Fotografias das fachadas Norte, Sul, Leste e Oeste do CTU**

Fonte: o próprio autor (2022).

Existem onze salas de aula ventiladas naturalmente no térreo, além de cinco laboratórios, dois banheiros, uma cozinha e depósitos. Há no primeiro pavimento nove salas de aula com ventilação natural, cinco com ar-condicionado, secretarias, dois laboratórios de informática, uma biblioteca, dois banheiros e depósitos. No segundo pavimento encontram-se seis salas com ar-condicionado, secretarias, laboratórios, salas dos docentes, cozinha e banheiros.

A planta baixa de cada um dos três pavimentos está apresentada nas **Figura 13** a **Figura 15**, indicando a divisão das salas, elencadas nas páginas a seguir.

Os experimentos foram realizados nas salas 1008, 1018 e MM8 do bloco Norte e na sala MM4 do bloco Sul, destacadas em vermelho nas imagens.

**Figura 13 – Planta baixa do térreo**



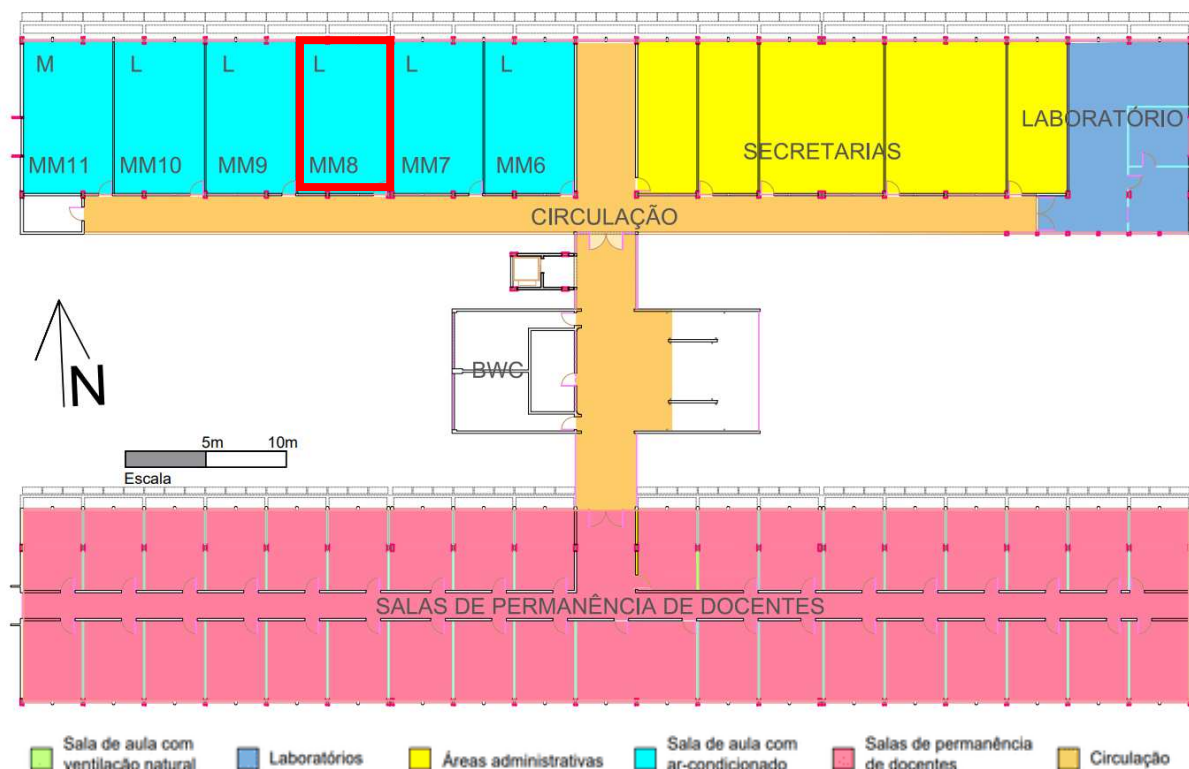
Fonte: o próprio autor (2022).

**Figura 14 – Planta baixa do primeiro pavimento**



Fonte: o próprio autor (2022).

**Figura 15** – Planta baixa do segundo pavimento



Fonte: o próprio autor (2022).

A **Tabela 2** a seguir apresenta as dimensões das salas de aula onde ocorreram os experimentos.

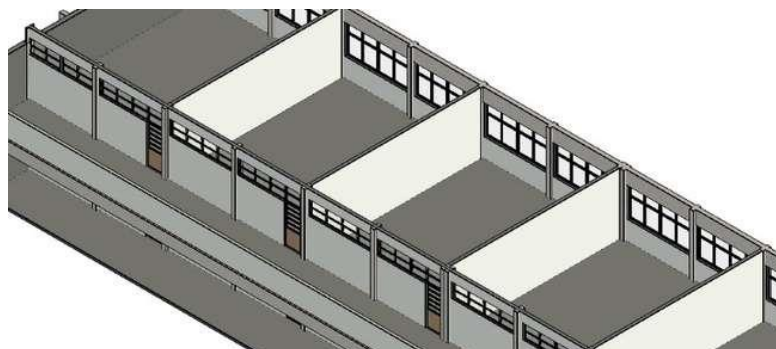
**Tabela 2** – Dimensões das salas de aula onde ocorreram as medições

Andar	Sala	Bloco	Área [m <sup>2</sup> ]	Volume [m <sup>3</sup> ]
Primeiro	1008	N	70,4	227,4
Segundo	1018	N	70,4	227,4
Segundo	MM4	S	52,0	167,9
Terceiro	MM8	N	52,9	170,9

Fonte: o próprio autor (2022).

As salas de aula foram projetadas para proporcionar ventilação cruzada, possuindo janelas superiores basculantes junto as paredes dos corredores, onde se localizam as portas, e esquadrias do tipo máximo-ar e basculantes (simples ou duplas) nas paredes voltadas para as fachadas externas. A **Figura 16** apresenta modelo 3D de salas do primeiro pavimento do bloco norte, evidenciando a configuração das esquadrias, neste caso com esquadrias basculantes duplas junto ao corredor. Os experimentos ocorreram em diferentes configurações de abertura, abrangendo casos com ventilação cruzada, unilateral e ensaios de infiltração. As configurações são apresentadas em detalhes mais à frente.

**Figura 16** – Modelo 3D explodido das salas



Fonte: o próprio autor (2022).

A **Figura 17** a seguir apresenta foto do interior da sala MM8 durante a execução de um dos ensaios. A imagem apresenta o mobiliário, constituído por carteiras escolares, computador de mesa, projetor, tela e cortinas. Em todas as salas, quando presentes, as cortinas foram totalmente dobradas, bem como a tela para projeção, pois não se pretendeu avaliar o impacto desse tipo de obstáculo interno neste estudo.

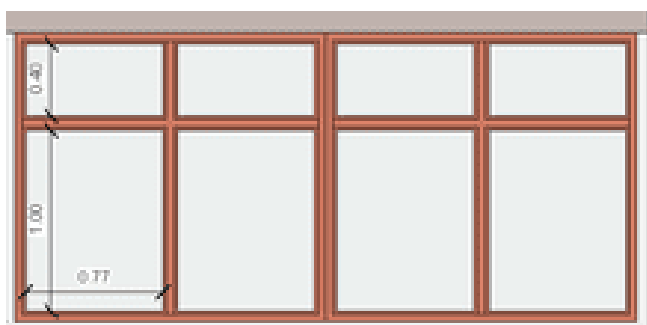
**Figura 17** – Interior da sala MM8



Fonte: o próprio autor (2022).

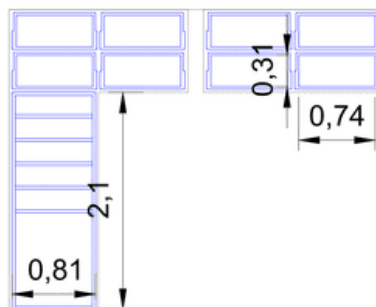
A **Figura 18** apresenta um módulo de esquadrias máximo-ar, com dimensões similares para os blocos norte e sul. Em seguida, a **Figura 19** apresenta um módulo de esquadrias basculantes, e uma porta metálica. Há pequenas variações nas dimensões e ângulos de abertura entre as esquadrias de cada sala, que serão detalhados na **Tabela 3** mais adiante.

**Figura 18** – Módulo de esquadria máximo-ar



Fonte: o próprio autor (2022).

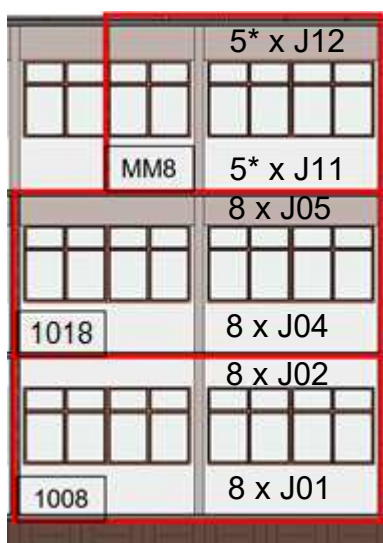
**Figura 19** – Módulo de esquadrias basculantes e porta



Fonte: o próprio autor (2022).

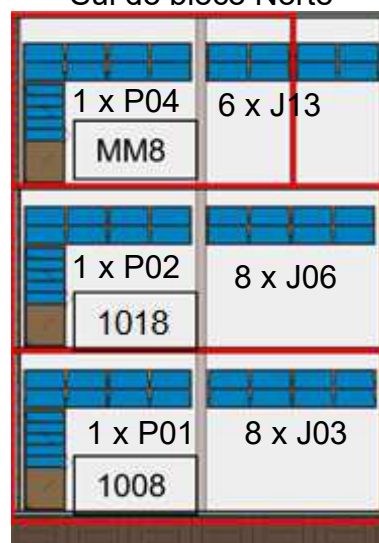
As **Figura 20** a **23** apresentam elevações das esquadrias das salas de aula estudadas. Apesar das esquadrias não serem idênticas entre as salas, pois existem variações de poucos centímetros (o edifício não foi executado todo de uma só vez, o que favorece essas pequenas variações dimensionais), os esquemas apresentam com precisão a distribuição das esquadrias nas fachadas. A nomenclatura arbitrária das esquadrias utilizada neste trabalho encontra-se ilustrada.

**Figura 20** – Esquadrias da fachada Norte do bloco Norte



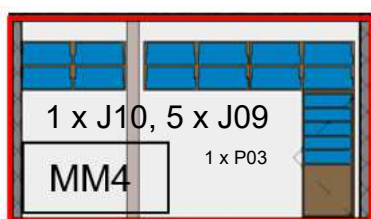
Fonte: o próprio autor (2022).

**Figura 21** – Esquadrias da fachada Sul do bloco Norte



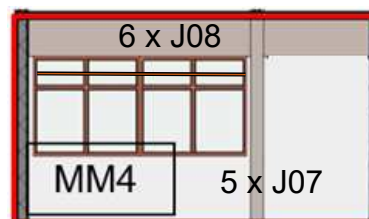
Fonte: o próprio autor (2022).

**Figura 22** – Esquadrias da fachada Norte do bloco Sul



Fonte: o próprio autor (2022).

**Figura 23** – Esquadrias da fachada Sul do bloco Sul



Fonte: o próprio autor (2022).

Chama a atenção o fato de existirem na sala MM8 duas esquadrias inoperantes. Por uma das janelas basculantes da fachada passa tubulação de ar-condicionado, e uma das esquadrias máximo-ar é fixa devido a trava ter sido instalada incorretamente.

Além das aberturas propositais, como janelas e portas operáveis, na condição real da edificação existem as infiltrações não intencionais, como a partir de frestas nas esquadrias, vidros quebrados, conduítes elétricos, entre outros. A **Figura 24** a seguir ilustra que mesmo com janelas fechadas ainda há vão significativo para que ocorra infiltração.

**Figura 24** – Vão presente nas esquadrias máximo-ar



Fonte: o próprio autor (2022).

Também são comuns vãos entre o módulo da esquadria e a estrutura de concreto armado, como ilustra a **Figura 25**.

**Figura 25** – Vão entre esquadria e estrutura de concreto



Fonte: o próprio autor (2022).

Também se chama atenção à alavanca para operação das esquadrias basculantes, ilustrada na **Figura 26**, ponto que será discutido mais à frente na seção de resultados.

**Figura 26** – Alavanca para operação das esquadrias basculantes



Fonte: o próprio autor (2022).

Em estágios preliminares do trabalho, a área livre das esquadrias foi determinada a partir do projeto do edifício e breves medições da inclinação das esquadrias. Entretanto, como é possível haver incompatibilidade entre o projeto e execução, em estágios posteriores mediu-se as dimensões de cada esquadria das salas estudadas, com auxílio de trena metálica. Além disso, o ângulo de inclinação de cada folha de janela basculante e máximo-ar foi medido com auxílio de um smartphone modelo Galaxy S21 dotado de inclinômetro, sensor comum em aparelhos atuais, cujos dados podem ser facilmente acessados a partir de diversos aplicativos gratuitos. A partir das inclinações de cada folha, foi determinada a inclinação de abertura média para cada tipo de esquadria.

Após esse procedimento foram constadas diferenças da ordem centímetros entre projeto e execução, além de significativas variações do ângulo de abertura entre esquadrias de diferentes salas. Por esses motivos, as esquadrias foram enumeradas para cada sala, totalizando 13 tipos de janela e 4 portas. As dimensões e características, como orientação, tipo, número de folhas, ângulo de inclinação e altura até o centro da abertura estão apresentadas na **Tabela 3** a seguir. A definição

do ângulo  $\theta$  é discutida mais à frente na **Figura 27**. A altura até o centro foi calculada a partir do nível do piso do térreo.

**Tabela 3** – Quadro de esquadrias organizado por sala de aula

Sala	Esquadria	Orient.	Há brises?	Corredor/parapeito?	Quant. por sala/orient.	Abre para	Tipo	Nº folhas	Altura até o centro [m]	Largura livre [m]	Altura livre [m]	$\theta$ médio [°]
1008	J01	N	Sim	Não	8	Fachada	Máximo-ar	1	1,50	0,79	1,01	33,30
	J02	N	Sim	Não	8	Fachada	Basculante simples	1	2,25	0,79	0,42	56,30
	P01	S	Não	Sim	1	Corredor	Porta metálica	1	1,03	0,86	2,05	-
	J03	S	Não	Sim	8	Corredor	Basculante dupla	2	2,50	0,79	0,42	49,60
1018	J04	N	Sim	Não	8	Fachada	Máximo-ar	1	4,85	0,77	1,00	33,76
	J05	N	Sim	Não	8	Fachada	Basculante simples	1	5,60	0,77	0,43	57,39
	P02	S	Não	Sim	1	Corredor	Porta metálica	1	4,37	0,86	2,05	-
	J06	S	Não	Sim	8	Corredor	Basculante dupla	2	5,85	0,80	0,73	52,01
MM4	J07	S	Não	Não	4	Fachada	Máximo-ar	1	4,85	0,78	0,92	25,53
	J08	S	Não	Não	4	Fachada	Basculante dupla	2	5,60	0,78	0,60	42,00
	P03	N	Não	Sim	1	Corredor	Porta metálica	1	4,37	0,85	2,10	-
	J09	N	Não	Sim	5	Corredor	Basculante dupla	2	5,85	0,83	0,51	31,33
MM8	J10	N	Não	Sim	1	Corredor	Basculante dupla	2	5,85	0,70	0,51	35,00
	J11	N	Sim	Não	5	Fachada	Máximo-ar	1	8,21	0,78	1,02	26,68
	J12	N	Sim	Não	5	Fachada	Basculante simples	1	8,95	0,78	0,44	54,26
	P04	S	Não	Sim	1	Corredor	Porta metálica	1	7,72	0,77	2,06	-
	J13	S	Não	Sim	6	Corredor	Basculante dupla	2	9,20	0,78	0,71	55,05

**Fonte:** o próprio autor (2022).

A **Tabela 3** apresenta as dimensões livres e ângulo médio de cada tipo de esquadria. Como apresentado na seção 2.2.2, a determinação das áreas de abertura a partir desses dados envolve um processo mais complexo do que pode ser inicialmente percebido.

Enquanto para esquadrias de correr e portas o cálculo é relativamente simples e direto, o procedimento para obtenção da área livre e efetiva das janelas basculantes e máximo-ar merece detalhamento, como discutido previamente e demonstrado na **Figura 7**.

Dois métodos foram utilizados para determinar as áreas livre e efetiva das esquadrias basculantes e máximo-ar. De início foi aplicado o procedimento proposto por Lamberts, Dutra e Pereira (2013), onde a área livre ( $A_f$ ) (equivalente à área útil) desse tipo de esquadria é reduzida de acordo com a inclinação, conforme a **Figura 6**, cujos valores correspondem à equação 12 a seguir.

$$A_f = A(1 - \cos(\alpha)) \quad (12)$$

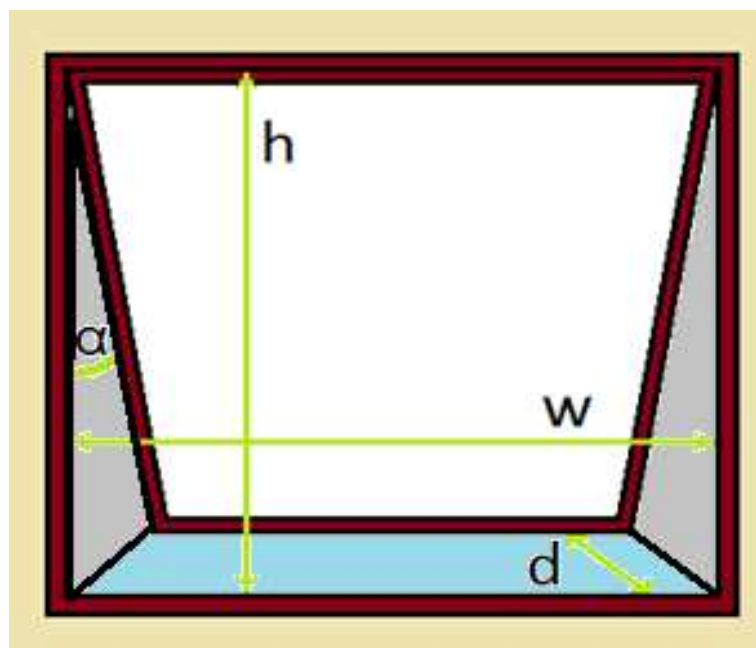
Neste caso o impacto da folha da esquadria na ventilação é contabilizado na determinação da área livre, e a área efetiva é calculada pela equação 8 utilizando um coeficiente de descarga ( $C_d$ ) igual a 0,6.

Na sequência foi aplicada a ferramenta de cálculo disponibilizada pela ESFA (Educacional and Skills Funding Agency), que retorna valores de área efetiva e

coeficiente de descarga para esquadrias pivotantes a partir de suas dimensões livres e ângulo de abertura. Sharpe et al. (2021) ainda indicam que este método também é aplicável a esquadrias basculantes.

Neste caso a calculadora toma por área livre de abertura a simples multiplicação da altura livre pela largura livre ( $h \cdot w$ , conforme **Figura 27**), e considera o impacto da obstrução da folha somente na determinação da área efetiva.

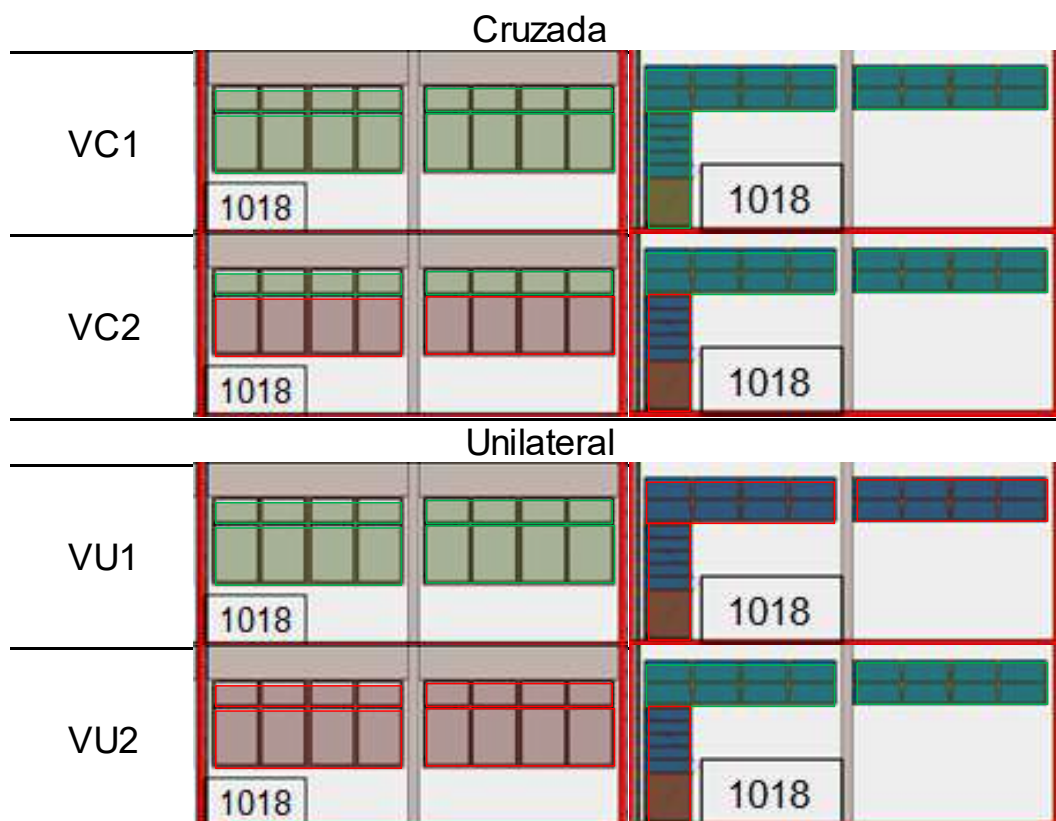
**Figura 27** – Dimensões consideradas no modelo de cálculo da ESFA



**Fonte:** adaptado de Education and Skills Funding Agency e Daniels (2018)

O coeficiente de descarga da esquadria é calculado pela ferramenta com base na inclinação de abertura  $\alpha$  e a razão entre altura e largura. Sharpe et al. (2021) compararam as previsões de  $C_d$  da calculadora com valores obtidos em medições, encontrando erro padrão médio foi de 2,6%. Os autores sugerem que outros métodos convencionais (ver **Figura 7**) tendem a subestimar o desempenho aerodinâmico das esquadrias.

Os experimentos foram realizados em cinco configurações de abertura para cada recinto: com todas janelas e porta abertas totalmente (VC1), com janelas basculantes abertas (VC2), com janelas máximo-ar e basculantes da fachada principal abertas (VU1), com janelas basculantes do corredor abertas (VU2) e com todas as aberturas fechadas (INF). A **Tabela 4** ilustra as diferentes configurações para a sala 1018, as aberturas destacadas em verde estavam abertas e em vermelho, fechadas.

**Tabela 4** – Configurações de abertura nos ensaios com cilindro

**Fonte:** o próprio autor (2023).

As configurações apresentadas na **Tabela 4** acima foram mantidas para todas as salas, mas é importante ter claro que há variações dimensionais entre as aberturas nas diferentes salas. Chama-se atenção ao caso da sala MM4, que possui esquadrias basculantes duplas ou invés de simples na fachada. Além disso, há variações nos ângulos de abertura das esquadrias entre as salas, conforme a **Tabela 3**, cujos dados foram utilizados para o cálculo das áreas livre ( $A_f$ ) e efetiva ( $A_{eff}$ ) de cada esquadria, pelos dois métodos até aqui discutidos.

As áreas livre e efetiva estão apresentadas na **Tabela 5**, para cada configuração de abertura estudada. Nas situações com ventilação cruzada, a área efetiva para múltiplas aberturas em série ( $A_{effs}$ ) foi calculada por meio da equação 11 para ambos os casos. Há casos de mais 300% de diferença entre a área efetiva para múltiplas aberturas em séries calculada pelos dois métodos, como ilustra a última coluna da tabela. A adequação dos métodos de cálculo das áreas é discutida na seção de resultados, a partir das taxas medidas em comparação com modelos analíticos de cálculo, cujos detalhes metodológicos são discutidos no item 3.6.

**Tabela 5 – Áreas de abertura para cada sala e configuração de abertura [m<sup>2</sup>]**

Sala	Cenário	ESFA (2018)					Lamberts, Dutra e Pereira (2013)					(Aeffs EFSA)/(Aeff Lamberts)
		Af total	Aeff total	Aeff fachada	Aeff corredor	Aeffs	Af total	Aeff total	Aeff fachada	Aeff corredor	Aeffs	
1008	VC1	13.46	6.17	4.33	1.85	1.70	4.93	2.96	1.34	1.62	1.03	1.6
	VC2	5.31	2.10	1.33	0.77	0.67	2.12	1.27	0.71	0.56	0.44	1.5
	VU1	9.04	4.33	4.33	0.00	-	2.23	1.34	1.34	0.00	-	-
	VU2	2.65	0.77	0.00	0.77	-	0.93	0.56	0.00	0.56	-	-
	INF	0.00	0.00	0.00	0.00	-	0.00	0.00	0.00	0.00	-	-
1018	VC1	15.24	7.61	4.25	3.36	2.64	5.82	3.49	1.36	2.14	1.14	2.3
	VC2	7.32	3.64	1.35	2.29	1.16	3.02	1.81	0.73	1.08	0.61	1.9
	VU1	8.81	4.25	4.25	0.00	-	2.26	1.36	1.36	0.00	-	-
	VU2	4.67	2.29	0.00	2.29	-	1.80	1.08	0.00	1.08	-	-
	INF	0.00	0.00	0.00	0.00	-	0.00	0.00	0.00	0.00	-	-
MM4	VC1	9.00	4.16	2.07	2.09	1.47	2.92	1.75	0.46	1.29	0.43	3.4
	VC2	4.35	1.86	0.86	1.00	0.65	0.85	0.51	0.29	0.22	0.18	3.7
	VU1	4.74	2.07	2.07	0.00	-	0.76	0.46	0.46	0.00	-	-
	VU2	2.47	1.00	0.00	1.00	-	0.37	0.22	0.00	0.22	-	-
	INF	0.00	0.00	0.00	0.00	-	0.00	0.00	0.00	0.00	-	-
MM8	VC1	10.60	5.16	2.53	2.63	1.82	4.14	2.49	0.68	1.80	0.64	2.9
	VC2	5.04	2.52	0.86	1.66	0.76	2.13	1.28	0.43	0.85	0.38	2.0
	VU1	5.69	2.53	2.53	0.00	-	1.14	0.68	0.68	0.00	-	-
	VU2	3.32	1.66	0.00	1.66	-	1.42	0.85	0.00	0.85	-	-
	INF	0.00	0.00	0.00	0.00	-	0.00	0.00	0.00	0.00	-	-

Fonte: o próprio autor (2022).

### 3.2 CARACTERIZAÇÃO DO CLIMA

A edificação de estudo de caso está situada no município de Londrina-PR, cujo clima é classificado por Köppen como Cfa, ou seja, subtropical úmido. Mais detalhes do clima da região são apresentados a partir de dados da estação meteorológica do IDR-Paraná, localizada nas coordenadas 23°21'34,3" Sul; 51°09'53,1" Oeste, a 585 m de altitude, distante 5.000 metros na direção Sudeste do CTU, conforme **Figura 28**.

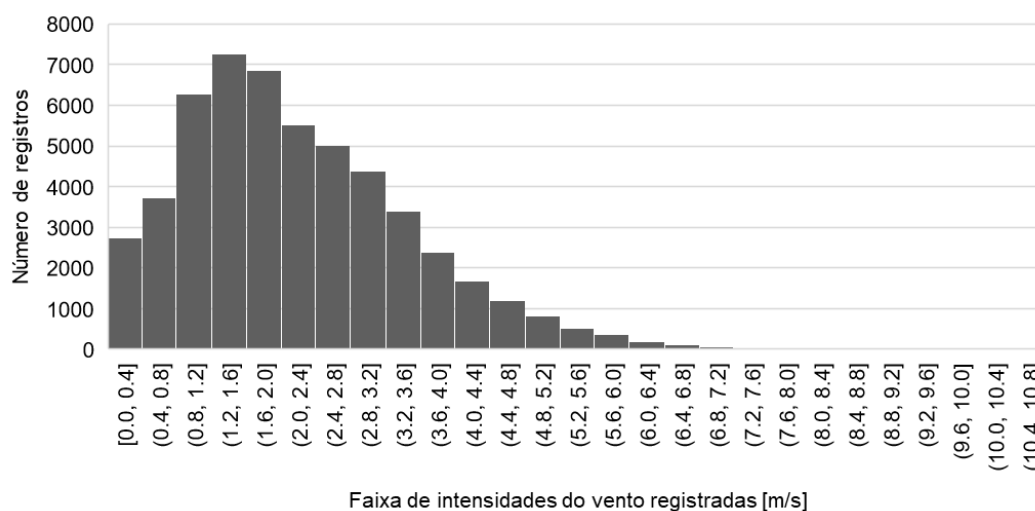
**Figura 28** – Distância entre o CTU e a estação meteorológica do IDR-PR



Fonte: autor, adaptado de Siglon (2022).

O **Gráfico 3** apresenta a frequência de ocorrência de diferentes faixas de velocidade média horária do vento entre 01 de janeiro de 2015 e 31 de dezembro de 2020. É importante ressaltar que essa intensidade é registrada na altura padrão de 10 metros.

**Gráfico 3** – Histograma de intensidade média horária do vento (2015-2020)

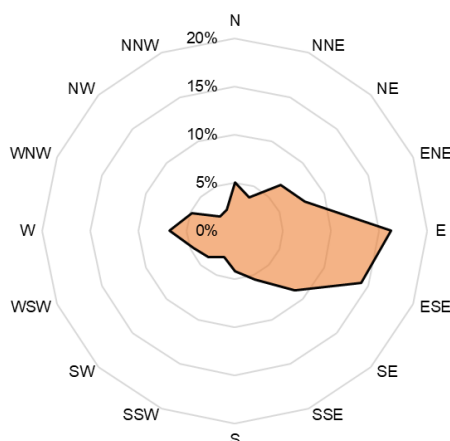


**Fonte:** autor, adaptado de IDR-Paraná (2021).

A intensidade média horária registrada foi de 2,23 m/s, com 1,30 m/s de desvio padrão. A intensidade foi superior a 0,4 m/s em 95% dos registros, superior a 0,8 m/s em 90%, maior que 1,3 m/s em 75%, superior a 2 m/s em 50% das medições. Durante 5% do tempo foi registrada intensidade média superior a 4,7 m/s, e durante 1% foi maior que 5,9 m/s.

Além da intensidade, outro parâmetro de grande interesse é a direção do vento. O **Gráfico 4** a seguir apresenta a frequência de ocorrência do vento por direção. Nota-se a predominância de ventos entre Leste e Sudeste.

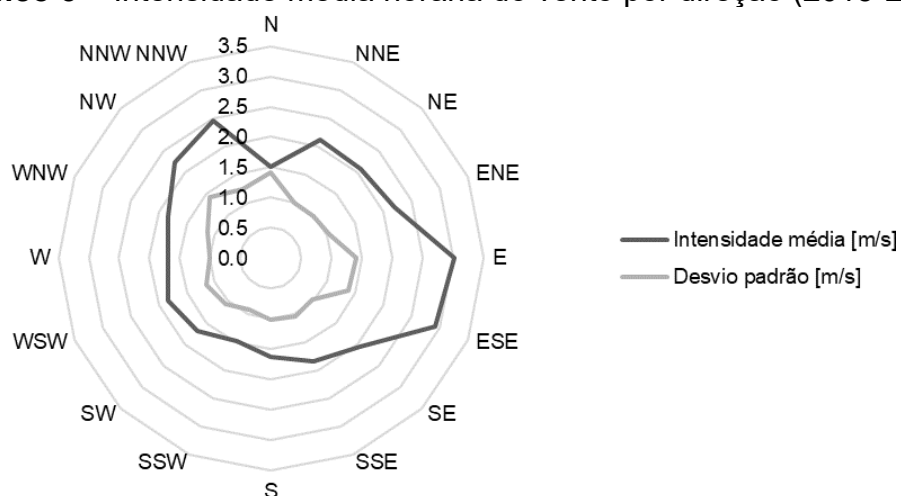
**Gráfico 4** – Frequência de ocorrência por direção



**Fonte:** autor, adaptado de IDR-Paraná (2021).

Em continuidade, o **Gráfico 5** detalha a intensidade média horária dos ventos por direção, bem como o desvio padrão das medidas.

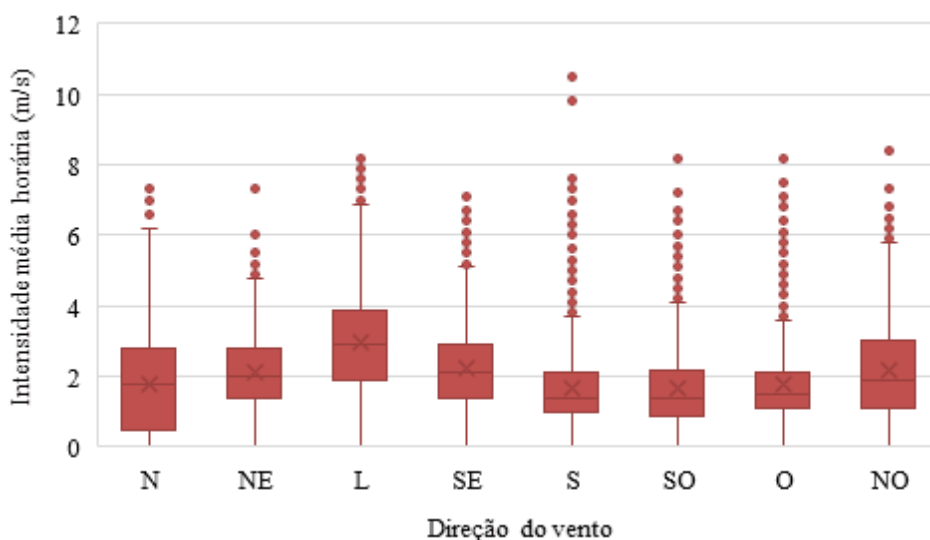
**Gráfico 5** – Intensidade média horária do vento por direção (2015-2020)



**Fonte:** autor, adaptado de IDR-Paraná (2021)

Nota-se significativa variação das intensidades entre diferentes direções. A intensidade média chega a cerca de 3,0 m/s para as direções Leste, enquanto não atinge 2,0 m/s para a direção Oeste, por exemplo. Os mesmos dados são apresentados de forma mais detalhada pelo **Gráfico 6**, desta vez em forma de box-plot, o que permite identificar com clareza o padrão de distribuição dos valores de intensidade do vento por direção ao redor da média.

**Gráfico 6** – Box-plot da intensidade média horária do vento por direção



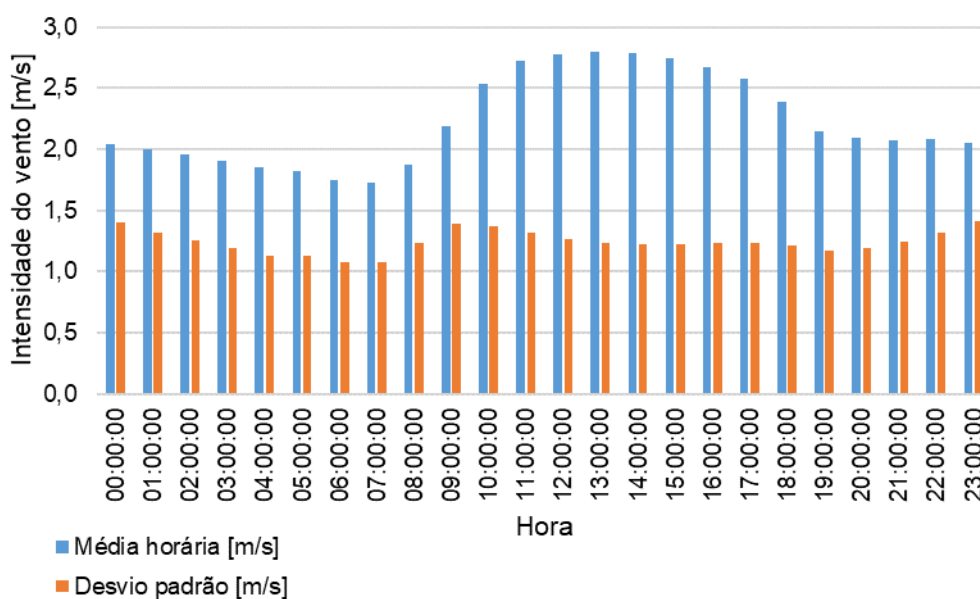
**Fonte:** autor, adaptado de IDR-Paraná (2021).

Nota-se também a existência de vários pontos extremos, com intensidades muito superiores à média, para todas as direções do vento. Ainda se nota

que para todas as direções, em algum momento há registro de intensidades nulas.

Além da variação da intensidade por direção, investigou-se a variação da intensidade do vento entre as horas do dia, como demonstra o **Gráfico 7**. Durante o final da manhã e à tarde a intensidade média do vento é levemente superior ao resto do dia, ultrapassando os 2,5 m/s entre as 10h00 e as 16h00. Essa variação demonstra a importância de ter controle sobre o horário das medições.

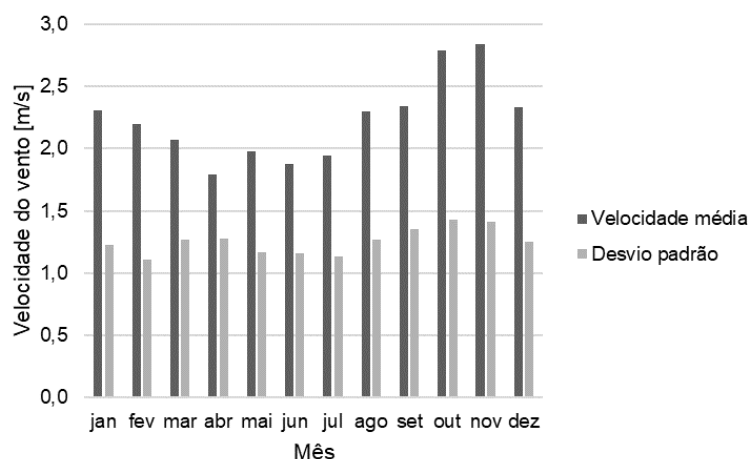
**Gráfico 7** – Intensidade média horária do vento (2015-2020)



Fonte: autor, adaptado de IDR-Paraná (2021).

Também é possível observar diferentes tendências na intensidade do vento ao longo dos meses do ano, como demonstra o **Gráfico 8**. Sendo assim, é importante alguma cautela ao extrapolar dados obtidos de medições realizadas em um único mês ou estação do ano.

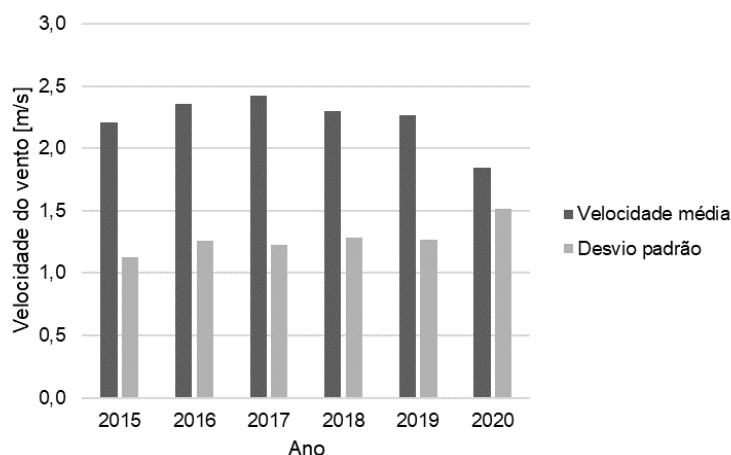
**Gráfico 8** – Intensidade média mensal do vento (2015-2020)



Fonte: autor, adaptado de IDR-Paraná (2021).

Os dados apresentados revelam que a intensidade predominante dos ventos é Leste em todos os meses do ano, havendo variações da intensidade média entre 2,0 m/s para o mês de junho até 2,8 m/s para os meses de outubro e novembro. O **Gráfico 9** demonstra que pode haver alguma variação estocástica na intensidade do vento mesmo na escala dos anos.

**Gráfico 9** – Intensidade média anual do vento (2015-2020)

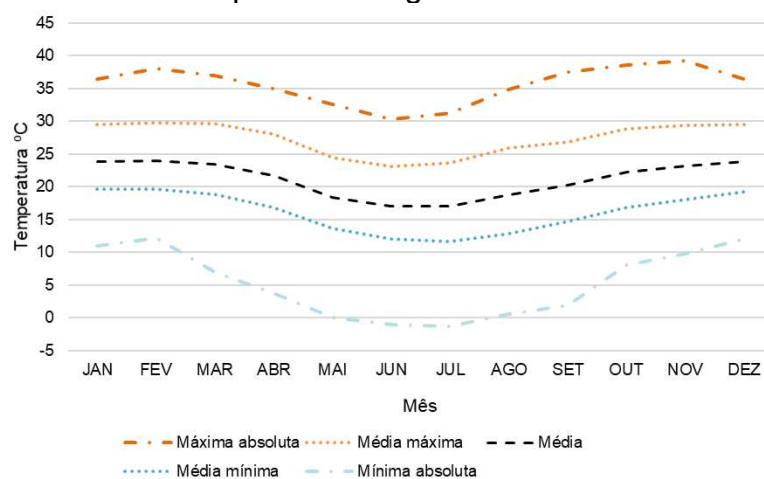


**Fonte:** autor, adaptado de IDR-Paraná (2021).

Os gráficos apresentados ilustram o já conhecido fato de que há variações estocásticas na intensidade do vento em diferentes escalas de tempo, de segundos a anos (TROEN e PETERSEN, 1989).

Por fim, o **Gráfico 10** apresenta a variação típica das temperaturas máximas e mínimas diárias do município de Londrina ao longo do ano, registradas entre 1976 e 2019, pela mesma estação meteorológica. Essa variação de temperaturas ao longo do ano é de interesse, já que a variação entre temperatura interna e externa é um dos fatores que influenciam a taxa de ventilação.

**Gráfico 10** – Temperaturas registradas entre 1976 e 2019



**Fonte:** autor, adaptado de IDR-Paraná (2020).

A temperatura média ao longo do ano é de 21,2 °C, com médias anuais máxima de 27,4 °C e mínima de 16,2 °C. A mesma estação ainda registrou precipitação anual média de 1632 mm.

Apesar dos dados registrados pela estação do IDR-PR sejam de grande valia para caracterizar o clima do ambiente de estudo de caso, a aplicação dos dados para estimar taxas de ventilação pode ser prejudicada pela baixa frequência da amostragem do aparato, que registra somente valores de direção e intensidades média e máxima do vento a cada 15 minutos.

Além disso, devido à distância entre estação e edifício, é possível que haja assincronia entre intensidade e direção registradas na estação e os valores de fato presentes na edificação durante os ensaios com gases traçadores, o que pode prejudicar a comparação das medidas com diferentes modelos analíticos de cálculo.

A opção ideal para evitar esse problema seria adquirir e posicionar estação meteorológica em local mais próximo ao edifício, porém foi considerada inviável em termos de custo e prazo para o desenvolvimento deste trabalho.

### 3.3 MATERIAIS

O cilindro de gás carbônico utilizado conta com capacidade nominal de 4 kg, com duas válvulas para o controle da vazão. A **Figura 29** apresenta o conjunto montado como utilizado nos experimentos.

**Figura 29** – Cilindro de CO<sub>2</sub> e válvulas



Fonte: o próprio autor (2022).

A concentração do gás foi registrada durante os experimentos com auxílio de três detectores de CO<sub>2</sub> com termo-higrômetro, modelo NDC02 da marca Next Instrumentos, adquiridos em 2022 com sistema de calibração automática pela curva ABC. Os sensores de gás carbônico são baseados na tecnologia de infravermelho não dispersivo (NDIR), possuem tempo de resposta menor que 5 segundos e realizam medições na faixa entre 0 e 9999 ppm, com 1 ppm de resolução e precisão reportada pelo fabricante de 50 ppm  $\pm$  5% da leitura. A **Figura 30** apresenta um dos equipamentos em questão.

**Figura 30** – Sensor NDIR de CO<sub>2</sub> com termo-higrômetro



Fonte: o próprio autor (2022).

Os equipamentos foram montados sobre tripé metálico, em altura fixa igual a 1,2 metros, na zona de respiração dos indivíduos sentados. A **Figura 31** a seguir apresenta um conjunto de sensor e tripé.

**Figura 31** – Conjunto de sensor de CO<sub>2</sub> e tripé metálico



Fonte: o próprio autor (2022).

Nos ensaios de decaimento, também foi utilizado ventilador portátil, apresentado na **Figura 32**, para, quando necessário, garantir a uniformidade do gás traçador antes do início do decaimento nos ensaios com cilindro. Para o mesmo

propósito foram utilizados ventiladores de teto presentes nas salas. Os procedimentos adotados são explicados em detalhes no item 3.4.

**Figura 32** – Ventilador portátil



**Fonte:** o próprio autor (2022).

Para o registro das condições do vento durante o decaimento foram coletados dados da estação meteorológica do IDR-Paraná, localizada a 5 km do edifício de estudo. Os mesmos equipamentos, com exceção dos ventiladores, foram empregados para o monitoramento da concentração de CO<sub>2</sub> durante as aulas.

### 3.4 PROCEDIMENTO DOS EXPERIMENTOS

Nesta subseção é apresentado o procedimento dos experimentos realizados. Métodos de gás traçador para a medida da taxa de ventilação das salas de aula foram aplicados a partir de duas estratégias, com objetivos distintos. Pretende-se aqui apresentá-los de maneira suficientemente detalhada para que sejam reproduzíveis a partir deste texto.

Parte dos ensaios foi conduzida utilizando CO<sub>2</sub> injetado no ambiente a partir de cilindro, sem ocupantes, em cinco configurações predeterminadas de abertura (3.1), utilizando a técnica de decaimento. Este é o método mais convencional, abordado por diferentes normas internacionais (ISO 12569, ASTM E741, JIS A1406), com precisão e aplicabilidade reconhecidas. Espera-se resultados mais precisos, porém que não correspondem ao cenário real de ocupação do edifício. Os dados coletados nessa situação “ideal” serão empregados para avaliar a eficiência de diferentes estratégias de ventilação, e possuem o potencial para auxiliar a calibração de simulações e modelos de cálculo, oferecendo subsídio para comparar dados simulados e medidos.

Também foram conduzidos ensaios aproveitando o CO<sub>2</sub> metabólico dos ocupantes como gás traçador, sem necessidade de injeção artificial a partir de

cilindro. A taxa de ventilação foi calculada a partir da técnica da concentração estacionária de CO<sub>2</sub>, estratégia adotada com sucesso em trabalhos anteriores, além de discutida nas normas ISO 12569 (2017) e ASTM E741 (2017) (KABIRIKOPAEI e LAU, 2020; TRAN et al., 2017).

Esses ensaios ocorreram durante períodos mais longos de tempo, demandaram menos intervenção, além de não interromper o uso das salas, porém não foi possível estabelecer controle rígido das configurações de abertura. Entretanto, são de grande valia, pois permitem avaliar as condições reais de uso dos ambientes, considerando as práticas habituais dos ocupantes e as dinâmicas de abertura e fechamento das janelas, em contraste com as configurações ideais predeterminadas, que nem sempre refletem a realidade cotidiana. Essa abordagem fornece uma perspectiva mais realista sobre a efetividade das taxas de ventilação em termos de qualidade do ar interno e conforto térmico, levando em conta as variações e preferências dos usuários, assim como as condições ambientais externas que influenciam o comportamento de abertura das janelas.

Os itens 3.4.1 e 3.4.2 apresentam em detalhes os procedimentos para os ensaios com e sem cilindro, respectivamente.

#### 3.4.1 Ensaios de Decaimento com Cilindro

Ocorreram ensaios de decaimento com injeção artificial de CO<sub>2</sub> em 4 salas de aula (1008, 1018, MM4 e MM8), em 5 configurações de abertura cada: duas configurações com ventilação cruzada (VC1 e VC2), duas com ventilação unilateral (VUNI1 e VUNI2), e uma de infiltração (INF).

Os ensaios de infiltração (INF) foram realizados com todas as esquadrias do recinto fechadas, o que é útil para conhecer o quão bem vedado são os ambientes. Nesta configuração toda a troca de ar com o exterior se dá por frestas. A caracterização do edifício de estudo revela que os caminhos de infiltração mais prováveis são frestas nas próprias esquadrias, ou na interface esquadria-estrutura. Devido ao sistema construtivo, trocas de ar com recintos adjacentes são improváveis, sem caminhos de infiltração evidentes.

A ventilação cruzada foi estudada em duas diferentes configurações por sala, uma com todas as esquadrias, inclusive porta, abertas ao máximo (VC1), e outra somente com as esquadrias basculantes abertas (de ambas as fachadas), e

portas e esquadrias máximo-ar fechadas (VC2). O cenário VC1 pretendeu, além de estudar o fenômeno da ventilação cruzada de forma mais ampla, analisar qual taxa de ventilação pode se esperar das salas de aula em condições ideais.

O segundo cenário (VC2) buscou, além de verificar a influência da alteração da área efetiva para múltiplas aberturas em série ( $A_{effs}$ ) na taxa e ventilação das salas, compreender se as janelas basculantes localizadas mais próximas ao teto são de fato eficientes para a ventilação, mesmo na presença de obstáculos externos (brises e corredores). Essa configuração é frequentemente apresentada em projetos arquitetônicos como destinada a retirar contaminantes internos do ambiente sem gerar corrente de ar na altura dos ocupantes, para evitar eventuais desconfortos gerados pelo fluxo de ar.

Dois cenários de ventilação unilateral foram experimentados, o primeiro, VU1, com as esquadrias das fachadas abertas (conjunto de esquadrias máximo-ar e basculantes), e as esquadrias junto aos corredores fechadas (porta metálica e esquadrias basculantes duplas). Os ensaios do cenário VU2 ocorreram com somente as esquadrias basculantes duplas dos corredores abertas, e as demais fechadas. Chama-se atenção para o fato de que não houve vedação das frestas das esquadrias da fachada oposta, portanto é possível que as condições de experimento sejam distintas de ambientes que realmente troquem ar com o exterior por somente uma de suas fachadas.

Os cenários de ventilação cruzada e unilateral foram repetidos quatro vezes para cada sala, e o de infiltração duas vezes, por apresentar menor variabilidade. Sendo assim, foram realizados 72 ensaios de decaimento. É sabido que uma medição única é insuficiente caso se deseje medir taxas de ventilação pela técnica do decaimento de gases traçadores, com trabalhos anteriores apresentando coeficientes de variação entre 0,2 e 0,64 (ALMEIDA, BARREIRA e MOREIRA, 2020).

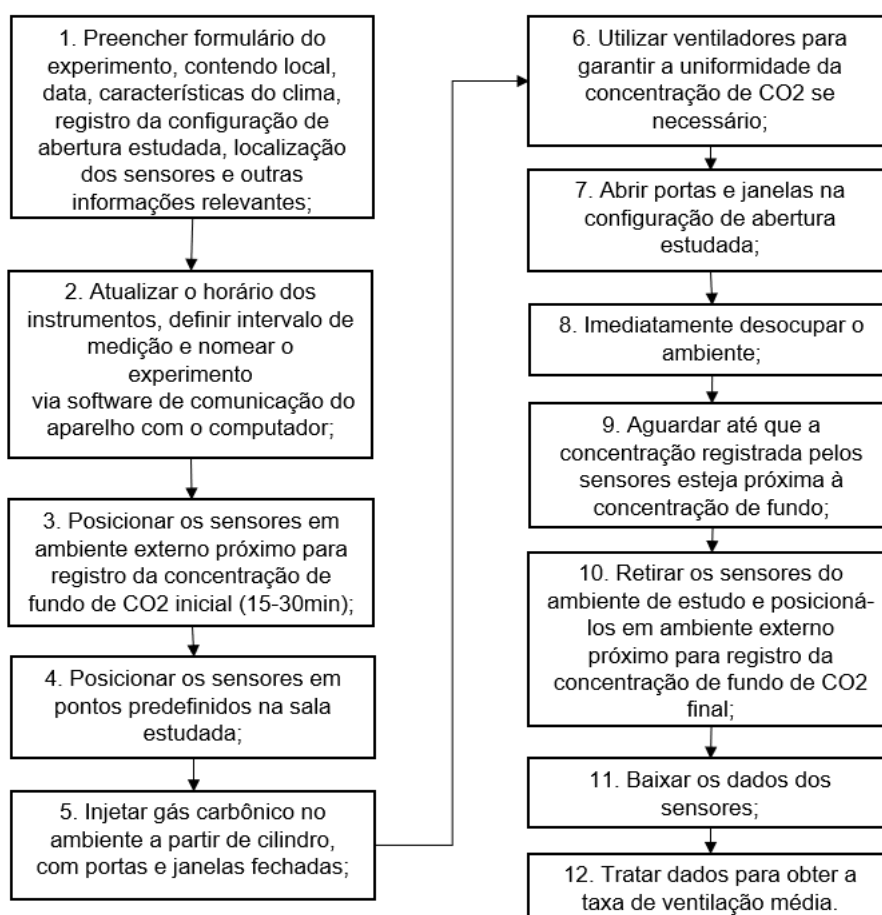
Evitou-se ao máximo executar ensaios sequenciais em uma mesma sala ou configuração de ventilação, de forma que a ordem dos ensaios foi realizada de forma aproximadamente aleatória, ainda que respeitando o cronograma de utilização das salas de aula. O objetivo desse cuidado foi reduzir ao máximo o potencial impacto de diferentes condições climáticas entre as amostras.

A taxa de ventilação do ambiente estudado é inversamente proporcional à duração esperada do experimento. Quanto mais intensa a ventilação, mais rápido ocorre o decaimento, e, portanto, menos tempo dura o ensaio. A título de

exemplificação, a norma ASTM E741 apresenta que em ambientes com  $4 \text{ h}^{-1}$ , o experimento dura cerca de 0,25 h, enquanto para ambientes com  $0,25 \text{ h}^{-1}$ , a duração deve ser de pelo menos 4 horas. Nas situações de ventilação cruzada, verificaram-se taxas mais altas de ventilação, e os experimentos na maioria não superaram a duração de uma hora, com período de decaimento propriamente dito ainda mais curto. Enquanto isso, experimentos de infiltração demandaram longos períodos, de várias horas.

Em continuidade, a **Figura 33** apresenta o passo-a-passo realizado em cada ensaio de decaimento com cilindro de  $\text{CO}_2$ . Seguiu-se o procedimento proposto pela norma europeia ISO 12569 (2017), com os passos apresentados em mais detalhes.

**Figura 33** – Fluxograma dos ensaios de decaimento com cilindro

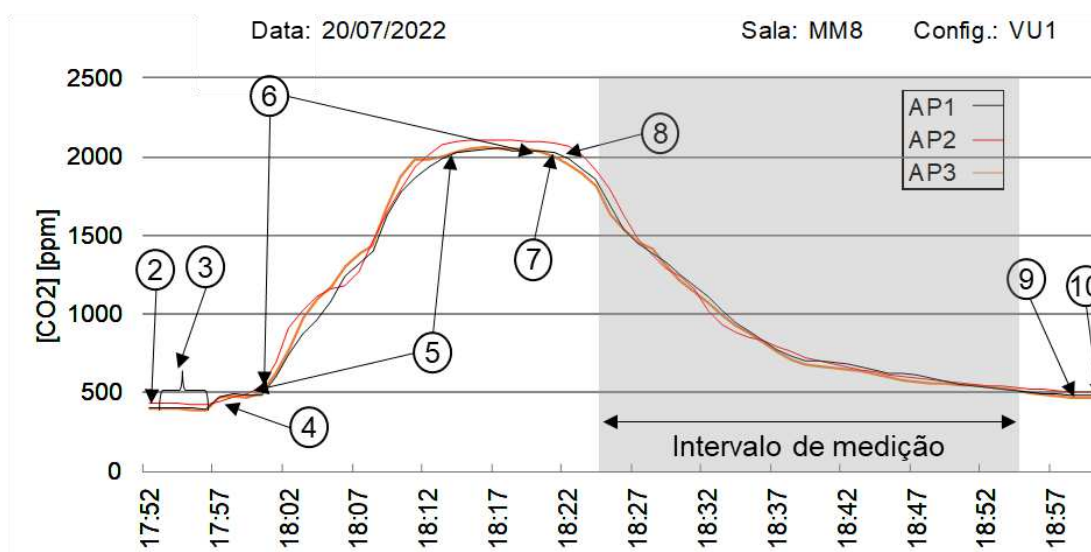


Fonte: o próprio autor (2022).

O **Gráfico 11** a seguir ilustra o momento das etapas 2 a 10 do fluxograma, em um gráfico típico da concentração de  $\text{CO}_2$  ao longo de um dos ensaios preliminares. O intervalo para o qual a taxa de ventilação é calculada está destacado em cinza. O **Gráfico 11** foi elaborado considerando média móvel da concentração ao

longo de 1 minuto, para suavizar oscilações.

**Gráfico 11** – Momento das etapas dos ensaios de decaimento com cilindro



Fonte: o próprio autor (2022)

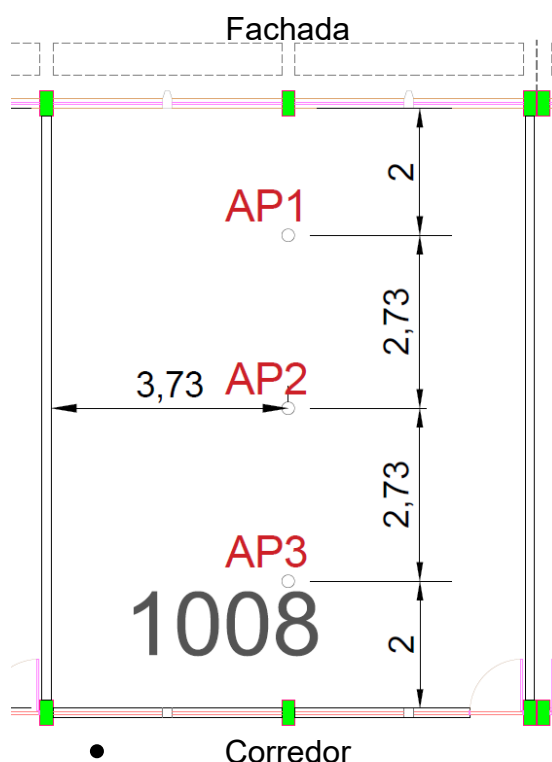
Para cada ensaio, a primeira etapa consistiu no preenchimento de formulário detalhado do experimento, com exemplo preenchido disponível no **Apêndice B**, contendo data e hora de realização do experimento, configuração de abertura estudada, horário de abertura das esquadrias, entre outras informações. Tratou-se de etapa fundamental para a organização dos dados coletados durante os experimentos, devido ao grande número de amostras coletadas.

Em seguida os três sensores eram ligados e configurados para o experimento, conectados via USB a um computador, onde por meio de software fornecido pelo fabricante nomeava-se o experimento com a data, sala e configuração de abertura do ensaio. Neste ponto o sensor iniciava a coleta de dados, correspondendo ao passo destacado como (2) no **Gráfico 11**. O intervalo de amostragem era configurado para a cada 5 segundos, e o horário do aparelho atualizado, para garantir a sincronização na etapa de análise de dados.

Em seguida posicionavam-se os sensores, já registrando dados, nos corredores externos, até que a concentração se estabilizasse, o que, em média, levava poucos minutos (passo 3). Como os dados eram registrados automaticamente pelo sensor, não foi necessário anotar manualmente esses valores durante o ensaio.

Na sequência posicionavam-se os sensores em pontos predefinidos da sala de aula, a 1,2 metros de altura do chão, na chamada zona de respiração dos alunos sentados (passo 4). Os pontos selecionados para cada sala de aula estudada encontram-se apresentados em planta na **Figura 34**.

**Figura 34** – Posicionamento dos sensores de CO<sub>2</sub> da sala 1008



Fonte: o próprio autor (2022).

Os sensores foram denominados como “AP1”, “AP2” e “AP3”, e em todos os experimentos foram posicionados nos mesmos pontos, sendo o AP1 mais próximo à fachada, o AP2 no centro da sala e o AP3 mais próximo ao corredor. O ponto preto indica o local aproximado onde se mediu as concentrações de fundo.

Com os equipamentos devidamente instalados, fechavam-se todas as aberturas e injetava-se CO<sub>2</sub> no ambiente, até que se atingisse concentração próxima a 2500 ppm para os cenários de ventilação cruzada, e 2000 ppm para a configuração VU1, e cerca de 1500 ppm para a concentração VU2 (passo 5). Nos cenários de infiltração se definiu concentração alvo de 1000 ppm acima da concentração de fundo.

Buscou se aplicar a mínima concentração que permitisse análise válida dos dados, e não se encontrou nas referências normativas valor mínimo padronizado. A ISO 12569 se limita a mencionar que a quantia de gás traçador requerida para ensaios de decaimento é muito pequena, e não precisa ser definida com precisão. Há, entretanto, recomendação para não se ultrapassar a concentração de 5000 ppm, considerada concentração limite de exposição (ASTM, 2017).

Em configurações com taxas de ventilação esperadas mais elevadas, é necessário empregar concentrações iniciais ligeiramente maiores de gás traçador, a fim de permitir intervalo de tempo de decaimento da ordem de algumas trocas de ar

por hora (PERSILY, 1997).

Em cada ensaio verificou-se a uniformidade da concentração a partir dos 3 sensores durante no instante inicial do decaimento. Variações de até  $\pm 10\%$  entre o valor de um aparelho e da média são aceitáveis (ASTM, 2017). Para acelerar a dispersão do gás no recinto, foram empregados os ventiladores fixos presentes nas salas, além de pequeno ventilador portátil (passo 6). Este é um ponto que merece atenção, já que o uso de ventiladores pode afetar a estratificação do ar em diferentes temperaturas no recinto, porém ajudam a alcançar a uniformidade da concentração, o que viabiliza a aplicação do método, e trata-se de procedimento descrito em norma (ASTM, 2017).

Após atingida concentração alvo de CO<sub>2</sub>, e verificada uniformidade nas medidas entre os aparelhos, os ventiladores eram desligados. Para minimizar o efeito desses instrumentos nos resultados, após o desligamento aguardava-se pelo menos 3 minutos prosseguir para passo seguinte (7), que consistia na operação das aberturas para a configuração desejada.

As esquadrias eram abertas de forma ágil pelo experimentador, imediatamente na sequência o ambiente era desocupado (passo 8), sendo mantido assim até o final do período de decaimento. Nas situações com ventilação cruzada, pelo menos dois indivíduos estavam presentes para operar as esquadrias, já que em testes preliminares com somente um experimentador, durante o tempo necessário para abrir todas as janelas, houve problemas com a manutenção da uniformidade da concentração no recinto.

Neste trabalho os valores foram truncados em 500 ppm, para evitar possíveis erros advindos da incerteza do equipamento quando já próximo às concentrações de fundo, critério similar ao adotado por Cui et al. (2015). A norma ISO 12569 recomenda utilizar concentração mínima superior a 20 vezes a resolução do equipamento de medição acima da concentração de fundo, o que é atendido a partir do critério adotado (ISO, 2017).

Neste momento retiravam-se os sensores da sala (9), e novamente eram posicionados no corredor externo para o registro da concentração de fundo final, após a estabilização do valor registrado, que novamente levava alguns minutos. O período de decaimento era encerrado quando a concentração registrada pelos equipamentos se aproximava da concentração de fundo.

Por fim os dados coletados por sensor eram baixados em forma de

planilha para um computador (passo 10), conectados via cabo USB, por meio do software do aparelho. A etapa final, de tratamento de dados, é apresentada em detalhes na seção 3.5.

### 3.4.2 Ensaio com CO<sub>2</sub> Metabólico

A coleta de dados a partir do registro da concentração do CO<sub>2</sub> metabólico ocorre de forma distinta dos ensaios com cilindro. De início, este procedimento apresenta como vantagens maior simplicidade e menor custo, com possibilidade de coleta de dados por períodos mais longos, na condição real de uso da edificação, sem interromper aulas. Além disso, pode-se argumentar em prol de implicar menor impacto ambiental, já que nenhum gás de efeito estufa adicional é lançado na atmosfera para sua execução.

Um aspecto que se buscou esclarecer é a viabilidade da aplicação desse tipo de ensaio em ambientes ventilados por janelas amplas, ou seja, com grande porosidade, já que se esperam altas taxas de ventilação nesses casos, o que eleva a ocupação mínima necessária para gerar concentrações suficientes para executar o ensaio.

Entretanto, para não causar transtorno aos ocupantes dos ambientes, não é comum adotar controle rígido das configurações de abertura durante as medições. Outro ponto a se destacar, é de que não seria ético solicitar aos ocupantes para que fechem as esquadrias durante as aulas para gerar maior acúmulo de CO<sub>2</sub> no recinto, já que isso colocaria a saúde dos ocupantes em risco, além de interferir nas condições reais de uso do sistema de ventilação natural pelos ocupantes.

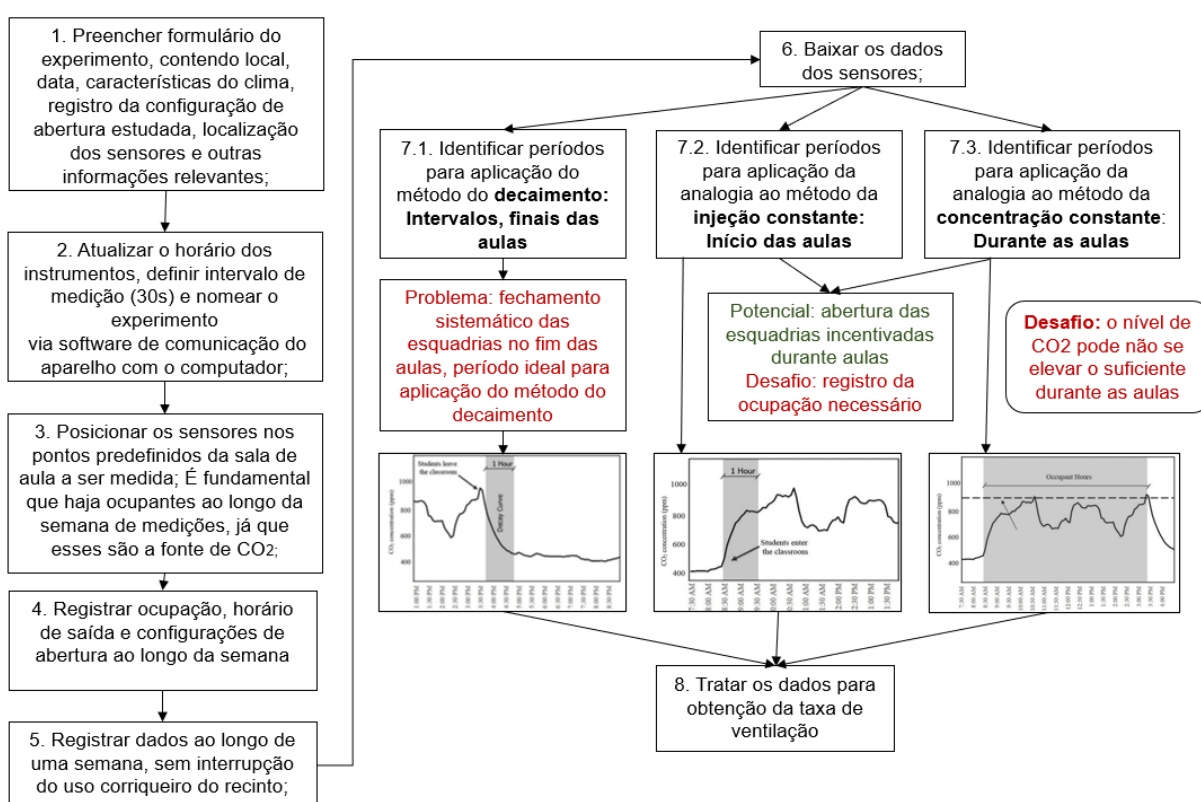
A sala 1018 foi escolhida para a aplicação deste método, um dos motivos é o de ser a única dentre as quatro salas investigadas pelo outro método que não dispõe de cortinas, o que dificultaria qualquer tentativa de comparação entre os resultados.

Os três sensores de CO<sub>2</sub> disponíveis foram posicionados nos mesmos pontos dos ensaios realizados com cilindro, sempre antes do início das aulas. Ao final de um dia de medições, os sensores eram retirados da sala, posicionados no corredor, ao abrigo do sol, até atingir a concentração de fundo, e por fim, coletavam-se os dados. As aulas em que ocorreram os ensaios foram acompanhadas, preenchendo-se formulário simples, contendo horários de início e fim, e número de

ocupantes. Também foram registradas as configurações de abertura das esquadrias em cada aula, a partir de inspeção visual realizada pelo autor.

É possível a aplicação do CO<sub>2</sub> metabólico como gás traçador em analogia a três técnicas mais tradicionais: decaimento, injeção e concentração estacionária (KABIRIKOPAEI e LAU, 2020). Cada uma dessas técnicas mede a taxa de ventilação referente a diferentes estágios da ocupação das salas. A **Figura 35** apresenta o fluxograma geral dos ensaios, que posteriormente foram analisados por uma das três técnicas apresentadas.

**Figura 35** – Fluxograma dos ensaios com CO<sub>2</sub> metabólico



**Fonte:** autor (2022), gráficos de Kabirikopaei e Lau (2020).

O método de análise mais simples é análogo ao utilizado nos ensaios com cilindro, o de decaimento. Neste caso mede-se a taxa de ventilação referente ao período em que o CO<sub>2</sub> acumulado durante as aulas leva para decair até a concentração de fundo. Ou seja, a taxa de ventilação do período após cada aula, considerando que durante esses períodos o ambiente estará desocupado.

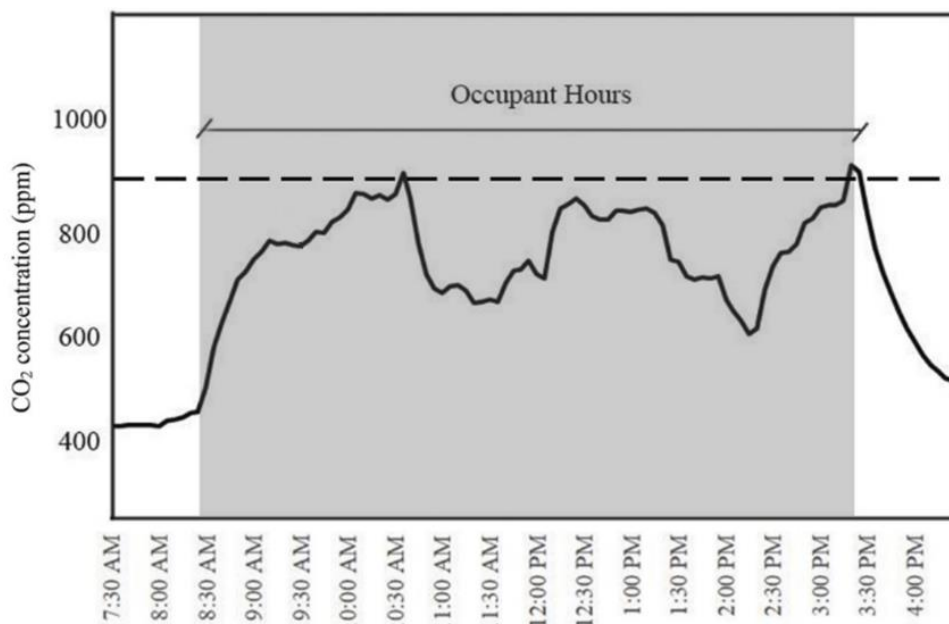
Somente a partir do gráfico de concentração de CO<sub>2</sub> é possível inferir o momento a se considerar para o início do decaimento, sem necessariamente realizar controle dos ocupantes, porém seria possível incorrer em erros caso após uma aula poucos ocupantes permaneçam no recinto.

Um problema inerente a esta técnica, é o fato de que após as aulas as esquadrias são sistematicamente fechadas, de forma que em muitos casos não se mediu a condição real de uso, e sim uma condição de infiltração. Além disso, verificou-se que é comum que leve algum tempo até todos os estudantes deixem o ambiente, o que pode acarretar problemas com as pressuposições envolvidas no cálculo, além de demandar registro da ocupação das salas em curtos intervalos de tempo. Por esses motivos a técnica do decaimento não foi aplicada para os ensaios com CO<sub>2</sub> metabólico.

Aventou-se, portanto aplicação de duas outras técnicas de análise de ensaios com gases traçadores, buscando períodos em que seja mais provável coletar dados representativos. Para a aplicação de ambas as técnicas, da injeção constante e concentração estacionária, controlar a ocupação das salas durante os experimentos não é apenas um cuidado adicional, mas sim uma necessidade, uma vez que esse dado será utilizado para estimar a taxa de geração de CO<sub>2</sub> pelos ocupantes, uma das variáveis de interesse. Foram utilizados dados de Persily e De Jonge (2017) para estimar essa taxa, correspondente a 0,00452 L/s de CO<sub>2</sub> por pessoa em uma sala universitária, com média de idade entre 16 e 20 anos, geração ajustada para a temperatura média do município de Londrina, 21 °C.

Quando se faz analogia ao método de injeção constante mede-se a taxa de ventilação referente ao período imediatamente após a ocupação do recinto, porém durante a campanha experimental observou-se que foi comum os alunos chegarem gradativamente, com atrasos, principalmente durante os minutos iniciais de aula, período crítico para aplicação do método. Além disso, verificou-se que alguns docentes sistematicamente fecham a porta durante ou esse período de incremento da concentração do traçador, logo após o início da aula. Como pretende-se investigar a taxa nas configurações de abertura de fato adotadas pelos usuários durante as aulas, não se julgou este período inicial das aulas como o mais adequado para coletar dados, visando manter condições experimentais homogêneas e controladas.

Com base nessas considerações, optou-se por analisar os dados utilizando a técnica da concentração estacionária. Nesse método, a taxa de ventilação é medida durante o período em que a concentração de CO<sub>2</sub> no ambiente atinge uma condição aproximadamente constante, ocorrendo tipicamente durante as aulas e, portanto, representando as condições reais de uso, como apresenta o **Gráfico 12**.

**Gráfico 12** – Período para aplicação da analogia à concentração estacionária

**Fonte:** Kabirikopaei e Lau (2020)

Estudos anteriores demonstraram a aplicabilidade e sucesso dessa técnica em investigações similares (TRAN et al., 2017). A concentração estacionária ( $C_{est}$ ), ou alvo, é definida como uma condição em que a taxa de geração de CO<sub>2</sub> pelos ocupantes é balanceada pela taxa de remoção do gás por meio da ventilação. Foi adotado o procedimento proposto por Kabirikopaei e Lau (2020) para determinar o valor de  $C_{est}$ , detalhado no item 3.5.2.

A norma ASTM E741 (2017) apresenta a equação 13 a seguir para estimar o fluxo de CO<sub>2</sub> ( $Q_{CO_2}$ , [m<sup>3</sup>/h]) necessário para que se atinja determinada concentração estacionária de CO<sub>2</sub> ( $C_{est}$ , [m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>], igual a ppm\*10<sup>6</sup>) em uma sala, a partir da taxa de ventilação aproximada ( $N_{est}$ , [h<sup>-1</sup>]) esperada em um ambiente de volume  $V$  [m<sup>3</sup>]. Trata-se do mesmo princípio posteriormente utilizado para calcular a taxa de ventilação.

$$Q_{CO_2} = (C_{est} - C_{bg}) * V * N_{est}. \quad (13)$$

Além da definição da concentração estacionária ( $C_{est}$ ), é fundamental determinar o valor da concentração de fundo ( $C_{bg}$ ), que foi calculada a partir das concentrações de fundo inicial e final, garantindo sempre que a média fosse obtida a partir de dois valores. Neste estudo, as concentrações de fundo foram medidas no corredor, tanto no início quanto no fim de cada dia de medição, de maneira análoga ao procedimento realizado nos ensaios com cilindro.

No entanto, os aparelhos não foram removidos do recinto entre aulas

consecutivas. Nos casos em que o intervalo entre aulas consecutivas permitiu que a concentração de CO<sub>2</sub> se estabilizasse novamente, essa concentração estável foi utilizada no cálculo da média da concentração de fundo, caso contrário foi adotada a concentração de fundo confiável mais próxima.

Apesar das limitações inerentes à técnica selecionada, acredita-se que a abordagem empregada neste estudo proporciona resultados robustos e representativos das condições reais de uso das salas de aula, auxiliando na compreensão da dinâmica de ventilação e da concentração de CO<sub>2</sub> nesses ambientes.

### 3.5 TRATAMENTO DOS DADOS

Como discutido na seção anterior, os procedimentos para obter o resultado da taxa de ventilação a partir dos dados coletados pelos ensaios com e sem cilindro são distintos. De início se apresenta o método mais tradicional e controlado, com uso de CO<sub>2</sub> em cilindros, na seção 3.5.1, na sequência descreve-se o procedimento de tratamento dos dados a partir do monitoramento da concentração de CO<sub>2</sub> durante as aulas, em 3.5.2. Em ambos os casos também se discute o procedimento de análise estatística adotado.

#### 3.5.1 Ensaios de Decaimento com Cilindro

A norma ISO 12569 apresenta duas formas de cálculo da taxa de ventilação a partir dos ensaios de decaimento de gases traçadores: o método de dois pontos e o método multipontos. O primeiro calcula a taxa de ventilação média do experimento com base nas concentrações inicial e final do decaimento, enquanto o segundo realiza uma regressão considerando diversos pontos da curva de decaimento. Ambas as taxas de ventilação são referentes ao mesmo intervalo, previamente ilustrado no **Gráfico 11**.

De acordo com as normas ISO 12569 (2017) e ASTM E741 (2017), para que se possa aplicar a estratégia de decaimento multipontos é necessário que a taxa de ventilação seja aproximadamente constante ao longo do período de decaimento. Essa condição foi verificada para cada ensaio plotando-se o logaritmo natural da concentração de CO<sub>2</sub> em função do tempo; a existência de relação linear indica que o pré-requisito foi atendido, caso contrário, recomenda-se a regressão

entre somente dois pontos.

Nota-se que ao se estudar cenários com ventilação natural, é esperado que haja flutuações na taxa de ventilação, o que em primeiro momento desencorajou a aplicação do método multipontos neste trabalho.

É preciso ter em mente, porém, que o intervalo de confiança dos resultados obtidos pelo método multipontos é mais estreito, justamente por considerar diversas amostras durante o decaimento. Como consequência o método multipontos retorna resultados mais precisos, ainda que enviesados, sendo frequentemente utilizado em estudos, mesmo em situações com ventilação natural (CUI et al., 2015). Sherman (1990) sugere que a redução da confiança estatística é a consequência da obtenção de um resultado não enviesado gerado pelo método de dois pontos.

Por esses motivos, este trabalho aplicou ambos os métodos para analisar os dados e comparou os resultados obtidos através do teste não paramétrico de Wilcoxon pareado, por meio da função “wilcox.test()” do pacote “stats”, com auxílio do software R. Neste contexto a normalidade na distribuição dos valores foi avaliada a partir do teste de Shapiro-Wilk, a partir da função “shapiro.test()”, e a homogeneidade das variâncias pelo teste de Levene, com a função “leveneTest()” do pacote “car”.

A equação 14 é apresentada pela norma ISO 12569 (2017) para determinar a taxa de ventilação, em número de trocas de ar por hora pelo método de dois pontos.

$$\bar{N} = \frac{1}{t_2 - t_1} * \ln \frac{C(t_1)}{C(t_2)} \quad (14)$$

, onde  $\bar{N}$  é a taxa de troca de ar [ $h^{-1}$ ],  $t_1$  é o instante inicial do decaimento [h],  $t_2$  é o instante final do decaimento, e  $C(t)$  representa a concentração de gás traçador no instante t [ppm].

É importante ressaltar que, durante o período inicial após a operação das esquadrias para a configuração desejada, o decaimento ainda não segue uma curva logarítmica, uma vez que a ventilação se encontra em um estado transiente, isto é, variando temporalmente desde a infiltração até atingir a taxa correspondente à configuração almejada. Por essa razão, o instante inicial do decaimento deve ser determinado a partir da análise do gráfico de  $C(t)$  de cada ensaio, excluindo-se os minutos iniciais desse período transiente

O instante inicial foi determinado a partir da apreciação do gráfico de

$C(t)$  de cada ensaio, evitando os minutos iniciais após a operação das esquadrias para a configuração desejada. Neste curto intervalo o decaimento ainda não segue uma curva logarítmica, uma vez que a ventilação se encontra em um estado transiente; ou seja, está variando no tempo, desde a infiltração até atingir a taxa de fato registrada pelo ensaio.

Antes de aplicar a equação, porém, foi preciso considerar que ela foi desenvolvida para outros gases traçadores, que não estão presentes em quantias significativas na atmosfera. Este não é o caso do  $\text{CO}_2$ , de forma ser necessário descontar a concentração de fundo (aqui denotado  $C_{bg}$ , do inglês background concentration). O valor de  $C_{bg}$  foi calculado a partir da média das concentrações de fundo inicial e final, medidas no corredor externo, nas imediações da sala de aula em que se registrou cada amostra. Destaca-se que esse procedimento foi realizado de forma individual para um dos três sensores utilizados para coletar dados durante os ensaios.

Sendo assim, a taxa de ventilação foi calculada para cada sensor a partir da equação 15.

$$\bar{N} = \frac{1}{t_2 - t_1} \ln \frac{\Delta C(t_1)}{\Delta C(t_2)} \quad (15)$$

, onde  $\Delta C(t_i)$  é igual a  $C(t_i) - C_{bg}$ . O instante inicial do decaimento foi determinado de forma individual para cada ensaio, evitando os primeiros minutos após o passo 8 do **Gráfico 11**, instantes em que o decaimento ainda não segue o comportamento logarítmico modelado pela equação 13.

O período de decaimento foi considerado finalizado quando se atingiu concentração média de 500 ppm no recinto. Esse critério não é determinado em norma. Apenas é necessário que a concentração mínima utilizada no cálculo esteja suficientemente acima da concentração de fundo, para evitar erros advindos da perda de precisão do sensor quando próximo ao limite inferior de sua faixa de operação (ASTM, 2017; ISO, 2017).

A variância do resultado obtido pela regressão entre dois pontos foi obtida com base na equação 16 a seguir, apresentada no anexo F da norma ISO 12569. Nota-se que foi necessário descontar a concentração de fundo, pois a equação como apresentada na supracitada norma é válida para traçadores que não estejam presentes na atmosfera em concentrações significativas.

$$s_N^2 = \frac{1}{(t_2 - t_1)} \left[ \frac{s_{\Delta C(t_1)}^2}{\Delta C(t_1)^2} + \frac{s_{\Delta C(t_2)}^2}{\Delta C(t_2)^2} \right] \quad (16)$$

, onde  $s_{\Delta C(t_i)}^2$  é a variância de  $\Delta C(t_i)$ , medido entre os sensores. E  $\Delta C(t_i)$  é a concentração média entre os sensores no instante  $i$ . A raiz desse valor foi adotada como o erro padrão da taxa de ventilação calculada pelo método 2 pontos de cada ensaio ( $\sigma_N$ ).

Enquanto isso, também substituindo o termo original  $C(t)$  por  $\Delta C(t)$ , o número de trocas de ar por hora obtido pelo método multipontos foi calculado conforme a equação 15 a seguir.

$$N = \frac{\left\{ \left( \sum_{j=1}^{n_p} t_j \right) \sum_{j=1}^{n_p} \ln[\Delta C(t_j)] \right\} - \left\{ n_p \sum_{j=1}^{n_p} t_j \ln[\Delta C(t_j)] \right\}}{\left( n_p \sum_{j=1}^{n_p} t_j^2 \right) - \left( \sum_{j=1}^{n_p} t_j \right)^2} \quad (17)$$

, onde  $N$  é o número de trocas de ar por hora [ $\text{h}^{-1}$ ],  $t_j$  é o período entre  $t_1$  (igual a zero) e o instante  $j$  [h], e  $n_p$  é o número total de amostras consideradas. Nota-se que para  $n_p$  igual a 2, a equação 17 se torna equivalente à 15.

A análise da incerteza da taxa de ventilação calculada pelo método multipontos foi realizada de acordo com o anexo A da norma ISO 12569 (2019), com auxílio de uma tabela de distribuição de  $t$  de Student. O erro padrão do coeficiente de regressão  $E_N$  [ $\text{h}^{-1}$ ] é calculado de acordo com a equação 18 a seguir.

$$E_N = \frac{s}{\sqrt{\sum_{i=1}^k (t_i - \bar{t})^2}} \quad (18)$$

, onde  $t_i$  [h] é o tempo medido para cada amostra,  $k$  é o número total de amostras,  $\bar{t}$  é a média dos tempos das amostras [h] e  $s$  é o erro da regressão ajustado para um grau de liberdade igual a  $k - 2$ , calculado pela equação 19.

$$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^k (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{k-2} \quad (19)$$

, onde  $Y_i$  é o valor medido e  $\hat{Y}_i$  é o valor estimado de  $\ln(C(t_i) - C_{bg})$ .

O intervalo  $F_N$  [ $\text{h}^{-1}$ ] com nível de confiança  $(1 - \alpha)$  da taxa de ventilação  $N$  foi obtido por meio da equação 20.

$$F_N = N \pm E_N * t(k - 2, 1 - \alpha) \quad (20)$$

, onde  $t(k - 2, 1 - \alpha)$  é o valor retornado por tabela da distribuição  $t$  de Student para nível de confiança  $(1 - \alpha)$  e  $k - 2$  graus de liberdade. Adotou-se significância de 5%.

A partir desses resultados, foram realizados testes estatísticos para

comparação das amostras divididas em diferentes grupos, com objetivo de avaliar se houve ou não diferença estatística na taxa de ventilação obtida entre configurações de abertura, sensores e salas de aula.

Para comparar as taxas entre as diferentes configurações de abertura, aplicou-se o teste não paramétrico de Kruskal-Wallis, a partir da função “kw\_result()”. A significância adotada foi de 5%. Em complemento, aplicou-se o teste de Dunn, para avaliar entre quais configurações específicas houve variação estatística. Ao se comparar todas as taxas de uma só vez, foi necessário aplicar testes não paramétricos, já que não se atendeu ao pressuposto de homogeneidade das variâncias, o que se avaliou a partir do teste de Bartlett. Procedimento similar foi adotado para avaliar diferenças entre salas de aula, considerando dados de todas as configurações agrupados.

Para comparar os resultados entre os sensores, aplicou-se o teste de Friedman, que pode ser aplicado a grupos pareados, como é o caso das taxas obtidas entre sensores, já que foram coletadas durante o mesmo ensaio, e, portanto, fazem referência à mesma amostra. Essa investigação se deu a partir da função “friedman.test”, também no Software R.

Outra abordagem adotada para realizar a comparação entre cenários foi dividir os experimentos por tipo de ventilação, para obter grupos mais homogêneos. Ou seja, comparou-se separadamente as configurações VC1-VC2 e VU1-VU2, identificando variações entre elas, e entre salas de aula nessas configurações.

Neste caso, os pressupostos para aplicação de ANOVA e teste de Tukey foram atendidos, avaliados pelos testes de Durbin-Watson, Shapiro-Wilk dos erros e de Bartlett, todos realizados a partir das funções “DIC()” e “FAT2DIC()” do pacote “AgroR”, que convenientemente fornece gráficos de barras com erros de cada grupo. Estratégia similar foi adotada para comparar as taxas das salas de aula nos cenários de infiltração.

Além das comparações estatísticas, se considerou a precisão calculada para as taxas na análise das diferenças entre diferentes grupos, como salas, métodos de cálculo, configurações de abertura e sensores.

O teste de Kruskal-Wallis também foi aplicado para identificar se houve diferença significativa na intensidade do vento registrada pela estação meteorológica do IDR-PR ao longo do experimento das diferentes salas de aula. Para comparar se houve homogeneidade das condições em agrupamento por

configurações de abertura foi possível aplicar o teste paramétrico de Tukey.

### 3.5.2 Ensaio com CO<sub>2</sub> Metabólico

Os dados de concentração de CO<sub>2</sub> ao longo das aulas foram analisados de acordo com a técnica da concentração estacionária, descrita no item 3.4.2. O fluxo de ar para a concentração estacionária  $Q_{95}$  foi calculado de acordo com a equação 21 a seguir.

$$Q_{95} = \frac{10^6 * G}{C_{est} - C_{bg}} \quad (21)$$

, onde  $G$  é a taxa de geração de CO<sub>2</sub> [L/s],  $C_{est}$  é a concentração estacionária atingida na sala [ppm] e  $C_{bg}$  é a concentração de fundo média [ppm]. Conforme previamente discutido, adotou-se geração  $G_p$  de 0,00452 L/s por pessoa, valor adaptado de Persily e De Jonge (2017) para ocupantes entre 16 e 20 anos, 50% de cada gênero.

Portanto, para aplicar este método, foi necessário identificar qual a concentração estacionária atingida, e em qual instante isso ocorreu. Para isso, adotou-se o método proposto por Kabirikopaei e Lau (2020), que adotaram o 95º percentil das concentrações de CO<sub>2</sub> durante as horas ocupadas como a concentração estacionária. Por esse motivo se denotará a subtração entre  $C_{est}$  e  $C_{bg}$  como  $\Delta C_{95}$ . Denota-se  $t_{95}$  como o primeiro instante em que essa concentração é atingida, definido para cada aula. O horário de início da ocupação é denotado como  $t_{ini}$ .

A abordagem, apesar de não normatizada, é robusta e facilmente reproduzível, além de estar de acordo com as recomendações de Persily (1997), que argumenta em prol de se calcular a taxa de ventilação com base nas concentrações de pico, e não a partir da concentração média do período ocupado.

O fluxo de ar calculado na equação 21 foi convertido para o número de trocas de ar por hora ( $N_{95}$ ) a partir da equação 22, considerando estimativa do volume do recinto  $V$  igual a 227,4 m<sup>3</sup>, conforme a **Tabela 2**. Esse valor foi a partir da multiplicação das dimensões internas. Ressalta-se que aplicar este valor de volume pode induzir pequeno erro nos resultados, já que não é desconsiderado o volume ocupado pelo mobiliário, o que pode subestimar a taxa obtida em valores da ordem de 5%.

$$N_{95} = Q_{95}/V \quad (22)$$

Os resultados foram calculados individualmente para cada sensor, e depois tomou-se a média aritmética para determinar a taxa de ventilação do recinto durante cada ensaio.

Algumas verificações foram aplicadas para atestar a validade e precisão do método de medição adotado. De início se verificou o atendimento à uniformidade da concentração em  $\pm 10\%$  entre os sensores no instante ( $t_{95}$ ) em que se atingiu a concentração estacionária ( $C_{est}$ ). Essa avaliação é feita a partir da divisão da concentração  $\Delta C_{95}$  registrada em cada sensor pela média dos outros três.

Persily (1997) ainda chama atenção para a necessidade de que tenha se passado período mínimo equivalente a três trocas de ar entre o início do período de ocupação e o instante em que se atinge esse pico do CO<sub>2</sub>. Ou seja, em situação hipotética em que se medisse taxa de ventilação igual a  $3 \text{ h}^{-1}$ , esse resultado somente seria válido caso houvesse passado no mínimo uma hora do início da ocupação. Isso equivale a dizer que se verificou a veracidade da equação 23.

$$t_{95} - t_{ini} > 3/N_{95} \quad (23)$$

, onde  $t_{95}$  [h] é o instante em que primeiro se atinge  $\Delta C_{95}$  e  $t_{ini}$  [h] é o início do período de ocupação constante.

Essa limitação busca garantir que tenha de fato se atingido uma concentração próxima à do equilíbrio para aquela taxa, e é similar ao critério estabelecido pela ASTM E741 (2017) para o método de injeção constante.

Por fim se avaliou a precisão do fluxo de ar calculado, de acordo com a equação 24 proposta por Persily (1997), com notações adaptadas.

$$\Delta Q = Q_{95} \sqrt{\left(\frac{\Delta G}{G}\right)^2 + \frac{2\Delta C^2}{(1,8 * \Delta C_{95})^2}} \quad (24)$$

, onde  $\Delta Q$  é a precisão do fluxo de ar [L/s];  $\Delta G$  é a precisão da taxa de geração de CO<sub>2</sub>, adotada como 0,000452 L/s por pessoa, equivalente a 10% do valor de  $G$  [L/s] que corresponde a variação de cerca de 0,1 MET no nível de atividade dos ocupantes;  $\Delta C$  é a precisão do sensor de CO<sub>2</sub> [ppm].

Neste estudo inicialmente adotou-se  $\Delta C$  como o valor fornecido pelo fabricante do aparelho, de 50 ppm + 5% da leitura, ou seja,  $50 \text{ ppm} + 0,05C_{95}$ . A adequação do uso desse valor foi um dos pontos discutidos.

O valor de  $\Delta Q$  obtido foi transformado para  $\Delta N_{95}$ , ou seja, a precisão estimada para a taxa de ventilação, em número de trocas de ar por horas, adotando procedimento análogo ao da equação 22. O valor de  $\Delta N_{95}/N_{95}$  foi considerado o erro

relativo das medições [%].

De forma análoga ao realizado com as taxas obtidas nos ensaios com cilindro, também se comparou resultados agrupados de acordo com as configurações de abertura registradas por meio do teste de Kruskal-Wallis. Para comparar os resultados obtidos entre diferentes sensores, adotou-se o teste não paramétrico pareado de Friedman.

### 3.6 COMPARAÇÃO COM MODELOS ANALÍTICOS

O fluxo de ar medido a partir dos ensaios com cilindro foi comparado com o fluxo calculado a partir de modelos analíticos simplificados. O modelo adotado para comparação foi o proposto por Lamberts, Dutra e Pereira (2013). Em cenários de ventilação cruzada, os autores propõe equação equivalente à 3, ainda que adotem notações distintas. Enquanto isso, em situações com ventilação unilateral, adotam a equação 4, originalmente proposta por Warren e Parkins (1985). No entanto, cabe destacar que o procedimento não considera a influência do efeito chaminé. Um dos pontos que se buscou avaliar é o impacto dessa limitação.

Ressalta-se que Lamberts, Dutra e Pereira (2013) não criaram as equações envolvidas, mas organizaram procedimento para análise a nível de projeto das condições gerais de ventilação dos ambientes internos, com base em equações amplamente utilizadas, com aplicabilidade e limitações discutidas diversos autores, desde o século passado (ETHERIDGE, 2015; FAN et al., 2021; HEISELBERG e SANDBERG, 2006; SHARPE et al., 2021; WALKER e WILSON, 1998).

Tanto nos cenários de ventilação cruzada quanto unilateral o passo inicial do procedimento de cálculo foi corrigir a velocidade do vento registrada na estação meteorológica para o edifício, de acordo com a rugosidade do terreno e com a altura da janela em relação ao solo.

Enquanto originalmente adota-se a direção predominante e intensidade média dos ventos para se realizar a previsão do fluxo de ar no recinto, para permitir uma comparação mais adequada às condições do tempo de cada experimento, adotou-se a intensidades média do vento durante cada ensaio como referência, valor registrado pela estação meteorológica do IDR-PR.

Essa correção se deu com base na equação 7. Se investigou resultados para três das condições de rugosidade da **Tabela 1**: campo com algumas

barreiras ( $k = 0,52$  e  $a = 0,2$ ), ambiente urbano ( $k = 0,35$  e  $a = 0,25$ ) e “centro da cidade” ( $k = 0,21$  e  $a = 0,33$ ), uma vez que a determinação desse critério qualitativa não é amplamente padronizada.

As esquadrias do edifício de estudo de caso são do tipo máximo-ar e basculantes, para as quais o procedimento de cálculo das áreas e não completamente padronizado. Por isso se investigou os resultados do modelo considerando dois modelos de cálculo das áreas, tanto seguindo à risca o procedimento de Lambert, Dutra e Pereira (2013), quanto a área quanto conforme o procedimento apresentado por ESFA e Daniels (2018), similar ao proposto por Sharpe et. al (2021). Como as áreas calculadas foram consideradas parte da caracterização do edifício de estudo de caso, os resultados obtidos foram previamente apresentados na **Tabela 5**, situada na seção 3.1.

Chama-se atenção para o fato de, nos cenários de ventilação unilateral, ser utilizada para o cálculo a área livre ( $A_f$ ), e nos cenários de ventilação cruzada, a área efetiva para múltiplas aberturas em série ( $A_{effs}$ ).

Com esses valores definidos, foi possível calcular a taxa de ventilação unilateral. Lamberts, Dutra e Pereira (2013) sugerem aplicação da previamente abordada equação 4, proposta por Warren e Parkins (1985). Também se avaliou o resultado a partir do modelo de Swami e Chandra (1988), que adota a mesma equação, porém sugere coeficiente distinto, conforme abordado em 2.1.3. Nota-se que a equação não leva considera o coeficiente de descarga  $C_d$  da abertura.

Enquanto isso, para a ventilação cruzada foi necessário determinar o valor da variação entre os coeficientes de pressão das aberturas, que quantificam o principal mecanismo responsável pelo fluxo de ar devido à ação dos ventos. Lamberts, Dutra e Pereira (2013) propuseram método bastante simplificado para o cálculo do valor de  $\Delta C_p$  a partir do ângulo de incidência do vento nas aberturas de entrada do ar, conforme a **Tabela 6** a seguir.

**Tabela 6** – Procedimento de cálculo de  $\Delta C_p$  em campo aberto

Ângulo de incidência ( $\theta$ )	Diferença entre os coeficientes de pressão do vento ( $\Delta C_p$ )
$0 \leq \theta \leq 30^\circ$	1,2
$30^\circ < \theta \leq 90^\circ$	$0,1 + 0,0183*(90-\theta)$

**Fonte:** o próprio autor (2023), adaptado de Lamberts, Pereira e Dutra (2013)

No caso do edifício em questão, ventos Norte e Sul foram considerados como tendo incidência de  $0^\circ$ , e ventos Leste e Oeste como  $90^\circ$ , já que

as janelas das salas de aula estão orientadas a 3° da direção Norte-Sul. A esse valor aplicou-se correção de acordo com as obstruções da vizinhança. O modelo considera duas possíveis situações qualitativas de obstrução, apresentado nos seguintes termos: caso haja edificações vizinhas a aproximadamente “duas casas” de distância, reduz-se  $\Delta C_p$  em 40%, e caso haja edificações mais próximas, a “uma casa” de distância, reduz-se  $\Delta C_p$  em 70%. Como nenhuma dessas situações representa com fidelidade o edifício de estudo de caso, as todas elas foram avaliadas.

A partir desses parâmetros, nos cenários de ventilação cruzada calculou-se o fluxo de ar a partir da equação 3. Em ambos os cenários a taxa foi calculada a partir da divisão do fluxo pelo volume do ambiente, adotadas as correções de unidade.

### 3.7 CRITÉRIOS PARA AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DO AR

Não existe critério universal para avaliar a qualidade do ar a partir de suas taxas de ventilação, por isso, este estudo comparou-se as taxas medidas, tanto nos ensaios com cilindro, quanto durante o uso real das salas com quatro critérios.

De início comparou-se a taxa de ventilação, em número de trocas de ar por hora [ $h^{-1}$ ], com a classificação proposta por Allen et al. (2020): qualidade do ar “ruim”, quando a taxa é inferior a 3  $h^{-1}$ ; “mínima” quando entre 3 e 4  $h^{-1}$ ; “boa” entre 4 e 5  $h^{-1}$ ; “excelente” entre 5 e 6  $h^{-1}$  e “ideal” acima de 6  $h^{-1}$ .

Em seguida se calculou o fluxo de ar por pessoa a partir das taxas medidas, para cada configuração de abertura dos ensaios, tanto com cilindro, quanto durante o uso real dos ambientes. Para avaliar o fluxo de ar por pessoa a partir dos ensaios com cilindro – que ocorreram sem ocupantes no recinto – adotou-se as ocupações máxima e reduzida considerando distanciamento de 2 metros entre ocupantes. Buscou-se avaliar o impacto desse critério para restrição do número de alunos, recomendado pela secretaria de saúde do governo do Paraná (2020) por meio da resolução SESA N°632/2020 durante a pandemia de COVID-19.

Comparou-se esses valores com três referências: faixas de qualidade do ar propostas pela norma EN 13779 (2007), apresentadas na sequência; critério recomendação pela OMS no contexto da pandemia de COVID-19, quando sugeriu fluxo de ar mínimo de 10 L/s por pessoa em salas de aula; e com recomendação de 7,5 L/s por pessoa proposta pela ANVISA para ambientes climatizados, único critério

nacional encontrado.

A norma EN 13779 (2007) propõe faixas para quatro categorias de qualidade do ar, de IDA-1 “alta qualidade”, passando por IDA-2 “adequada”, IDA-3 “moderada” a IDA-4, qualidade do ar interno “baixa”. As faixas, em litros por segundo por pessoa, são, respectivamente: maior que 15, entre 10 e 15, entre 6,1 e 10 e abaixo de 6,1. Ainda que a norma não faça diferenciação entre valores abaixo de 6,1 L/s por pessoa, se adotou o valor de 4 L/s por pessoa como limite inferior da classificação “baixa”, adicionando-se a faixa em que se considera simplesmente como QAI “inadequada”, com base em recomendações da norma mais recente EN 16798-1 (2019).

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Esta seção está organizada em quatro partes. De início, em 4.1, apresentam-se os resultados obtidos a partir dos 72 ensaios de decaimento com cilindro, com discussões acerca da influência de parâmetros como método de cálculo, posição dos sensores, condições do tempo e áreas de abertura.

Em 4.2 encontram-se os resultados obtidos a partir do monitoramento da concentração de CO<sub>2</sub> durante 21 aulas, na condição real de uso de uma das salas.

Prossegue-se, no item 4.3, com interpretação do significado das taxas de renovação de ar medidas em relação à qualidade do ar das salas de aula, tomando por referência diferentes critérios de ventilação, já que não há consenso na literatura.

Por fim, compara-se em 4.4 o fluxo de ar registrado durante os ensaios com previsões de modelos analíticos simplificados. Busca-se compreender em que situações é adequado utilizar esses modelos, de acordo com os objetivos de uso do valor e características do ambiente.

### 4.1 ENSAIOS DE DECAIMENTO COM CILINDRO

Apresentam-se neste item os resultados e as discussões pautadas nos ensaios de decaimento com cilindro, organizados em oito partes.

Em 4.1.1 oferece-se visão geral dos ensaios. Discutem-se as condições em que os ensaios foram realizados e elencam-se gráficos da concentração de CO<sub>2</sub> ao longo do tempo nas diferentes configurações de abertura estudadas.

Na sequência, em 4.1.2 se discute a aplicabilidade do método de decaimento multipontos em recintos com ventilação natural e grandes áreas de abertura.

Os itens 4.1.3 a 4.1.5 contém os resultados propriamente ditos de taxa de ventilação. Investigam-se os resultados entre diferentes configurações de abertura, salas de aula, entre grupos combinando os fatores sala e configuração.

Em seguida, no item 4.1.6 avalia-se a influência da posição dos sensores nos resultados, e se discute a necessidade do uso de vários sensores durante ensaios com gases traçadores de acordo com seu objetivo.

Por fim, nos itens 4.1.7 e 4.1.8 discute-se, respectivamente, as

influências das condições do tempo nas taxas registradas, e das áreas de abertura.

#### 4.1.1 Visão Geral dos Ensaios

Os ensaios de decaimento com cilindro ocorreram entre julho de 2022 e janeiro de 2023, em 5 configurações de abertura (VC1, VC2, VU1, VU2 e INF) para cada uma das 4 salas selecionadas, num total de 72 ensaios. As concentrações de fundo médias de CO<sub>2</sub> variaram entre 407 ppm e 468 ppm, entretanto, os sensores utilizados possuem o sistema de calibração pela curva ABC, isso implica que, após um período específico, o menor valor registrado será considerado como 400 ppm.

O que significa que os valores registrados não trazem grandes informações sobre a real concentração de fundo do ambiente, mas permitem avaliar o parâmetro crítico para a aplicação dos métodos de gases traçadores, a diferença entre concentrações internas e externas.

Isso não se constituiu em empecilho para a realização dos ensaios, uma vez que os aparelhos registraram frequentemente as concentrações externas, dando oportunidade para que acontecessem calibrações automáticas no decorrer da campanha experimental. Em aplicações específicas, como em estufas, ou outros espaços onde nunca são alcançadas concentrações de fundo, esse mecanismo de calibração deve ser desativado.

O **Apêndice C** exibe gráficos de concentração de CO<sub>2</sub> ao longo do tempo para cada amostra, organizados conforme a configuração de abertura e a sala de aula. Também consta no **Apêndice C**, em forma de rosa dos ventos, registro da velocidade [m/s] e direção médias do vento a cada 15 minutos, durante o decaimento de cada ensaio, registradas em estação meteorológica a 5 km do edifício, a altura padrão de 10 metros. Os mesmos dados referentes as condições do tempo são apresentados no **Apêndice D**, agrupados por configuração de abertura, para pautar discussão acerca da influência da direção do vento nos ensaios. Pretende-se deixar registro detalhado de todos os dados coletados ao longo dos experimentos.

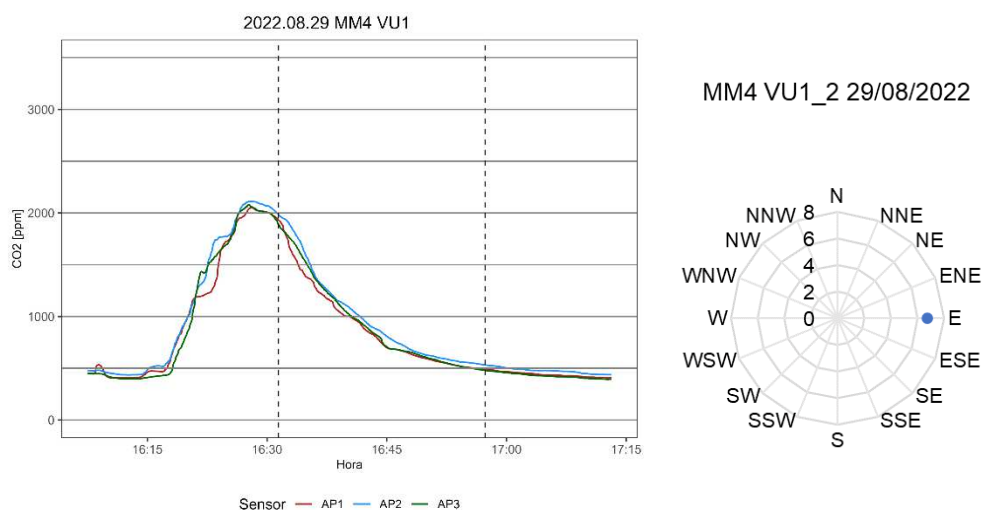
Ao longo dos 72 ensaios o cilindro utilizado foi recarregado 12 vezes, o que corresponde a consumo total aproximado de 48 kg de CO<sub>2</sub>. Segundo estimativas médias, a queima de 1 litro de gasolina gera cerca de 2,3 kg de CO<sub>2</sub> (EPA, 2018). Portanto, os 48 kg do gás emitidos durante o estudo equivalem à combustão de

aproximadamente 20 litros de gasolina. Além disso, ao avaliar o impacto ambiental do estudo, é importante ressaltar que o objetivo da pesquisa é investigar a ventilação natural, uma prática sustentável que pode contribuir para a redução do consumo de energia e emissões de gases de efeito estufa em edificações.

Os **Gráfico 13** e **14** ilustram duas amostras obtidas na sala MM4 com a configuração de ventilação VU1. As linhas pontilhadas verticais indicam os tempos inicial e final do decaimento. Os ensaios apresentados foram escolhidos de forma arbitrária, por representarem duas situações distintas, uma em que o decaimento é constante e uniforme entre os sensores, e outra em que há significativas oscilações e perda da uniformidade

O **Gráfico 13** mostra uma amostra com taxa de ventilação aproximadamente constante, evidenciada pelas curvas de concentração bem ajustadas ao decaimento exponencial e pouca variação entre os registros dos três sensores durante o período de decaimento. A rosa dos ventos indica que no período entre as linhas pontilhadas a intensidade média registrada foi de aproximadamente 6,7 m/s, vindo de Leste.

**Gráfico 13** – Concentração de CO<sub>2</sub>, velocidade e direção do vento, dia 29/08/2022

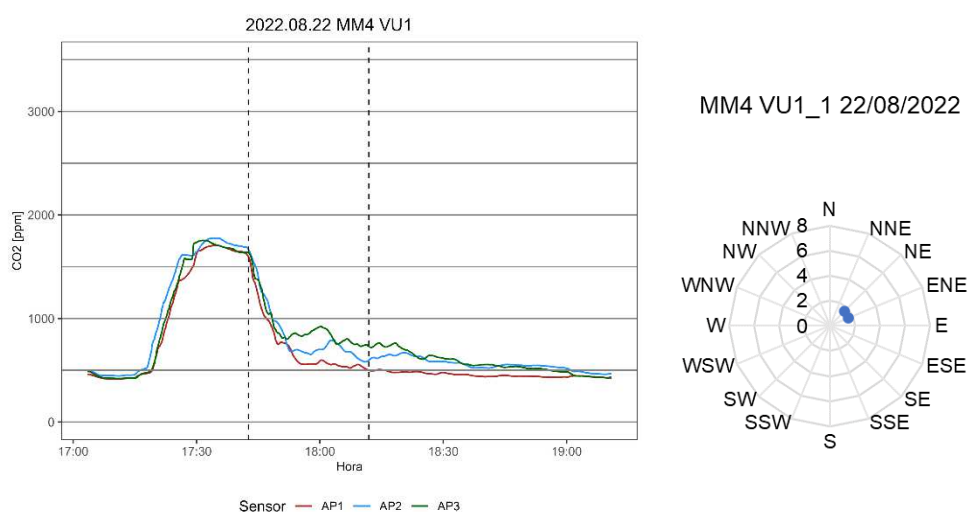


**Fonte:** o próprio autor (2023).

Enquanto isso, o **Gráfico 14** ilustra amostra em que houve diferenças significativas entre as concentrações registradas pelos três sensores, o que indica que a renovação de ar não foi uniforme no recinto. As oscilações nas curvas de cada sensor entre as linhas pontilhadas também indicam que a ventilação não foi constante nesta amostra, o que envia a taxa calculada a partir do método multipontos, descrito pela equação 17. Durante este ensaio, a intensidade média do vento foi de 1,6 m/s,

vindo de Nordeste.

**Gráfico 14** – Concentração de CO<sub>2</sub>, velocidade e direção do vento, dia 22/08/2022



**Fonte:** o próprio autor (2023).

Outra possível fonte de oscilações nos registros de concentração é o ingresso de ar contaminado com CO<sub>2</sub> de salas vizinhas ocupadas, ou do corredor. Os métodos baseados em gases traçadores são especialmente adequados aos ambientes de zona única, ou seja, aqueles que trocam ar somente com o exterior.

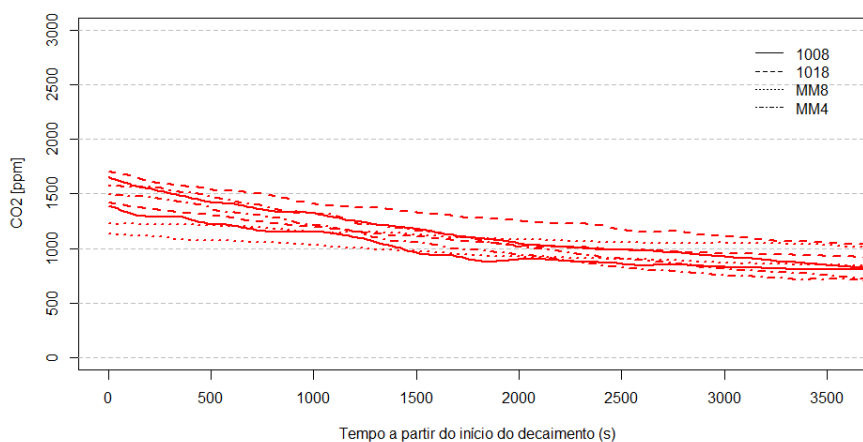
Apesar do edifício em questão ser constituído de múltiplas zonas, cada sala de aula possui aberturas voltadas somente para a fachada externa do edifício, e para um corredor aberto, sem caminhos de infiltração evidentes entre salas por dentro da edificação.

Entretanto, principalmente em situações como a representada pelo **Gráfico 14**, em que com baixa velocidade do vento, é possível que alguma contaminação, através das janelas ou frestas tenha enviesado os resultados obtidos. Sem registros mais detalhados acerca das oscilações de velocidade e direção do vento não foi possível atribuir de forma definitiva a fonte dos ruídos presentes em algumas das amostras.

É possível, porém, ao apreciar a evolução da concentração de CO<sub>2</sub> em diferentes configurações de abertura, verificar padrões distintos no decaimento e ruído. Para viabilizar essa avaliação, serão apresentados gráficos das concentrações de CO<sub>2</sub> registradas ao longo intervalo de medição divididos por configuração de abertura. O **Gráfico 15** a seguir apresenta a concentração média entre os sensores de cada ensaio ( $C(t)_{\text{médio}}$ ) somente para os cenários de infiltração. Destaca-se que  $t_1$  é igual a zero e corresponde ao início do decaimento. Os diferentes estilos de linha

representam cada sala, conforme a legenda.

**Gráfico 15** –  $C(t)_{\text{médio}}$  dos ensaios de infiltração

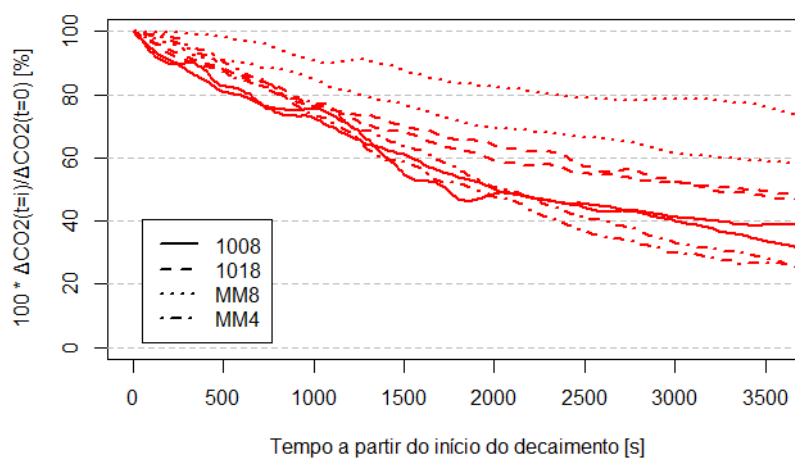


Fonte: o próprio autor (2023).

Como não se atingiu exatamente a mesma concentração inicial em cada amostra e por ter havido variações nas concentrações de fundo entre amostras, é interessante fazer uma transformação no eixo vertical do gráfico, para permitir comparações entre diferentes ensaios de forma mais clara.

Primeiro subtrai-se de cada ponto da curva a concentração de fundo média de cada ensaio, para se obter os valores de  $\Delta C(t)$ . Em seguida, a diferença entre concentração inicial e concentração de fundo  $\Delta C(t_1)$  tem seu valor definido como 100%, e cada registro  $\Delta C(t)$  é apresentado como fração do valor inicial. Essa transformação permite comparar o decaimento de diferentes amostras de forma facilitada, conforme ilustrado no **Gráfico 16**, ainda para cenários de infiltração (INF).

**Gráfico 16** –  $\Delta C(t)/\Delta C(t_1)$  durante o decaimento, INF



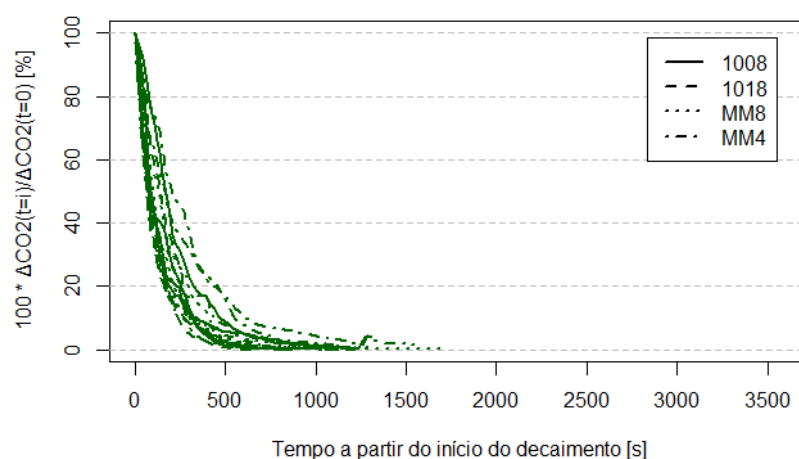
Fonte: o próprio autor (2023).

A partir desse tipo de plotagem, é possível verificar diferenças entre os padrões de decaimento de acordo com a posição das linhas umas em relação às

outras. Os cenários de infiltração (INF) permitem avaliar a estanqueidade do ambiente, e são aqueles que levam mais tempo, e apresentam as taxas mais baixas de ventilação. Nesta escala horizontal, mantida para facilitar comparação visual simples com gráficos subsequentes de outras configurações de abertura, não é possível identificar o fim do decaimento, que se estenderam por várias horas.

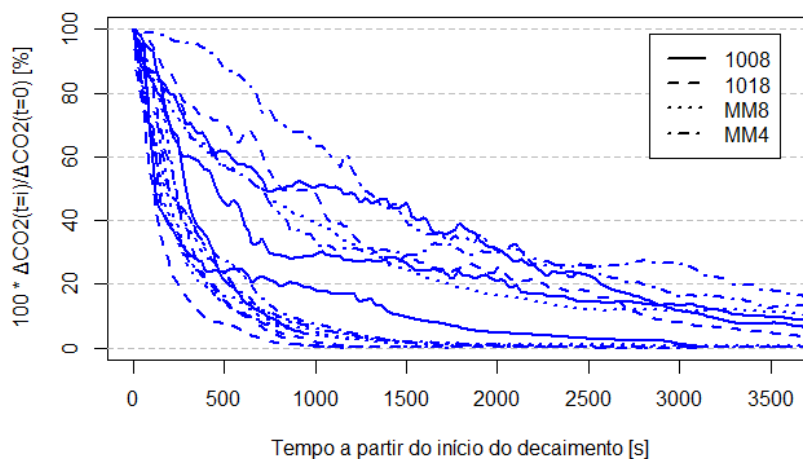
Mesmo antes de calcular a taxa de ventilação para cada ensaio, o **Gráfico 16** revela que a sala MM8 registrou as menores taxas de infiltração, já que são as linhas cujo decaimento se mostra mais lento. O procedimento foi repetido para todos os cenários de ventilação. Os **Gráfico 17** e **Gráfico 18** a seguir apresentam os ensaios realizados nos cenários de ventilação cruzada 1 e 2 respectivamente (VC1 e VC2), ou seja, com todas as esquadrias abertas, e somente com esquadrias basculantes abertas, respectivamente.

**Gráfico 17** –  $\Delta C(t)/\Delta C(t_1)$  durante o decaimento, VC1



Fonte: o próprio autor (2023).

**Gráfico 18** –  $\Delta C(t)/\Delta C(t_1)$  durante o decaimento, VC2



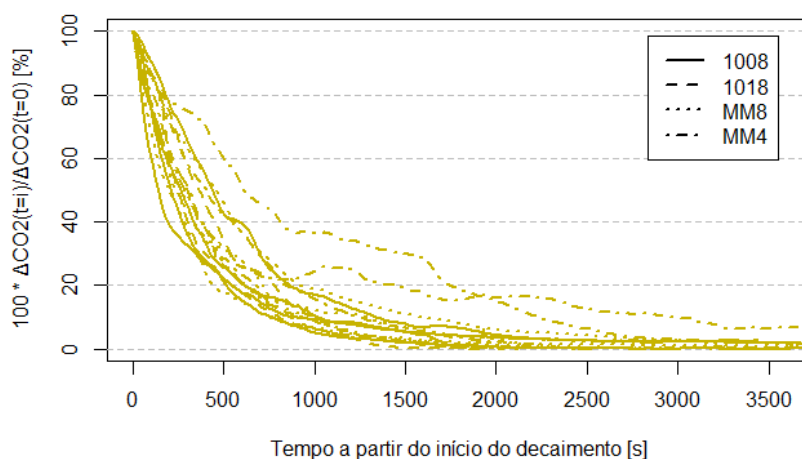
Fonte: o próprio autor (2023).

Como esperado, o decaimento é mais abrupto no cenário com maior

área de abertura, VC1, o que indica maiores taxas de ventilação. Também se observa maior variação entre os períodos de decaimento nos ensaios no cenário VC2, o que aponta para maior coeficiente de variação entre amostras. Neste cenário também observam-se os maiores ruídos nas séries de dados.

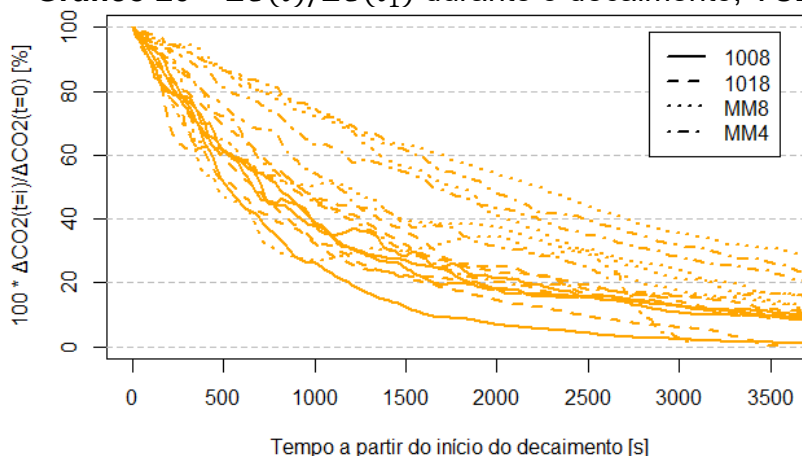
De forma análoga, os **Gráfico 19** e **Gráfico 20** apresentam os ensaios dos cenários de ventilação unilateral 1 e 2 (VU1 e VU2).

**Gráfico 19** –  $\Delta C(t)/\Delta C(t_1)$  durante o decaimento, VU1



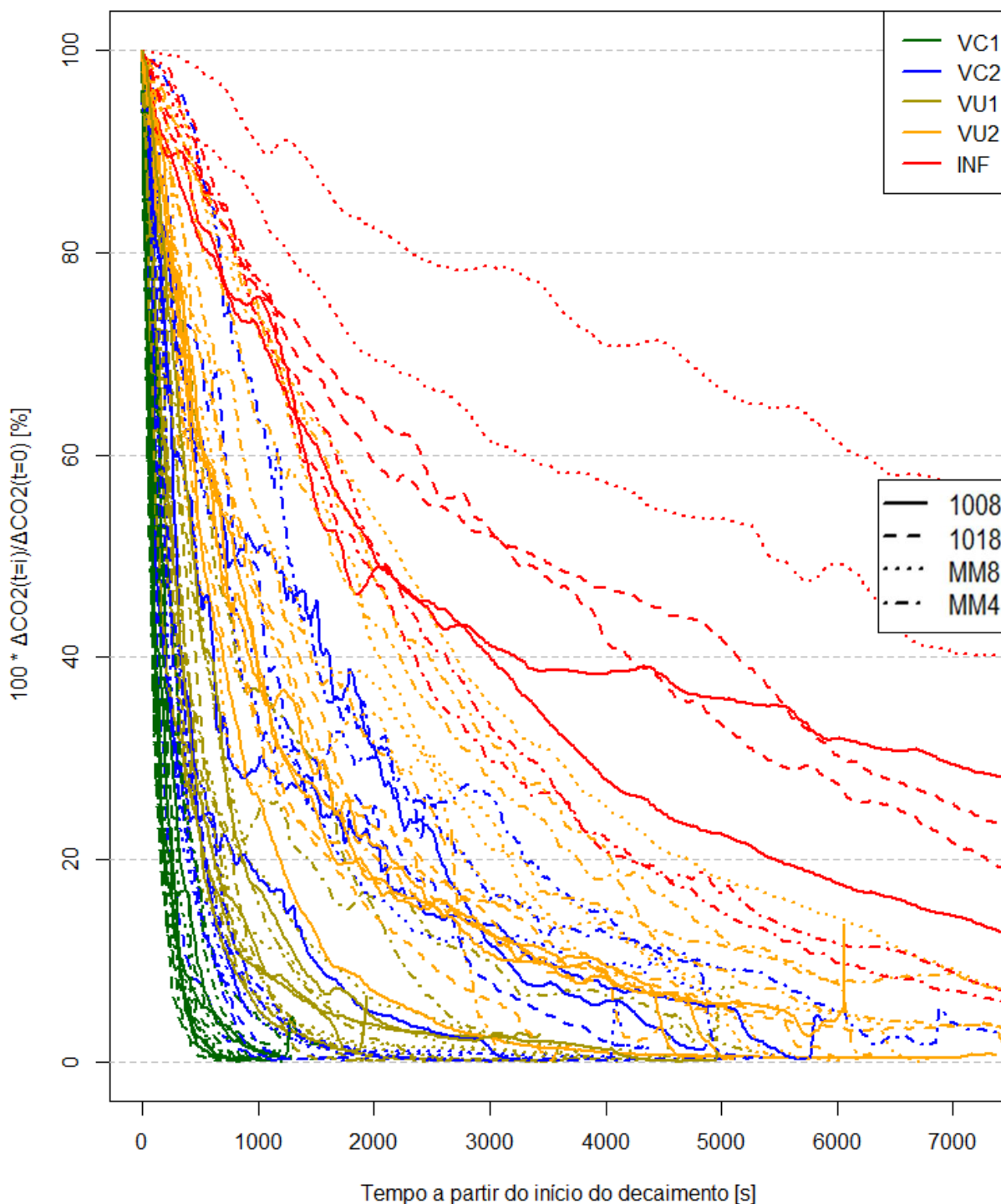
**Fonte:** o próprio autor (2023).

**Gráfico 20** –  $\Delta C(t)/\Delta C(t_1)$  durante o decaimento, VU2



**Fonte:** o próprio autor (2023).

Inicialmente, observa-se decaimento mais intenso nos cenários de configuração VU1 em relação a VU2, como esperado, por contarem com maior área de abertura. Visando proporcionar uma visão geral dos ensaios realizados com cilindro, dados referentes a todos as configurações de abertura encontram-se plotados no **Gráfico 21** a seguir. A diferença na duração dos experimentos, e consequentemente da taxa de ventilação calculada a partir deles é notável.

**Gráfico 21** – Visão geral dos ensaios de decaimento com cilindro

**Fonte:** o próprio autor (2023).

É evidente que nos cenários de VC1 o decaimento é mais intenso e uniforme. Também é possível notar que nos cenários com VU1, há menos oscilações da concentração quando em comparação aos cenários de VC2.

Com base nessas séries de dados, as taxas de ventilação para cada ensaio foram calculadas a partir das duas técnicas disponíveis para análise do

decaimento: o método de dois pontos, que calcula a taxa de ventilação a partir somente dos instantes inicial e final do decaimento; e a regressão entre múltiplos pontos, descritas respectivamente pelas equações 15 e 17.

#### 4.1.2 Comparação dos Métodos de Decaimento Dois Pontos e Multipontos

Antes de discutir os valores obtidos para cada configuração, investiga-se a concordância entre os dois métodos de análise dos dados de decaimento. Esse é um ponto que merece atenção para este estudo de caso, já que um dos pressupostos da aplicação da regressão entre múltiplos pontos é de que a taxa de ventilação é constante durante o decaimento.

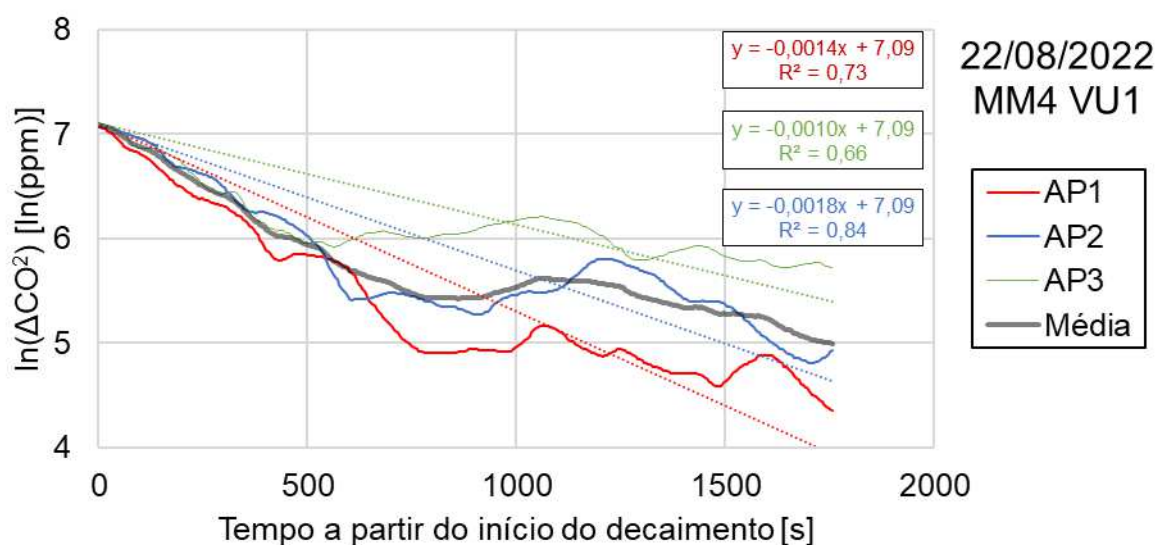
Tal pressuposto é mais facilmente atendido em recintos com ventilação mecânica, ou com pequenas porosidades, situações em que a taxa depende menos das variações do tempo, quando em comparação com recintos como os estudados, com grandes áreas de abertura. A adequação da análise a partir do método multipontos neste estudo foi questionada, pois como discutido em torno dos **Gráfico 14 a Gráfico 21**, em parte das amostras houve oscilações do decaimento em relação à curva suave que representa taxa constante.

A comparação da curva de  $\Delta C_{(t)}$  real em relação à curva do decaimento ideal permite avaliar se houve ou não variação da taxa ao longo do ensaio, porém a comparação é mais intuitiva ao se transformar o eixo vertical para escala logarítmica, pois neste caso o decaimento ideal é representado por uma linha reta, com coeficiente linear igual a  $\ln(\Delta C_{(t_1)})$ . Esse procedimento é discutido pela ASTM E741 (2017), como parte do que se chama de “método de regressão opcional”. A norma recomenda descartar os resultados caso não se verifique bom ajuste, porém não apresenta um valor de  $R^2$  que deva ser tomado como critério de descarte. Nessas situações considera-se mais adequado considerar a taxa calculada a partir do método dois pontos.

O **Gráfico 22** apresenta essa análise a título de exemplificação para a mesma amostra previamente discutida no **Gráfico 14**, um dos três ensaios em que houve grandes variações da taxa de ventilação durante o decaimento. Os valores de  $R^2$  dos ajustes lineares podem ser utilizados para avaliar o grau de aderência entre o decaimento real e o ideal, permitindo quantificar a variação da taxa de ventilação ao longo do tempo, mesmo que não haja uma interpretação física explícita para esses

valores.

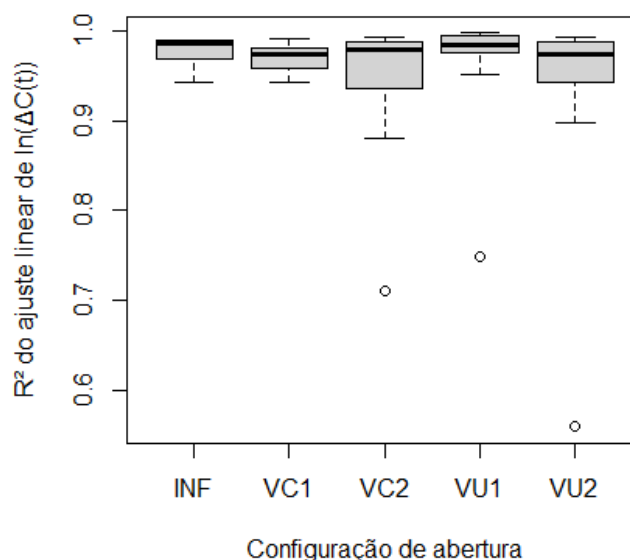
**Gráfico 22** – Exemplo de amostra com taxa variada ao longo do decaimento



**Fonte:** o próprio autor (2023).

O **Gráfico 23** a seguir apresenta box-plot do valor médio de  $R^2$  de cada ensaio, calculado a partir do valor médio entre os sensores, agrupados por configuração de ventilação.

**Gráfico 23** – Box-plot de  $R^2$  da regressão linear de  $\ln(\Delta C(t))$  por configuração



**Fonte:** o próprio autor (2023).

O valor de  $R^2$  médio entre todos os ensaios foi de ensaios de 0,959. Isso indica não houve grandes variações da taxa de ventilação durante o período de decaimento para a maioria das amostras. Foram, porém, registrados três ensaios com  $R^2$  considerados outliers. O **Gráfico 22** foi construído a partir de um desses três

ensaios discrepantes, que foram realizados nos dias 22 e 28 de agosto e 06 de dezembro, respectivamente nos cenários VU1, VC2 e VU2, com data aqui mencionada para permitir ao leitor identificar os ensaios em questão no **Apêndice C**.

Nessas três amostras a taxa calculada partir do método multipontos (equação 17) foi subestimada quando em comparação com o resultado do método dois pontos (equação 15). Para o outlier de VU1, mediu-se taxa de  $4,3 \text{ h}^{-1}$  a partir de dois pontos, e  $3,5 \text{ h}^{-1}$  por multipontos, cerca de 20% menor. Na outlier de VC2, mediu-se respectivamente taxas de  $1,8 \text{ h}^{-1}$  e  $1,2 \text{ h}^{-1}$ , 32% de diferença. Na amostra com pior  $R^2$ , 0,55, a variação chegou a 40%, com taxas calculadas de  $2,3 \text{ h}^{-1}$  pelo método dois pontos e  $1,4 \text{ h}^{-1}$  pelo método multiponto.

A **Tabela 7** exhibe parte das estatísticas descritivas utilizadas na construção das caixas-estreitas de  $R^2$  por configuração de abertura.

**Tabela 7** – Estatísticas descritivas de  $R^2$  da regressão multipontos

Estatística	INF	VC1	VC2	VU1	VU2
Média	0,977	0,971	0,947	0,967	0,941
Desv. pad.	0,018	0,015	0,072	0,060	0,106
Máximo	0,989	0,991	0,993	0,997	0,993
Mínimo	0,942	0,943	0,709	0,748	0,559
Mediana	0,985	0,974	0,978	0,982	0,974

Fonte: o próprio autor (2023).

Dentre as configurações de ventilação, VU2 e VC2 apresentaram os menores valores médios de  $R^2$ , de 0,941 e 0,947 respectivamente, sugerindo que houve maiores oscilações nesses cenários. A princípio esses valores relativamente altos são indicativo a favor da aplicabilidade do método multipontos, mesmo para ambientes com ventilação natural e grandes áreas de abertura, porém não existe um valor universalmente aceito para determinar a validade do método com base nessa estatística.

Para investigar com maior profundidade se há ou não diferença significativa entre os resultados dos dois métodos, foi aplicado o teste não paramétrico de Wilcoxon pareado. É importante destacar a relevância da aplicação de um teste pareado, pois há dependência natural entre os resultados obtidos pelos dois métodos, uma vez que se baseiam nos mesmos dados.

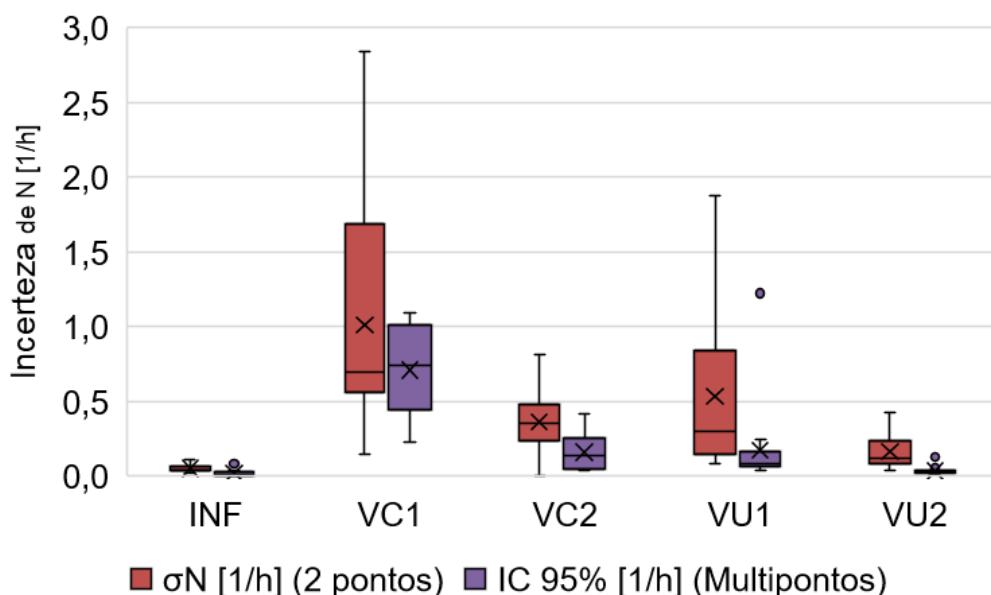
Os resultados obtidos de cada método são dependentes e não apresentam distribuição normal, conforme revelado pelo p-valor do teste de Shapiro-Wilk aplicado a ambos, da ordem de  $10^{-7}$  nos dois casos, invalidando a comparação

entre os grupos com base em simples análise de variâncias (ANOVA).

O teste de Wilcoxon pareado retornou p-valor de 0,0896, superior à significância de 5%, e, portanto, não se rejeita a hipótese nula, o que indica não haver evidência suficiente para se afirmar que existe diferença estatística entre as taxas calculadas pelo método 2 pontos e da regressão multipontos. Esse resultado reforça a adequação do método multipontos, mesmo para avaliar ambientes com ventilação natural, entretanto, é preciso atentar para eventuais outliers, ou ensaios em que houver variações abruptas das condições externas. Entretanto, antes de se formular conclusões, prosseguiu-se com cálculo da incerteza das taxas de ventilação obtidas a partir de cada método, com base nos procedimentos apresentados no item 3.5.1.

O **Gráfico 24** a seguir ilustra a incerteza calculada para ambas os métodos adotados em cada configuração de ventilação estudada. A incerteza do método 2 pontos foi avaliada com base na raiz quadrada do resultado da equação 16, ou seja, o erro padrão da taxa calculada, conforme . Enquanto isso, o método multipontos teve a precisão calculada a partir das equações 18 a 20. Plotou-se o termo  $E_N * t(k - 2, 1 - \alpha)$ , que representa o intervalo em torno da taxa medida com 95% de probabilidade de conter a taxa real, denotado IC 95% [ $h^{-1}$ ].

**Gráfico 24** – Incerteza calculada para os métodos 2 pontos e multipontos



**Fonte:** o próprio autor (2023).

A tendência de o método multipontos apresentar menor incerteza em relação ao método dois pontos foi confirmada para todos os cenários estudados. É possível notar dois outliers no intervalo de confiança calculado para a taxa do método

multipontos nos cenários VU1 e VU2, justamente referentes a ensaios em que a taxa foi variada ao longo do decaimento. Mesmo nesses casos, a incerteza calculada a partir das equações 18 a 20 foi inferior à obtida para o método 2 pontos.

Ainda assim, a incerteza calculada para ambos os métodos foi bastante baixa, inferior a precisão proposta pela norma ASTM E741 para ensaios de gases traçadores de forma geral como igual a 10% caso se atendam aos critérios de uniformidade da concentração. A **Tabela 8** apresenta para cada cenário, a taxa medida, a incerteza, e o erro relativo (razão da taxa pela incerteza) para ambos os métodos. As taxas serão discutidas no item 4.1.3, e são por hora apresentadas para pautar a avaliação da incerteza.

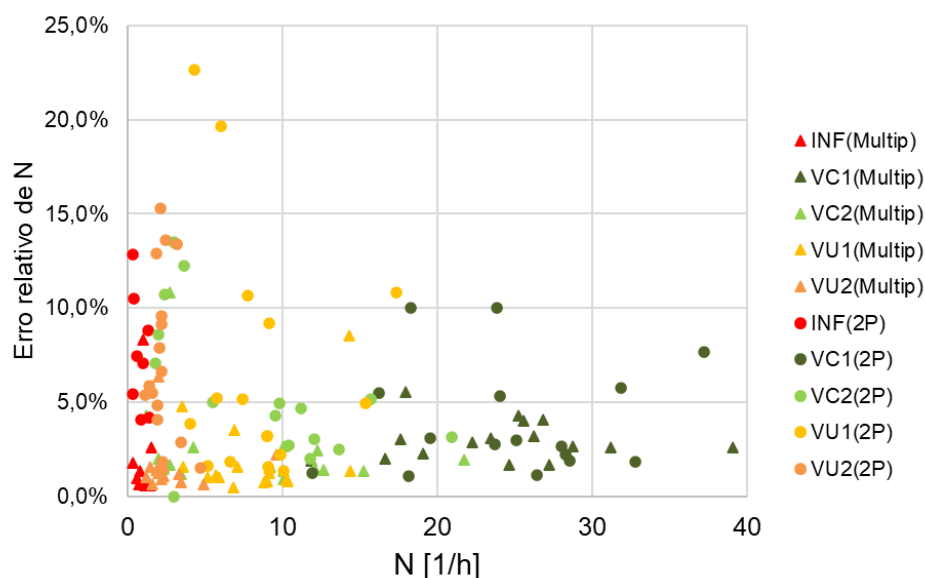
**Tabela 8** – Incerteza calculada para os métodos 2 pontos e multipontos

Configuração de abertura	Dois pontos			Multipontos		
	N médio [1/h]	$\sigma N$ médio [1/h]	$\sigma N/N$ médio	N médio [1/h]	IC95% médio [1/h]	IC95%/N médio
VC1	24,6	1,01	4,1%	24,0	0,71	3,0%
VC2	8,5	0,36	4,8%	8,2	0,16	2,4%
VU1	8,5	0,54	6,4%	8,1	0,17	1,9%
VU2	2,3	0,16	7,5%	2,3	0,03	1,7%
INF	0,8	0,05	7,5%	0,9	0,02	2,1%
TODAS	9,8	0,47	5,9%	9,6	0,24	2,2%
DESVIO PADRÃO	9,6	0,56	4,6%	9,3	0,32	1,9%
MAIOR	37,2	2,84	22,7%	39,0	1,22	10,8%
MENOR	0,3	0,016	1,1%	0,3	0,005	0,5%

**Fonte:** o próprio autor (2023).

É importante ressaltar que o valor de  $\sigma N$  não se refere ao desvio padrão da taxa calculado entre as amostras, tendo sido calculado conforme a equação 16, entre as séries de  $\Delta C(t)$  de cada sensor. O erro relativo  $IC95\%/N$  médio entre configurações de abertura para o método multipontos foi inferior a 3% em todos os casos, com média geral entre ensaios de 2,2%, enquanto o erro relativo do método dois pontos  $\sigma N/N$  médio entre todos os ensaios foi de 5,9%.

O **Gráfico 25** apresenta a dispersão do erro relativo de cada método em função da taxa de ventilação  $N$  registrada, e permite identificar quais foram os ensaios em que se registraram os maiores erros. A taxa do método multipontos é representada por triângulos, e do método dois pontos por círculos. Cada cor identifica diferentes configurações de abertura.

**Gráfico 25** – Incerteza calculada para os métodos 2 pontos e multipontos

**Fonte:** o próprio autor (2023).

Nota-se que somente em três ensaios o erro relativo  $\sigma N/N$  superou 15%, chegando a valor máximo de 22,7% em uma amostra. Enquanto isso, somente em uma das amostras o parâmetro  $IC_{95\%}/N$  teve valor superior a 10%. É possível identificar que as maiores incertezas foram identificadas para o método dois pontos, em especial nos ensaios com taxas mais baixas de ventilação, correspondendo aos cenários INF e VU2. Mesmo nessas configurações a precisão é satisfatória, com erro relativo médio de somente 7,5% em ambos os casos, com desvios padrões de 4,3% e 3,1% respectivamente (não confundir com  $\sigma N$ ).

A partir de ensaios em câmara experimental com ventilação mecânica e taxa de ventilação controlada, variada entre  $7,8 \text{ h}^{-1}$  e  $40,6 \text{ h}^{-1}$ , Cui et al. (2015) avaliaram a incerteza do método multipontos em 5%, e de do método dois pontos em 12%. Os autores também utilizaram sensores NDIR, considerados de baixo custo quando em relação a analisadores de gás, e a partir desses resultados concluíram que são adequados para esse tipo de ensaio, permitindo cálculo confiável da taxa de ventilação.

Além disso, concluem que o método multipontos é preferível em relação ao de dois pontos, justamente por apresentar menor erro relativo. Como o ambiente por eles avaliado tratava-se de câmara experimental com condições controladas, avaliar se isso também é válido para recintos com ventilação natural era um ponto a se investigar.

Os resultados apresentados nesta subseção corroboram com as conclusões de Cui et al. (2015) em relação à confiabilidade das taxas medidas pelo método de decaimento de CO<sub>2</sub> como gás traçador, e as estende para ambientes com ventilados por esquadrias de grandes dimensões. Também se atestou a vantagem do cálculo a partir do método multipontos, que de fato retornou intervalo de confiança mais estreito. Nota-se também que o modelo de cálculo é mais complexo.

Porém, principalmente caso haja poucas amostras, deve-se avaliar se de gráfico de  $\ln(\Delta C_{(t)})$  apresenta bom ajuste a uma reta, conforme descrito pela ASTM E741. O **Gráfico 22** ilustrou essa avaliação para uma amostra em que não houve bom ajuste. Como a aplicação do método dois pontos é bastante simples, não demandando qualquer esforço adicional, recomenda-se calcular ambos os valores, abordagem adotada neste trabalho.

Caso haja oscilações bruscas no perfil de decaimento, deve-se ter mais confiança no valor calculado somente a partir dos pontos inicial e final de decaimento. Nesses casos, uma alternativa é dividir o decaimento em intervalos com taxa de ventilação uniforme.

#### 4.1.3 Taxa de Ventilação por Configuração de Abertura

A **Tabela 9** a seguir resume as principais estatísticas descritivas da taxa de ventilação, e aponta parâmetros relevantes, como desvio padrão e coeficiente de variação (CV) das taxas calculadas para cada configuração de abertura a partir de ambos os métodos de cálculo avaliados.

**Tabela 9** – Estatísticas descritivas de  $N$  [h<sup>-1</sup>] por configuração

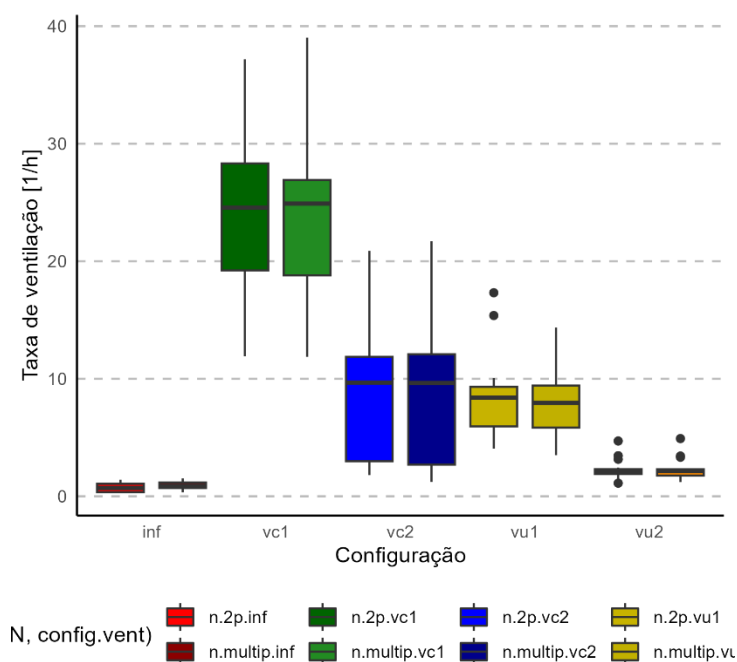
<b>Método dois pontos</b>					
Configuração	VC1	VC2	VU1	VU2	INF
Mediana	24,6	9,7	8,4	2,1	0,7
Máximo	37,2	20,9	17,3	4,7	1,4
<b>Média</b>	<b>24,6</b>	<b>8,5</b>	<b>8,5</b>	<b>2,3</b>	<b>0,8</b>
Mínimo	11,9	1,8	4,0	1,1	0,3
Desvio Padrão	6,6	5,7	3,6	0,9	0,4
CV	0,27	0,67	0,43	0,38	0,59
<b>Método multipontos</b>					
Configuração	VC1	VC2	VU1	VU2	INF
Mediana	24,9	9,6	7,9	2,1	0,9
Máximo	39,0	21,7	14,4	4,9	1,5
<b>Média</b>	<b>24,0</b>	<b>8,2</b>	<b>8,1</b>	<b>2,3</b>	<b>0,9</b>
Mínimo	11,9	1,2	3,5	1,2	0,3
Desvio Padrão	6,5	5,9	3,2	0,9	0,4
CV	0,27	0,71	0,40	0,41	0,44

**Fonte:** o próprio autor (2023).

Retoma-se que as implicações desses resultados em relação à qualidade do ar interno é avaliada no item 4.3, que também leva em consideração os resultados alcançados pelas medições com CO<sub>2</sub> metabólico.

Em continuidade, o **Gráfico 26** a seguir apresenta os resultados agrupados em forma de box-plot do número de trocas de ar por hora ( $N$ ) [ $\text{h}^{-1}$ ] por configuração de abertura, por ambas as técnicas de cálculo até aqui discutidas.

**Gráfico 26** – Box-plot da taxa de ventilação por configuração de abertura



**Fonte:** o próprio autor (2023).

Os resultados alcançados correspondem aos padrões de decaimento observados nos **Gráfico 16** a **Gráfico 21**, cuja interpretação mais elementar é a de que quanto mais curto o intervalo de decaimento, maior a taxa de ventilação, o que se dá a partir de relação logarítmica.

Antes de interpretar os resultados, chama-se atenção ao fato de não haver perfeita homogeneidade entre as amostras de cada configuração. Dois fatores podem contribuir para essa diferença entre amostras: variações geométricas entre as salas, e variações nas condições do tempo durante os ensaios. Dentre as variações geométricas, apontam-se diferenças nos ângulos de abertura das esquadrias basculantes, áreas das aberturas, pavimento e orientação. Esses impactos serão avaliados em mais detalhes nos itens 4.1.8. e em 4.1.7 se discutem variações na intensidade e direção do vento, e da diferença entre temperatura interna e externa.

Portanto, é provável que os coeficientes de variação registrados

estejam inflados em relação ao que se mediria caso todos os ensaios tivessem ocorrido no mesmo recinto, o que eliminaria as incertezas geométricas. Esse é um dos motivos que levou à posterior divisão dos resultados de acordo com a sala de aula, que consta em 4.1.4, além de divisão mais detalhada, por combinação de configuração e cenário de abertura, no item 4.1.5.

Pautou-se a apresentação das taxas de ventilação a partir dos resultados obtidos pelo método dois pontos. Dada a boa correlação demonstrada entre os ele e o método multipontos, a avaliação a partir de qualquer um dos dois leva a conclusões similares.

A taxa média de infiltração registrada entre as salas de aula foi de 0,8 h<sup>-1</sup> trocas de ar por hora, com coeficiente de variação (CV) de 0,59. A variação entre os resultados obtidos neste cenário também é discutida em detalhes no item 4.1.7, em torno do **Gráfico 40**, que apresenta a dispersão da taxa medida conforme a intensidade do vento. O valor indica a vedação das salas com todas as esquadrias fechadas.

No cenário VC1 a taxa média registrada foi de 24,6 trocas de ar por hora, com CV de 0,27, o que está de acordo com o decaimento uniforme identificado anteriormente para essa configuração de abertura, e muito acima de qualquer critério, mesmo na amostra com menor valor registrado, 11,9 h<sup>-1</sup>.

No cenário VC2 a taxa média foi de 8,4 h<sup>-1</sup>, e as variações entre as séries dos ensaios se traduz em CV de 0,67. Mesmo que a média registrada atenda aos critérios mínimos de ventilação, conforme o item 4.3, houve amostra nesta configuração em que se registrou taxa média somente de 1,8 h<sup>-1</sup>, valor bastante aquém do recomendado. Isso indica que a estratégia ventilação cruzada por si só não necessariamente garante taxas de ventilação adequadas, pelo menos se suas áreas não forem dimensionadas de forma adequada, ponto investigado em mais detalhes no item 4.1.8.

A taxa média registrada para a configuração VU1 também foi de 8,5 h<sup>-1</sup>, porém com CV de 0,43, ou seja, com valores mais constantes quando em comparação com os registrados em VC2. Neste caso o valor mínimo registrado foi de 4 h<sup>-1</sup>, que ainda é considerado adequado por parte dos critérios, vide item 4.3. Isso sugere que, caso as áreas de abertura sejam grandes o suficiente, é possível manter taxas de ventilação adequadas em salas de aula com ventilação unilateral.

O cenário VU2, com áreas reduzidas de abertura em comparação a

VU1, registrou taxas entre  $1,1 \text{ h}^{-1}$  e  $4,7 \text{ h}^{-1}$ , com média de  $2,3 \text{ h}^{-1}$ , o que demonstra novamente a influência das áreas de abertura nos resultados, tanto em cenários de ventilação cruzada, quanto unilateral, o que será investigado mais a fundo no item 4.1.8.

As diferenças entre as taxas de ventilação das configurações de abertura foram avaliadas por meio do teste não paramétrico de Kruskal-Wallis, que retornou p-valor muito próximo de 0, indicando diferenças estatisticamente significativas entre pelo menos dois grupos de configurações, o que é evidente a partir dos valores até aqui apresentados, já que certamente mediana de  $0,7 \text{ h}^{-1}$  (INF) difere de  $24,6 \text{ h}^{-1}$  (VC1). Entretanto, o teste de Dunn com correção de Bonferroni permitiu atestar entre quais configurações específicas a diferença foi significativa.

Levando em conta os resultados do teste de Dunn e um nível de significância de 5%, não foi possível identificar diferenças estatisticamente significativas entre as taxas de ventilação registradas nos cenários INF e VU2. O p-valor obtido para essa comparação foi de 0,65, e a hipótese nula, de igualdade entre só seria rejeitada se o p-valor fosse menor ou igual a 0,025 ( $\alpha/2$ ).

Da mesma forma, não foi possível confirmar a existência de variação estatística entre os cenários VU1 e VC2, uma vez que o p-valor obtido foi igual a 1,00. Esse resultado indica que as taxas de ventilação nessas configurações são estatisticamente semelhantes. Porém, na prática, o cenário VU1 é vantajoso em relação a VC2, já que garante taxa menos variada, sempre superior a  $4 \text{ h}^{-1}$ . Em 4.1.5 se discutirá o impacto das condições do tempo nos resultados obtidos.

Enquanto isso, para a comparação entre as configurações VC2 e VU2, o p-valor registrado foi de 0,0302, revelando diferenças estatisticamente significativas a partir de um nível de significância de 6%. Isso sugere que as taxas de ventilação nessas configurações são distintas.

As demais combinações de configurações apresentaram p-valores inferiores a 0,025, o que indica que elas são estatisticamente diferentes entre si. Entretanto, nesses casos o teste sequer seria necessário, dada a clara diferença ao se avaliar o **Gráfico 26**.

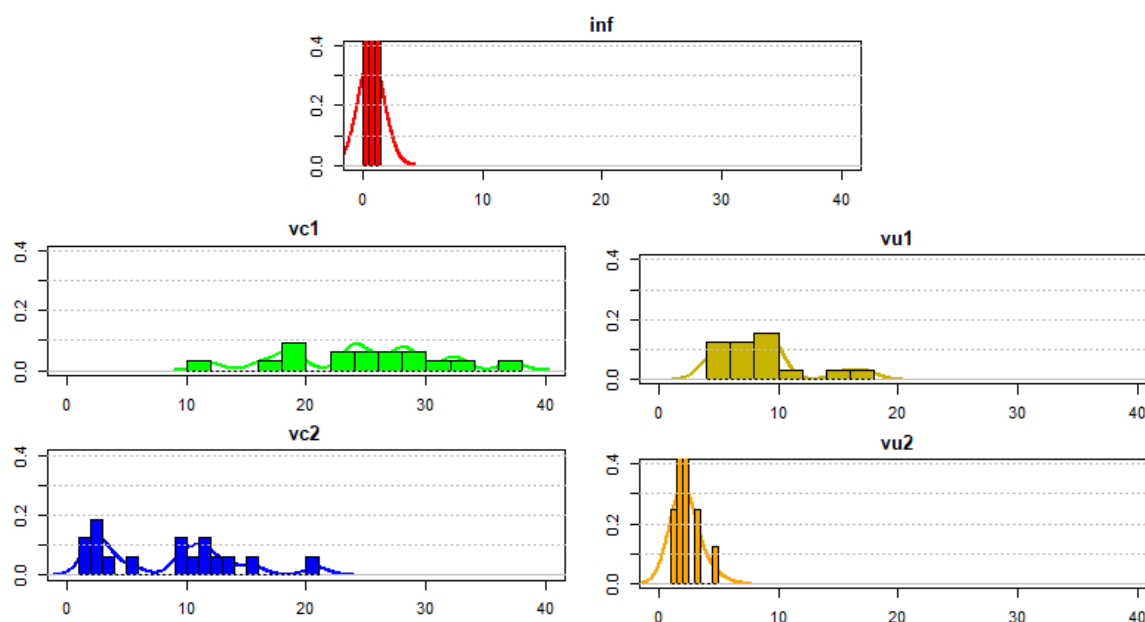
Apesar de aplicados os testes, adotados para manter o maior rigor científico possível aos dados obtidos, a partir da incerteza calculada para os métodos de medição no item 4.1.2, é possível atestar que as diferenças entre as taxas de ventilação registradas entre todas as configurações de abertura são relevantes, uma

vez que são superiores às incertezas calculadas nos dois casos. Portanto, com base nesses resultados, pode-se concluir que as taxas de ventilação variam significativamente entre as configurações analisadas.

Chama-se atenção ao fato de que durante a execução dos ensaios, nenhuma medida adicional foi tomada para vedar as frestas das esquadrias que não estavam em uso. Pode-se argumentar, portanto, que os cenários VU1 e VU2 não medem casos ideais de ventilação unilateral, já que houve alguma contribuição de infiltração a partir da fachada oposta. Fortuitamente a caracterização da taxa de infiltração das salas pode indicar a relevância desse efeito, tão mais reduzido quanto forem os caminhos de infiltração. Para as salas de aula em questão, os caminhos mais prováveis são frestas entre esquadrias e estrutura, e nas próprias folhas das esquadrias.

O **Gráfico 27** explora os mesmos dados, referentes ao método dois pontos, desta vez em forma de histogramas, que apresentam as frequências relativas das taxas de ventilação obtidas para cada cenário, e são úteis para auxiliar na interpretação da análise estatística dos resultados.

**Gráfico 27** – Histogramas de frequência relativa (Y) de  $N$  [ $\text{h}^{-1}$ ] por configuração (X)



**Fonte:** o próprio autor (2023).

Os histogramas ilustram a distribuição até aqui discutida das diferentes amostras da taxa de ventilação  $N$  em cada configuração de abertura estudada. Também permitem avaliar em qual fração dos ensaios de cada cenário se atingiu taxas consideradas adequadas, discussão que será aprofundada na seção 4.3.

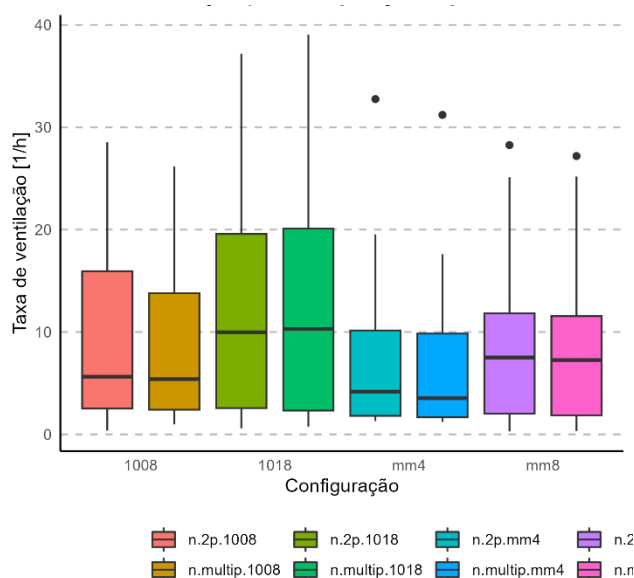
Por hora pontua-se que um dos critérios adotados considera que para salas de aula a taxa é “boa” a partir de  $4 \text{ h}^{-1}$ , valor não atingido em 37% das amostras no cenário VC2 e alcançado em somente um ensaio na configuração VU2. Nos demais cenários, VU1 e VC1, todas as amostras registraram taxa superior a  $4 \text{ h}^{-1}$ .

Prosseguindo com a análise, a próxima seção examina as variações nas taxas de ventilação medidas em cada uma das sala de aula avaliadas.

#### 4.1.4 Taxa de ventilação por Sala de Aula

Como se discutiu a influência da homogeneidade entre salas de aula nos desvios encontrados, convém investigar se houve variações significativas entre as médias agrupadas por sala de aula. Essa divisão tem problemas mais evidentes com a falta de homogeneidade entre amostras de cada grupo, pois agrupa configurações de abertura distintas. Porém, como houve o mesmo número de repetições de cada configuração entre as salas, a análise do **Gráfico 28** pode indicar alguma tendência.

**Gráfico 28** – Box-plot da taxa de ventilação ( $N$ ) [ $\text{h}^{-1}$ ] por sala de aula



**Fonte:** o próprio autor (2023).

A análise preliminar do gráfico sugere que as a taxas registradas na sala MM4 foram ligeiramente inferiores às demais, e sugere que valores maiores foram registrados para a sala 1018, porém, devido a forma que estão agrupados os dados, não é possível atribuir significado físico para os valores apresentados no **Gráfico 28**, já que não existe uma configuração de abertura média entre as cinco

avaliadas.

É possível utilizar diferentes abordagens para extrair informações dos dados coletados ao longo dos ensaios. Uma opção é adotar testes não paramétricos, como Kruskal-Wallis e Dunn, que permitem avaliar diferenças entre grupos que não atendem às pressuposições de normalidade e homogeneidade das variâncias, como é o caso das taxas agrupadas por sala. O teste não paramétrico de Kruskal-Wallis aplicado considerando esse agrupamento não permitiu rejeitar a hipótese nula, já que retornou p-valor de 0,5, superior à significância de 0,05 adotada.

Dessa forma, não se pôde afirmar que exista diferença estatística significativa entre a taxa média de ventilação de cada sala de aula para todas as configurações de abertura por essa abordagem, e o teste leva à conclusão de que todas as caixas estreitas apresentadas no **Gráfico 28** são estatisticamente equivalentes.

Entretanto, deve-se considerar as limitações desse tipo de comparação, em especial para avaliar uma grandeza que varia de acordo com as condições de vento e temperatura, já que garantir homogeneidade entre as amostras é improvável, ainda mais quando agrupa-se diferentes configurações de abertura em um mesmo grupo, como é o caso dessa divisão por salas. Mesmo ao realizar a divisão por configurações de abertura, agrupam-se as salas, que apesar de similares, com os mesmos tipos de esquadria, possuem variações dimensionais, tanto em volume quanto em áreas de abertura, além de estarem situadas em andares distintos.

Portanto, apresta-se na **Tabela 10** resultados de taxa de ventilação média, erro relativo e desvio padrão para cada sala de aula.

**Tabela 10** – Média, erro relativo e desvio padrão da taxa de ventilação por sala

Sala	N médio [1/h] (2p)	$\sigma$ N/N médio (2p)	Desv. Pad. de N [1/h] (2p)	N médio [1/h] (multip)	IC95%/N médio (multip)	Desvio padrão de N [1/h] (multip)
1008	9,2	4,6%	8,8	8,8	2,9%	8,3
1018	12,8	5,1%	11,5	12,6	2,1%	11,4
MM4	7,6	10,4%	8,4	7,4	2,1%	8,0
MM8	9,7	8,3%	9,3	9,4	1,9%	9,1

**Fonte:** o próprio autor (2023).

Os valores médios calculados a partir de ambos os métodos indicam que a sala MM4 apresentou a menor taxa de ventilação, o que apesar de não confirmado pelo teste de Dunn, pode ser atestado considerando o erro relativo

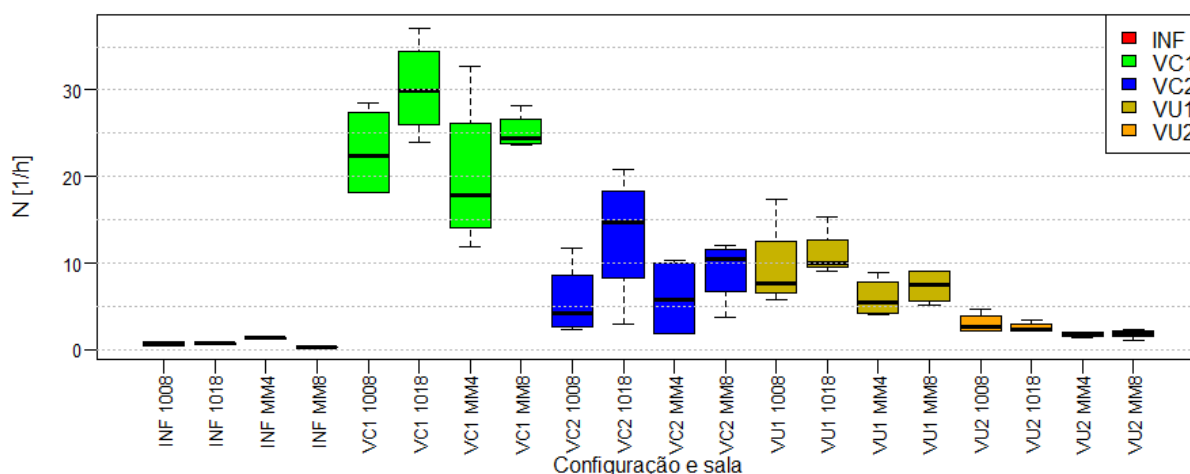
calculado para o método de medição (em média 2,2% para o método multipontos e 5,9% para o dois pontos). Também é possível identificar significativa variação entre os valores registrados pela sala 1018 em relação às demais. Enquanto isso, de fato há similaridade entre os valores registrados pelas salas MM8 e 1018, ainda que o intervalo de confiança do método multipontos permita atestar diferença.

Também se investigou a influência dos fatores sala de aula e configuração de abertura de forma conjunta, o que além permitiu avaliar com mais detalhes as diferenças entre as salas de aula.

#### 4.1.5 Taxa de Ventilação por Configuração de Abertura e Sala de Aula

Os resultados de taxa de ventilação de todas as combinações de sala e configuração de abertura, totalizando 20 tratamentos, estão elencados no **Gráfico 29** a seguir. Ressalta-se que cada uma das caixas estreitas foram construídas a partir de 4 ensaios para casos de ventilação cruzada e unilateral, e 2 ensaios para infiltração. Ainda que cada grupo seja mais homogêneo por não agrupar ambientes distintos, há baixo número amostral, e continuam válidas as ressalvas em relação as diferentes condições do tempo em cada ensaio.

**Gráfico 29** – Taxa de ventilação [ $\text{h}^{-1}$ ] por sala e configuração de abertura



**Fonte:** o próprio autor (2023).

É possível identificar que nas configurações de abertura VC1, VU1 e VU2 a sala MM4 de fato registrou mediana de taxas de ventilação inferiores às das demais. Na configuração VC2 o valor registrado na sala MM4 também foi mais baixo quando comparado às salas 1018 e MM8, mas similar ao registrado na sala 1008.

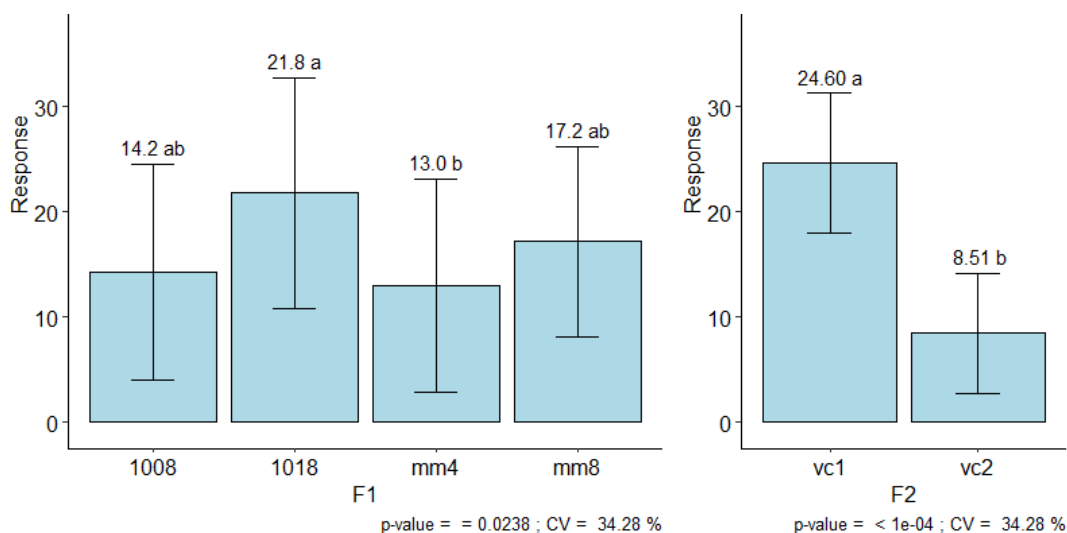
Uma alternativa para permitir análise mais rigorosa consiste em dividir

os dados em grupos mais homogêneos, buscando cumprir as pressuposições necessárias para a aplicação de testes paramétricos, como ANOVA e o teste de Tukey. Além de considerar combinação dos fatores sala de aula e configuração, dividiu-se a análise dos resultados filtrando os ensaios de acordo com o tipo de ventilação do ensaio (cruzada, unilateral e infiltração).

Ao se restringir os dados somente aos cenários de ventilação cruzada, agrupando a taxa de ventilação ( $N$ ) por sala e configuração de abertura, foram atendidos os pressupostos para a aplicação do teste de paramétrico de Tukey, o que permitiu comparar as taxas registradas entre as salas, e as configurações de abertura VC1 e VC2. A normalidade dos erros foi verificada, com teste de Shapiro-Wilk retornando p-valor de 0,99. Também se atestou homogeneidade das variâncias, identificada por p-valor de 0,51 no teste de Bartlett. O teste de Durbin-Watson confirmou a independência dos erros, considerando estatística 2,61 e p-valor de 0,70.

O **Gráfico 30** a seguir revela as conclusões do teste de Tukey para a comparação entre a taxa de ventilação [ $\text{h}^{-1}$ ] em cenários de ventilação cruzada nas diferentes salas. Letras diferentes numa coluna representam variações significativas.

**Gráfico 30** – Resultados do teste de Tukey para ventilação cruzada



**Fonte:** o próprio autor (2023).

Com base nesta análise, confirma-se que a ventilação na sala MM4 foi menor do que na 1018 nos cenários de ventilação cruzada. Contudo, em termos estatísticos, não há evidências suficientes para garantir que a MM4 teve a menor taxa de ventilação entre todas as salas, nem que a 1018 teve a maior, uma vez que não houve diferenças estatísticas significativas entre ela e as demais salas (1008 e MM8). Novamente pontua-se que a ausência de diferenças estatísticas significativas nos

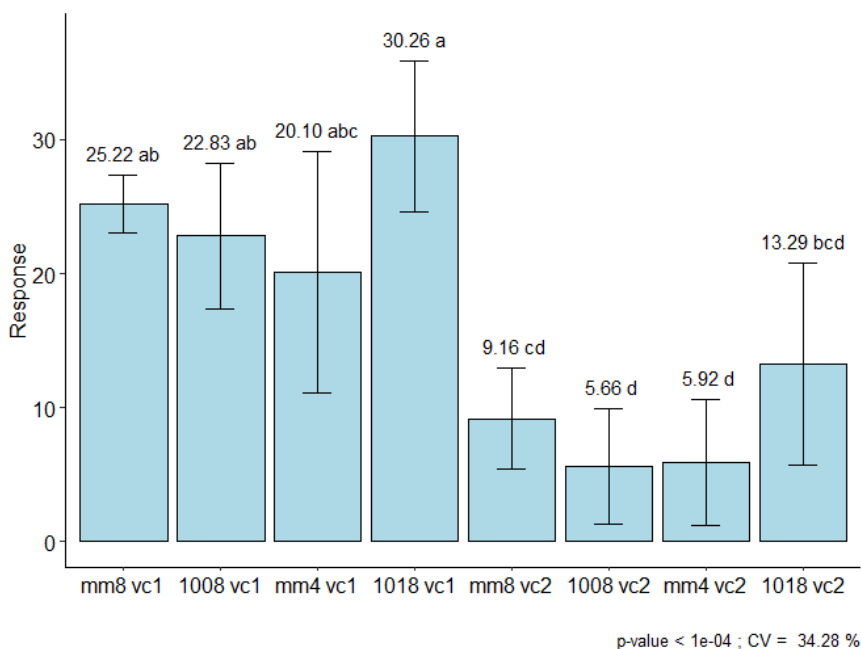
testes de comparação de grupos não implica que as diferenças observadas sejam irrelevantes na prática, dada a demonstrada alta precisão dos registros.

Além disso, deve-se considerar que é possível atribuir as diferenças entre a taxa média registrada em de cada sala a fatores concretos, como variações entre suas áreas de abertura. De fato, era esperado que as salas MM4 e 1008 apresentassem taxas de ventilação ligeiramente inferiores em relação às outras, devido, respectivamente, às menores porosidades e altura em relação ao solo. A sala MM4 conta com somente dois módulos de esquadrias basculantes na fachada, e a 1008 está no térreo como previamente ilustrado nas **Figura 20 a 23**. A influência das áreas de abertura nesses resultados é investigada mais a fundo no item 4.1.8.

Com base no teste de Tukey entre configurações de abertura, a comparação entre VC1 e VC2 gerou p-valor de  $10^{-4}$ . Neste caso a estatística confirma a evidente diferença entre as configurações de abertura.

Em continuidade, o **Gráfico 31** apresenta resultados do teste de Tukey aplicado aos mesmos grupos, porém combina os fatores sala de aula e configuração de abertura.

**Gráfico 31** – Resultados do teste de Tukey, ventilação cruzada, fatores combinados



**Fonte:** o próprio autor (2023).

A partir dessa divisão é possível identificar mais níveis de diferença entre os grupos. A 5% de significância, novamente não se pode atribuir diferença entre qualquer uma das salas na configuração VC1, nem entre salas na configuração VC2, somente entre grupos de diferentes cenários. Neste caso sequer entre as salas 1018

e MM4 houve variação estatística, que tinha sido identificada a partir do **Gráfico 30**.

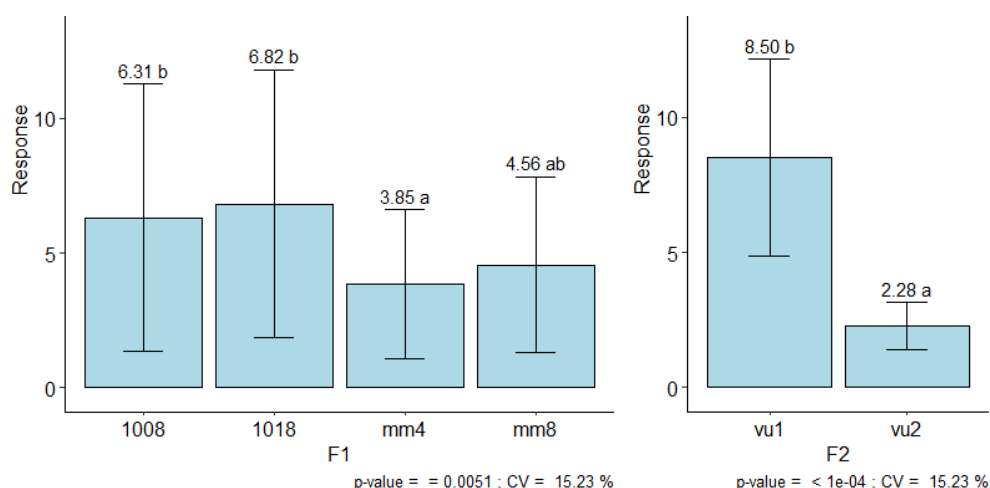
A simples comparação das médias, porém, novamente está de acordo com o esperado, taxas ligeiramente inferiores nas salas MM4 e 1008 em relação às demais, e valores maiores na sala 1018, que possui maiores áreas de abertura.

De forma análoga ao apresentado para os cenários de ventilação cruzada, os dados referentes aos cenários de ventilação unilateral foram analisados separadamente.

O **Gráfico 32** a seguir ilustra o resultado do teste de Tukey realizado para as configurações de ventilação unilateral. De início, sem realizar qualquer transformação nos dados, o teste de normalidade de erros de Shapiro-Wilk retornou p-valor de 0,001, inferior à significância de 5%, o que leva à rejeição da hipótese nula, e impediria a aplicação do teste.

Com objetivo de contornar esse empecilho, aplicou-se transformação de raiz quadrada na taxa de ventilação, a partir do argumento “transf=-0.5” da função FAT2DIC, parte do pacote público AgroR, baseado na linguagem de programação R. Após a transformação, foram atendidas as pressuposições de independência dos erros (teste de Durbin-Watson com estatística 2,3 e p-valor 0,35 > 0,05), homoscedasticidade (teste de Bartlett com p-valor 0,63 > 0,05) e normalidade dos erros (teste de Shapiro-Wilk com p-valor 0,45 > 0,05).

**Gráfico 32** – Resultados teste de Tukey para ventilação unilateral



**Fonte:** o próprio autor (2023).

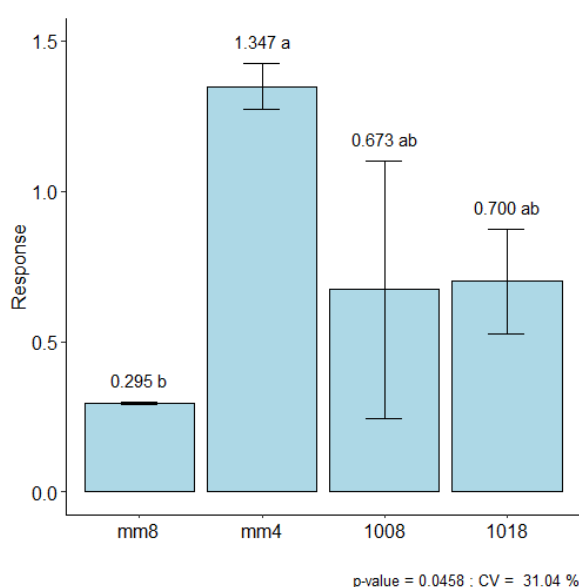
O atendimento às pressuposições garante a validade estatística dos resultados apresentados no **Gráfico 32**. Nesse sentido, verifica-se uma diferença significativa entre as salas (comprovada pelo p-valor do teste de Tukey, 0,0051 < 0,05)

e entre as configurações de ventilação VU1 e VU2 ( $p$ -valor de  $10^{-4} < 0,05$ ).

Com isso, é confirmado que a taxa registrada na sala MM4 foi menor em comparação com as salas 1008 e 1018 nos cenários de ventilação unilateral, embora seja equivalente à taxa observada na sala MM8.

Ao filtrar resultados somente para o cenário de infiltração, também foram atendidos os pressupostos a 5% de significância, neste caso sem necessidade de transformações. O **Gráfico 33** apresenta os resultados do teste de Tukey entre as diferentes salas de aula neste cenário.

**Gráfico 33** – Resultados teste de Tukey (por sala) para infiltração



**Fonte:** o próprio autor (2023).

Neste caso a ANOVA indicou variação estatística a infiltração das salas, com  $p$ -valor de  $0,045 < 0,05$ . Especificamente neste caso, porém, o resultado deve ser tratado com cautela, pois há somente duas amostras para cada grupo.

Portanto, ainda que o teste de Tukey tenha indicado diferença significativa entre as taxas de infiltração das salas MM8 e MM4, no item 4.1.7 se demonstra que houve significativa variação da intensidade do vento entre os ensaios de infiltração em cada sala, de forma que não é possível concluir que haja de fato variações entre o grau de vedação das salas, o que posteriormente é discutido em mais detalhes, e demonstra a importância da repetição dos ensaios, se possível em diferentes condições do tempo.

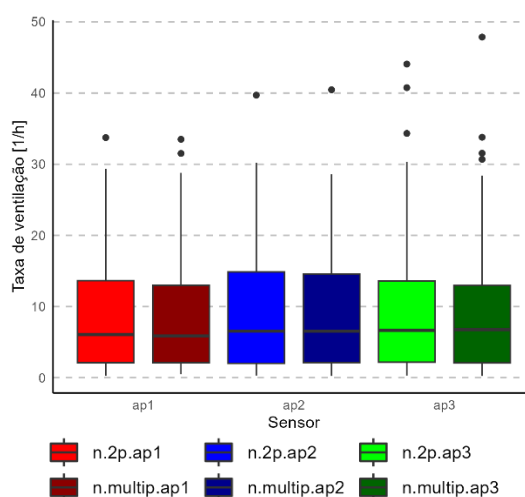
#### 4.1.6 Influência da Posição dos Sensores

Em todas as 72 amostras se atendeu ao critério da uniformidade da concentração  $\Delta C(t_1)$  durante o início do decaimento, conforme proposto pela ASTM E741 (2017), ou seja, não houve variação de mais de 10% entre o valor de  $\Delta C(t_1)$  de nenhum dos sensores em relação à média dos três.

Como previamente apresentado na **Figura 34**, posicionaram-se os sensores nos mesmos pontos em todos os ensaios, igualmente espaçados entre si, conforme prescreve a ASTM E741 (2017). O sensor AP2 sempre foi posicionado no centro geométrico das salas, AP1 a 2 metros das esquadrias da fachada, e AP2 a 2 metros da parede do corredor, todos na linha central do recinto. Nota-se que nenhum dos aparelhos foi situado nas quinas das salas, onde é possível que haja zonas mortas. Também se evitou demasia proximidade das esquadrias, a fim de evitar superestimar o fluxo de ar do recinto.

O **Gráfico 34** apresenta a taxa de ventilação, calculada a partir dos métodos dois pontos e multipontos com os dados de cada um dos sensores. De início analisam-se dados referentes a todos os ensaios agrupados. Nota-se que foram removidos dados de duas amostras em que a bateria de um dos sensores acabou durante o decaimento.

**Gráfico 34** – Taxa de ventilação por sensor



**Fonte:** o próprio autor (2023).

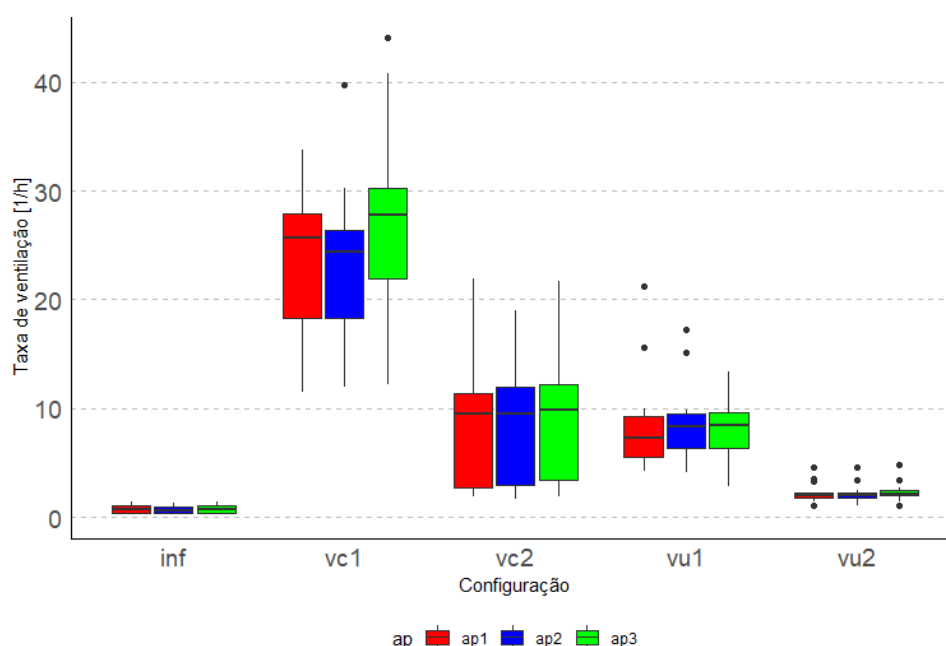
A partir dessa divisão inicial é difícil identificar tendências, pois a variância das taxas ao se agrupar todas as configurações de abertura é muito alta. Ainda assim, é possível avaliar os resultados médios e conduzir teste estatístico entre os grupos.

A taxa média dos ensaios calculada pelo método dois pontos (n.2p) a partir dos dados registrados por AP3 foi de 10,5 h<sup>-1</sup>, enquanto para os outros dois foi de 9,5 h<sup>-1</sup>. Para o método multipontos (n.multip), os valores foram respectivamente 10,2 h<sup>-1</sup> e 9,3 h<sup>-1</sup>. Esses valores foram comparados a partir do teste não paramétrico pareado de Friedman, adotado considerando que as taxas calculadas a partir de cada sensor são pareadas, uma vez que obtidas a partir das mesmas amostras. Nota-se a relevância de adotar esse teste, uma vez que não são atendidos os pressupostos para ANOVA ou teste de Tukey.

Testes como o de Kruskal-Wallis também não seriam adequados, porque não podem ser aplicados a grupos pareados. Nota-se que esse teste não foi capaz de identificar variação estatística entre as medianas, com p-valores de 0,87 e 0,95 respectivamente, valores apresentados somente para ressaltar a importância de se adotar um teste estatístico adequado.

Enquanto isso, para as taxas calculadas pelo método dois pontos, o teste pareado de Friedman retornou p-valor extremamente baixo, de  $1,7 \cdot 10^{-7}$ , muito inferior a 5%, o que leva a interpretação de que há diferença estatística entre os valores registrados por sensor. O **Gráfico 35** apresenta box-plot com as taxas calculadas por esse método agrupadas por configuração de ventilação. A partir dessa divisão constata-se que em todas as configurações de abertura os valores registrados pelo sensor AP3 foram ligeiramente superiores aos demais.

**Gráfico 35** – Taxa de ventilação (dois pontos) por sensor e configuração de abertura



Fonte: o próprio autor (2023).

Considerando somente o cenário de infiltração, o Friedman aplicado entre sensores foi capaz de detectar diferença estatística próxima ao limite da significância, com p-valor de 0,044; também foi o caso para a configuração VU2, com p-valor de 0,047. A diferença foi pouco mais significativa para a configuração VC2, para a qual se obteve p-valor de 0,038. Enquanto isso, para VC1 o valor foi de  $9 \cdot 10^{-3}$ . A única configuração para a qual não se verificou diferença estatística entre as taxas calculadas foi VU1, caso em que o p-valor do teste foi de  $0,25 > 0,05$ .

Portanto, houve diferença entre a taxa registradas pelos aparelhos nas configurações VC1, VC2, VU2 e INF.

Como a média calculada entre todas as configurações de ventilação a partir de dados sensor AP3 foi de  $10,5 \text{ h}^{-1}$ , enquanto para os outros dois foi de  $9,5 \text{ h}^{-1}$ , a razão dessas taxas resulta é aproximadamente 0,9. Isso indica variação próxima de 10% entre o resultado dos sensores.

Considerando que, conforme discutido em 4.1.2, o erro relativo médio calculado para a taxa de ventilação foi inferior a 10% para o método dois pontos (5,9%), as conclusões dos testes estatísticos para comparação dos sensores estão de acordo com as conclusões que se tomariam a partir da comparação das médias com base no erro relativo previamente calculado. Essa equivalência entre conclusões corrobora com o valor obtido para a precisão do método.

A análise dos valores obtidos a partir do método multipontos indica comportamento um pouco distinto, pelo menos para as configurações VU2 e INF. Quando aplicado o teste de Friedman ente todas as amostras, independente da configuração, o p-valor foi de 0,0002, que também indica diferença estatística entre valor registrado por aparelhos neste caso.

Para esse método de cálculo, taxa média geral obtida variou entre  $10,2 \text{ h}^{-1}$  para o AP3 e  $9,3 \text{ h}^{-1}$ , variação de aproximadamente 9%. Como o erro relativo médio calculado para o método multipontos foi de somente 2,2%, a conclusão do teste estatístico também está de acordo a precisão estimada para o método multipontos.

Ao se comparar a taxa do método multipontos entre sensores a partir dos resultados divididos por configuração de abertura, identificou-se diferença estatística entre eles para VC1 (p-valor 0,028) e VC2 (p-valor 0,011). Porém, nas configurações e INF, VU1 e VU2 não se confirmou a variação a 5% de significância, com p-valores respectivamente iguais a 0,197, 0,247 e 0,829.

#### 4.1.7 Influência das Condições do Tempo

Antes de discutir a influência das condições do tempo nas taxas de ventilação registradas, é importante ressaltar uma limitação em relação aos dados de intensidade e direção do vento. Conforme mencionado, a estação meteorológica cujos dados foram utilizados registra somente resultados médios a cada 15 minutos, portanto não captura oscilações de curta duração na intensidade direção do vento durante os ensaios. Além disso, devido à distância de 5 km entre estação e edifício, a sincronia do registro pode ser prejudicada.

Dados coletados nas adjacências do edifício e com maior resolução temporal permitiriam, por exemplo, avaliar com a influência das oscilações de velocidade e direção do vento durante os ensaios em que a taxa de ventilação não foi constante, ou seja, que em que não houve bom ajuste para regressão linear a partir dos pontos do gráfico de  $\ln(\Delta C(t))$ , como se exemplificou no **Gráfico 22**. Com a resolução disponível, não é possível avaliar esse efeito, que continua uma lacuna na área.

Ainda assim, as investigações das influências da intensidade e direção do vento neste estudo se justificam, uma vez que Etheridge e Sandberg (1996) sugerem que, mesmo utilizando dados de velocidade do vento médias a cada hora é possível analisar as condições climáticas envolvidas no fenômeno da ventilação de ambientes internos. Além disso, estudos mais recentes, como o conduzido por Fan et al. (2021), concluíram que não houve melhora significativa da previsão das taxas de ventilação a partir de dados coletados em uma estação meteorológica próxima ao edifício de estudo de caso, quando em comparação com a aplicação de dados de estação de aeroporto localizada a 24 km de distância.

Os autores ressaltam que isso não significa que não há vantagens em se utilizar dados locais, porém indicam que mesmo dados coletados a distâncias significativas podem ser proveitosos, e que mais campanhas experimentais são necessárias para investigar esse efeito. Nesse mesmo estudo se identificou que houve boa correlação no geral entre as intensidades do vento registradas pelas duas estações meteorológicas, porém com erros em faixas específicas de direção do vento, o que se atribuiu à presença de obstáculos ao redor da edificação investigada.

Para este estudo de caso, é relevante observar que há uma significativa variação de altitude na distância que separa o edifício da estação, situada

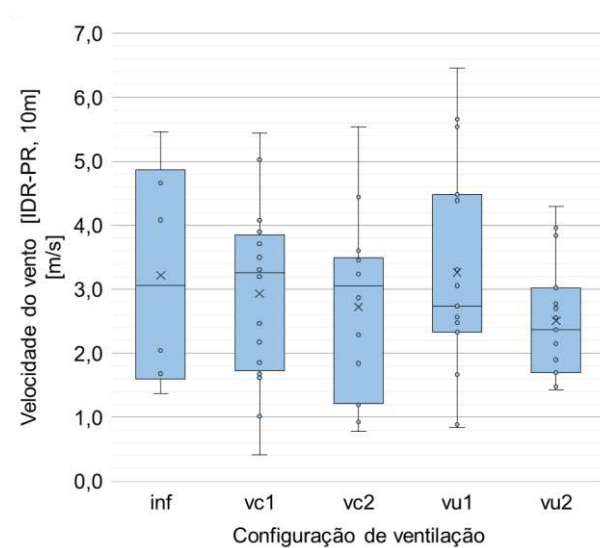
a 585 m de altitude na direção SE. A distância em linha reta entre o edifício e a estação meteorológica passa por um vale com altitude mínima de 510 m, alcançando o edifício a uma altitude de 593 m. Próximo ao edifício, a elevação atinge uma altitude máxima de 596 metros, cerca de 100 m ao norte. Conforme discutido na seção 2.2.1, em especial com base na **Figura 5**, as variações da topografia são um dos fatores que influenciam a incidência real do vento sobre o edifício, tanto em direção quanto em intensidade.

As inúmeras árvores ao redor do edifício também podem afetar a direção do vento, em especial aqueles vindos de Norte, já que existe um bosque denso cerca de 50 metros à frente do edifício, como destacado nas **Figura 9** e **Figura 10**. Além disso, o edifício é composto por dois blocos, ambos com cerca de 73 m de comprimento e 12 m de altura. Como a distância que os separa é de somente 17 metros, com base na **Figura 3**, é possível identificar – ainda que de forma qualitativa – que os blocos estão situados na chamada zona de sombra de vento.

É importante salientar que isso não significa que essa distância de afastamento seja problemática, porém é ponto que gera incertezas em relação às reais intensidades e direções do vento que de fato incidem sobre a edificação. Autores como Romero (2007) recomendam afastamento mínimo de uma vez a altura do edifício, o que é atendido neste caso.

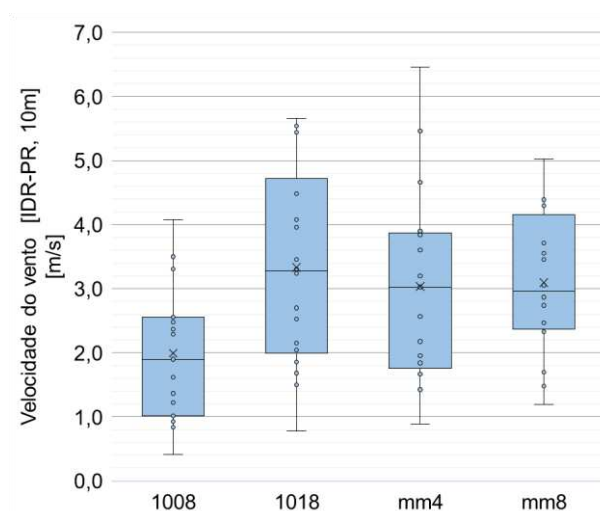
O **Gráfico 36** pretende avaliar se houve distribuição homogênea de intensidade do vento ao longo dos ensaios para cada configuração de abertura, com base nos dados coletados na estação meteorológica do IDR-Paraná. Foi possível coletar dados de intensidade e direção do vento para 66 das 72 amostras. A estação meteorológica encontrava-se em manutenção, ou simplesmente não registrou dados durante a execução de 6 das amostras.

Foi aplicada ANOVA, uma vez que a velocidade do vento agrupada por configuração de ventilação atendeu aos pressupostos de normalidade de Shapiro-Wilk, com p-valor de 0,38, e estatística de Durbin-Watson igual a 2,14. Dados próximos de 2 indicam a inexistência de autocorrelação. A ANOVA revelou que não houve variação estatística entre a intensidade do vento durante os ensaios de diferentes configurações, o que corrobora para hipótese da homogeneidade de condições oferecidas às diferentes configurações de abertura, que se buscou a partir da repetição dos ensaios de forma aleatória.

**Gráfico 36** – Velocidades do vento registradas por configuração de abertura

Fonte: o próprio autor (2023).

Porém, ao realizar agrupamento de acordo com as salas de aula, conforme **Gráfico 37**, verificou-se variação significativa da intensidade média do vento durante os ensaios na sala 1008 em relação as demais, a partir de teste de Kruskal-Wallis, com p-valor de 0,04, inferior 0,05. Neste caso, não foram atendidos os pressupostos para adoção dos testes paramétricos.

**Gráfico 37** – Velocidades do vento registradas por sala

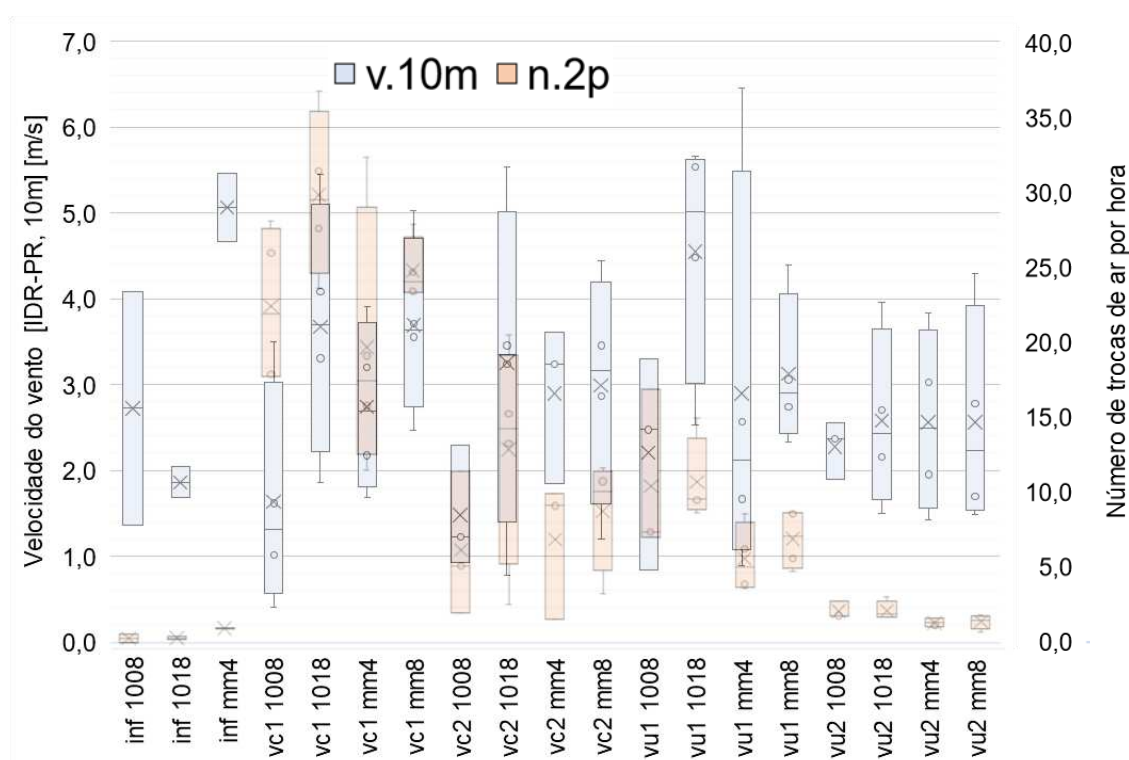
Fonte: o próprio autor (2023).

A partir da análise post-hoc do teste de Dunn, concluiu-se que a intensidade média do vento durante ensaios na sala 1008 diferiu significativamente de da intensidade registrada durante os ensaios nas demais salas, pois os p-valores calculados entre as combinações 1008-1008, 1008-mm4 e 1008-mm8 variaram entre 0,025 e 0,47, todos inferiores à significância de 5%, o que permite a rejeição da

hipótese nula de igualdade entre medianas. Enquanto isso, não foram encontradas diferenças significativas na intensidade média do vento entre as salas 1018, MM4 e MM8.

Com base no **Gráfico 38** pretende-se avaliar se as condições de intensidade do vento foram homogêneas entre as cada grupo de sala de aula e tipo de ventilação combinados. Como também se deseja avaliar a influência desse parâmetro nas taxas calculadas, plotou-se sobreposto aos box-plots de  $v_{10m}$  por grupo, as caixas estreitas relativas à taxa de ventilação desses mesmos grupos, translúcidas. As séries de dado translúcidas são equivalentes ao **Gráfico 29**, ou seja, box-plot de  $N$  (dois pontos) [ $\text{h}^{-1}$ ], divididos nos mesmos grupos.

**Gráfico 38** – Velocidades do vento registradas por sala e configuração



Fonte: o próprio autor (2023).

É possível identificar a origem de algumas variações entre resultados obtidos a partir das diferentes salas de aula. Para o cenário de infiltração, anteriormente se constatou que a sala MM4 apresentou o as maiores taxas de ventilação em relação às demais, com variação estatística significativa em relação à MM8 (para os quais não houve registros de dados da estação meteorológica durante o decaimento). Entretanto, nota-se que enquanto para as salas 1008 e 1018 a intensidade  $v_{10m}$  foi em média 2,7 m/s e 1,9 m/s, durante os decaimentos na sala MM4

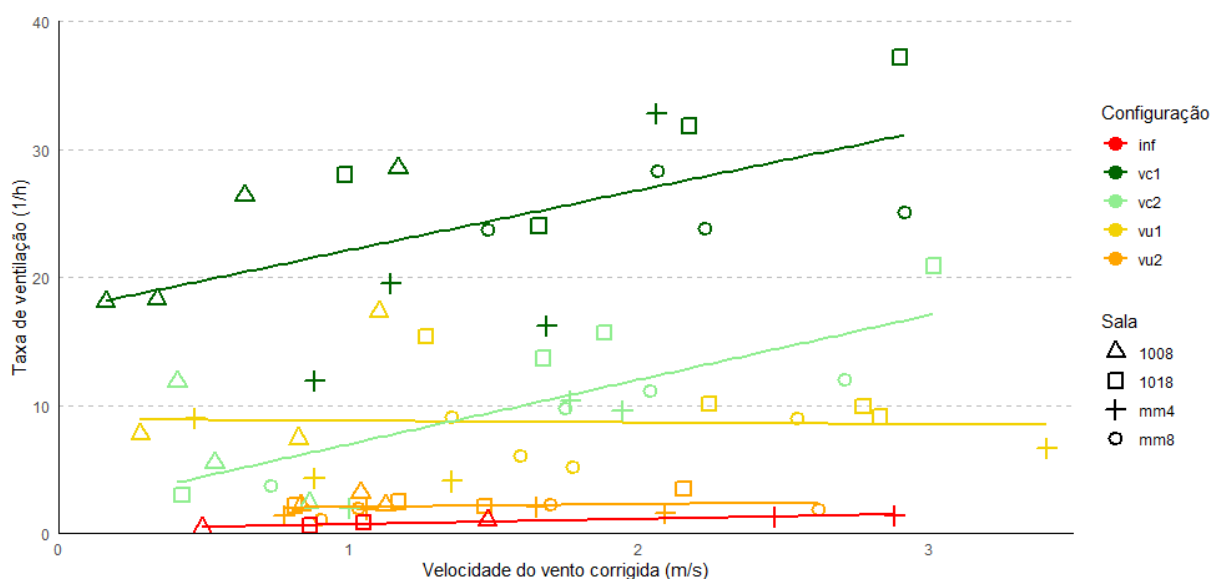
a intensidade média superou 5 m/s, o que pode ter corroborado ao fado deste recinto ter registrado taxa de infiltração de  $1,35 \text{ h}^{-1}$ , enquanto foi de 0,8 para as salas 1008 e 1018. A mesma tendência foi identificada para outras configurações de ventilação, o que se identificou pelo fato de as posições relativas das caixas translúcidas ( $N$ ) serem similares às das azuis ( $v_{10m}$ ) para uma mesma configuração de ventilação.

Seguindo para comparação dos cenários VC1, a sala que registrou as maiores taxas de ventilação foi a 1018, para as quais a intensidade do vento média também foi superior em relação às demais. Entre cenários do tipo VC2, novamente se mediu maior taxa para a sala 1018, durante os quais, coincidentemente as intensidades do vento também foram superiores.

Nos cenários de ventilação unilateral, porém, a correlação não é tão clara. Essa comparação foi útil para compreender as diferenças entre grupos discutidas entre os itens 4.1.3 a 4.1.5. Porém, para avaliar a influência do fator intensidade do vento separadamente, foram elaborados gráficos de dispersão.

O **Gráfico 39** apresenta a taxa de ventilação registrada em cada ensaio ( $Y$ ) para as diferentes velocidades do vento registradas ao longo dos ensaios. Neste caso, a velocidade foi corrigida para a altura de abertura de cada sala de aula, a partir da equação 7, considerando os coeficientes de rugosidade de ambiente urbano, elencados na **Tabela 1**.

**Gráfico 39** –  $N \text{ [h}^{-1}] \times v_{urb}$  em diferentes cenários de abertura



**Fonte:** o próprio autor (2023).

As diferentes cores representam configurações de abertura, e a forma dos marcadores denota a sala. As linhas de tendência lineares foram plotadas de

acordo com cada configuração.

Há, para os cenários de ventilação cruzada agrupados, identificou-se tendência significativa de aumento da taxa registrada de acordo com a intensidade do vento, identificada a partir regressão linear simples entre a taxa  $N$  e a velocidade corrigida. Apesar desse modelo baseado somente na velocidade do vento para explicar a taxa de ventilação ser capaz de explicar somente 18% da variância de  $N$ , a Análise de Variância indicou p-valor de 0,0178, inferior a 5%, e que, portanto, confirma a que a relação entre os parâmetros é significativa. Como o fenômeno depende de diversos parâmetros, é natural que o valor de  $R^2$  seja baixo para o modelo linear considerado. Mais à frente serão investigadas regressões lineares múltiplas, considerando mais de um parâmetro simultaneamente, e que permitem explicar melhor os resultados obtidos.

Regressão linear similar, porém, realizada somente considerando a configuração de abertura VC1, também, se atestou a significância da relação entre  $v_{urb}$  e a taxa de ventilação, neste caso com p-valor de 0,016, e  $R^2$  do modelo foi de 0,34. Nota-se que apesar de existir influência da intensidade do vento, a análise do **Gráfico 39** sugere que há uma taxa mínima, que se registra mesmo quando a intensidade do vento é nula. O p-valor calculado para o intercepto foi de  $4,3 \cdot 10^{-5}$ , o que garante que esse valor mínimo, calculado em  $17,4 \text{ h}^{-1}$  é diferente de zero. É possível que se trate do efeito chaminé em ação, já que há diferença significativa entre as alturas de abertura nesta configuração.

Enquanto isso, no cenário VC2, para o qual também se identifica influência significativa da intensidade do vento, as taxas tendem a valores próximos da infiltração em situações com vento estagnado. Neste caso, o valor do intercepto do modelo linear,  $1,9 \text{ h}^{-1}$ , não registrou diferença estatística em relação à zero, considerando p-valor de 0,38, superior à significância de 5%. Ainda que não se confirme a equivalência estatística, não se rejeita a hipótese nula de igualdade a zero. Isso se dá devido à grande variabilidade entre os resultados obtidos nesses cenários.

Neste caso, o p-valor retornado por ANOVA foi de 0,001 e o valor de  $R^2$  do modelo linear simples foi de 0,58, o que indica que a ação do vento é um mecanismo mais predominante neste cenário quando em comparação a VC1, que também depende de outros parâmetros para que se melhore o ajuste.

No cenário VC1, aparenta existir taxa de ventilação mínima, independente da intensidade do vento. Já no cenário VC2, as taxas de ventilação se

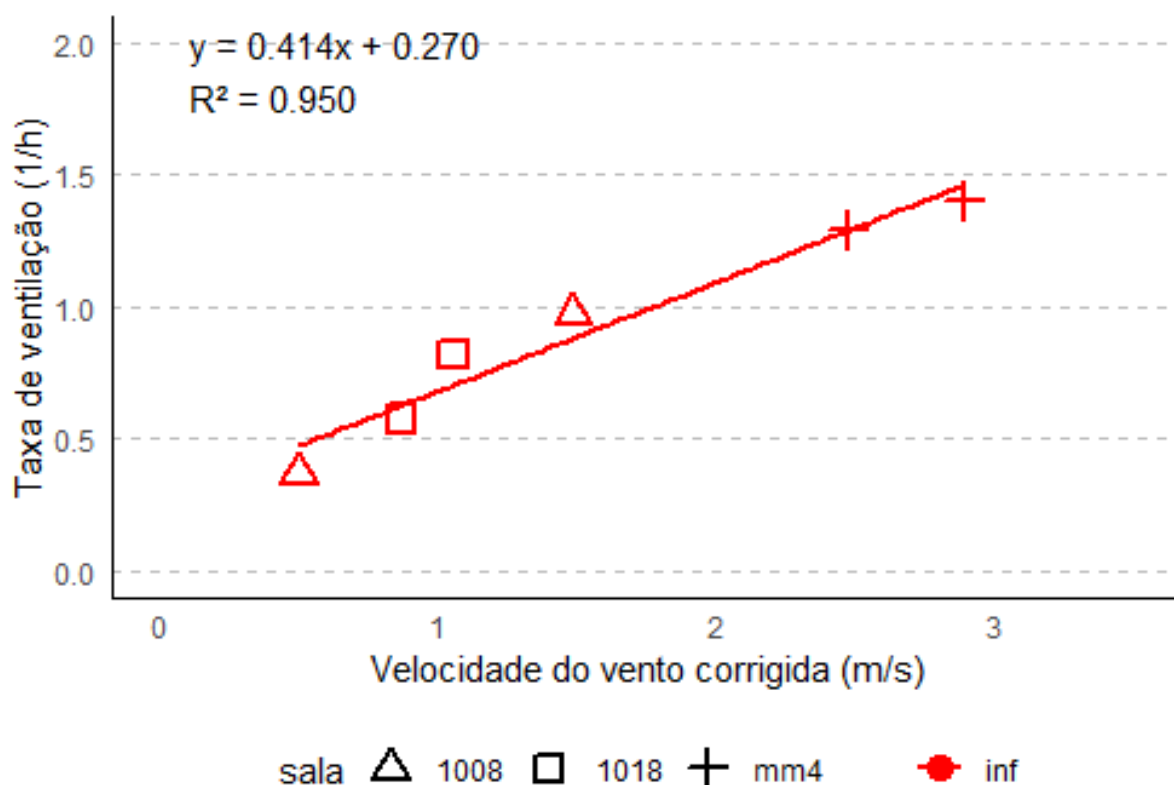
aproximam de nulas quando a intensidade do vento é baixa. Nesses cenários todas as aberturas estão no mesmo nível o que não favorece o efeito chaminé, o que explica a não rejeição da hipótese nula de igualdade entre intercepto e zero.

O **Gráfico 39** não indica correlação entre os valores de  $v_{urb}$  e  $N$  em ambos os cenários de ventilação unilateral. Para VU1, a regressão linear seguida de ANOVA retornou p-valor de 0,9 para a relação entre os parâmetros, o que sugere – mas não confirma – que essa não é significativa. Como esperado a partir da apreciação do gráfico de dispersão, o valor do intercepto neste caso também é diferente de zero, calculado em 8,9, e p-valor de 0,0008. Isso indica que mesmo caso a intensidade do vento seja nula, se espera taxa média de 8,9  $h^{-1}$  nesta configuração.

Para VU2 calculou-se intercepto de 1,8  $h^{-1}$ , para o qual foi possível identificar diferença significativa em relação a zero, com p-valor também igual a 0,0008. Também não se identificou influência da velocidade do vento nos resultados neste cenário, considerando p-valor de 0,46.

Na escala apresentada não é possível avaliar com clareza o efeito da velocidade nos cenários de infiltração. O **Gráfico 40** permite avaliar esse impacto.

**Gráfico 40** –  $N [h^{-1}] \times v_{urb}$  em cenários de infiltração



Fonte: o próprio autor (2023).

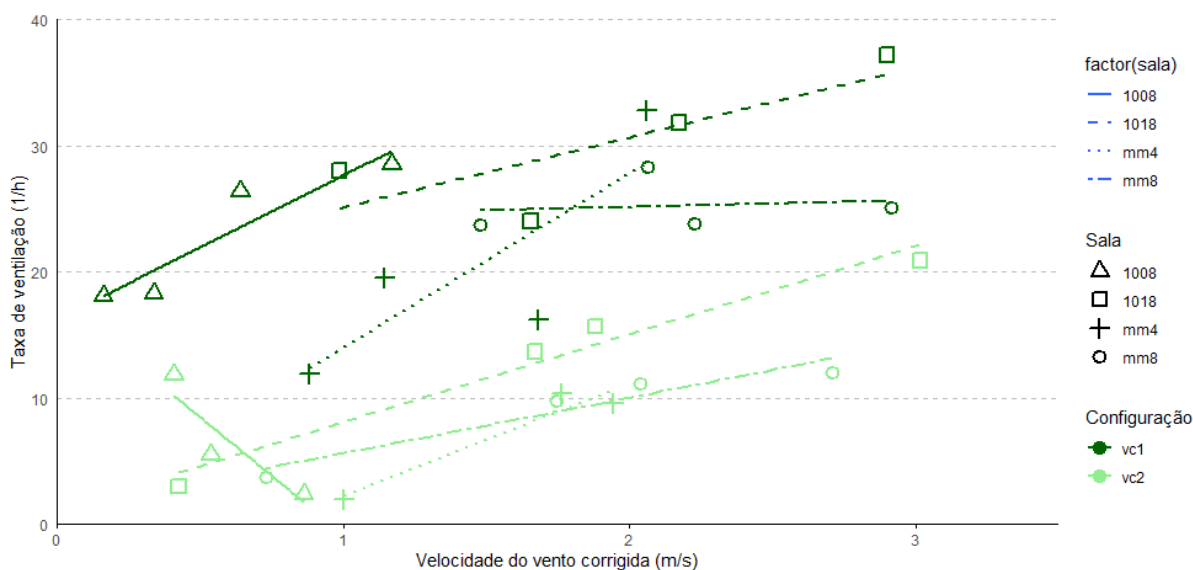
Ainda que a regressão linear seja capaz de explicar 95% da variação

na taxa de ventilação das salas a partir da velocidade do vento, é preciso ter em mente que há dados da intensidade do vento somente para seis ensaios nesta configuração, com dois registros para cada uma das salas 1008, 1018 e MM4. Por acaso a estação meteorológica estava em manutenção durante os dois ensaios de infiltração na sala MM8. Neste caso o p-valor da ANOVA aplicada ao modelo de regressão linear simples foi de 0,0009, o que sugere efeito significativo de  $v_{urb}$  e  $N$ . Neste caso, mesmo que tenham se registrados as menores taxas de ventilação, também foi possível aferir diferença estatística entre zero e o intercepto calculado, de  $0,27 \text{ h}^{-1}$ , que corresponde a infiltração esperada em situações com vento estagnado.

Os dois ensaios ocorridos nas salas MM4 ocorreram em dias com velocidades do vento mais elevadas. Após aplicadas as correções, registraram médias de aproximadamente 2,6 m/s e 2,9 m/s. Essa pequena diferença entre os valores registrados para esta sala não permite avaliar com precisão o efeito da variação para esta sala específica. Isso também é verdadeiro para os ensaios de infiltração na sala 1018, ambos ocorreram em condições muito similares de intensidade do vento, próxima a 1 m/s neste caso. Para a sala 1008 as condições do tempo foram mais variadas entre os registros, durante um ensaio se registrou cerca de 0,6 m/s; no outro, 1,5 m/s.

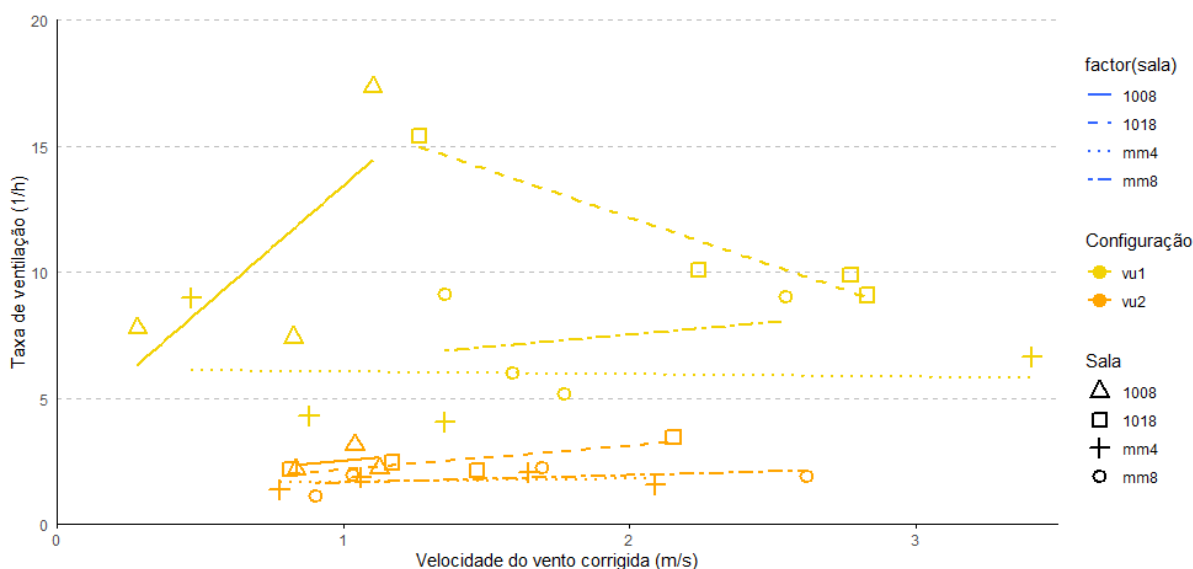
Apesar das salas não serem idênticas, como suas esquadrias são muito similares, posicionadas nas mesmas configurações, do mesmo tipo, e se fixando à estrutura a partir do mesmo sistema construtivo, é esperado que as taxas de infiltrações sejam semelhantes entre os recintos, o que parece verdadeiro, dada a boa correlação do modelo aos dados, mesmo que somente com seis amostras.

É possível, a partir dos mesmos dados, elaborar linhas de tendência separadamente por sala e configuração, com objetivo de verificar se o mesmo comportamento se repete para os grupos mais homogêneos, mas com menor número amostral. O **Gráfico 41** apresenta as tendências por sala nos cenários de ventilação cruzada. Com exceção do cenário VC2 da sala 1008, para o qual há somente 3 ensaios com velocidade do vento registrada, para as demais combinações de sala e configuração ainda é possível verificar influência positiva da intensidade do vento nas taxas registradas.

**Gráfico 41** – Taxa de ventilação x Velocidade do vento corrigida, VC

**Fonte:** o próprio autor (2023).

Ao se definir as linhas de tendência para os cenários de ventilação unilateral entre cada sala de aula, de forma análoga, não é possível identificar uma tendência constante entre as salas, em especial para o cenário VU1, como ilustra o **Gráfico 42** a seguir.

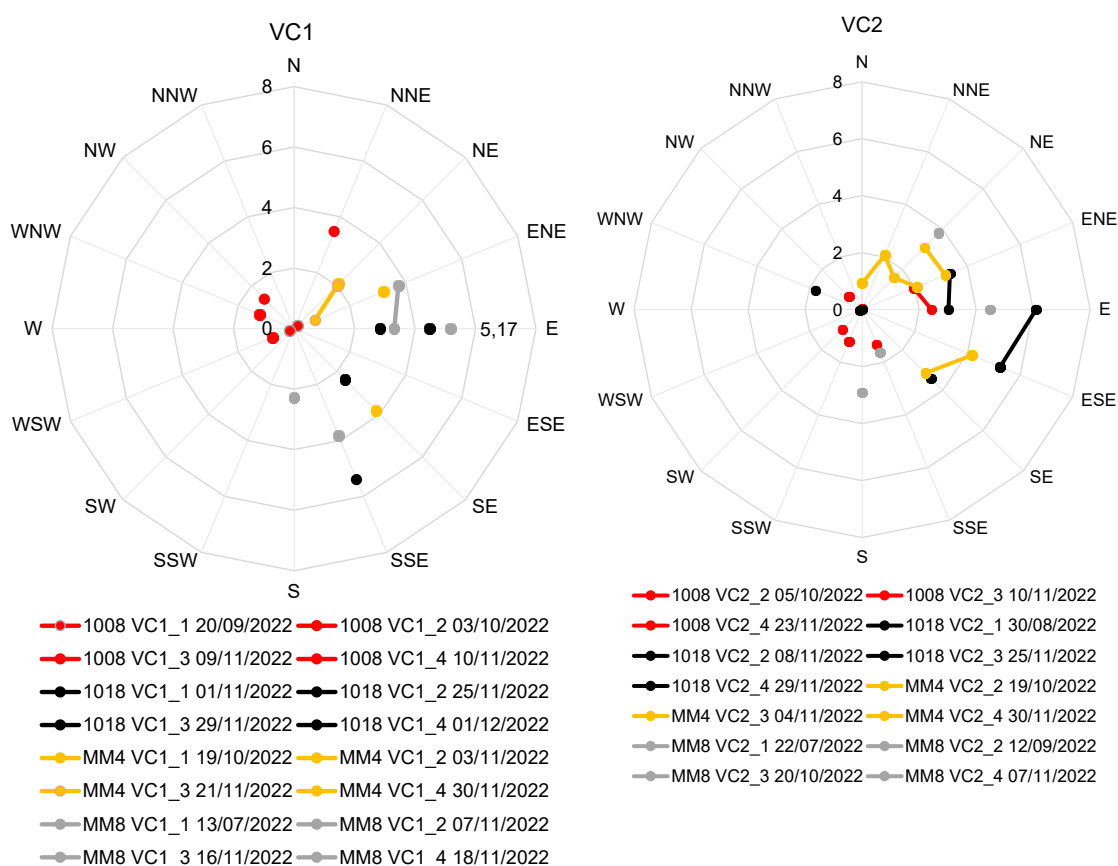
**Gráfico 42** – Taxa de ventilação x Velocidade do vento corrigida, VU

**Fonte:** o próprio autor (2023).

Esse comportamento indica que seriam necessárias mais amostras em cada sala para se verificar padrões mais consistentes, em especial no cenário VU1. A partir dos dados do cenário VU2 divididos por sala mantém-se a interpretação de que há pouca influência da velocidade do vento nas taxas registradas.

Também se investigou a influência da direção do vento nas taxas de ventilação registradas nas diferentes configurações de abertura. Inicia-se a discussão a partir de avaliação de gráficos contendo rosas dos ventos com intensidades e direções registradas pela estação meteorológica durante os ensaios. Como para a infiltração somente  $v_{urb}$  foi capaz de explicar 95% da variância de  $N$ , não se investigou o efeito da direção do vento para este cenário. O **Gráfico 43** seguir apresenta a caracterização do vento durante ensaios nos cenários VC1 e VC2.

**Gráfico 43** – Intensidade [m/s] e direção do vento durante ensaio de VC1 e VC2

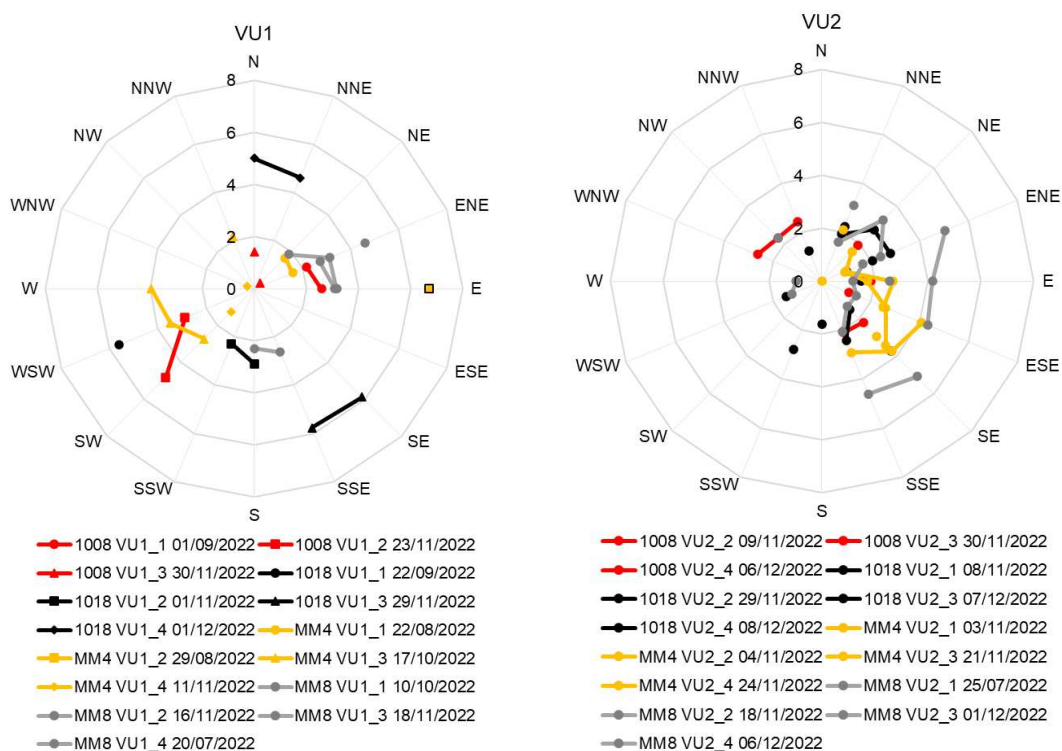


**Fonte:** o próprio autor (2023).

Nota-se que a direção predominante durante os ensaios nas duas configurações foi aproximadamente Leste, o que corresponde a direção de 90°. Em ambos os casos quando se registrou ventos vindos de oeste, foram de baixa intensidade. Destaca-se que para vários dos ensaios, principalmente na configuração VC1, há somente um ponto de dados advindos da estação meteorológica, pois ela coletou dados a cada 15 minutos, intervalo maior que o tempo de decaimento em parte das amostras nessa configuração de abertura.

De forma análoga, **Gráfico 44** a seguir apresenta os registros de intensidade e direção do vento para os cenários com ventilação unilateral.

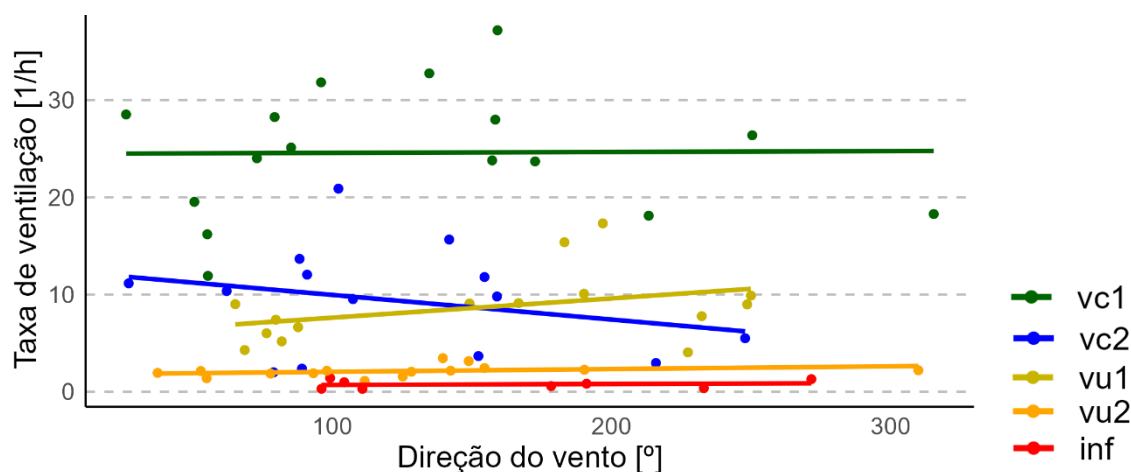
**Gráfico 44** – Intensidade [m/s] e direção do vento durante ensaio de VU1 e VU2



Fonte: o próprio autor (2023).

Pontua-se que nesses cenários, em especial VU2, há muito mais pontos de dados, considerando que o decaimento dura algumas horas. Para VU2, ventos Lestes também foram os predominantes, enquanto para VU1 houve maior variação. O **Gráfico 45** apresenta a dispersão de do número de trocas de ar por hora de acordo com a direção do vento. O valor de 0° indica ventos vindos da direção Norte.

**Gráfico 45** – Taxa de ventilação por direção do vento



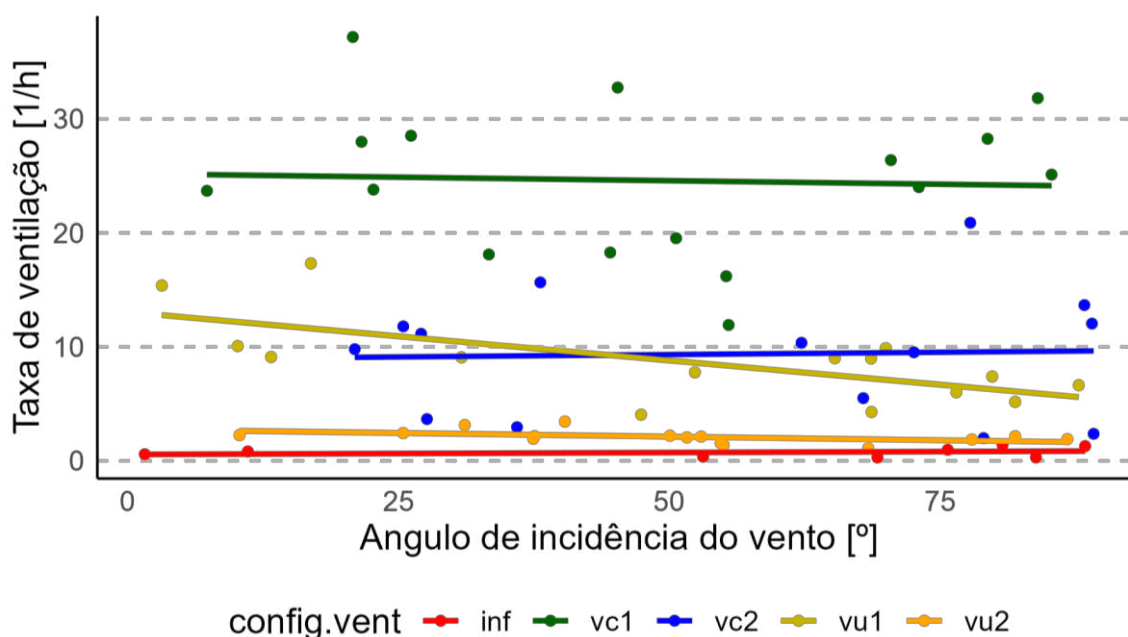
Fonte: o próprio autor (2023).

Para os cenários VC1, VU1 e INF não foi possível identificar tendência de variação na taxa de ventilação de acordo com a direção do vento, e mesmo para os cenários VC2 e VU1 para os quais a regressão linear apresenta inclinação, a grande variância não permite identificar variação estatística significativa. Para todas as configurações ANOVA aplicada à regressão linear retornou p-valor superior à significância. Para VU1 o p-valor foi de 0,16, com  $R^2$  de somente 0,14; para VC2 o p-valor foi de 0,34, e  $R^2$  de somente 0,07.

Outra forma interessante de analisar os mesmos dados, é transformando a direção do vento em ângulo de incidência nas fachadas, cujo valor numérico pode ter mais relevância no fluxo de ar. O **Gráfico 46** apresenta o gráfico de dispersão considerando essa transformação.

Um ponto a se retomar é que a sala MM4 é a única localizada no bloco sul, com suas maiores aberturas para esta fachada, enquanto as demais estão alinhadas no bloco norte. Retoma-se que as esquadrias de todas as salas estão orientadas a 3° da direção Norte-Sul.

**Gráfico 46** – Taxa de ventilação por ângulo de incidência do vento



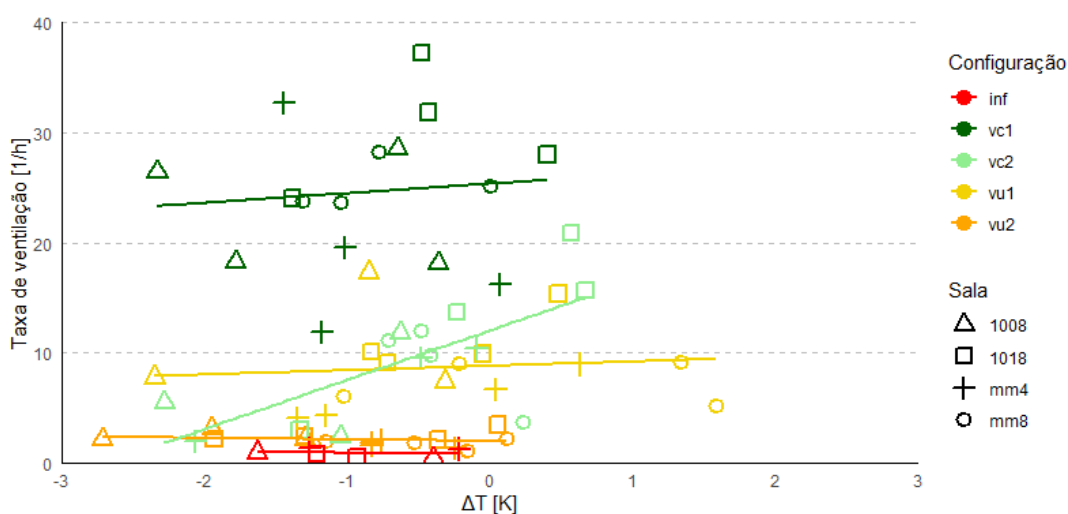
**Fonte:** o próprio autor (2023).

A partir dessa divisão não foi possível identificar variações significativas para os cenários INF, VC1 e VC2. Para VU1 o gráfico sugere que haja efeito da direção do vento, quanto mais perpendiculares à fachada, maiores as taxas registradas. A aplicação de ANOVA a este modelo retorna p-valor de 0,14, o que

sugere diferença estatística a partir de 15% de significância. Considerando baixa precisão dos dados de direção do vento obtidos, limitação previamente abordada, não seria adequado se considerar significância de somente 5% para aceitar a influência do ângulo de incidência como significativa. Apesar de não tão evidente no gráfico, devido à escala, para VU2 também foi possível identificar a influência do parâmetro na taxa de ventilação. Neste caso, o p-valor da ANOVA foi de 0,00375, que indica ter havido maior influência do ângulo de incidência nesses cenários. Neste caso, registrou-se  $R^2$  múltiplo de 0,46.

Na sequência se investigou a influência da variação entre temperatura interna e externa nos resultados obtidos. O **Gráfico 47** pautou essa discussão e aplicação de testes estatísticos; nele se apresenta a dispersão da taxa de ventilação para as diferentes configurações de abertura de acordo com a variação entre temperatura interna e externa.

**Gráfico 47** – Taxa de ventilação x  $\Delta T$



**Fonte:** o próprio autor (2023).

A apreciação visual do gráfico indica correlação entre os parâmetros  $\Delta T$  e  $N$  principalmente para o cenário VC2, tendência confirmada a partir de aplicação de ANOVA para o modelo linear, com p-valor de 0,009 e  $R^2$  múltiplo do ajuste igual a 0,39. Neste cenário se identificou que quando o ambiente externo está mais quente que o interno, o que é desejável em boa parte do ano, em especial durante o verão, há redução das taxas de ventilação, o que sugere que nesses casos o efeito chaminé atua em contraposição à ação dos ventos. Deve-se ter em vista que no cenário VC2 não há significativa distância vertical entre as esquadrias, o que teoricamente reduziria intensidade do efeito chaminé, conforme a equação 1.

Para VC1 não se confirmou a relevância de  $\Delta T$  nos valores de  $N$ , situação que retornou p-valor igual a 0,72; nem para as demais configurações de abertura.

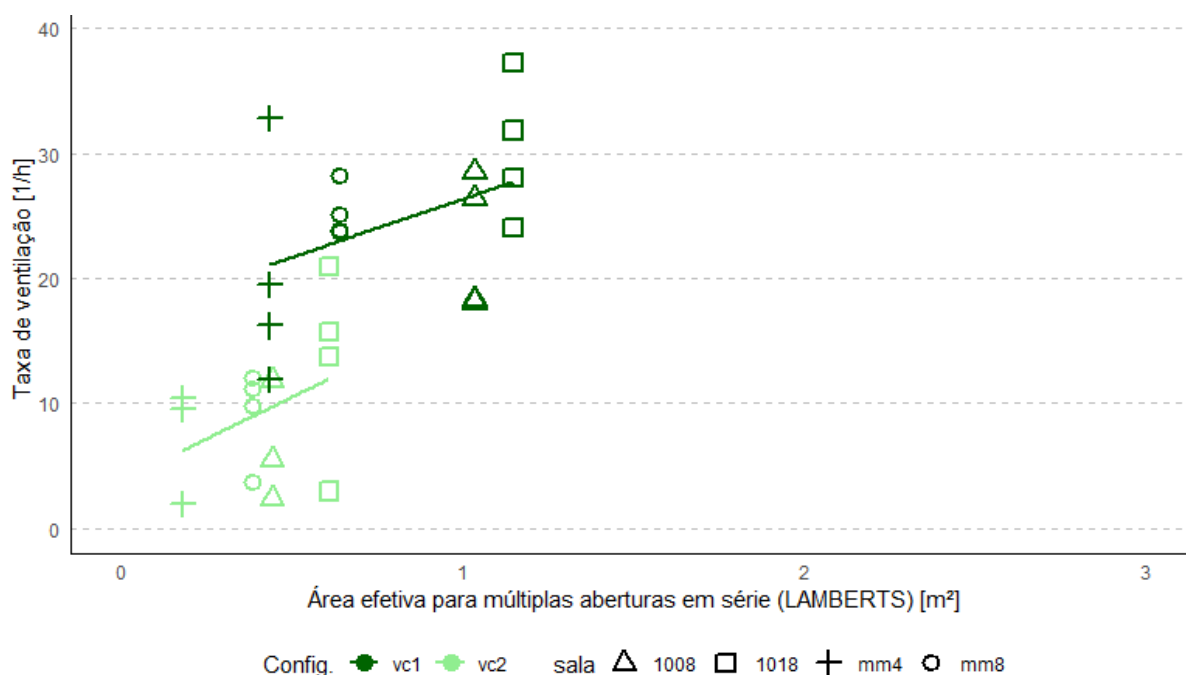
Investigadas as influências dos principais parâmetros referentes às condições do tempo, prossegue-se com investigação acerca da relevância das áreas de abertura.

#### 4.1.8 Influência das Áreas de Abertura na Taxa de Ventilação

Neste item avalia-se a influência das áreas de abertura com base nos valores calculados pelos procedimentos propostos por Lamberts, Dutra e Pereira (2013), e ESFA e Daniels (2018). Por hora, essas áreas são tomadas como aceitas, porém no item 4.4 se discutem as limitações associadas à suas definições. Dividiu-se a apresentação dos resultados entre ventilação cruzada e unilateral, já que são regidos por fenômenos distintos.

O **Gráfico 48** apresenta dispersão entre a taxa de ventilação e a área efetiva para múltiplas aberturas em série ( $A_{effs}$ ), calculadas conforme Lamberts, Dutra e Pereira (2013) para cenários com ventilação cruzada.

**Gráfico 48** – Dispersão de  $N$  [ $h^{-1}$ ] por  $A_{effs}$  [ $m^2$ ] (Lamberts)



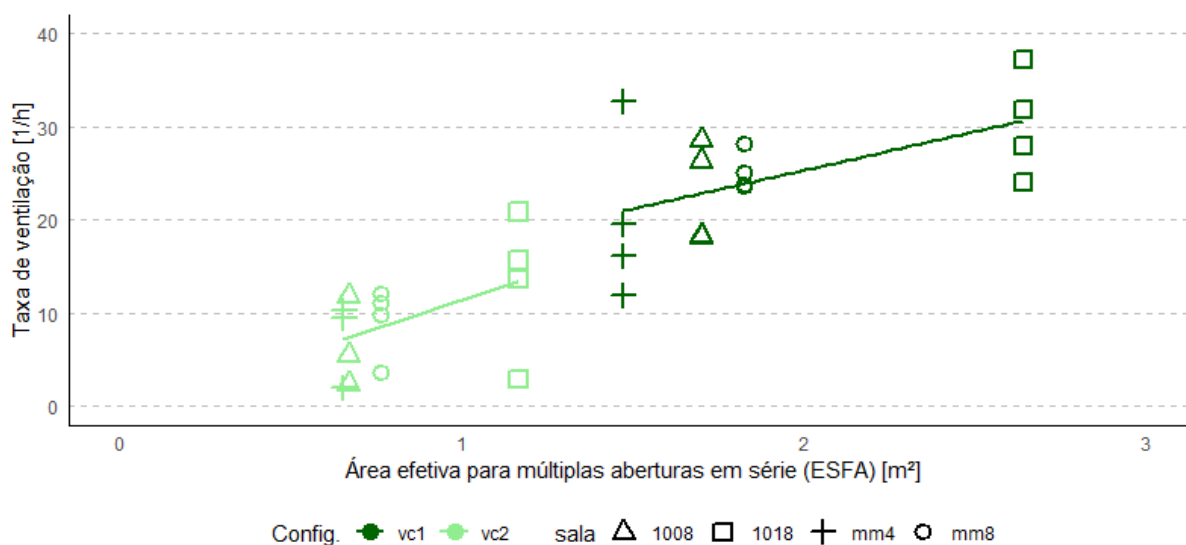
**Fonte:** o próprio autor (2023).

Nota-se que há pouca variação entre as áreas, considerando que se

mantiveram as exatas mesmas configurações de abertura entre as amostras. Portanto, há uma limitação nos dados em relação aos pontos de  $A_{effs}$  para se permitir regressão mais adequada. Entretanto, foi possível identificar a relação entre as áreas de abertura e a taxa de ventilação. A Análise de Variâncias para a regressão linear de  $N$  por  $A_{effs}$  com base em dados agrupados de VC1 e VC2 retornou p-valor da ordem de  $10^{-6}$ , que garante a correlação significativa entre taxa de ventilação e área de abertura ponderada conforme o procedimento de Lamberts. O modelo registrou  $R^2$  múltiplo de 0,51, o que indica que 51% da variação na taxa de ventilação pôde ser explicada pelas diferenças entre  $A_{effs}$ . Destaca-se que apesar de plotadas as regressões lineares por configuração no **Gráfico 48**, a análise estatística se pautou em todas as amostras de ventilação cruzadas agrupadas.

De forma similar, investigou-se a regressão linear com base na  $A_{effs}$  calculada conforme ESFA e Daniels (2018), com objetivo de avaliar se há diferenças entre as estatísticas de ajuste de cada método.

**Gráfico 49** – Dispersão de  $N$  [ $h^{-1}$ ] por  $A_{effs}$  [ $m^2$ ] (ESFA)



**Fonte:** o próprio autor (2023).

A ANOVA aplicada à regressão análoga, baseada nas áreas calculadas conforme ESFA e Daniels (2018), retornou um p-valor da ordem de  $10^{-10}$  e um  $R^2$  de 0,723. Esses valores indicam um melhor ajuste em comparação com o modelo que adotou  $A_{effs}$  conforme calculado por Lamberts. A diferença significativa entre os modelos foi verificada por meio do teste de razão de verossimilhança, por meio da função "lrtest()" do pacote "lmtest" do software R, que resultou em um p-valor da ordem de  $10^{-16}$ . Portanto, pode-se concluir que o modelo baseado nas áreas

calculadas por ESFA e Daniels (2018) apresenta um ajuste significativamente melhor do que o modelo baseado nas áreas calculadas por Lamberts, Dutra e Pereira (2013).

Entretanto, é importante notar que os valores de  $A_{effs}$  calculados pelos diferentes procedimentos foram bastante distintos. Por exemplo, a área ponderada para a sala 1018 na configuração VC1, conforme o procedimento de ESFA e Daniels (2018), foi de aproximadamente 2,6 m<sup>2</sup>, enquanto a área ponderada conforme Lamberts, Dutra e Pereira (2013) foi de aproximadamente 1,3 m<sup>2</sup>.

De forma análoga se comparou o ajuste de modelos lineares para explicar as variações de  $N$  durante os ensaios com tipo de ventilação unilateral (VU1 e VU2) de acordo com a área efetiva  $A_{eff}$  de abertura calculada pelos dois procedimentos. Neste caso, não há ponderação entre áreas de entrada e saída.

Conclusões similares advém dessa avaliação. Com o valor de  $A_{eff}$  calculado conforme Lamberts, Dutra e Pereira (2013), obteve-se reta com ajuste R<sup>2</sup> múltiplo de 0,30, e a partir de ANOVA identificou-se a relação significativa entre  $A_{eff}$  e  $N$ , dado p-valor de 0,001. Enquanto isso, o ajuste R<sup>2</sup> múltiplo com  $A_{eff}$  obtida pelo outro procedimento avaliado foi de 0,59, com p-valor da ordem de 10<sup>-7</sup>. Novamente se atestou pelo teste de razão de verossimilhança que o ajuste do modelo baseado nas áreas calculadas de acordo com ESFA e Daniels (2018) foi mais adequado.

Outro comparação que se investigou, que ofereceu resultados interessantes, foi comparação entre a simples adoção da área livre  $A_f$  para o modelo linear dos cenários com ventilação natural, calculada sem considerar qualquer influência da folha da esquadria. Esperava-se pior ajuste neste cenário, porém se identificou R<sup>2</sup> múltiplo de 0,64, e a ANOVA retornou p-valor de 3,6\*10<sup>-8</sup>. Quando comparado ao modelo que adotou o valor de  $A_{eff}$ , novamente pelo teste de razão de verossimilhança, se confirmou vantagem significativa do ajuste a partir de modelo com  $A_f$ .

Isso motivou a se investigar o ajuste também dos modelos com ventilação cruzada ao se adotar a simples soma das áreas livres do ambiente, sem adoção de coeficientes de descarga ou ponderações. Apesar de também ter se identificado ajuste adequado – considerando se tratar de modelo linear simples, baseado somente em um parâmetro, e o fenômeno da ventilação depender de diversos parâmetros – com R<sup>2</sup> múltiplo de 0,69, e ANOVA demonstrando p-valor da ordem de 10<sup>-9</sup>, neste caso o melhor ajuste continuou sendo aquele obtido com uso

da área  $A_{effs}$  de ESFA e Daniels (2018).

## 4.2 ENSAIOS COM CO<sub>2</sub> METABÓLICO

Nesta seção apresentam-se os resultados dos ensaios que se aproveitaram do CO<sub>2</sub> metabólico como gás traçador para o determinar a taxa de ventilação de uma sala de aula sob condições reais de uso

Inicialmente, no item 4.2.1, apresenta-se visão geral dos ensaios realizados, incluindo gráficos da concentração de CO<sub>2</sub> ao longo do tempo, registros das concentrações de fundo, e considerações para a devida interpretação dos resultados.

Na sequência, em 4.2.2 discute-se o comportamento dos ocupantes durante as medições, com informações sobre o uso das esquadrias e padrões de ocupação identificados.

Em continuidade, na subseção 4.2.3 apresentam-se as taxas de ventilação calculadas a partir do método da concentração estacionária, investigando as diferenças entre cenários com ventilação cruzada e unilateral. Em seguida, no item 4.2.4 avalia-se a influência do posicionamento dos sensores e necessidade ou não do uso de mais de um aparelho por sala.

Por fim, na seção 4.2.5 se abordam as limitações e o potencial do método de medição, tanto como forma de avaliação da qualidade do ar em salas de aula, quanto como no auxílio da compreensão do fenômeno da ventilação natural. Não se avalia neste item a qualidade do ar durante os ensaios especificamente, ponto abordado no item 4.3, em discussão conjunta com resultados obtidos a partir dos ensaios com cilindro.

### 4.2.1 Visão Geral dos Ensaios

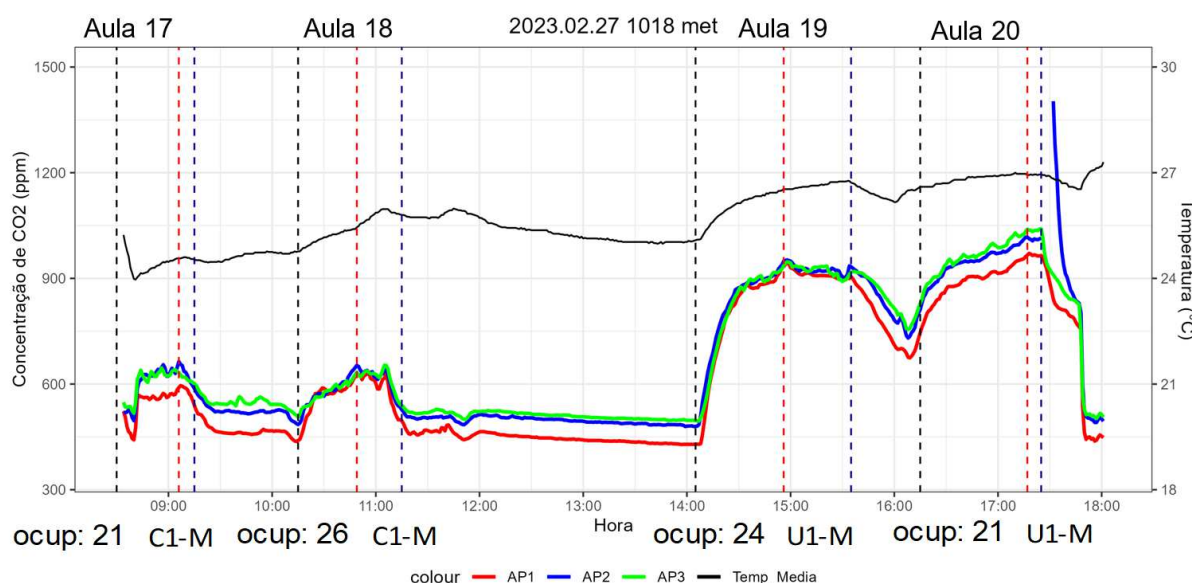
Foi possível coletar dados durante oito dias de medições, num total de 21 aulas, com registros da ocupação, configuração de abertura, temperatura e concentração de CO<sub>2</sub> ao longo do tempo. Os ensaios ocorreram na sala 1018 entre os dias 06 e 28 de fevereiro de 2023.

Neste período a sala foi exclusivamente utilizadas por turmas de graduação dos cursos de Engenharia Civil e Arquitetura. Essa informação foi relevante

para ajustar a taxa média de geração de CO<sub>2</sub> por ocupante, já que há variação de acordo com a idade dos usuários.

Constam no **Apêndice D** gráficos da concentração de CO<sub>2</sub> e temperatura registradas ao longo de cada um dos oito dias de medição. O **Gráfico 50**, referente ao dia 27/02 é aqui apresentado a fim de orientar a interpretação dos resultados.

**Gráfico 50** – Concentração de CO<sub>2</sub> e temperatura ao longo do dia 27/02/2023



**Fonte:** o próprio autor (2023).

As linhas pontilhadas verticais pretas representam o horário de início de ocupação das salas, e as azuis o fim. Neste dia foram medidas quatro aulas, duas no período da manhã, e duas no período da tarde. As linhas vermelhas pontilhadas indicam o instante em que se atingiu o 95º percentil da concentração de CO<sub>2</sub> em cada aula.

As três linhas sólidas representam os três sensores utilizados nos ensaios. A posição dos sensores durante esses ensaios foi sempre a mesma, AP1 a 2 metros das esquadrias máximo-ar da fachada principal, AP2 no centro da sala e AP3 a 2 metros das esquadrias basculantes duplas do corredor, de forma análoga ao apresentado na **Figura 34**. Consta no **Gráfico 50** e no **Apêndice D** registro da ocupação e das configurações de abertura, em forma de legenda. O significado das siglas é apresentado mais à frente na **Tabela 11**.

Nota-se claramente a diferença entre as concentrações atingidas em cenário com ventilação cruzada, caso das aulas da manhã deste dia que se adota de exemplo; e com ventilação unilateral, como as duas aulas da tarde.

Embora a ocupação, e conseqüentemente a o valor adotado para de a taxa de emissão de CO<sub>2</sub> no recinto  $G$  [L/s], tenham sido similares, durante a aula 20, quando estavam 7 das 8 esquadrias máximo-ar abertas e as demais fechadas, se atingiu concentração estacionária de aproximadamente 1000 ppm, correspondente a  $\Delta C(t_{95})$  de cerca de 530 ppm. Enquanto isso, na aula 18, com ventilação cruzada, com porta e esquadrias máximo-ar abertas, o valor de  $C_{est}$  médio entre os sensores foi de 635 ppm, ou, descontado o  $C_{bg}$  de 471 ppm registrado,  $\Delta C(t_{95})$  igual a somente 161 ppm.

Foi a partir da aplicação desses parâmetros,  $C_{est}$ ,  $C_{bg}$  e  $G$ , que se calculou o fluxo de ar que passa pelo ambiente, a partir da equação 21, que basicamente estabelece relação inversa entre fluxo de ar e variação entre concentração de fundo e concentração estacionária, e direta com a geração metabólica. Para o cálculo da taxa de ventilação em número de trocas de ar por hora, também o volume do recinto também é um dos parâmetros considerados.

Portanto, mesmo antes de realizar os cálculos, a simples apreciação do gráfico de  $C(t)$  permite identificar os períodos em que se registrou baixas taxas de ventilação. Como se discute em 4.3, algumas referências inclusive estabelecem concentrações de CO<sub>2</sub> máximas durante o período ocupado como critério para avaliar a qualidade do ar interno.

Embora o **Gráfico 50** pareça sugerir que o valor registrado pelo AP1 tenha sido consistentemente mais baixo em relação aos demais, o que se explicaria pela proximidade das maiores áreas de abertura, trata-se de diferença na calibração entre os sensores. O valor médio de  $C_{bg}$  registrados pelos aparelhos AP1, AP2 e AP3 ao longo dos ensaios foi de, respectivamente, 441 ppm, 491 ppm e 499 ppm.

Ou seja, a diferença de cerca de 50 ppm entre o sensor AP1 e os demais aparelhos visível no **Gráfico 50** não se deu devido a sua proximidade das esquadrias, e não indica problema recorrente com a uniformidade da concentração de CO<sub>2</sub> durante as aulas.

Adotaram-se três procedimentos para a avaliação da precisão e validade das taxas de ventilação calculadas. Um deles foi justamente a avaliação da uniformidade de  $\Delta C(t_{95})$  entre os sensores no instante em que se atingiu a concentração estacionária,  $t_{95}$ . Outro critério foi verificar se houve tempo suficiente entre o início de cada aula e o  $t_{95}$  para que se atinja uma concentração de fato

estacionária, intervalo que é inversamente proporcional à taxa de ventilação calculada. Por fim, a precisão das medições foi estimada com base na precisão do sensor reportada pelo fabricante; essas análises estão detalhadas no item 4.2.5.

Com base no mesmo gráfico, chama-se atenção para um ponto importante ao analisar os dados, para evitar erros nos resultados. Nota-se que no fim da última aula houve grande pico da concentração de CO<sub>2</sub>, que neste caso interpretou-se que tenha ocorrido exatamente quando os alunos deixam o recinto. Neste caso, algum dos ocupantes expirou na direção dos sensores, o que, considerando que exalamos ar a cerca de 40000 ppm, isso afeta os dados por vários minutos. Neste caso, isso ocorreu após a concentração estacionária ter sido atingida, portanto não houve empecilho para análise dos dados.

Com os sensores posicionados na altura de respiração dos ocupantes, mesmo com a orientação para não respirarem diretamente nos aparelhos, é possível que isso ocorra de forma não intencional. Por isso é crucial avaliar cada série de dados de C(t), já que caso não se removesse o período com dados poluídos, grande erro seria cometido no cálculo da taxa de ventilação ao se adotar o 95º percentil das concentrações registradas durante o período de ocupação.

#### 4.2.2 Comportamento dos Ocupantes

Para esse tipo de experimento, é importante levantar informações sobre os padrões de uso do ambiente. Além da ocupação de cada aula, foi registrada a partir de inspeção visual a configuração em que as esquadrias foram mantidas durante as aulas. A **Tabela 11** a seguir ilustra esquema de todas as configurações registradas ao longo das aulas, e o número de aulas em que cada uma se repetiu. Na tabela, aberturas sombreadas em verde significam esquadrias abertas; em vermelho, fechadas.

Ressalta-se que, como se desejava também avaliar o comportamento dos ocupantes em relação ao uso das janelas, não houve qualquer interferência proposital do autor na escolha da configuração adotada pelos ocupantes. A única orientação dada aos docentes e discentes foi evitar exalar na direção dos sensores.

Uma descoberta importante é o fato de que em nenhuma das 21 aulas registradas as janelas basculantes foram abertas, o que demonstra uma incompatibilidade entre o projeto arquitetônico e o uso real do espaço. As esquadrias

basculantes do corredor tem centro a 2,5 metros do nível do piso, e as da fachada a aproximadamente 2,25 m, com variações de poucos centímetros entre as salas. Em ambos os casos a única forma de operá-las é a partir de alavancas metálicas, ilustradas na **Figura 26**. No corredor as alavancas estão a cerca de 2,2 metros do piso, e na fachada a aproximadamente 1,7 m.

**Tabela 11** – Configurações de abertura registradas durante aulas

Configurações de abertura registradas					Nº de aulas
Cruzada					
C1-M					10
C2-M					1
C3-M					1
C4-M					1
Unilateral					Nº de aulas
U1-M					4
U2-M					2
U3-M					2

Fonte: o próprio autor (2023).

A condição de conservação das alavancas é ruim, e é evidente o

desgaste da tinta à base de zarcão, que atua como camada protetiva à oxidação. Além do problema de acessibilidade derivado da altura das alavancas, que em muitos casos inviabiliza que pessoas mais baixas consigam operá-las sem subir nas cadeiras, a oxidação e falta de manutenção deixa as alavancas emperradas.

Durante os ensaios com cilindro foi necessário operar dezenas de vezes essas esquadrias, e em muitos casos foi necessário abrir as esquadrias puxando-as diretamente pela folha para assegurar o ângulo máximo de abertura. É provável que esses empecilhos tenham contribuído significativamente para o fato dessas esquadrias simplesmente não terem sido operadas.

Outra possível explicação, complementar, é o fato de que ao se abrir as esquadrias voltadas para o corredor, prejudica-se o isolamento acústico da sala, e são comuns reclamações de ruídos advindos de alunos transitando no edifício.

Foi possível identificar outro padrão de comportamento relativo ao uso das esquadrias do recinto. Verificou-se que nas aulas de um mesmo docente, na maioria dos casos se repetiu o mesmo cenário de ventilação. Alguns docentes sistematicamente fecham a porta da sala após o ingresso dos estudantes, dando prioridade ao conforto acústico, enquanto outros sempre que possível mantêm portas e janelas abertas, o que, nas condições ambientais em que ocorreram as medições – dias de verão – acaba por favorecer qualidade do ar e conforto térmico.

Isso indica que é o docente o principal responsável pela escolha da configuração de uso das esquadrias da sala, e devem ser eles, portanto, o público-alvo preferencial de eventuais campanhas para orientação de abertura de janelas das salas de aula, como as que ocorreram durante a pandemia de COVID-19. O que não significa que não seja importante conscientizar a população como um todo em relação à relevância da ventilação para garantir qualidade do ar interno adequada.

Somente durante duas das aulas todas as janelas da fachada ficaram fechadas, equivalente à configuração U3-M apresentada na **Tabela 11**. Foram aulas consecutivas durante um período de chuva, em que foi necessário fechar as esquadrias para não molhar o recinto. Neste caso, somente a porta do corredor estava aberta. Não houve nenhum registro de aula em que todas as esquadrias estivessem fechadas.

Agrupando as aulas por “tipo” de ventilação, registraram-se 13 aulas com ventilação cruzada, e 8 com ventilação unilateral, porém seriam necessários mais registros para permitir avaliação aprofundada acerca de quais são as configurações

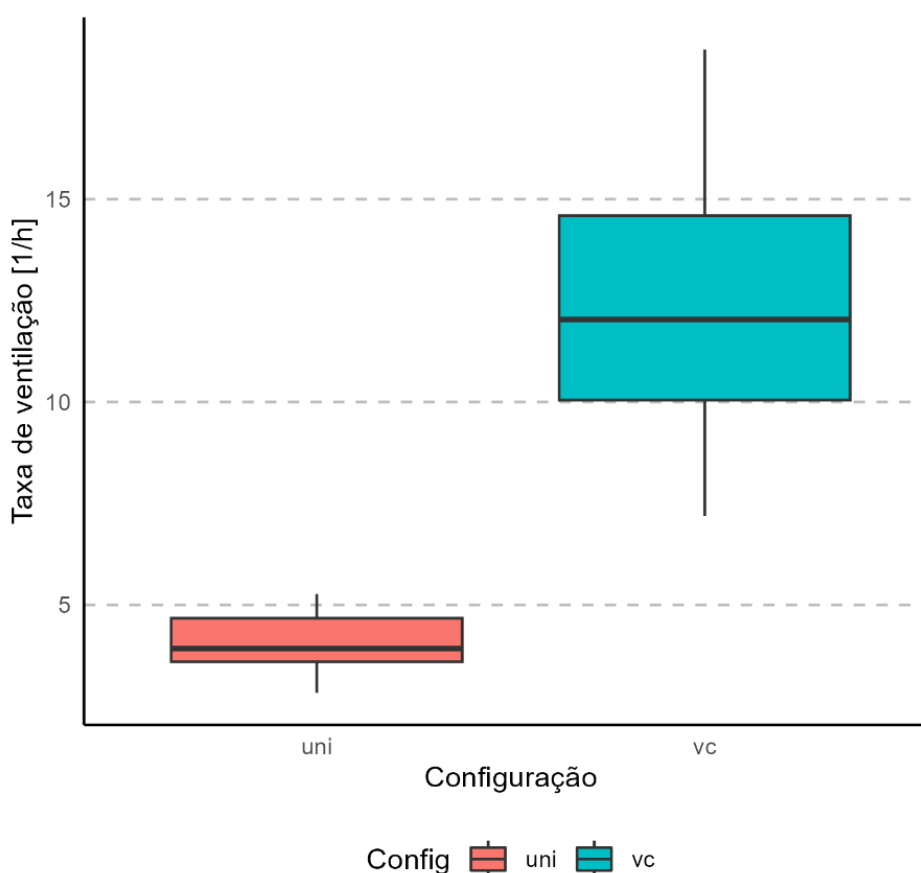
mais adotadas durante as aulas. Como todos os ensaios ocorreram na mesma sala, e as aulas seguem cronograma semanal, foram tomadas medições durante aulas ministradas somente por seis docentes, número amostral bastante limitado para se pretender conclusões acerca de padrões comportamentais entre adoção de ventilação cruzada ou unilateral. Entretanto, mantém-se as considerações acerca do não uso das esquadrias basculantes, que de fato quase não são operadas no edifício em questão.

Sendo assim, prossegue-se com a apresentação das taxas calculadas pelo método da concentração estacionária.

#### 4.2.3 Taxa de Ventilação Durante as Aulas

Ainda que haja variações das áreas de abertura dentro dos chamados tipos de ventilação, como sugere a **Tabela 11**, de início investiga-se a taxa calculada para esses grupos a partir do **Gráfico 51** a seguir. Ressalta-se que as implicações em relação a qualidade do ar são discutidas no item 4.3.

**Gráfico 51** – Box-plot  $N_{95}$  [ $h^{-1}$ ] por tipo de ventilação



**Fonte:** o próprio autor (2023).

Nota-se grande diferença entre os valores registrados entre os tipos de ventilação. Enquanto nas aulas com ventilação cruzada as taxas registradas estiveram entre  $7,2 \text{ h}^{-1}$  e  $18,7 \text{ h}^{-1}$ , o maior valor registrado nos cenários com ventilação unilateral foi de  $5,3 \text{ h}^{-1}$ , com média de  $4,1$ . Entre os grupos o coeficiente de variação (CV) foi similar, de  $0,19$  para VU e  $0,26$  para VC. A **Tabela 12** a seguir apresenta as principais estatísticas descritivas de  $N_{95}$  nesses grupos.

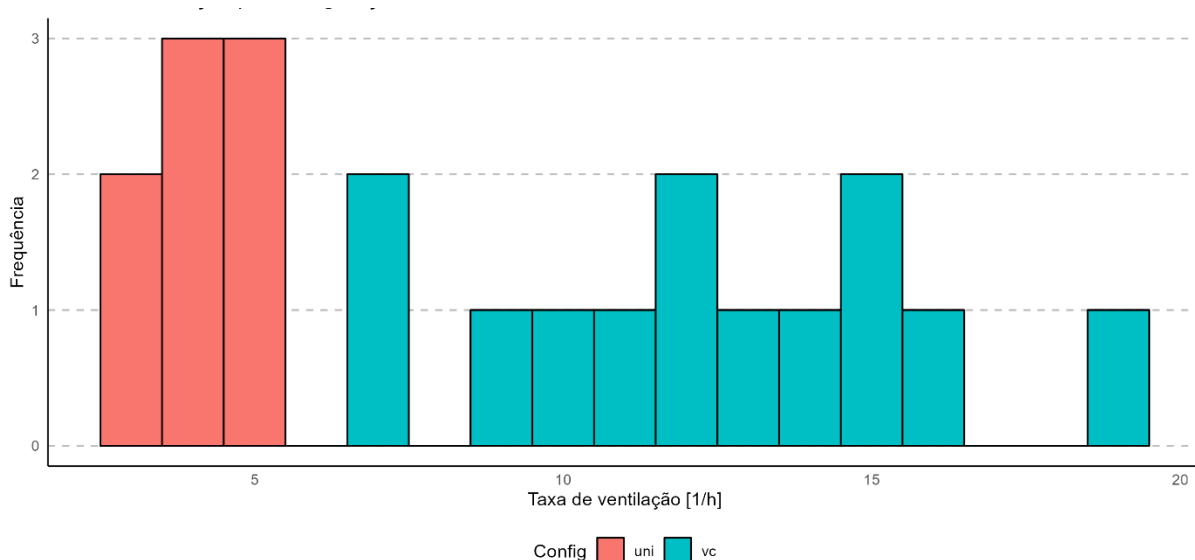
**Tabela 12** – Estatísticas descritivas de  $N_{95} [\text{h}^{-1}]$  por tipo de ventilação

Tipo	Mediana	Média	Mínimo	Máximo	Desvio padrão	CV
VU	3,9	4,1	2,8	5,3	0,8	0,19
VC	12,1	12,3	7,2	18,7	3,3	0,26
TODOS	9,5	9,2	2,8	18,7	4,8	0,52

Fonte: o próprio autor (2023).

A evidente diferença estatística entre os cenários foi garantida por p-valor da ordem de  $10^{-11}$  a partir do teste de Kruskal Wallis. O histograma de frequências absolutas plotado no **Gráfico 52** a partir desses dados deixa evidente que em nenhuma aula com ventilação unilateral se atingiu taxa equivalente mesmo aos casos com ventilação cruzada que registraram taxas mais baixas, além apresentar o número de amostras registradas em cada tipo considerado.

**Gráfico 52** – Histograma da taxa de ventilação  $[\text{h}^{-1}]$  para VC e VU

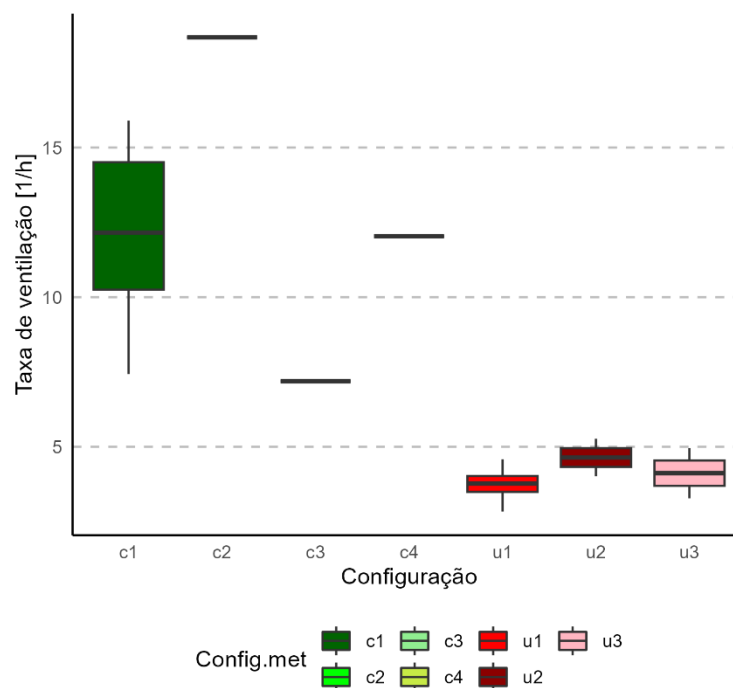


Fonte: o próprio autor (2023).

De forma análoga ao procedimento de análise dos dados advindos dos ensaios com cilindro, dividiu-se cada aula para a qual se coletou dados de acordo

com a configuração de abertura registrada, conforme a **Tabela 11**. O **Gráfico 53** apresenta as taxas agrupadas a partir desse critério, que se pretende mais homogêneo.

**Gráfico 53** - Taxa de ventilação por configuração de abertura registrada



**Fonte:** o próprio autor (2023).

Como para as configurações C2, C3 E C4 houve somente um ensaio, não foi possível plotar box-plot, estando o registro apresentado a partir do único ponto disponível. Para as configurações U2 e U3 houve somente dois registros, e somente para C1 e U1 houve número amostral maior, respectivamente de 10 e 4 aulas. Não se intentam comparações com os grupos pontuais, já que não seria possível fazer qualquer análise estatística adequada. As estatísticas descritivas de  $N_{95}$  médias por configuração de abertura encontram-se na **Tabela 13** a seguir.

**Tabela 13** – Estatísticas descritivas de  $N_{95}$  [ $h^{-1}$ ] por configuração de abertura

Aulas	Tipo	Mediana	Média	Mínimo	Máximo	Desvio padrão	CV
10	C1-M	12,2	12,2	7,4	15,9	2,8	0,23
1	C2-M	18,7	18,7	18,7	18,7	-	-
1	C3-M	7,2	7,2	7,2	7,2	-	-
1	C4-M	12,1	12,1	12,1	12,1	-	-
4	U1-M	3,8	3,7	2,8	4,6	0,7	0,19
2	U2-M	4,6	4,6	4,0	5,3	0,9	0,19
2	U3-M	4,1	4,1	3,3	5,0	1,2	0,29

**Fonte:** o próprio autor (2023).

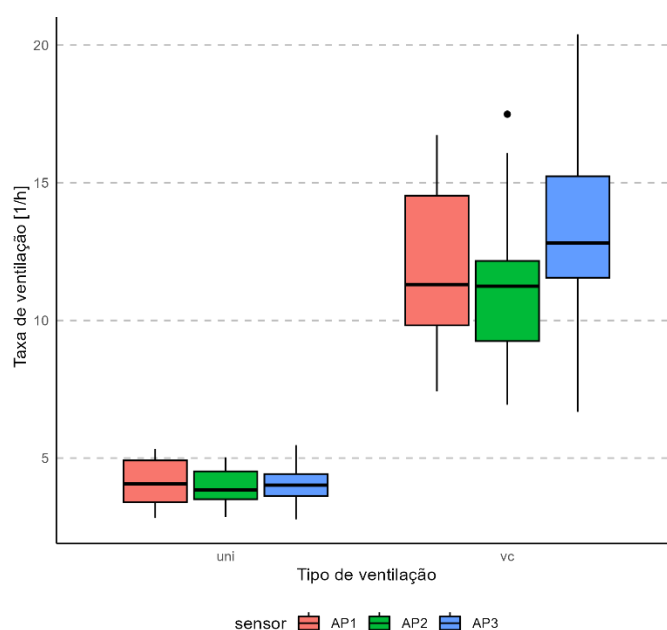
Ao se melhorar as condições de uniformidade entre as amostras, no caso da configuração C1-M verificou-se pequena redução melhora do CV quando em relação a todos os ensaios de ventilação cruzada, de 0,26 agrupado por tipo para 0,23 agrupado por configuração. Para a configuração U1-M o coeficiente de variação se manteve em 0,19, igual ao registrado para as configurações agrupadas.

As implicações dessas taxas de ventilação em relação à qualidade do ar das salas de aula são investigadas

#### 4.2.4 Influência da Posição dos Sensores

O **Gráfico 54** a seguir apresenta as taxas calculadas a partir dos três diferentes sensores, que foram mantidos nas mesmas posições em todas as aulas, retomando divisão entre ventilação cruzada e unilateral.

**Gráfico 54** –  $N_{95}$  [ $h^{-1}$ ] por sensor e tipo de ventilação



**Fonte:** o próprio autor (2023).

O teste de Friedman aplicado às taxas calculadas entre cada sensor retornou p-valor de 0,129, o que não confirma a 5% de significância a aparente variação entre o sensor AP3 e os demais, em especial no cenário de ventilação cruzada. Para teste aplicado somente às amostras desses cenários o teste de Friedman retornou p-valor de 0,292, que também não permite descartar a hipótese nula de igualdade entre as medianas.

Como o teste não foi conclusivo, a **Tabela 14** a apresenta as principais

estatísticas descritivas relacionadas ao **Gráfico 54** para pautar investigação mais detalhada acerca das variações entre aparelhos.

**Tabela 14** – Estatísticas descritivas de  $N_{95}$  [ $h^{-1}$ ] por sensor e tipo de ventilação

Estatística descritiva	Unilateral (U1, U2, U3)			Cruzada (C1, C2, C3, C4)		
	AP1	AP2	AP3	AP1	AP2	AP3
<b>Mediana</b>	4,1	3,8	4,0	11,3	11,2	12,8
<b>Média</b>	4,1	4,0	4,1	11,8	11,4	12,8
<b>Máximo</b>	5,3	5,0	5,5	16,7	17,5	20,4
<b>Mínimo</b>	2,8	2,9	2,8	7,4	6,9	6,7
<b>Desvio padrão</b>	0,94	0,78	0,89	3,05	3,26	3,68
<b>CV</b>	0,23	0,20	0,22	0,26	0,29	0,29

Fonte: o próprio autor (2023).

A média de  $N_{95}$  calculada para as aulas com ventilação unilateral variou entre 4,0 e 4,1 entre os sensores, que também registraram valores mínimos e máximos similares. Com dados das oito aulas com ventilação natural, o valor de  $N_{95}$  calculado entre cada sensor e a média dos três variou somente entre -2% para o AP2, no centro da sala, até 2%, para o AP1, mais próximo da fachada.

Entretanto, o **Gráfico 54** e a **Tabela 14** foram elaborados a partir de dados agrupados, de 8 aulas para ventilação unilateral, e 13 para cruzada. Convém investigar a variação entre a taxa medida pelos sensores em cada amostra de forma individual.

Para isso, se investigou as diferenças registradas entre o valor de  $N_{95}$  dos sensores em cada aula. Se contabilizou a diferença entre a maior e menor taxa de calculada de cada amostra. Em média, a variação foi de 10% para as aulas com ventilação unilateral, com máxima variação de 25% em uma das amostras.

Enquanto isso, para as aulas com ventilação cruzada, a média de  $N_{95}$  calculada variou entre 11,4  $h^{-1}$  para ao AP2, no centro, até 12,8  $h^{-1}$  para o AP3, próximo ao corredor. Em termos proporcionais, isso equivale a entre -5% para o AP2  $h^{-1}$  até 6% para o AP3  $h^{-1}$ , considerando média dos três aparelhos. Ao se considerar somente a maior e menor taxa de cada aula, houve variação média de 19%, e a maior diferença registrada numa única aula chegou a 35%.

Isso indica que em estudos onde se necessita conhecer com precisão a taxa de ventilação, em especial pare recintos com ventilação cruzada, ou aqueles em que se esperam altas taxas de renovação de ar, o mais recomendado é utilizar múltiplos sensores no recinto.

Enquanto isso, para ambientes somente com ventilação unilateral, ainda que o uso de múltiplos sensores aumente a confiança nos resultados obtidos, com a repetição dos ensaios – algo fundamental para avaliar adequadamente as condições de ventilação de ambientes internos, em especial aqueles com ventilação natural – mesmo o valor obtido a partir de somente um sensor pode ser adequado.

Apesar das diferenças registradas entre sensores, mesmo em ambientes com ventilação cruzada, se o objetivo de se medir a concentração de CO<sub>2</sub> ao longo do tempo for somente o de avaliar a qualidade do ar interno, sem se preocupar com investigar o fenômeno da ventilação natural propriamente dito, utilizar somente um sensor parece adequado, desde que se colem dados por longos períodos. Em instituições de ensino, por exemplo, caso haja mais de um aparelho disponível, faria sentido coletar dados de mais salas de aula, pois permitira coleta de maior volume de dados.

Neste estudo todos os sensores estavam situados distantes das paredes, o que é um ponto importante a se levantar, uma vez que posicionar os sensores afixados a elas pode ser bastante conveniente. Alguns aparelhos destinados à medição da qualidade do ar interno (o que inclui, mas não se restringe a sensores NDIR de CO<sub>2</sub>) inclusive contam com suportes para serem assim utilizados.

Durante as medidas realizadas neste trabalho, foi necessária intervenção diária do autor para posicionar os sensores na sala de aula apoiados sobre tripé e orientar os alunos a não expirarem diretamente em sua direção, além de retirar os sensores do recinto para medir a concentração de fundo com melhor precisão.

Esse procedimento se justificou, para melhorar a precisão dos dados obtidos. O objetivo das medições foi para além de somente avaliar a qualidade do ar interno, buscou-se estudar o fenômeno da ventilação natural de forma mais ampla, avaliando efeito das condições do tempo, características geométricas e configurações de abertura. Porém, não seria viável simplesmente deixar os equipamentos sobre tripé no centro de salas de aula para avaliar a qualidade do ar interno durante seu uso cotidiano, já que se constituíam em empecilho para os usuários. Neste contexto, afixar os sensores nas paredes é muito mais viável.

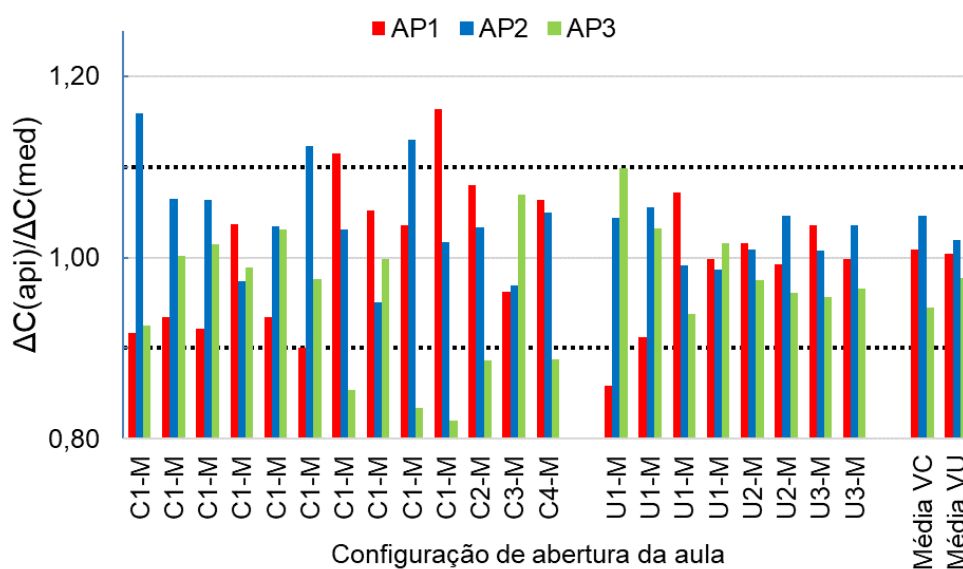
Portanto, ainda é necessário investigar se há boa correlação entre os resultados obtidos a partir de sensores presos às paredes do recinto com sensores no centro, em especial para recintos com ventilação cruzada e grandes áreas de

abertura. Nesses cenários as dimensões e o posicionamento das esquadrias pode influenciar o comportamento do fluxo de ar, criando zonas mortas. Nesses casos mesmo as diferentes condições do tempo exercem influência em como o ar se movimenta nos ambientes internos, o que foi investigado na próxima subseção.

#### 4.2.5 Limitações e Potencial do Monitoramento Contínuo de CO<sub>2</sub>

O **Gráfico 55** a seguir apresenta para cada aula os resultados obtidos na etapa de avaliação da uniformidade da concentração registrada entre os aparelhos no instante em que se atingiu a concentração estacionária, conforme procedimento descrito no item 3.5.2. As aulas estão divididas conforme o tipo de ventilação adotado pelos ocupantes, ou seja, se cruzada ou unilateral.

**Gráfico 55** – Avaliação da uniformidade da concentração entre aparelhos



**Fonte:** o próprio autor (2023).

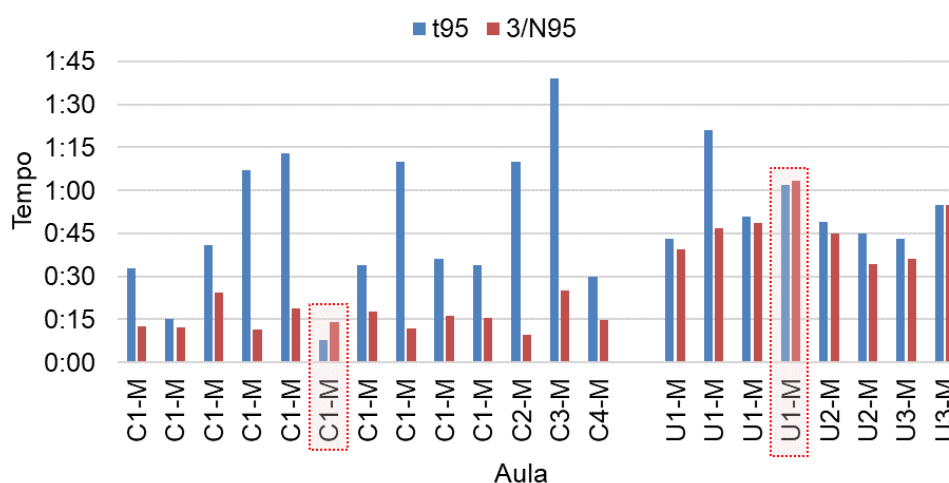
O critério proposto pela ASTM E741 para avaliação da uniformidade indica variação máxima de 10% entre os valores de  $\Delta C(t)$  para uma precisão desejada de 10% nos resultados. Das 8 aulas com ventilação unilateral, não se atendeu ao critério em somente uma, em que o sensor AP1 registrou  $\Delta C_{95}$  com valor de 86% da média entre os  $\Delta C_{95}$  registrados pelos três, ou seja, variação de 14%. Isso indica que há boa confiança nos valores registrados nesses cenários.

Enquanto isso, das 13 aulas em que os ocupantes adotaram configurações com ventilação cruzada, somente em 6 se verificou uniformidade dentro dos limites de 10%. Em outras 4 aulas a variação ficou entre 10% e 15%, e em 3 entre

15% e 18%. Isso não significa que os valores registrados não têm significado, porém indica que a precisão esperada do valor medido nesses cenários seja menor. Para melhor estabelecer qual a confiança que se deve ter nos resultados obtidos, prosseguiu-se com as verificações propostas em 3.5.2.

O próximo critério avaliado foi o equilíbrio da concentração adotada como estacionária,  $C_{est}$ , conforme procedimento proposto por Persily (1997). De acordo com o autor, leva período equivalente a três trocas de ar após o início de um período com ocupação constante num recinto para que se atinja a concentração de equilíbrio. Portanto, verificou-se se o valor de  $t_{95}$  de cada aula foi maior que a razão  $3/N_{95}$ . O **Gráfico 56** a seguir apresenta os resultados obtidos para essa análise em cada uma das 21 aulas que ocorreram medições.

**Gráfico 56** – Verificação do equilíbrio da concentração



**Fonte:** o próprio autor (2023).

Não se atendeu a esse critério proposto por Persily (1997) em somente em duas aulas, uma com cenário de ventilação cruzada, outra com ventilação unilateral. Foram as aulas 11 e 20. No segundo caso, o tempo decorrido foi muito próximo ao critério estabelecido.

O atendimento a esse critério é mais complexo para recintos com baixas taxas de ventilação, já que o valor de  $3/N_{95}$  pode corresponder a algumas horas. Como as taxas obtidas na sala 1018 foram relativamente altas, atender ao critério não se mostrou problemático, em especial nos cenários com ventilação cruzada, uma vez que em poucos minutos ocorrem as três trocas de ar. Além disso, mesmo os resultados que não atendem a esse critério podem ser aproveitados. Persily (1997) indica que nessas situações o valor da taxa de ventilação calculada a partir da

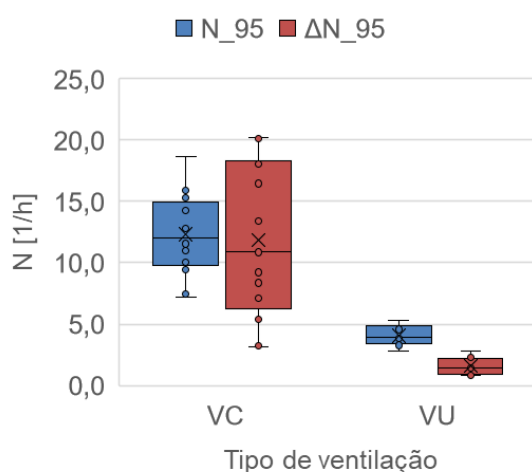
concentração que não se atestou estacionária pode ser interpretado como um teto, indicando que a taxa real de ventilação foi menor que a calculada.

Prosseguiu-se com avaliação da incerteza associada ao cálculo, com base na equação 24, que calcula a precisão  $\Delta Q$  [L/s] do fluxo de ar  $Q_{95}$  [L/s] obtido a partir da equação 21. É necessário estimar a precisão  $\Delta G$  [L/s] da geração metabólica de CO<sub>2</sub> pelos ocupantes, além da precisão  $\Delta C$  [ppm] do sensor utilizado, além dos já abordados valores de  $G$  [L/s],  $\Delta C_{95}$  [ppm] e do próprio fluxo  $Q_{95}$  [L/s].

O valor de geração por pessoa  $G_p$  adotado neste estudo foi de 0,00452 L/s de CO<sub>2</sub>, considerando ocupantes entre 16 e 20 anos, 50% de cada gênero (PERSILY e DE JONGE, 2017). Kabirikopaei e Lau (2020) discutem que ao se adotar valor corrigido de acordo com as características dos ocupantes (como idade e gênero), reduz-se a incerteza associada a este parâmetro. De acordo com os autores, dentre os parâmetros considerados no cálculo da taxa de ventilação ( $C_{est}$ ,  $C_{bg}$ ,  $G_p$  e  $V$ ), vide equações 21 e 22, a determinação de  $G_p$  é a que menos contribui com incertezas, caso haja registro adequado dos padrões de ocupação. A análise da incerteza desenvolvida pelos autores revela que o maior erro advém da determinação da concentração estacionária ( $C_{est}$ ), tanto devido a problemas de uniformidade, quando devido a precisão dos sensores utilizados.

O **Gráfico 57** a seguir apresenta os resultados obtidos ao se adotar  $\Delta G$  equivalente a 10% do valor de  $G$ , ou seja, 0,000452 L/s por pessoa, o que corresponde a incerteza de 0,1 MET. De início adotou-se a precisão fornecida pelo fabricante do aparelho de medição como  $\Delta C$ , de 50 ppm + 0,05\* $C_{est}$ , ou seja, 50 ppm + 5%.

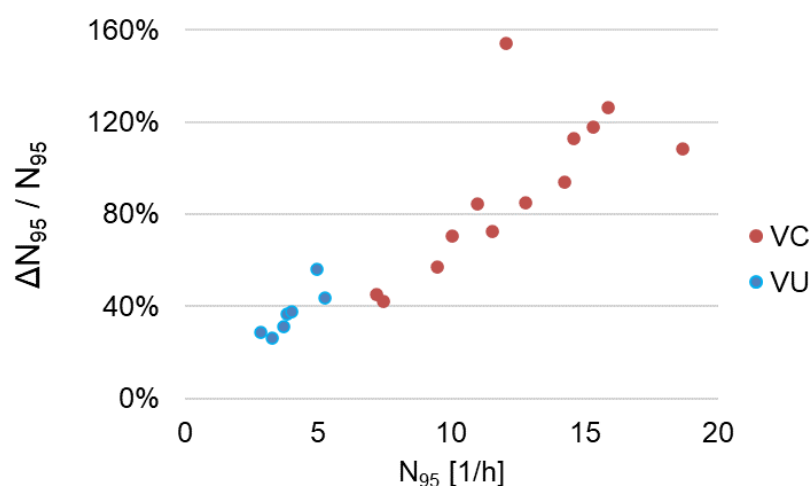
**Gráfico 57** – Box-plot da taxa de ventilação e sua incerteza calculada



Fonte: o próprio autor (2023).

Ao se adotar esses parâmetros, registra-se incerteza elevada, em especial nos cenários de ventilação cruzada, com erro relativo médio de 90%, com valor máximo de 154%. Enquanto isso, o erro relativo médio das salas em que se registrou ventilação unilateral foi de 38%, com valor máximo de 56%. O **Gráfico 58** a seguir apresenta dispersão do erro relativo ( $\Delta N_{95}/N_{95}$ ) em função da taxa de ventilação registrada em cada aula.

**Gráfico 58** – Erro relativo dos ensaios com CO<sub>2</sub> metabólico



**Fonte:** o próprio autor (2023).

Fica claro que o erro relativo calculado é proporcional às taxas de ventilação registradas, uma vez que isso implica em valores de  $\Delta C_{95}$  mais próximos das concentrações de fundo, e conseqüentemente maior valor de  $Q_{95}$ . Ainda que em primeiro momento essa avaliação sugira baixa precisão dos resultados, é preciso considerar que autores como Persily (1997) e Martin et al. (2017) indicam que é comum que a acurácia fornecida pelos fabricantes não seja adequada para o cálculo da precisão das medições a partir da equação 24, pois pode superestimar a incerteza associada à medição, como foi o caso.

Martin et al. (2017) investigaram sensores NDIR modelo K30 da marca Senseair, com acurácia reportada pelo fabricante de 30 ppm  $\pm$  3% da leitura. Os autores compararam suas medições com analisador de gases modelo LGR-24A-FGGA, com precisão < 1%.

Os autores descobriram que, após descontado o “offset” dos sensores NDIR – as diferentes calibrações entre aparelhos, como as diferenças discutidas no **Gráfico 50** –, o desvio padrão médio entre o valor registrado pelo aparato de referência e os sensores K30 ficou entre 4 e 6 ppm, ainda sem que se adotasse

quaisquer correções adicionais, o que significou precisão prática de aproximadamente 1% da leitura, que seria valor mais adequado a se utilizar na equação 24.

Isso significa que ao se adotar a acurácia fornecida pelo fabricante para avaliar a precisão do método, superestima-se a faixa de incerteza. Nota-se que o sensor do equipamento utilizado neste trabalho é produzido pelo mesmo fabricante, ainda que de modelo distinto, com acurácia reportada um pouco inferior, de  $50 \text{ ppm} \pm 5\%$  da leitura. O modelo do sensor não foi relatado pela empresa fabricante do aparelho de medição utilizado, porém foi possível identificá-lo ao se desmontar o equipamento. Trata-se do sensor NDIR Senseair S8. Pontua-se que essa investigação foi realizada somente após o término da campanha experimental, para garantir que não prejudicaria os dados coletados de nenhuma maneira.

Ainda que não se possa estender completamente as conclusões de Martin et al. (2017) sobre a precisão do modelo K30 ao sensor utilizado neste trabalho, é provável que a mesma tendência se repita, já que a precisão reportada se refere à concentração bruta registrada pelo aparelho, e contabiliza as possíveis diferenças de calibração entre sensores. Como o método de medição se baseia no valor de  $\Delta C_{95}$ , parâmetro que desconta as medições da concentração de fundo, registradas simultaneamente entre os sensores, em condições homogêneas, ocorre uma “calibração” dos sensores a cada ensaio, o que reduz drasticamente a precisão prática das medições.

Outros autores como Few e Elwell (2021) chegaram a conclusões similares, também adotando sensores NDIR. Neste caso a acurácia reportada pelo fabricante era de  $50 \text{ ppm} \pm 3\%$  da leitura, porém testes empíricos indicaram precisão prática de somente 5,4 ppm, também da ordem de 1%.

Ao se adotar precisão de 2% para as medições, valor definido de forma arbitrária, com base nos valores reportados pela literatura aqui discutidos adicionados de margem, o erro relativo médio dos ensaios com ventilação cruzada cairia de 90% para somente 17%, e nos cenários com ventilação unilateral de 38% para 12%.

Esses valores estão mais próximos da faixa de incerteza identificada por Kabirikopaei e Lau (2020) para o método da concentração estacionária, entre 6% e 23%, considerado o método que se baseia em  $\text{CO}_2$  metabólico que fornece a melhor precisão. Os autores também avaliaram a incerteza associada ao cálculo da taxa de ventilação a partir dos métodos de decaimento, e da injeção constante, chegando a

faixas de incertezas de, respectivamente, 15% a 77% e 10% a 80%

Essa avaliação, portanto, não desencoraja a aplicabilidade desse método de medição, mesmo quando há somente pequenas variações em relação à concentração de fundo, e corrobora com a aplicabilidade dos sensores NDIR. Few e Elwell (2021) sugerem como critério somente considerar concentrações de CO<sub>2</sub> acima de 50 ppm acima do valor de fundo, variação bastante baixa, que se verifica mesmo em recintos muito bem ventilados.

Com o avanço tecnológico dos sensores de CO<sub>2</sub>, hoje é possível amostrar continuamente a concentração do gás nos ambientes, em intervalos tão curtos quanto um segundo, em aparelhos de pequenas dimensões, com valores cada vez mais acessíveis. Isso torna viável posicionar esse tipo de equipamento em salas de aula e outros recintos densamente ocupados onde se deseje medir taxas de ventilação de forma confiável e custo relativamente baixo.

Ademais, ao utilizar estações de medição "faça você mesmo" (DIY), baseadas nos mesmos sensores empregados em aparelhos comerciais, é possível reduzir ainda mais os custos associados.

Saini, Dutta e Marques (2020) conduziram revisão sistemática acerca de sistemas de monitoramento da qualidade do ar interno, e identificaram 40 estudos publicados em periódicos revisados por pares cegos que desenvolveram esse tipo de equipamento de medição, 90% dos quais baseados em sistemas de código aberto, o que indica uma tendência crescente na adoção de soluções mais acessíveis para a medição da qualidade do ar interno.

É possível criar equipamento que meça diversas variáveis relevantes ao longo dos ensaios. Com câmeras ou sensores eletromagnéticos é possível identificar e registrar as configurações de abertura ao longo das aulas de forma mais confiável. A partir de sistemas com câmeras também seria possível obter registro fidedigno da ocupação ao longo do tempo, com a resolução tão curta quanto o necessário. Neste caso seria mais seguro adotar outras estratégias de medição para além da concentração estacionária.

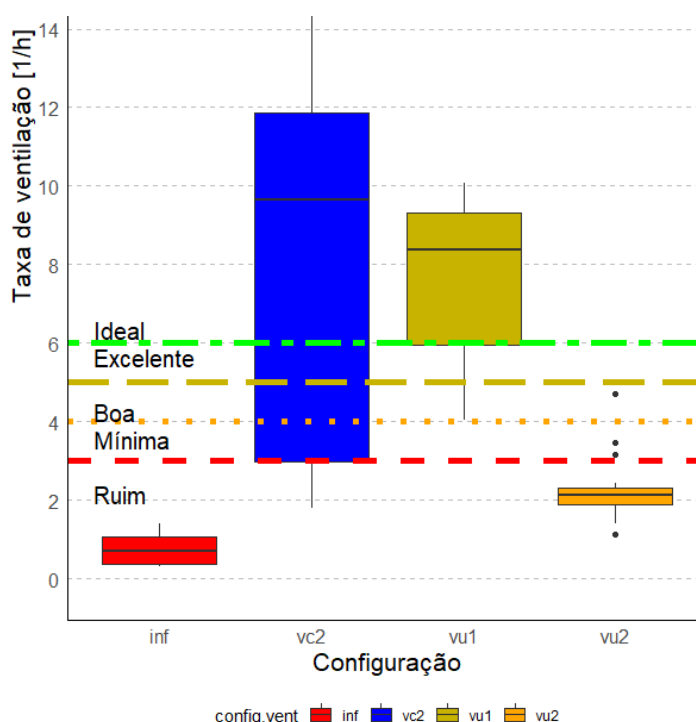
#### 4.3 AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DO AR

De início ressalta-se que, apesar da taxa de ventilação ser um importante parâmetro relacionado à QAI, não é o único, e investigações mais

detalhadas envolvem avaliação de diversos parâmetros, discutidos ao fim desta seção.

O **Gráfico 59** a seguir apresenta a box-plot das taxas de ventilação registradas durante os ensaios de decaimento, obtidas a partir do método de decaimento entre dois pontos. Plotou-se no gráfico linhas correspondentes aos limites das faixas propostas por Allen et al. (2020) para avaliar a qualidade do ar interno de salas de aula.

**Gráfico 59** – Avaliação da QAI conforme Allen et al. (2020) em cenários ideais



**Fonte:** o próprio autor (2023).

Excluiu-se da plotagem o cenário VC1, pois a menor taxa registrada nesta situação foi de  $11,9 \text{ h}^{-1}$ , duas vezes ao valor acima do qual Allen et al. (2020) considera a taxa como “ideal”,  $6 \text{ h}^{-1}$ .

Quase todos os ensaios ocorridos na configuração VU2 registraram taxas inferiores a  $3 \text{ h}^{-1}$ , portanto conclui-se que se trata de configuração de abertura inadequada. O que também se conclui para os cenários de infiltração. Comportamentos esperados, dadas as baixas áreas de abertura. As informações mais relevantes que se extrai dessa comparação são referentes às configurações VC2 e VU1.

Ainda que se esperem taxas de ventilação mais elevadas para recintos com ventilação cruzada, os resultados indicam que quando as áreas de

abertura são insuficientes, mesmo ambientes que adotam essa estratégia podem registrar taxas inadequadas. No cenário VC2, aqueles somente com as esquadrias basculantes superiores abertas, em 30% das amostras não se atingiu o valor mínimo de  $3 \text{ h}^{-1}$ .

Neste caso se demonstrou significativa influência da intensidade do vento nos resultados obtidos, o que indica que quando há pequenas áreas de abertura, sem distância vertical que as separa, só se atingem taxas de ventilação adequada caso haja condição do tempo favorável. Para o cenário VC2 também se identificou tendência de redução da taxa de ventilação quando a temperatura externa era superior a interna, o que sugere que o chamado efeito chaminé nessa situação ocorra em contraposição ao efeito da ação dos ventos, conforme discutido em torno do **Gráfico 47**.

Enquanto isso, o cenário de VU1, apesar de registrar a mesma média de  $8,5 \text{ h}^{-1}$  que o cenário VC2, obteve taxas mais constantes, com valor mínimo registrado de  $4 \text{ h}^{-1}$ . Neste cenário não foi possível estabelecer a influência da intensidade do vento nos resultados, nem da variação entre temperatura externa e interna. Notou-se, porém, alguma influência associada ao ângulo de incidência, como se discutiu em torno do **Gráfico 46**. Ainda assim, pode-se afirmar que houve menor influência das condições do tempo.

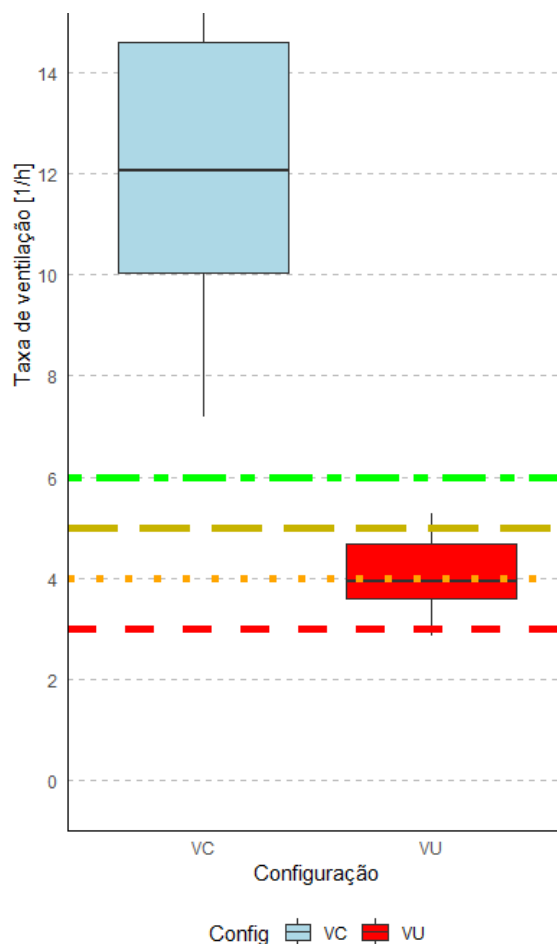
O **Gráfico 60** a seguir investiga a avaliação conforme Allen et al. (2020) para as taxas registradas durante as aulas em que se mediu a taxa com auxílio do  $\text{CO}_2$  metabólico. Esses resultados apresentam uma significativa vantagem em relação aos obtidos a partir do decaimento da concentração, ainda que sejam menos precisos.

As configurações ideais de abertura definidas para a execução dos ensaios com cilindro não refletem com precisão o comportamento real dos ocupantes, como ocorre nas medições durante as aulas. É possível identificar que em todas as aulas em que se adotou ventilação cruzada as taxas superaram com folga o valor de  $6 \text{ h}^{-1}$  tomado como ideal.

Esse cenário de ventilação cruzada dos ensaios com  $\text{CO}_2$  metabólico é, em termos de áreas de abertura, intermediário entre VC1 e VC2 dos ensaios com cilindro. Em VC1, todas as esquadrias estavam abertas, incluindo a porta. Em VC2, somente as esquadrias basculantes. Enquanto isso, todas as amostras com ventilação cruzada durante as aula contavam somente com a porta aberta no corredor,

e parte das esquadrias máximo-ar abertas na fachada. Em nenhum momento os ocupantes utilizaram as esquadrias basculantes, como se discutiu no item 4.2.2.

**Gráfico 60** – Avaliação da QAI conforme Allen et al. (2020) uso real



**Fonte:** o próprio autor (2023).

Enquanto isso, nos cenários com ventilação unilateral, as taxas variaram majoritariamente entre classificadas como “mínima”, entre 3 e 4 h<sup>-1</sup> ou “boa”, entre 4 e 5 h<sup>-1</sup>. Este cenário também é distinto do cenário ideal VU1 investigado pelo cilindro, que além das esquadrias máximo-ar, contou com as esquadrias basculantes abertas.

Essa redução em relação à área de abertura significou sair de valores 75% do tempo acima de 6 h<sup>-1</sup>, e 100% acima de 4 h<sup>-1</sup>, para valor mínimo de 3 h<sup>-1</sup> e máximo pouco acima de 5 h<sup>-1</sup>, taxas ainda aceitáveis conforme Allen et al. (2020), mas no limite do considerado como mínimo em alguns casos.

Prosseguiu-se com a avaliação da QAI com base no parâmetro fluxo de ar por pessoa. Para isso, foi necessário contabilizar as ocupações máximas e reduzidas nos ensaios com cilindro, apresentadas para cada sala de aula na **Tabela**

15 a seguir.

**Tabela 15** – Capacidade das salas de aula

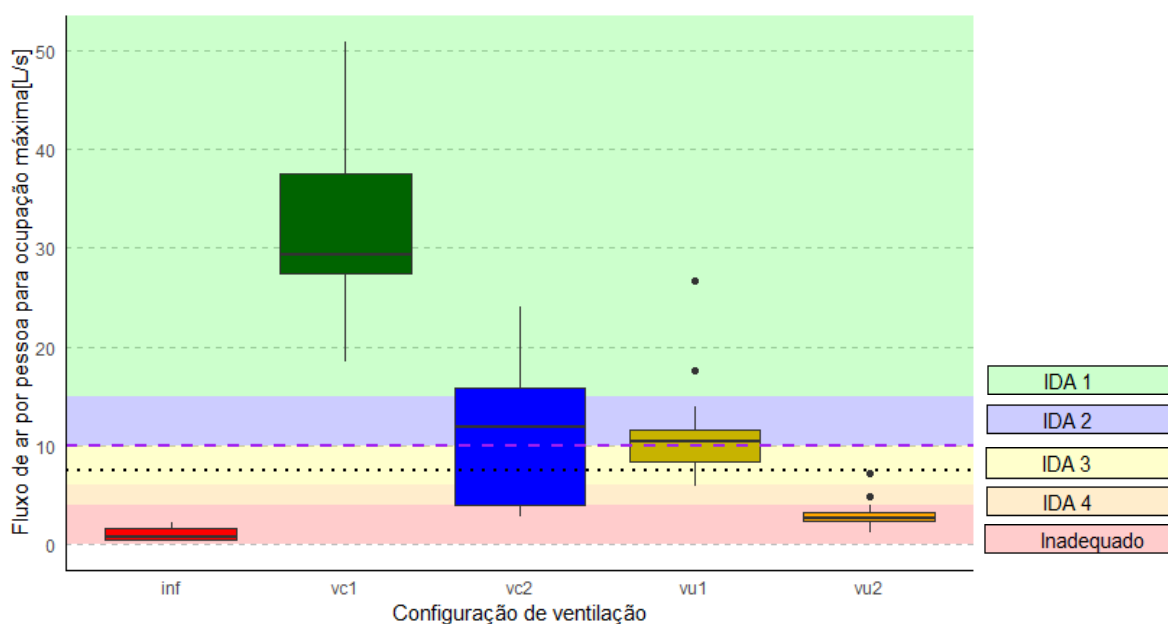
Sala	Ocupação máxima	Ocupação reduzida (2m)
1008	41	15
1018	55	15
MM4	30	10
MM8	42	10

**Fonte:** o próprio autor (2023).

Detalhes referentes à definição ocupação máxima e ao cálculo da ocupação reduzida a partir do critério de distanciamento de 2 metros foram previamente abordados por Decker e Atem (2022) para as mesmas salas de aula deste estudo de caso. Durante a pandemia de COVID-19 esse critério para restrição do número de ocupantes foi recomendado pela secretaria de saúde do governo do Paraná (2020) por meio da resolução SESA N°632/2020. Pretende-se avaliar a efetividade dessa medida em relação ao atendimento das taxas mínimas recomendadas por pessoa.

O **Gráfico 61** apresenta o fluxo de ar por pessoa, calculado considerando ocupação máxima do recinto, e as taxas de ventilação de cada configuração de abertura obtida a partir dos ensaios com cilindro.

**Gráfico 61** – Fluxo de ar por pessoa [L/s] calculado para ocupação máxima



**Fonte:** o próprio autor (2023).

Nos ensaios com configuração VU1, a taxa estaria acima do critério

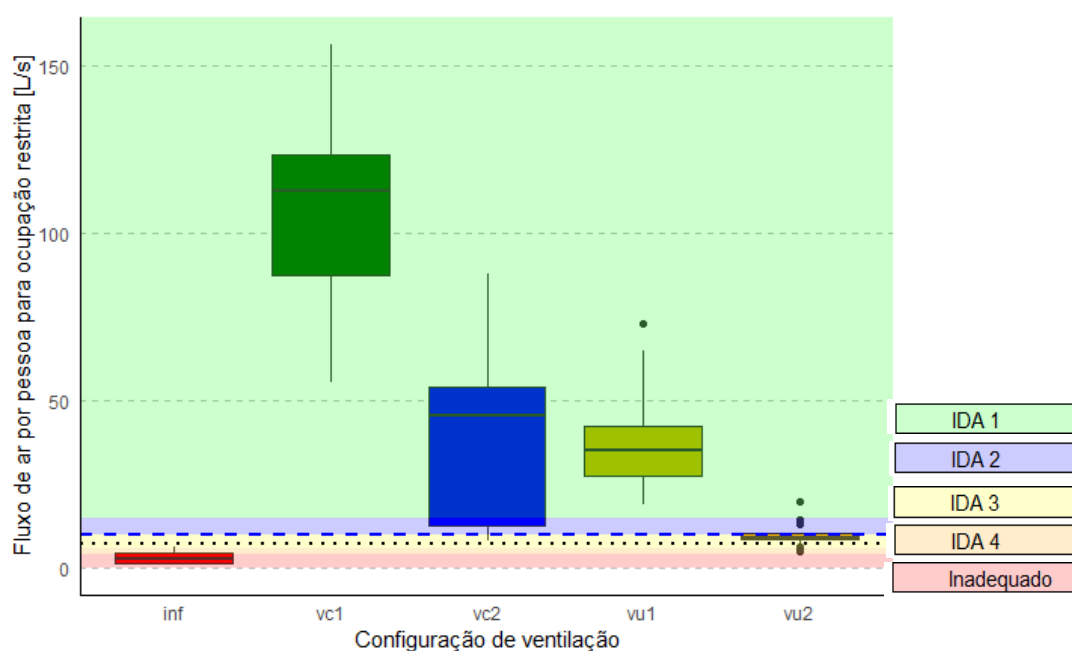
da ANVISA em mais de 80% das amostras, com média no limiar das classificações de QAI em IDA-2 (“adequada”) e IDA-3 (“moderada”), sem amostras classificadas como IDA-4 (“baixa”). Em comparação com o critério de Allen et al. (2020), que indicava qualidade “ideal” para 75% das amostras de VU1, avalia-se com base nas faixas da EN 13779 (2007) que o fluxo de ar por pessoa, considerando ocupação máxima, estaria entre QAI “moderada” e “adequada”.

Isso sugere que as faixas propostas por Allen et al. (2020) consideram menor densidade de ocupantes no recinto do que as ocupações máximas previstas para a sala em questão.

A mesma proporção entre critérios se mantém para os demais cenários. Neste caso, VC2 registrou desde taxas no limite do valor mínimo proposto pela EN 16798-1 (2019), 4 L/s por pessoa, abaixo do qual se considerou a QAI “inadequada”, até amostras que ultrapassam os 20 L/s por pessoa, ou seja, “alta qualidade”. A média dos valores desse cenário fica próxima dos 10 L/s por pessoa para a ocupação máxima. Não houve alteração da interpretação da QAI para os cenários com VC1, VU2 e INF em relação ao que foi previamente abordado.

O **Gráfico 62** a seguir apresenta o fluxo de ar, calculado a partir dos mesmos dados de taxa de ventilação, porém considerando a lotação restrita a partir do critério de 2 m de distância entre ocupantes.

**Gráfico 62** – Fluxo de ar por pessoa [L/s] calculado para ocupação restrita (2 m)



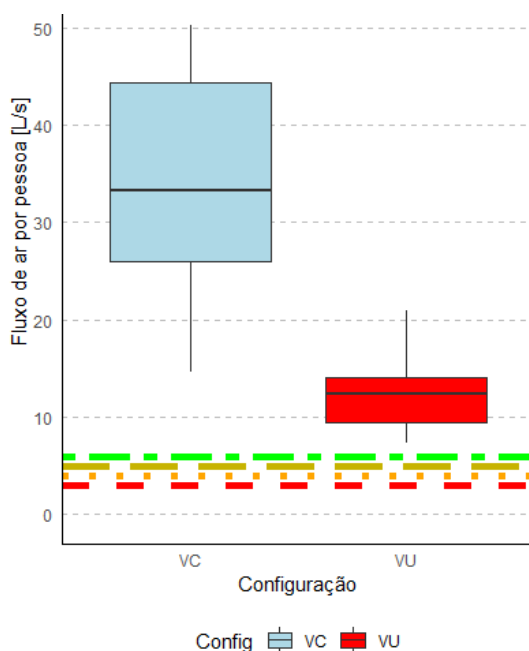
**Fonte:** o próprio autor (2023).

Após adotada a restrição da ocupação máxima das salas de aula considerando distância mínima de 2 metros entre cada ocupante, mesmo o cenário com VU2, que gerava taxas inadequadas de acordo com todos os critérios investigados, registra fluxo de ar muito próximo ao critério da OMS de 10 L/s por pessoa, no limite entre as classificações de QAI “moderada” e “adequada”.

Neste caso tanto VU1 quanto VC2 registrariam QAI de “alta qualidade” conforme EN 13779 (2017) para a vasta maioria das amostras. Quando adotada essa restrição do número de ocupantes, somente não se atinge taxas adequadas no cenário de infiltração. Isso revela que a medida recomendada pela secretaria de saúde do governo do Paraná (2020) durante a pandemia de COVID-19 foi de fato efetiva para melhorar a qualidade do ar nos ambientes escolares.

Essa avaliação do fluxo de ar por pessoa, entretanto, não reflete com fidelidade as reais condições de uso das salas de aula. Em relação à avaliação com ocupação máxima, é provável que seja pessimista, uma vez que não é frequente que as salas sejam utilizadas em sua lotação máxima. Quanto ao cenário com distanciamento de dois metros entre ocupantes, tratou-se de medida emergencial durante pandemia que ceifou milhões de vida, cujo rigor não é necessário quando não há em questão esse tipo de preocupação. Portanto, é provável que o **Gráfico 63** apresente dados mais fidedignos à realidade cotidiana das salas.

**Gráfico 63** – Fluxo de ar por pessoa [L/s] para ocupação real



**Fonte:** o próprio autor (2023).

Considerando a ocupação real registrada durante as aulas (média de 22 ocupantes, com mínimo de 12 e máximo de 32), mesmo quando se adotou a ventilação unilateral como estratégia, registrou-se fluxo de ar acima de 10 L/s por pessoa na maioria das amostras, o que indica QAI entre “adequada” e “alta”.

Conforme abordado na seção 2.4, não há critério único bem estabelecido a nível global para taxas mínimas de ventilação nos ambientes internos. Identificou-se entre normas a recomendação de diferentes critérios mínimos, e mesmo diferentes parâmetros. Existem referências que indicam um fluxo mínimo por área de piso, enquanto outras adotam fluxo de ar por pessoa. Ainda há critérios estabelecidos com base na taxa de ventilação em número de trocas de ar por hora.

Fato é que o fluxo de ar por pessoa trata-se de parâmetro chave para a avaliação da probabilidade do risco de propagação de doença respiratórias, e está reconhecidamente relacionado à qualidade do ar interno (BUONANNO, STABILE e MORAWSKA, 2020).

Isso indica que a avaliação da qualidade do ar de ambientes internos deve estar intrinsecamente relacionada ao seu uso. Uma mesma taxa de ventilação pode se traduzir em condições adequadas ou não, de acordo com o número de ocupantes do recinto. Portanto, critérios como os propostos por Allen et al. (2020), apesar de muito convenientes, pois se baseia no mesmo parâmetro medido pelos ensaios realizados ( $N$  [ $h^{-1}$ ]), devem ser aplicados com cautela. As faixas foram elaboradas pelos autores considerando salas de aula com dimensões e uso convencionais, e devem ser utilizadas somente para avaliar esse tipo específico de recinto.

Outro ponto importante levantado foi o de que não existem a nível nacional referências normativas específicas para taxas mínimas de ventilação em ambientes com ventilação natural. Como as diferentes condições climáticas são relevantes ao se projetar as áreas de abertura das edificações, seria importante existirem valores de referência que considerem as condições climáticas do país.

Além disso, identificou-se significativas diferenças entre as taxas mínimas recomendadas por diferentes normas. A título de exemplificação, os critérios aqui investigados são bastante superiores à taxa mínima recomendada para salas de aula universitárias pela norma estadunidense ASHRAE 62.1 (2019) de somente 3,9 L/s por pessoa.

#### 4.4 COMPARAÇÃO DAS MEDIÇÕES COM MODELOS ANALÍTICOS

Comparou-se a taxa de ventilação registrada em cada ensaio com o valor previsto com base no procedimento proposto por Lamberts, Dutra e Pereira (2013), que se divide entre cenários de ventilação cruzada, em que se calcula o fluxo de ar por meio de modelo derivado da equação do orifício, descrito pela equação 3; e ventilação unilateral, quando se adota a equação 4, advinda do modelo semiempírico de Warren e Parkins (1985).

Em ambos os casos, de início calcula-se o fluxo de ar  $Q$  [volume/tempo], que é convertido para taxa de ventilação  $N$  [tempo<sup>-1</sup>] conforme o volume do recinto.

Para ventilação cruzada,  $Q = f(A_{effs}, v_{cor.}, \Delta C_p)$ , ou seja, o fluxo de ar  $Q$  se dá em função da área efetiva para múltiplas aberturas em série, velocidade corrigida do vento e da diferença entre os coeficientes de pressão das fachadas. Cada um desses parâmetros também é calculado em função de outras medidas.

O parâmetro  $v_{cor.}$  depende da intensidade do vento medida na estação meteorológica, dos coeficientes  $k$  e  $a$  de rugosidade do terreno e da altura das aberturas em relação ao solo ( $z$ ), para a qual se corrige a velocidade, portanto  $v_{cor.} = f(v_{10m}, k, a, z)$ .

A adoção dos coeficientes  $k$  e  $a$ , conforme a **Tabela 1** por si só já se constitui importante fonte de incerteza, motivo pelo qual se investigou a correção para três das categorias de rugosidade, desde campo com algumas barreiras, passando por ambiente urbano até a mais pessimista centro da cidade.

Enquanto isso, o procedimento calcula o calor de  $\Delta C_p$  variando conforme a direção do vento e as condições de obstruções de vizinhança, parâmetro qualitativo descrito em detalhes no item 3.6, portanto, considera  $\Delta C_p = f(\theta, obstrução)$ .

De forma geral, com base nos termos até aqui adotados para se referir às áreas de abertura, para se obter a área  $A_{effs}$  ponderam-se as áreas efetivas de entrada e saída, portanto,  $A_{effs} = f(A_{eff,entrada}, A_{eff,saída})$ , e cada  $A_{eff}$  é calculada a partir da área livre e do coeficiente de descarga, logo  $A_{eff} = f(A_f, C_d)$ .

Neste ponto se notou uma diferença entre os procedimentos adotados por Lamberts, Dutra e Pereira (2013) e por ESFA e Daniels (2018) para o cálculo das

áreas. A diferença entre os termos adotados pelos autores pode gerar bastante confusão. Até aqui trataram-se as áreas de acordo com os termos sugerido por Jones et al. (2016), e adotados por ESFA e Daniels (2018), por se considerar que são mais facilmente padronizáveis, e que devam ser adotados em trabalhos futuros na área.

Porém, nos parágrafos seguintes se discute o procedimento de cálculo adotado por Lamberts, Dutra e Pereira (2013) com base em seus próprios termos e notações, que serão explicitados, o que se julgou necessário para descrever as diferenças entre os métodos de cálculo das áreas, sem que se confundam conceitos. Para evitar qualquer desentendimento, se adicionou o subscrito “lamb.” para evidenciar que não se trata exatamente da mesma nomenclatura até aqui adotada.

Para contabilizar as áreas de abertura, Lamberts, Dutra e Pereira partem da definição da “área útil” ( $A_{\text{útil,lamb.}}$ ) das aberturas, que corresponderia a área livre para o fluxo de ar de uma esquadria. Para aberturas bidimensionais, como esquadrias de correr, não há diferença entre a  $A_{\text{útil}}$  e o que ESFA e Daniels (2018) consideram como “área livre”  $A_f$ , a simples multiplicação de altura por largura livre ( $A_f = hw$ ).

Porém, Lamberts, Dutra e Pereira (2013) contabilizam o impacto do ângulo de inclinação da folha de esquadrias basculantes e máximo-ar ( $\alpha$ ) na determinação da própria área útil, portanto, neste caso  $A_{\text{útil,lamb}} = f(A, \alpha)$ . Em primeiro momento houve confusão com a equivalência dos termos “área útil” ( $A_{\text{útil}}$ ) e “área livre” ( $A_f$ ), que são de fato iguais para aberturas convencionais, mas diferem para os casos de esquadrias basculantes e máximo-ar.

Após determinar a área  $A_{\text{útil,lamb}}$ , Lamberts, Dutra e Pereira (2013) calculam a “área equivalente”  $A_{J,lamb}$ , a partir de ponderação das áreas úteis de entrada e saída, portanto  $A_{J,lamb} = f(A_{\text{útil,lamb,entrada}}, A_{\text{útil,lamb,saída}})$ . Essa área ( $A_{J,lamb}$ ) é a utilizada pelos autores no cálculo do fluxo de ar  $Q$ . Em momento algum os autores mencionam o termo “coeficiente de descarga”, porém o adotam como constante e igual a 0,6, e somente o fazem ao calcular  $Q$ , multiplicando o  $A_{J,lamb}$  pela constante sem maiores explicações.

Enquanto isso, ESFA e Daniels (2018) consideram o impacto do ângulo de inclinação da folha de esquadrias basculantes na etapa de determinação do coeficiente de descarga, não na determinação da “área livre”, que em qualquer

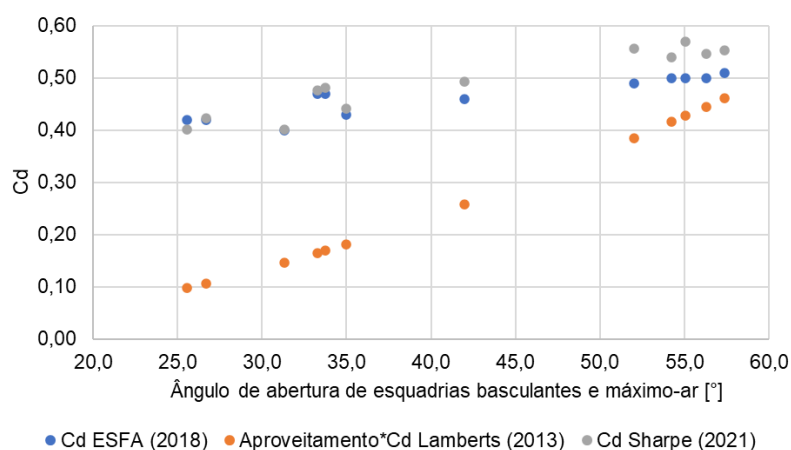
caso é igual a multiplicação da altura e larguras livres. Os autores determinam o coeficiente de descarga a partir da proporção entre altura e largura livres, ângulo de abertura, e adotam coeficientes empíricos, portanto consideram  $C_d = f(h, w, \alpha)$ . Planilha de cálculo para esse coeficiente foi disponibilizada pelos autores e utilizada neste trabalho (ESFA e DANIELS, 2018). Em seguida, consideram o efeito do coeficiente de descarga para a determinação da “área efetiva”, logo  $A_{eff} = f(A_f, C_d)$ , para então ponderar as aberturas de entrada e saída  $A_{effs} = f(A_{eff,entrada}, A_{eff,saída})$ .

Sendo assim, a principal diferença entre os métodos de cálculo, apesar dos problemas entre terminologias, é como se avalia o impacto do ângulo de inclinação da folha da esquadria no fluxo de ar. Apesar de Lamberts, Dutra e Pereira (2013) considerarem o efeito de  $C_d$  somente na última etapa de cálculo, como é constante, o resultado encontrado para o fluxo seria o mesmo se a constante fosse aplicada ainda na determinação do que eles chamam de  $A_{útil,lamb}$ .

Portanto, retornando à nomenclatura adotada neste estudo, o procedimento de Lamberts equivale a considerar  $C_d = f(\alpha)$  para esquadrias basculantes e máximo-ar. Neste caso,  $f(\alpha) = 1 - \cos(\alpha)$ . Adotar essa notação unificada foi útil pois permitiu comparar as áreas calculadas entre os autores.

O **Gráfico 64** a seguir compara os valores de  $C_d$  adotados para cada uma das esquadrias basculantes e máximo-ar das salas avaliadas. O gráfico adota as correções de nomenclatura e ordem de consideração do efeito de  $C_d$  conforme discutido. Adicionalmente, apresentam-se os valores conforme procedimento de cálculo proposto por Sharpe et al. (2021), análogo ao de ESFA e Daniels (2018).

**Gráfico 64** –  $C_d$  calculado de acordo com o ângulo de abertura da esquadria



**Fonte:** o próprio autor (2023).

Nota-se que o procedimento adotado por Lamberts, Dutra e Pereira subestima severamente o valor de  $C_d$  para esquadrias basculantes e máximo-ar com pequenos ângulos de abertura. Como o restante do procedimento é igual entre autores, as diferenças ilustradas no **Gráfico 64** já correspondem à variação entre as áreas calculadas pelos autores.

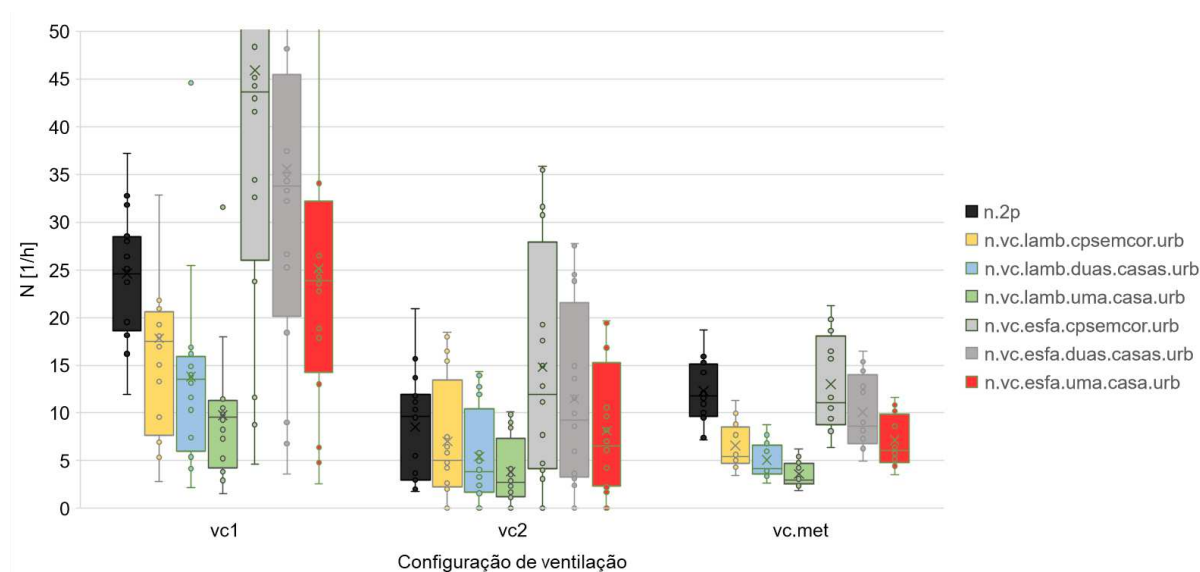
Como o ângulo de inclinação das esquadrias varia entre as salas de aula avaliadas, para aquelas com os menores ângulos de abertura, se registrou as maiores variações entre áreas calculadas a partir dos métodos. É o caso da sala MM4, na qual as esquadrias máximo-ar abrem somente cerca de  $25^\circ$ , e as esquadrias basculantes duplas do corredor abrem pouco mais que  $30^\circ$ , como se apresentou na **Tabela 3**. Neste caso a **Tabela 5** revelou haver variação de mais de 300% entre a área calculada pelos métodos.

#### 4.4.1 Ventilação cruzada

Como para cenários com ventilação cruzada o modelo de cálculo utilizado considera  $A_{effs}$  como tendo efeito diretamente proporcional no fluxo de ar  $Q$ , e os demais parâmetros foram mantidos constantes (entre a taxa calculada para cada ensaio), as diferenças entre nas áreas calculadas entre os dois métodos explicam completamente a variação das taxas obtidas entre eles.

Dessa forma, mesmo antes da determinação dos fluxos, é possível atribuir grandes diferenças entre as previsões. O fluxo calculado é apresentado no **Gráfico 65** a seguir com objetivo de apreciar quais as implicações práticas de se adotar essas diferentes áreas para prever as taxas de ventilação. Agrupam-se os resultados de todas as salas de acordo com a configuração de ventilação. De início se apresentam resultados considerando a rugosidade do terreno como a de “ambiente urbano”. O gráfico permite investigar diferentes condições de obstrução.

A caixa preta indica a faixa de taxas de ventilação [ $h^{-1}$ ] medidas em cada uma das três configurações avaliadas, duas ideais e uma considerando o uso real das salas de aula. As caixas amarela, azul e verde são relativas às áreas calculadas conforme Lamberts, Dutra e Pereira (2013), enquanto as duas caixas cinza e caixa a vermelha representam taxas calculada com base na área calculada conforme ESFA e Daniels (2018).

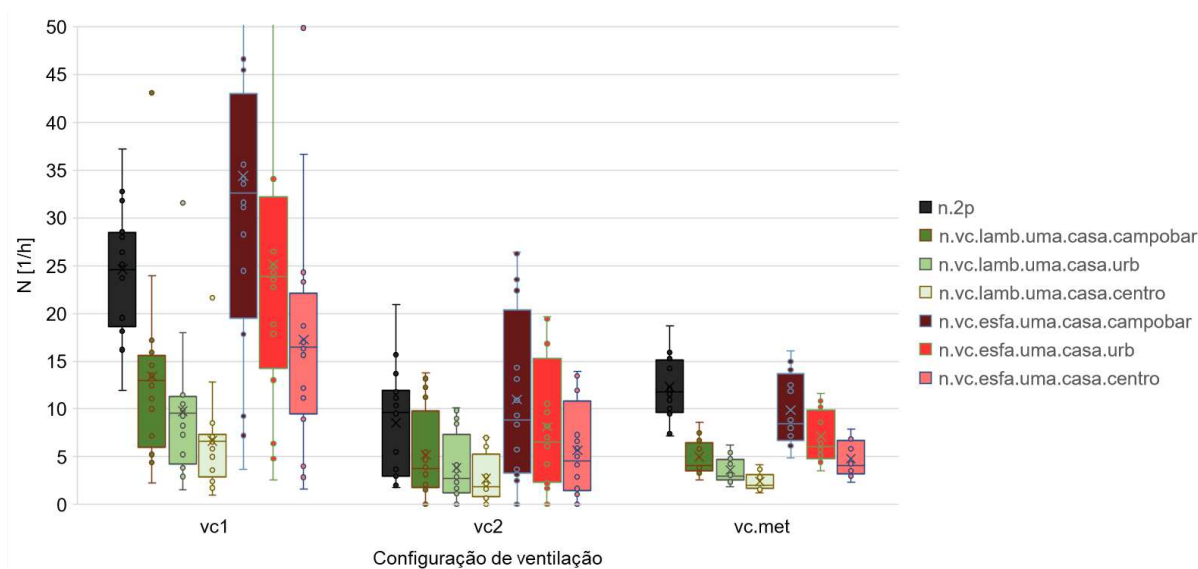
**Gráfico 65 –  $N$  medido e  $N$  calculado, ventilação cruzada, ambiente urbano**

**Fonte:** o próprio autor (2023).

As diferentes caixas de cada modelo fazem referência aos três cenários qualitativos de obstrução. A esperada grande diferença entre os procedimentos de cálculo ficou explícita. Nota-se que para as configurações VC1 e “VC.MET” o procedimento de cálculo de Lamberts considerando rugosidade do ambiente como “urbano”, subestimou severamente as taxas calculadas, mesmo considerando que não existam obstruções, porém, neste caso, para VC2 os valores ficaram próximos à medição, com melhor ajuste ao se considerar que não há obstruções na vizinhança, o que não está de acordo com a realidade da edificação. Isso indica que de fato as áreas calculadas por Lamberts para as esquadrias basculantes e máximo-ar estão subestimadas.

Enquanto isso, com as áreas calculadas a partir de ESFA e Daniels (2018), e considerando parâmetros de obstrução “uma casa” e rugosidade de “ambiente urbano”, houve melhor correlação entre as medições e dados calculados. Em especial para os cenários VC1 e VC2 a previsão foi em média próxima dos resultados dos ensaios, porém, adotados esses parâmetros, a taxa medida na configuração VC.MET foi quase o dobro da calculada. Para os demais critérios de obstrução, os valores calculados superestimaram muito as taxas medidas.

Investigou-se melhor, a partir do **Gráfico 66**, os resultados obtidos considerando a obstrução de “uma casa”, que se julgou o mais adequado ao ambiente de estudo de caso, considerando a proximidade entre os blocos. São apresentadas as demais condições de rugosidade do terreno consideradas.

**Gráfico 66** –  $N$  medido e  $N$  calculado, ventilação cruzada, “uma casa”

**Fonte:** o próprio autor (2023).

As previsões baseadas nas áreas calculadas por Lamberts, Dutra e Pereira (2013) considerando este cenário de obstrução, que se supôs o mais adequado, subestimaram as taxas de ventilação em todos os cenários de ventilação, com erros menores somente para o cenário VC2.

Enquanto isso, as taxas calculadas conforme ESFA e Daniels (2018) para os cenários VC1 e VC2, a combinação dos parâmetros “uma casa” como obstrução e “ambiente urbano” de fato forneceram os melhores ajustes; ainda assim, nos cenários de VC.MET, ou seja, ventilação cruzada durante o uso real das salas, a taxa calculada a partir desses critérios se mostrou subestimada em relação as medições.

Entretanto, nota-se que aplicar esses métodos só apresenta alguma utilidade quando não há um valor mais preciso que meça o mesmo parâmetro. Como neste caso há disponível uma taxa mais próxima da real, é fácil fazer calibrações do modelo para que se atinjam os resultados já conhecidos, ajustando as condições qualitativas de rugosidade e obstrução, que não são precisamente definidas.

Ainda assim, é possível afirmar que as previsões foram bastante mais precisas, ao se adotar os parâmetros de rugosidade e obstrução considerados arbitrariamente como mais adequados ao ambiente de estudo, quando se adotou as áreas calculadas conforme ESFA e Daniels (2018). Isso leva à conclusão de que esse é o procedimento preferível para correção das áreas de esquadrias basculantes e máximo-ar.

Além disso, deve-se notar que problemas na correlação entre as taxas de ventilação medidas com os valores estimados não advêm somente das incertezas relacionada à determinação da área. Diversos trabalhos acusam a baixa precisão de esse tipo de modelo analítico, em especial para edificações com grandes áreas de abertura (ETHERIDGE, 2015; HEISELBERG e SANDBERG, 2006; KARAVA, STATHOPOULOS e ATHIENITIS, 2004; SEIFERT et al., 2006).

A chamada equação do orifício é considerada como o modelo cálassico para calcular o fluxo de ar em edifícios, porém os pressupostos necessários para sua validade não são atendidos em ambientes com ventilação cruzada e grandes áreas de abertura. Dentre os pressupostos não atendidos, Heiselberg e Sandberg (2006) destacam que a equação considera que a abertura está submetida a pressões constantes e uniformes, tanto em intensidade quanto direção, o que raramente é o caso para ambientes com ventilação natural.

Além disso, Heiselberg e Sandberg (2006) e Karava, Stathopoulos e Athienitis (2004) defendem que não se deve tratar o coeficiente de descarga como constante, considerando que há variações de acordo com diversos parâmetros, como direção do vento, temperatura, número de Reynolds do fluxo de ar, dimensões da esquadria, porosidade, ângulo de inclinação de esquadrias, entre outros. Isso leva os autores a afirmar que estimar os valores de coeficiente de descarga para um cenário específico demanda grande número de amostras, e avalia que será difícil para quem desejar fazê-lo, considerando que requer muitas medições para permitir análise estatística válida.

Portanto, mesmo o procedimento de ESFA e Daniels (2018) que considera  $C_d = f(h, w, \alpha)$  está associado a incertezas, pois não é capaz de contabilizar todas os parâmetros que influenciam o comportamento do fluxo de ar através das esquadrias.

Seifert et al. (2006) também indicam que para recintos com grandes áreas de abertura, a precisão desse tipo de modelo de cálculo não é adequada, e que uma das principais fontes de incerteza advêm da conservação da energia cinética do jato de ar entre as aberturas de entrada e saída, o que ocorre quando se cria uma corrente de ar entre as aberturas, sem que o ar externo seja completamente difuso no ambiente interno. Quando ocorre esse fenômeno, os autores discutem que a equação tende a subestimar o fluxo real.

Outro fator é que esse tipo de modelo de cálculo foi desenvolvido para

fluxos passando por orifícios em dutos, em que o fluido não tem outra opção senão passar pelo orifício, enquanto em edifícios submetidos à ação dos ventos, o ar pode fluir não somente através das aberturas, como também ao redor do edifício. Isso também se constitui em desafio para caracterizar o desempenho aerodinâmico das esquadrias a partir do ensaio proposto pela EN 13141 (2019), pois também se oferece somente um caminho para o fluxo de ar, o que é distinto das condições reais, em que o ar passa através e em volta do edifício.

Em relação ao valor dos coeficientes de pressão, há bancos de dados, como o da Tokyo Polytechnic University (2007), que apresentam resultados obtidos a partir de ensaios com túnel de vento em diferentes situações de vizinhança, porém não se encontrou referências que investiguem edifícios com condições similares de obstrução ao do estudo de caso.

As equações semiempíricas disponíveis para calcular essa distribuição somente são válidas para edifícios isolados com características específicas, como planta retangular, como as de Swami e Chandra (1988) e de Walker e Wilson (1994). Autores como Muehleisen e Patrizi (2013) propuseram equações paramétricas mais complexas e com melhor ajuste aos dados obtidos a partir de ensaios em túnel de vento, porém também foram derivadas de modelos com geometria simples.

A aplicação desses dados de coeficiente de pressão aproximados é especialmente problemática para grandes aberturas, uma vez que a própria presença de aberturas de grandes dimensões no envelope do edifício altera a distribuição desses coeficientes de pressão. Como os ensaios em túnel de vento (e as equações semiempíricas deles derivadas) são geralmente baseadas em modelos com envelope “fechado” (sem aberturas), é necessário cautela na aplicação desses resultados para outras situações (ETHERIDGE, 2015).

Em relação a esses modelos de cálculo de  $C_p$ , nota-se a simplicidade e baixa precisão do procedimento proposto por Lamberts, Dutra e Pereira (2013), que se dá simplesmente conforme a **Tabela 6** e por três condições qualitativas de obstrução.

Ressalta-se, portanto, que todos os parâmetros envolvidos na equação 3 estão sujeitos a variações significativas, desde a determinação dos coeficientes de pressão ( $C_p$ ) no envelope do edifício, ao coeficiente de descarga ( $C_d$ )

- e conseqüentemente a área efetiva ( $A_{eff}$ ) e até mesmo a velocidade do vento na abertura ( $v$ ), que se adotou a partir de correção dos intensidade registrada durante os ensaios. Dessa forma, foi difícil avaliar qual a influência de cada parâmetro na grande diferença que se encontrou entre as previsões analíticas e os valores medidos durante os ensaios. Como destacaram Heiselberg e Sandberg (2006), a diferença entre coeficientes de pressão  $\Delta C_p$  é contabilizada no cálculo do fluxo de ar a partir de sua raiz, e provavelmente não é maior fonte de incertezas, que foi por eles atribuída como a área.

Para além disso, o procedimento de cálculo investigado sequer leva em consideração o efeito chaminé, de forma que há limitações inerentes a sua aplicação. Deve-se notar que autores como Fan et al. (2021) propõe procedimentos que permitem contabilizar esse efeito, e mesmo assim encontraram significativas discrepâncias entre previsões e medições para algumas das situações avaliadas, apesar de terem julgado a precisão de seu procedimento como adequada, dadas as incertezas associadas aos diversos parâmetros.

Além disso, ação dos ventos e efeito chaminé podem atuar em contraposição ou favoravelmente um ao outro, de forma que a taxa de ventilação gerada pelos dois fenômenos não pode ser simplesmente somada (CHENARI, CARRILHO e SILVA, 2016; FAN et al., 2021).

O fenômeno da ventilação natural é muito complexo, e depende de inúmeras variáveis. O procedimento analítico simplificado aqui investigado para estimar a taxa de ventilação pela ação dos ventos em cenários de ventilação cruzada, como ilustração, pode ser descrito como  $N = f(A_f, \alpha, l, w, v_{10m}, k, a, z, \theta, \text{obstrução}, V)$ , todos parâmetros discutidos nesta seção, cada um associado a importantes incertezas. Ainda assim trata-se de modelo bastante simplificado em relação ao fenômeno real. Para se criar modelos confiáveis e precisos que consideram tantos parâmetros, é necessário grande esforço experimental, com número muito elevado de amostras.

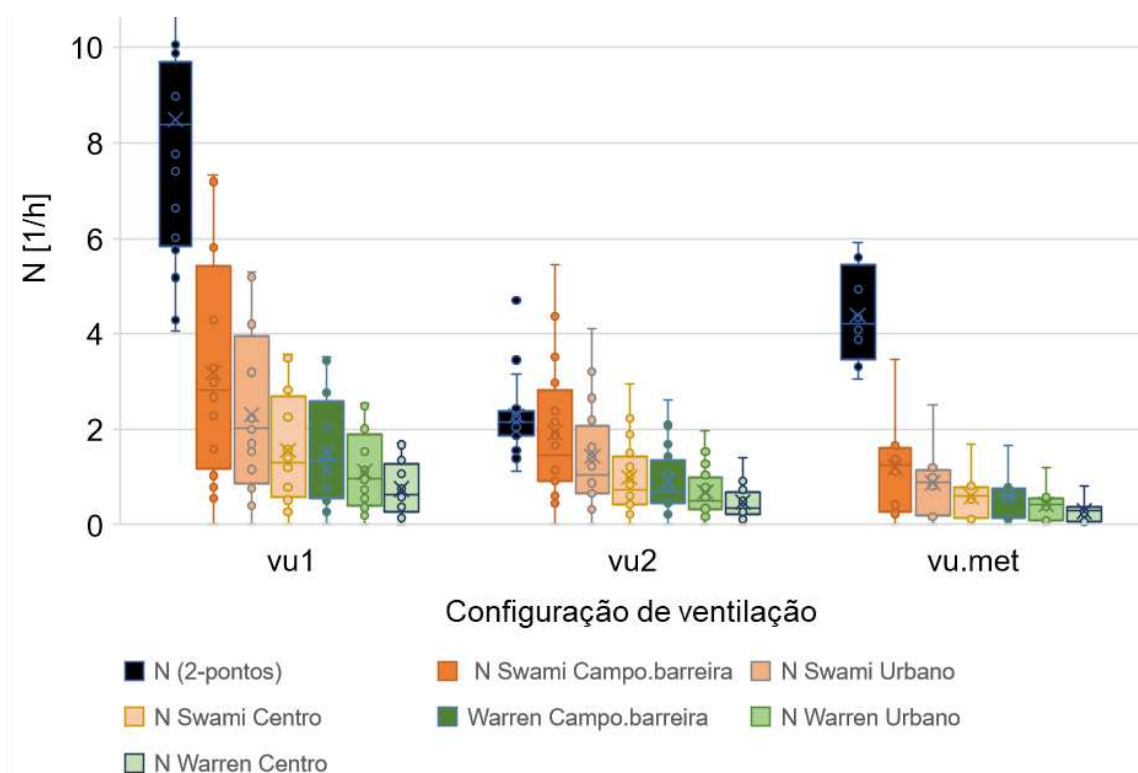
Caso se deseje um modelo generalista, adequado a diferentes tipos de edifício, com variadas dimensões e áreas de abertura, é necessário fazê-lo em múltiplos ambientes para garantir sua validade. Portanto, ao se estimar o fluxo de ar a partir desse tipo de procedimento, é necessário bastante cautela ao se interpretar os resultados. Pontua-se que a definir critérios menos subjetivos para a determinação

das condições de obstrução e rugosidade do terreno têm potencial para melhorar a confiança nos resultados desse tipo de análise, considerando que esse foi uma das grandes fontes de incerteza para a aplicação do modelo.

#### 4.4.2 Ventilação Unilateral

De forma análoga ao investigado para cenários de ventilação cruzada, **Gráfico 67** a seguir apresenta compara as taxas de ventilação obtidas durante os ensaios com ventilação unilateral, com a previsão de analíticos simplificados. Investigou-se as taxas calculadas conforme os modelos originalmente apresentados por Warren e Parkins (1985), adotado por Lamberts, Dutra e Pereira (2013), e o de Swami e Chandra (1988).

**Gráfico 67** – Comparação de  $N$  com previsões para VU,  $A_f$  Lamberts



Fonte: o próprio autor (2023).

Esses modelos são ambos semiempíricos, e dependem somente dos parâmetros área livre ( $A_f$ ) e velocidade corrigida do vento ( $v_{cor}$ ), conforme a equação 4. Os valores calculados pelo modelo de Swami e Chandra (1988) são exatamente o dobro dos valores calculados por Warren e Parkins (1985), pois a única diferença entre os modelos é o coeficiente que multiplica os termos  $A$  e  $v_{cor}$ .

Antes de se interpretarem os resultados, nota-se um grande problema

com o procedimento de cálculo proposto por Lamberts, Dutra e Pereira (2013), novamente advindo das nomenclaturas adotadas para determinar as áreas de abertura. Como discutido, os autores não usam o termo “área livre”, e sim “área útil”, porém indicam que o cálculo deva ser realizado com base na “área efetiva” da janela, que não é definida claramente pelos autores, que se limitam a mencionar que ser reduzida. Portanto, orientam para a adoção da área já corrigida conforme o ângulo de inclinação da folha da esquadria. Como identificado nos cenários de ventilação cruzada, esse método não se demonstrou adequado, subestimando o desempenho aerodinâmico desse tipo de esquadria.

Também é preciso considerar que quando apresentam o modelo, Warren e Parkins (1985) alertam que se trata de um coeficiente conservador, que pode subestimar a taxa, em especial para quando há múltiplas janelas no cenário avaliado, pois nesses casos diferenças entre os coeficientes de pressão entre janelas, ainda que na mesma fachada, podem intensificar o fluxo de ar. Também mencionam que os resultados podem ser inadequados para edifícios altos, e imprecisos para algumas direções específicas do vento. Essas considerações não foram apresentadas por Lamberts, Dutra e Pereira (2013) ao propor o procedimento.

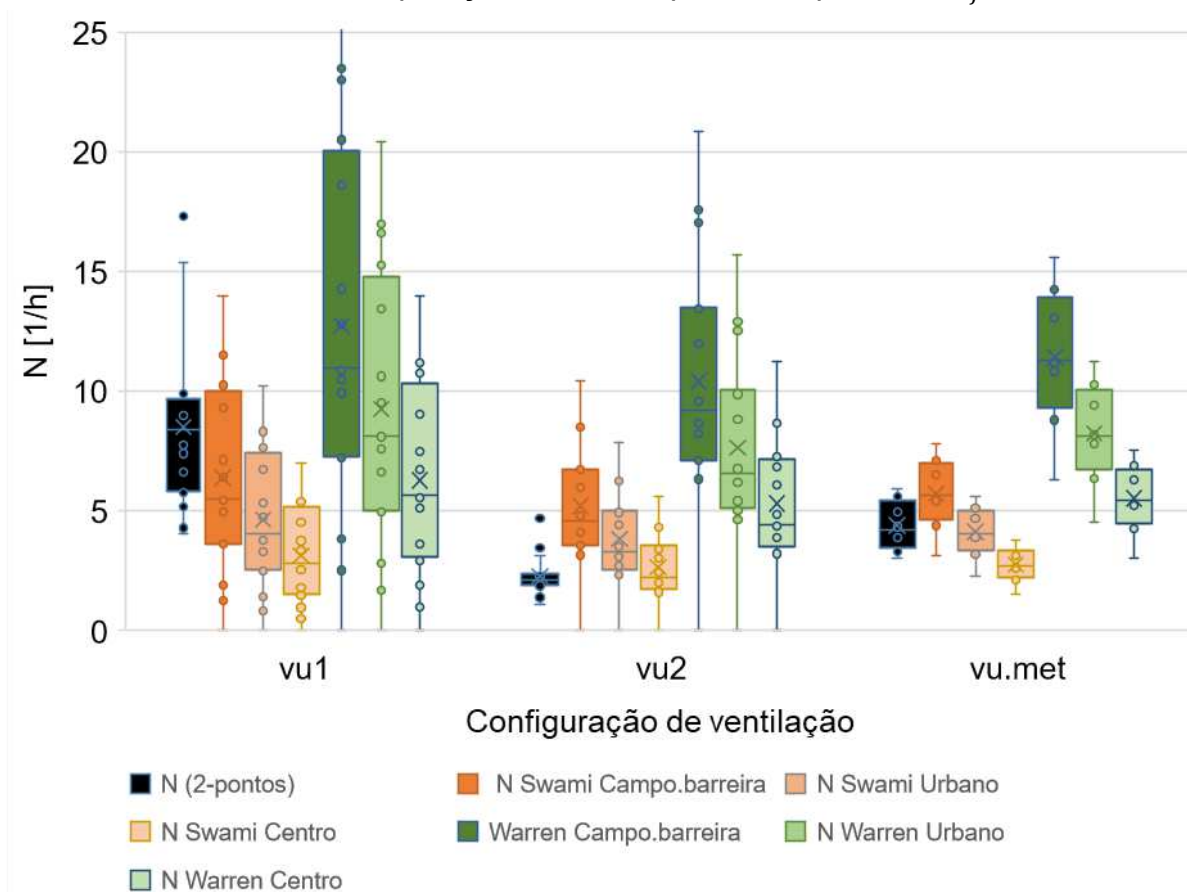
Portanto, os resultados obtidos se demonstraram severamente subestimados quando comparados às taxas medidas, mesmo com aplicação do coeficiente proposto por Swami e Chandra (1988). Porém, nem Warren e Parkins (1985) nem Swami e Chandra (1985) fazem referências a correções da área de abertura ao apresentar o modelo, o que foi sugerido pelos autores que organizaram o procedimento de cálculo que aqui se avaliou. Sendo assim, pode se atribuir a grande diferença entre os resultados obtidos e a previsão dos modelos à área adotada para a realização do cálculo, o que corrobora com as recomendações de Jones et al. (2016) acerca da necessidade da adoção de termos padronizados.

Dado o problema identificado, se repetiu a avaliação, porém utilizando o valor de  $A_f$  calculado conforme ESFA e Daniels (2018). Ressalta-se que essa área não considera o efeito da folha da esquadria. Os resultados obtidos constam no **Gráfico 68** a seguir.

Neste caso, a ordem de grandeza dos resultados é mais adequada, e demonstra que o coeficiente de 0,025 de fato retorna valores subestimados (considerando a rugosidade como urbana), porém esse efeito também pode se dar

peço fato de  $A_f$  não se considerar qualquer impacto do ângulo de inclinação da esquadria. O fato de os autores originais dos modelos não apresentarem procedimento para contabilizar a redução da área das esquadrias devido à influência se seu ângulo de inclinação dificulta sua aplicação neste cenário.

**Gráfico 68** – Comparação de  $N$  com previsões para VU,  $A_f$  ESFA



Fonte: o próprio autor (2023).

Além disso, deve-se notar que a investigação da correlação entre as taxas de ventilação medidas neste trabalho com as condições do tempo não foi capaz de estabelecer influência significativa da intensidade do vento na taxa de ventilação nos cenários com ventilação cruzada, pressuposto do qual partem ambos os modelos avaliados.

## 5 CONCLUSÕES

Mediu-se a taxa de ventilação de salas de aula por meio de dois métodos baseados em CO<sub>2</sub> como gás traçador. Primeiro, adotou-se o método do decaimento, em configurações ideais de abertura e recinto desocupado, num total de 72 amostras. Em seguida, o método da concentração estacionária, a partir do CO<sub>2</sub> gerado pelos ocupantes durante 21 aulas.

Diversos questionamentos puderam ser respondidos através dos dados obtidos, desde relacionados à compreensão do fenômeno da ventilação natural nos ambientes internos em si, como a influência das condições do tempo e das áreas de abertura na taxa de ventilação; até aqueles relacionados à aplicação e adequação dos métodos de medição.

De início, em relação aos métodos de medição, questionou-se a aplicabilidade dos procedimentos para recintos com ventilação natural e grandes áreas de abertura. Havia preocupação quanto a influência de variações nas condições do tempo durante os ensaios, porém ambos os procedimentos foram adotados com sucesso, atendendo-se aos critérios para de uniformidade da concentração, um dos pressupostos para a validade dos resultados obtidos.

Os dois métodos de cálculo da taxa de ventilação para os ensaios de decaimento – método dois pontos e método multipontos – retornaram resultados similares. Teste de Wilcoxon pareado entre as taxas calculadas pelas diferentes abordagens não foi capaz de identificar diferença estatística entre os valores a 5% de significância, com p-valor de 0,089.

Além disso, o erro relativo médio calculado entre os ensaios para o método dois pontos foi de somente 5,9%, valor ainda menor foi calculado para o erro relativo médio do método multipontos, somente 2,2%. Portanto, um dos questionamentos respondidos foi a aplicabilidade do método multipontos para ambientes com ventilação natural, pois um de seus pressupostos é o de que a taxa é constante ao longo do decaimento. Esse fator não se demonstrou empecilho para a grande maioria das amostras.

Considerando que o método multipontos retorna resultado mais precisos, caso se identifique decaimento constante, o que pode ser facilmente avaliado a partir do gráfico de  $\ln\Delta C(t)$ , recomenda-se sua utilização. Entretanto, quando se verificam significativas oscilações durante o decaimento, deve-se ter mais

confiança no resultado obtido pelo método dois pontos, pois ele não depende da manutenção de taxas constantes para ser válido. Como o método dois pontos têm cálculo bastante simples e retorna resultados robustos, não há razões para não se reportar ambos os resultados.

Em relação ao método da concentração estacionária, adotado a partir do CO<sub>2</sub> metabólico, também se questionou em primeiro momento sua adequação às salas de estudo de caso. Uma preocupação era a de que não se atingissem concentrações suficientes acima da concentração de fundo, pois é recomendado utilizar concentrações mínimas que estejam significativamente acima do limite inferior de medição dos instrumentos, para evitar perda de precisão nos registros.

Outra preocupação era a de que não se atendessem aos critérios de uniformidade da concentração no recinto durante as medições. Apesar de em algumas das aulas ter se identificado variações de mais de 10% entre os valores de  $\Delta C$  medidos pelos aparelhos, em especial aquelas em que os ocupantes adotaram estratégia de ventilação cruzada. Em 6 das 13 aulas medidas nesse cenário a variação foi inferior a 10%, e em 4 esteve entre 10 e 15%. Somente em uma das oito aulas com ventilação unilateral houve variação de mais de 10% na uniformidade entre os sensores.

Como esses ensaios não demandam quase nenhuma intervenção, mesmo que fosse necessário descartar esses dados, isso não seria problemático, pois podem se coletar dados por longos períodos, e caso se julgue necessário conhecer os resultados com grande precisão, pode-se descartar essas amostras e tomar conclusões a partir dos casos de sucesso. Porém, sequer é necessário descartar os dados, pode-se apreciá-los, tendo em mente que estão associados a incerteza um pouco mais elevada.

Ainda em relação aos ensaios com concentração estacionária, também se identificou que não é adequado considerar a acurácia reportada pelo fabricante de sensores NDIR para se calcular a incerteza do método de medição, pois a variável de interesse para o método de medição não é a leitura do aparelho propriamente dita, sim sua variação em relação à concentração de fundo. A acurácia reportada dos sensores não considera a realização do procedimento que desconta as concentrações de fundo, o que foi um ponto previamente identificado por outros autores. Isso indica que até mesmo aparelhos que estejam descalibrados, porém mantenham leituras consistentes, podem ser utilizados nesse tipo de ensaio. Os sensores adotados neste estudo eram dotados de calibração automática pela curva

ABC, o que não se demonstrou empecilho para a validade e precisão dos dados coletados.

Em comparação com os resultados obtidos nos ensaios cilindro, se considerou que houve boa concordância entre os resultados. Como as configurações de abertura adotadas pelos usuários diferiram das configurações ideais em que se executou os ensaios com cilindro, não foi possível realizar comparação direta entre os valores. Isso se deu porque durante nenhuma das aulas em que ocorreram medições as janelas basculantes da sala de aula foram abertas, nem as do corredor, nem as da fachada. Considera-se essa uma descoberta importante, que indica uma incompatibilidade entre o projeto arquitetônico e o uso real das salas.

Como se mostrou influência significativa da intensidade do vento na taxa de ventilação para os cenários de ventilação cruzada com cilindro, a partir de regressão linear e ANOVA com p-valor de 0,0178, e como se identificaram variações significativas entre as intensidades do vento registradas durante os diferentes grupos combinados por sala de aula e configuração de abertura, cada um somente com 4 amostras, acredita-se ser mais prudente comparar os resultados obtidos a partir do método da concentração estacionária – que ocorreram somente na sala de aula 1018 – com as médias dos resultados obtidos entre todas as quatro salas em que ocorreram os ensaios com decaimento.

Nos cenários de ventilação cruzada com a sala ocupada, que na maioria dos casos estavam com todas as esquadrias máximo-ar abertas, além da porta, se mediu taxa média de  $12,3 \text{ h}^{-1}$ . Enquanto isso, a média registrada entre as 16 amostras no cenário VC1, com todas as esquadrias abertas, foi de  $24,6 \text{ h}^{-1}$ , e no cenário VC2, somente com esquadrias basculantes abertas, de  $8,5 \text{ h}^{-1}$ . De fato, era esperado que a taxa calculada durante as aulas fosse intermediária, pois conta com área de abertura inferior a VC1, mas superior a VC2.

Para os cenários de ventilação unilateral, também se julgou o valor próximo daquele previsto a partir dos ensaios com cilindro. Enquanto no cenário VU1, com todas as esquadrias da fachada abertas, basculantes e máximo ar, a taxa de ventilação média entre as salas foi de  $8,5 \text{ h}^{-1}$ , e para o cenário VU2, somente com esquadrias basculantes do corredor, foi de  $2,3 \text{ h}^{-1}$ , novamente esperava-se taxa intermediária para as aulas com ventilação unilateral, pois contavam somente com as esquadrias máximo-ar abertas, o que confirmou, pois se mediu taxa de ventilação média de  $4 \text{ h}^{-1}$  neste caso.

Esses resultados corroboram para a aplicabilidade do método com CO<sub>2</sub> metabólico, que está associado a custos mais baixos, tanto monetários, pois não há necessidade de aparatos como cilindro de gás, válvula; quanto ambientais, pois não emitem gases de efeito estufa adicionais; também de tempo, pois há a importante vantagem de permitir a coleta de dados por longos períodos, demandando intervenção e esforço experimental mínimo.

Outro ponto questionado foi a necessidade de se adotar múltiplos sensores durante os ensaios. Identificou-se variação máxima de 10% entre as taxas de ventilação calculada entre os três sensores utilizados nos ensaios de decaimento com cilindro. Apesar da diferença estatística entre os resultados ter sido confirmada pelo teste de Friedman, em todas as configurações de ventilação estudadas, exceto VU1, nota-se que a necessidade ou não de se adotar vários sensores depende do objetivo final da medição. Caso seja estudar o fenômeno da ventilação natural, caracterizar o desempenho aerodinâmico de diferentes tipos de esquadria, ou outras aplicações para as quais se necessite de precisão dos dados, adotar tantos sensores quanto disponíveis é adequado. Porém, caso o objetivo seja avaliar a qualidade do ar das salas de aula, a variação de 10% entre o resultado dos sensores não justifica o dispêndio adicional. Além disso, caso haja múltiplos sensores disponíveis e se deseje investigar a qualidade de diferentes salas de uma instituição de ensino, faz mais sentido coletar mais dados, ainda que menos precisos, a partir de somente um sensor por recinto.

Também foi possível avaliar a qualidade do ar interno das salas de aula estudadas, o que pode ser estendido para ambientes com características geométricas e submetidos a condições climáticas similares. Considerando que o ambiente de estudo de caso possui um dos partidos arquitetônicos mais comuns para instituições de ensino brasileiras, e dado que se identificou carência de campanhas experimentais para a medição das taxas de ventilação no país, os dados coletados podem ser de grande valia para futuros trabalhos que investiguem a ventilação de salas de aula. Como se mediu cenários com ventilação unilateral e cruzada, estudando duas configurações para cada caso, além de taxas de infiltração, é possível comparar os resultados com uma gama outros ambientes que adotam estratégias similares de ventilação.

Também se respondeu ao questionamento acerca de quais configurações de abertura são capazes de proporcionar taxas de ventilação

adequadas em salas de aula, a partir da comparação dos resultados com diferentes critérios normativos internacionais. Para a configuração VC1, a taxa foi muito superior aos valores mínimos propostos por qualquer critério adotado todas as ocasiões. Enquanto isso, para a configuração VC2, apesar da média dos registros ter valor adequado,  $8,5 \text{ h}^{-1}$ , se identificou grande variação entre os resultados, o que se explicou pelas diferenças entre a intensidade do vento durante o período de decaimento, chegando a menos de  $2 \text{ h}^{-1}$  uma das amostras. Isso revela que o fato de existir ventilação cruzada por si só não garante que a taxa de ventilação seja adequada, pelo menos não quando as condições do tempo são desfavoráveis e as áreas de abertura não corretamente dimensionadas.

Enquanto isso, a configuração VU1, com mesma média em relação a VC2, garantiu taxas mais uniforme, acima de  $6 \text{ h}^{-1}$  em 75% das amostras, com menor valor registrado igual a  $4 \text{ h}^{-1}$ , o que corresponde a valor ainda considerado como adequado. Portanto, caso se dimensione adequadamente as áreas de abertura, é possível atingir taxas de ventilação adequadas em salas de aula, mesmo com ventilação unilateral. Nota-se que quanto menor for o volume do recinto, maior a taxa de ventilação para um mesmo fluxo de ar. Isso sugere que é mais fácil que ambientes de pequenas dimensões sejam ventilados adequadamente por cenários com aberturas em somente uma das fachadas. Enquanto isso, o cenário VU2 registrou valores inferiores aos mínimos recomendados.

Quando se comparou o fluxo de ar por pessoa, considerando a ocupação máxima de cada sala, se chegou a conclusões similares. Enquanto VC1 provê taxas muito acima dos critérios, para VU1 é em média  $10 \text{ L/s}$  por pessoa, valor próximo da média de VC2, que neste caso registra valores mínimos inferiores a  $4 \text{ L/s}$  por pessoa, que se adotou como mínimo aceitável.

Nesta etapa se identificou que, apesar de já terem sido propostos diversos critérios para taxas mínimas de ventilação, que variam de acordo com o uso do ambiente, não há consenso acerca de quais os valores mínimos adequados, existindo diferenças inclusive entre os parâmetros considerados. A maioria recomenda valores em fluxo de ar por pessoa, porém há critérios relativos ao fluxo de ar por área de piso, e mesmo critérios que consideram a taxa de ventilação em  $\text{h}^{-1}$ . A carência de um critério ou referência normativa nacional que estabeleça taxas mínimas de ventilação de acordo com o uso do ambiente foi um ponto importante identificado.

Além disso, comparou-se as taxas de ventilação medidas com a previsão de modelos analíticos, e se identificou pontos críticos para aplicá-los de forma a se obter melhor precisão possível para essa abordagem. Pontuaram-se as principais limitações associadas à sua aplicação, e feitas importantes ressalvas em relação ao cálculo das áreas de abertura, que podem ser preciosas para estudos futuros que pretendam adotar esse tipo de modelo analítico.

Em suma, em especial para ambientes com grandes áreas de abertura o cálculo para a o fluxo de ar a partir da equação do orifício não tem diversos de seus pressupostos atendidos, como intensidade e direção do vento constante e uniforme, e a total dissipação da energia cinética do fluxo de ar que entra no recinto. Ainda que esse tipo de procedimento possa ser adotado, se descobriu que um dos métodos investigados para contabilizar as áreas de abertura é inadequado, e subestima o fluxo de ar que passa por esquadrias basculantes com pequeno ângulo de inclinação.

Sugere-se a estudos futuros que avertam a adoção de modelos analíticos simplificados para se estimar as taxas de ventilação que não considerem o impacto da folha de abertura diretamente na “área livre”  $A_f$  da janela, mas sim que o façam com base em correção do coeficiente de descarga  $C_d$ , e que a partir dele determinem as áreas “efetiva”  $A_{eff}$  e “efetiva para múltiplas aberturas em série”  $A_{effs}$ .

Nota-se que não foi possível confirmar efeito significativo da intensidade do vento na taxa de ventilação dos cenários com ventilação unilateral, o que vai contra os modelos analíticos investigados para esta situação. Identificou-se que para esse cálculo que é mais adequado adotar a  $A_f$ , não a área descontada do efeito do ângulo de inclinação da folha da esquadria.

Por fim, também se pontua que os dados coletados durante a campanha experimental deste trabalho, em especial os advindos dos ensaios com cilindro, sujeitos a menores incertezas, podem ser utilizados para a calibração de modelos de simulação computacional que se proponham a estimar a taxa de ventilação natural do edifício de estudo de caso, como a partir de Fluidodinâmica Computacional, ou ainda por softwares como o EnergyPlus.

## REFERÊNCIAS

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: ABNT, 2005.

AHMED, T.; KUMAR, P.; MOTTET, L. Natural ventilation in warm climates: The challenges of thermal comfort, heatwave resilience and indoor air quality. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [S.L.], v. 138, 2021. Disponível em:

ALLEN, J. et al. **5-Step Guide To Checking Ventilation Rates in Classrooms**. [S.L.] Harvard Healthy Buildings Program, 2020.

ALMEIDA, R.; BARREIRA, E.; MOREIRA, P. A discussion regarding the measurement of ventilation rates using tracer gas and decay technique. **Infrastructures**, [S.L.], v. 5, n. 10, p. 1–13, 2020.

ANDERSON, J. **Computational Fluid Dynamics**. Nova Iorque: McGraw-Hill, 1995. 563 p.

AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. **ASHRAE Standard 62.1**: Ventilation for acceptable indoor air quality. [S.L.], 2019.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E741**: Standard test method for determining air change in a single zone by means of a tracer gas dilution. [S.L.], 2017.

BATTERMAN, S. et al. Ventilation rates in recently constructed U.S. school classrooms. **Indoor Air**, [S.L.], v. 27, n. 5, p. 880-890, 2017.

BITTENCOURT, L.; CÂNDIDO, C. **Introdução à ventilação natural**. 2. ed. Maceió: Edufal, 2005. 147 p.

BITTENCOURT, L.; CÂNDIDO, C. **Ventilação natural em edificações**. Rio de Janeiro: Procel Edifica, 2010. 101p.

BUONANNO, G.; STABILE, L.; MORAWSKA, L. Estimation of airborne viral emission: Quantifying emission rate of SARS-CoV-2 for infection risk assessment. **Environment International**, [S.L.], v. 14, 2020.

CHANG, L.; ZHANG, X.; CAI, Y. Experimental determination of air leakage to pressurized main control room caused by personnel entering. **Building and Environment**, School of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai, v. 99, p. 142–148, 2016.

CÓSTOLA, D. **Ventilação por ação do vento no edifício**: procedimentos para qualificações para qualificação. 2006. 214 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

CÓSTOLA, D.; ALUCCI, M. Application of CFD simulations for the calculation of external wind pressure coefficients on openings of a building. **Ambiente Construído**, [S.L.], v. 11, n. 1, p. 145–158, 2011.

CUI, S. et al. CO<sub>2</sub> tracer gas concentration decay method for measuring air change rate. **Building and Environment**, [S.L.], v. 84, p. 162–169, 2015.

DAGHIGH, R.; ADAM, N.; SAHARI, B. Ventilation parameters and thermal comfort of naturally and mechanically ventilated offices. **Indoor and Built Environment**, [S.L.], v. 18, n. 2, p. 113–122, 2009.

DECKER, P.; ATEM, C. Ventilação natural como instrumento na redução da propagação da COVID-19 em salas de aula. **Ambiente Construído**, [S.L.], 2022.

EDUCATION & SKILLS FUNDING AGENCY; DANIELS, R. **Building bulletin 101: Guidelines on ventilation, thermal comfort and indoor air quality in schools**. [S. l.: s. n.], 2018.

EDUCATION & SKILLS FUNDING AGENCY; DANIELS, R. **Building bulletin 101: discharge coefficient calculator**. 2018. Disponível em: <https://www.gov.uk/government/publications/classvent-and-classcool-school-ventilation-design-tool>. Acesso em: 23 nov. 2022.

ETHERIDGE, D.; SANDBERG, M. **Building Ventilation: Theory and Measurement**. 1 ed. [S.L.]: John Wiley & Sons, 1996.

ETHERIDGE, D. A perspective on fifty years of natural ventilation research. **Building and Environment**, [S.L.], v. 91, p. 51–60, 2015.

FAN, S. et al. A full-scale field study for evaluation of simple analytical models of cross ventilation and single-sided ventilation. **Building and Environment**, Cambridge, v. 187, 2021.

FERNANDES, L. et al. Evaluación de los coeficientes de descarga de grandes ventanas que se pueden abrir utilizando muestras a escala real en ensayos en túneles de viento. **Revista Ingeniería de Construcción**, [S.L.], v. 35, n. 2, p. 203-214, ago. 2020.

FEW, J. **Ventilation in occupied homes: measurement, performance and sociotechnical perspectives**. 2021. - University College London, London, 2021.

FEW, J.; ELWELL, C. Applying the CO<sub>2</sub> concentration decay tracer gas method in long-term monitoring campaigns in occupied homes: identifying appropriate unoccupied periods and decay periods. **International Journal of Building Pathology and Adaptation**, [S.L.], 2021.

FISK, W. The ventilation problem in schools: literature review. **Indoor Air**, [S.L.], v. 27, n. 6, p. 1039-1051, jul. 2017.

FRANKE, J. et al. **Best practice guideline for the CFD simulation of flows in the urban environment - a summary**. Cambridge: Cambridge Environmental Research Consultants, 2007.

FREIRE, A. **Teoria de camada limite**. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1990.

FROTA, A.; SCHIFFER, S. **Manual de conforto térmico**. 5. ed. São Paulo: Studio Nobel, 2001.

GIVONI, B. Comfort, climate analysis and building design guidelines. **Energy and Buildings**, [S.L.], v. 18, n. 1, p. 11–23, 1992.

GOUGH, H. et al. Field measurement of natural ventilation rate in an idealised full-scale building located in a staggered urban array: Comparison between tracer gas and pressure-based methods. **Building and Environment**, [S.L.], v. 137, p. 246–256, 2018.

GU, L. Airflow Network Modeling in EnergyPlus. *In*: international building performance simulation association conference and exhibition, 10, 2007, Pequim. **Proceedings [...]**. University of Central Florida, 2007. p. 964-971.

HEISELBERG, P.; SANDBERG, M. Evaluation of discharge coefficients for window openings in wind driven natural ventilation. **International Journal of Ventilation**, [S.L.], v. 5, n. 1, p. 43–52, 2006.

HITCHIN, E.; WILSON, C. A review of experimental techniques for the investigation of natural ventilation in buildings. **Building Science**, [S.L.], v. 2, n. 1, p. 59–82, 1967.

HULT, E.; IACCARINO, G.; FISCHER, M. Using CFD simulations to improve the modeling of window discharge coefficients. **Proceedings of SimBuild**, [S.L.], v. 5, n. 1, p. 322–328, 2012.

IDR-PARANÁ. **Dados climáticos entre 1976 e 2019 - Londrina-PR**, 2020.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **EN ISO 13141-1: Performance testing of components / products for residential ventilation**. Part 1 : Externally and internally mounted air transfer devices. Bruxelas: BSI Standards, 2019.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **EN ISO 12569: Thermal performance of buildings and materials**. Determination of specific airflow rate in buildings — Tracer gas dilution method. Bruxelas: BSI Standards, 2017.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **EN ISO 13779: Ventilation for non-residential buildings**. Performance requirements for ventilation and room-conditioning systems. Bruxelas: BSI Standards, 2007.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **EN ISO 16798-1 Energy performance of buildings - ventilation for buildings**. Part 1: Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics. Bruxelas: BSI Standards, 2019.

JONES, B. et al. A review of ventilation opening area terminology. **Energy and Buildings**, [S.L.], v. 118, p. 249–258, 2016.

JONES, N. et al. Two metres or one: what is the evidence for physical distancing in COVID-19?. **BMJ (Clinical research ed.)**, [S.L.], v. 370, p. 3223, 2020.

JREIJIRY, D.; HUSAUNNDEE, A.; INARD, C. Numerical study of a hybrid ventilation system for single family houses. **Solar Energy**, [S.L.], v. 81, n. 2, p. 227–239, 2007.

KABIRIKOPAEI, A.; LAU, J. Uncertainty analysis of various CO<sub>2</sub>-Based tracer-gas methods for estimating seasonal ventilation rates in classrooms with different mechanical systems. **Building and Environment**, [S.L.], v. 179, n. maio, p. 107003, 2020.

KARAVA, P.; STATHOPOULOS, T.; ATHIENITIS, A. Wind Driven Flow through Openings – A Review of Discharge Coefficients. **International Journal of Ventilation**, [S.L.], v. 3, n. 3, p. 255–266, 2004;

KOWALTOWSKI, D. **Arquitetura escolar: o projeto do ambiente de ensino**. São Paulo. Oficina de textos, 2011.

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. **Eficiência energética na arquitetura**. 3. ed. Rio de Janeiro: Eletrobras PROCEL, 2013.

LIRA, M. et al. Caracterização do regime de ventos no Piauí para o aproveitamento de energia eólica. **Revista Brasileira de Meteorologia**, [S.L.], v. 32, n. 1, p. 77–88, 2017.

LOOMANS, M. **The measurement and simulatioof indoor air flow**. 1998. Technische Universiteit Eindhoven, [S.L.], 1998.

LOWTHER, S. et al. Low level carbon dioxide indoors - a pollution indicator or a pollutant? A health-based perspective. **Environments - MDPI**, [S.L.], v. 8, n. 11, p. 1–25, 2021.

LUKIANCHUKI, M. A evolução das estratégias de conforto térmico e ventilação natural na obra de João Filgueiras Lima, Lelé: Hospitais Sarah de Salvador e do Rio de Janeiro. [S.L.], 2010.

LUKIANCHUKI, M. et al. Evaluation of CFD simulations with wind tunnel experiments: pressure coefficients at openings in sawtooth building. **Acta scientiarum. Technology**, [S.L.], v. 40, n. 1, 2018.

RODRIGUES, A. **Análise da qualidade da ventilação em salas de aula**. 2017. 112 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2017.

MARTIN, C. et al. Evaluation and environmental correction of ambient CO<sub>2</sub> measurements from a low-cost NDIR sensor. **Atmospheric Measurement Techniques**, [S.L.], v. 10, n. 7, p. 2383–2395, 2017.

MIJORSKI, S.; CAMMELLI, S. Stack effect in high-rise buildings: a review. **International Journal of High-Rise Buildings**, [S.L.], v. 5, n. 4, p. 327–338, 2016.

MORAWSKA, L. et al. A paradigm shift to combat indoor respiratory infection. **Science**, [S.L.], v. 372, n. 6543, p. 689-691, maio 2021.

MUEHLEISEN, R.; PATRIZI, S. A new parametric equation for the wind pressure coefficient for low-rise buildings. **Energy and Buildings**, [S.L.], v. 57, p. 245–249, 2013.

NOWAK, K.; MARCINOWSKI, A. Analysis of ventilation air exchange rate and indoor air quality in the office room using metabolically generated CO<sub>2</sub>. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, [S.L.], 2018.

OKUYAMA, H.; ONISHI, Y. Uncertainty analysis and optimum concentration decay term for air exchange rate measurements: Estimation methods for effective volume and infiltration rate. **Building and Environment**, [S.L.], v. 49, n. 1, p. 182–192, 2012.

PEREIRA, H. et al. **Manual de simulação computacional de edifícios naturalmente ventilados no programa EnergyPlus**. Florianópolis: LabEEE, 2013.

PERSILY, A. Evaluating building IAQ and ventilation with indoor carbon dioxide. **ASHRAE Transactions**, [S.L.], v. 103, n. pt 2, p. 193–204, 1997.

PERSILY, A. Field measurement of ventilation rates. **Indoor Air**, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, v. 26, n. 1, p. 97–111, 2016.

PERSILY, A. Ventilation measurements in selected QAI studies. **Society**, [S.L.], n. August, p. 17–22, 2008.

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

RAMPONI, R.; BLOCKEN, B. CFD simulation of cross-ventilation for a generic isolated building: Impact of computational parameters. **Building and Environment**, [S.L.], v. 53, p. 34–48, 2012.

REMION, G.; MOUJALLED, B.; EL MANKIBI, M. Review of tracer gas-based methods for the characterization of natural ventilation performance: Comparative analysis of their accuracy. **Building and Environment**, [S.L.], v. 160, n. maio, p. 106180, 2019.

ROMERO, M. **Arquitetura Bioclimática do Espaço Público**. 3. ed. Brasília: Universidade de Brasília, 2007.

SAINI, J.; DUTTA, M.; MARQUES, G. Indoor air quality monitoring systems based on internet of things: a systematic review. **International Journal Of Environmental Research And Public Health**, [S.L.], v. 17, n. 14, p. 4942, jul. 2020;

SAKIYAMA, N. et al. Perspectives of naturally ventilated buildings: a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [S.L.], v. 130, 2020. Disponível em:

SALES, G. **Diagrama de ventilação natural**: ferramenta de análise do potencial da ventilação natural no estudo preliminar de projeto. 2016. 217 f. Tese (Doutorado) - Curso de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de Brasília, Brasília, 2016.

SANDBERG, M. et al. Experimental methods in ventilation. **Advances in Building Energy Research**, [S.L.], v. 2, n. 1, p. 159–210, 2008.

SCHIRMER, W. et al. Air pollution in internal environments and sick building syndrome. **Ciência & saúde coletiva**, Rio de Janeiro, v. 16, n. 8, p. 3583–3590, 2011.

SEIFERT, J. et al. Calculation of wind-driven cross ventilation in buildings with large openings. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, [S.L.], v. 94, n. 12, p. 925–947, 2006.

SEPPÄNEN, O.; FISK, W.; LEI, Q. Ventilation and performance in office work. **Indoor Air**, [S.L.], v. 16, n. 1, p. 28-36, fev. 2006.

SHARPE, P. et al. What we think we know about the aerodynamic performance of windows. **Energy & Buildings**, [S.L.], v. 231, n. 110556, 2021.

SHERMAN, M. Tracer-gas techniques for measuring ventilation in a single zone. **Building and Environment**, [S.L.], v. 25, n. 4, p. 365–374, 1990.

SHERMAN, M.; WALKER, I.; LUNDEN, M. Uncertainties in air exchange using continuous-injection, long-term sampling tracer-gas methods. **International Journal of Ventilation**, [S.L.], v. 13, n. 1, p. 13–27, 2014.

SUNDELL, J. On the history of indoor air quality and health. **Indoor Air**, [S.L.], v. 14, n. 7, p. 51-58, ago. 2004.

SUNDELL, J. et al. Ventilation rates and health: Multidisciplinary review of the scientific literature. **Indoor Air**, [S.L.], v. 21, n. 3, p. 191–204, 2011.

SWAMI, M.; CHANDRA, S. Correlations for pressure distribution on buildings and calculation of natural-ventilation airflow. **ASHRAE Transactions**, [S.L.], v. 94, n. 1, p. 243–266, 1988.

TOKYO POLYTECHNIC UNIVERSITY. **Aerodynamic database for non-isolated low-rise buildings**, 2007.

TOLEDO, M. **Avaliação do desempenho da ventilação natural pela ação do vento em apartamentos: uma aplicação em Maceió/AL**. 2006. 253 f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

TRAN, D. et al. Indoor particle dynamics in schools: Determination of air exchange rate, size-resolved particle deposition rate and penetration factor in real-life conditions. **Indoor and Built Environment**, [S.L.], v. 26, n. 10, p. 1335–1350, 2017.

TROEN, I.; PETERSEN, E. **European wind atlas**, Roskilde: Riso National Laboratory 1989.

US EPA. **Greenhouse gas emissions from a typical passenger vehicle (EPA-420-F-18-008)**. EPA, [S.L.], p. 1–5, 2018.

VAN BUGGENHOUT, S. et al. Influence of sampling positions on accuracy of tracer gas measurements in ventilated spaces. **Biosystems Engineering**, [S.L.], v. 104, n.

2, p. 216–223, 2009.

WALKER, I.; WILSON, P. **Field validation of algebraic equations for stack and wind driven air infiltration calculations**. [S. l.: s. n.], 1998.

WALKER, I.; WILSON, P. Practical Methods for Improving Estimates of Natural Ventilation Rates. Buxton, set. 1994. *In*: The Role of Ventilation 15th AIVC Conference AIVC Conference, Buxton. **Anais [...]**. Buxton: AIVC, 1994.

WARREN, P.; PARKINS, L. **Single-sided ventilation through open windows**, 1985.

WHO. **Roadmap to improve and ensure good indoor ventilation in the context of COVID-19**, 2021.

XAVIER, A. et al. Visualização da ventilação natural em ensaios na mesa d'água comparado a simulações computacionais. **PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção**, [S.L.], v. 11, p. e020020, 2020.

YAGLOU, C.; RILEY, E.; COGGINS, D. Ventilation requirements. **ASHRAE Transactions**, [S.L.], n. 1013, p. 133–162, 1936.

YANG, T. **CFD and field testing of a naturally ventilated full-scale building**. 2014. 227 f. These (Doutorado) - Civil Engineering, University of Nottingham, Nottingham, 2014.

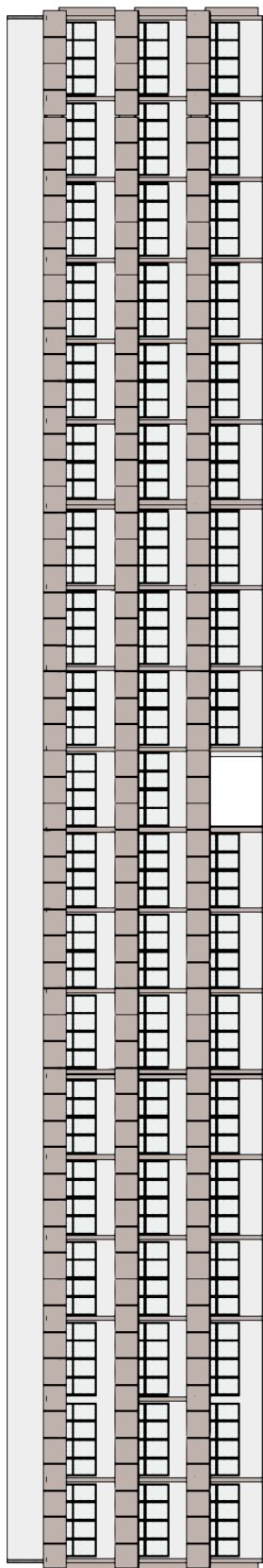
ZHANG, H. et al. A critical review of combined natural ventilation techniques in sustainable buildings. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [S.L.], v. 141, 2021.

ZHANG, W. et al. Test on ventilation rates of dormitories and offices in university by the CO<sub>2</sub> tracer gas method. **Procedia Engineering**, [S.L.], v. 121, p. 662–666, 2015.

## APÉNDICES

**APÊNDICE A – ELEVAÇÕES DO EDIFÍCIO DE ESTUDO DE CASO****Figura A-1 – Elevação Oeste do CTU****Figura A-2 – Elevação Leste do CTU**

**Figura A-3** – Elevação Norte do CTU



**Figura A-4** – Elevação Sul do CTU



## APÊNDICE B – FORMULÁRIO PARA ENSAIOS DE DECAIMENTO

### Tabela B-1 – Formulário de experimento de CO<sub>2</sub> com cilindro

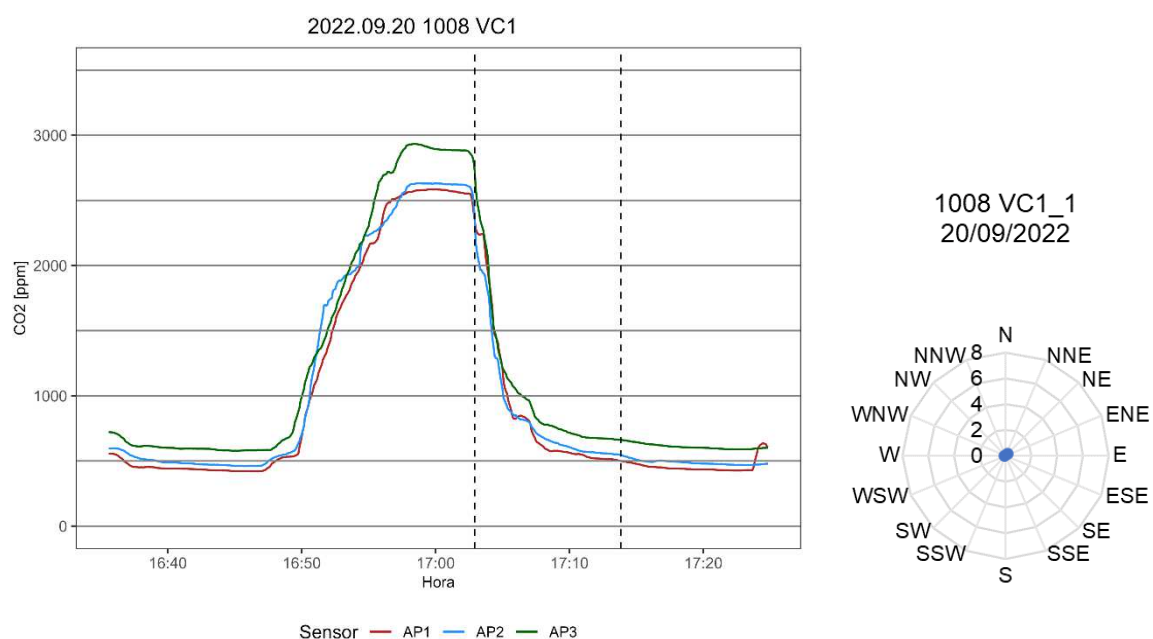
<b>Formulário de experimento de medição da taxa de ventilação com gás traçador</b>	
Método: Decaimento da concentração de CO <sub>2</sub>	
Data: 13/07/2022	
Local: Londrina, PR - Brasil;	
Coordenadas: -23.326527, -51.198425	
Descrição do clima: Céu limpo	
Período: Tarde	
Sala: MM8	
Volume do ambiente [m <sup>3</sup> ]: 52,92	
Área do ambiente [m <sup>2</sup> ]: 170,93	
Potenciais fontes de infiltração: Frestas das esquadrias	
Sistema de ventilação: Ventilação natural somente, ar-condicionado desligado	
Tipo de ventilação: Cruzada	
Configuração das aberturas: VC1	
Auxiliar MM8VC1	
Esquadrias abertas: J11, J12, P04, J13	
ESFA e Daniels (2018)	Af total [m <sup>2</sup> ]: 10,60
	Af fachada [m <sup>2</sup> ]: 5,69
	Af corredor [m <sup>2</sup> ]: 4,91
	Aeff total [m <sup>2</sup> ]: 5,16
	Aeff fachada [m <sup>2</sup> ]: 2,53
	Aeff corredor [m <sup>2</sup> ]: 2,63
Lamberts, Dutra e Pereira (2013)	Aeffs [m <sup>2</sup> ]: 1,82
	Af total [m <sup>2</sup> ]: 4,14
	Af fachada [m <sup>2</sup> ]: 1,14
	Af corredor [m <sup>2</sup> ]: 3,01
	Aeff total [m <sup>2</sup> ]: 2,49
	Aeff fachada [m <sup>2</sup> ]: 0,68
Aeff corredor [m <sup>2</sup> ]: 1,80	
Aeffs [m <sup>2</sup> ]: 0,64	
Horário de início [procedimentos]: 16h00	
Intervalo entre medições [s]: 5	
T de soltura do gás [cronometrar] [s]:	
Fluxo de CO <sub>2</sub> injetado [L/min]:	
Volume injetado (1atm, 21C) [L/min]:	
Massa aprox.a de CO <sub>2</sub> injetado [kg]:	
Horário de abertura das janelas: 17h18	
Horário de retirada dos sensores: 17h40	

## APÊNDICE C – ENSAIOS COM CILINDRO

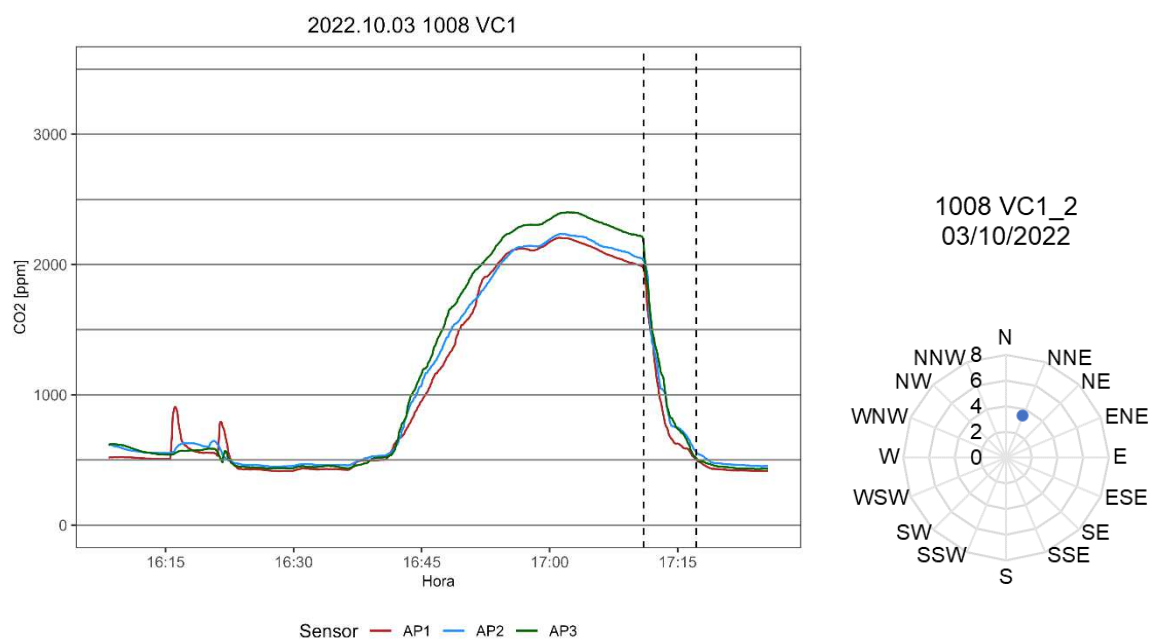
### C.1 VENTILAÇÃO CRUZADA 1

Sala 1008

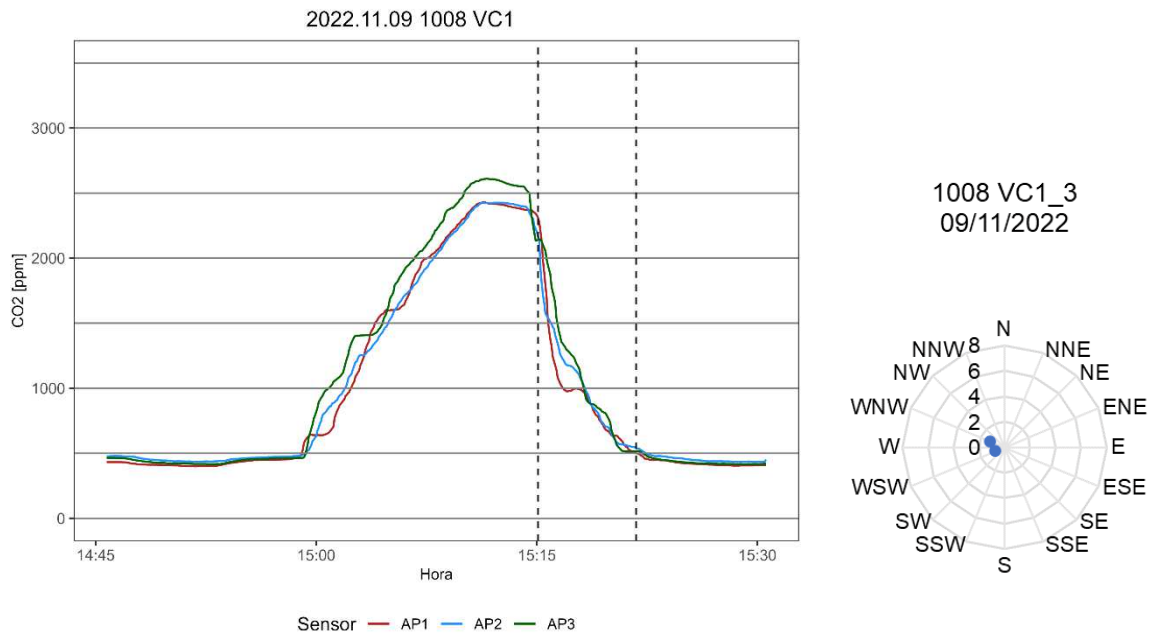
**Gráfico C-1** – Ensaio de decaimento com cilindro, sala 1008, VC1.1, 20/09/2022



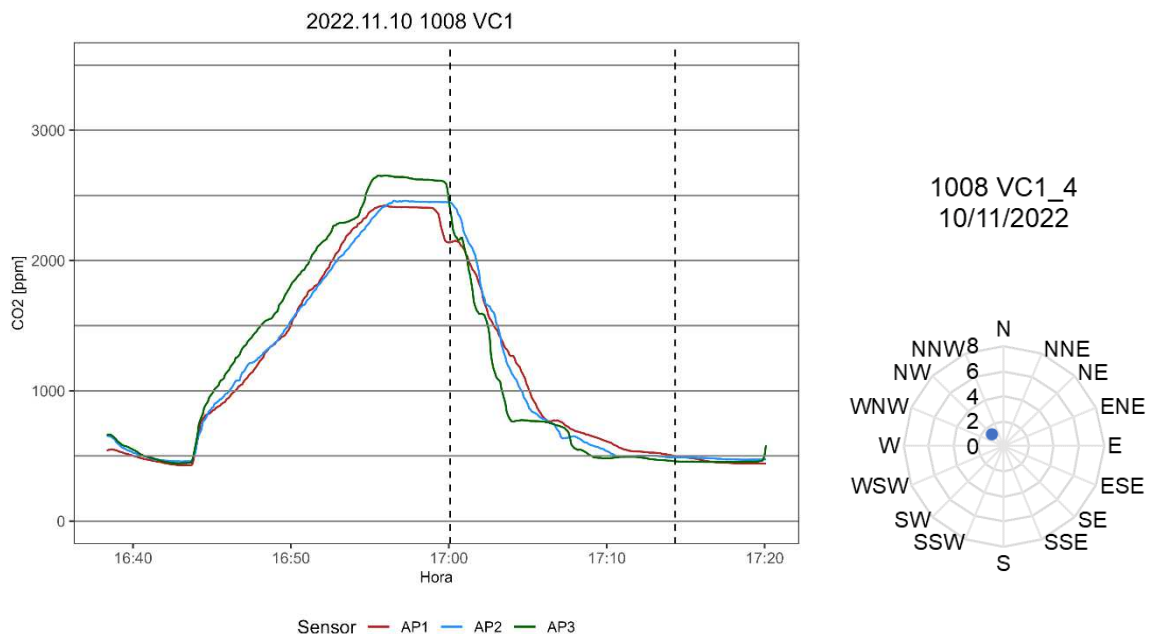
**Gráfico C-2** – Ensaio de decaimento com cilindro, sala 1008, VC1.2, 03/10/2022



**Gráfico C-3 – Ensaio de decaimento com cilindro, sala 1008, VC1.3, 09/11/2022**

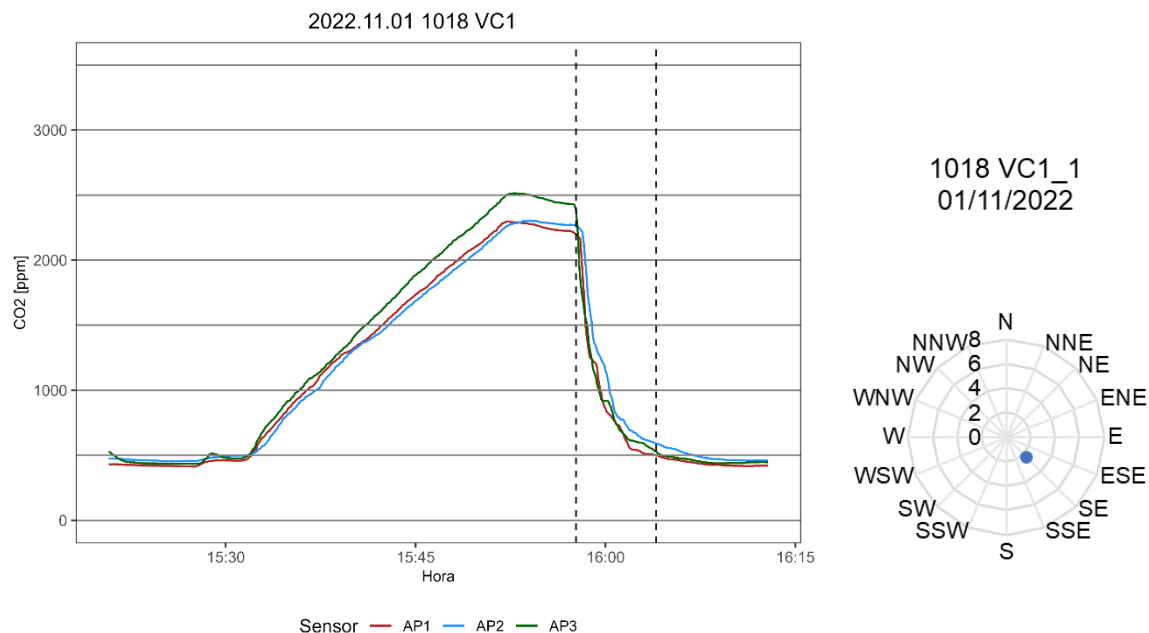


**Gráfico C-4 – Ensaio de decaimento com cilindro, sala 1008, VC1.4, 10/11/2022**

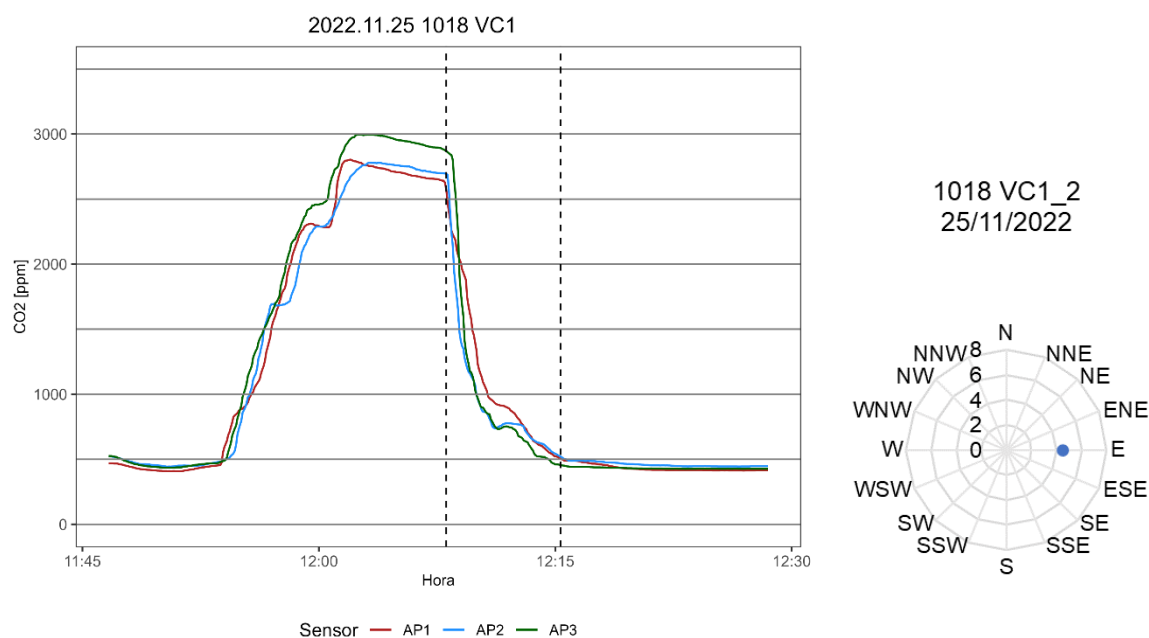


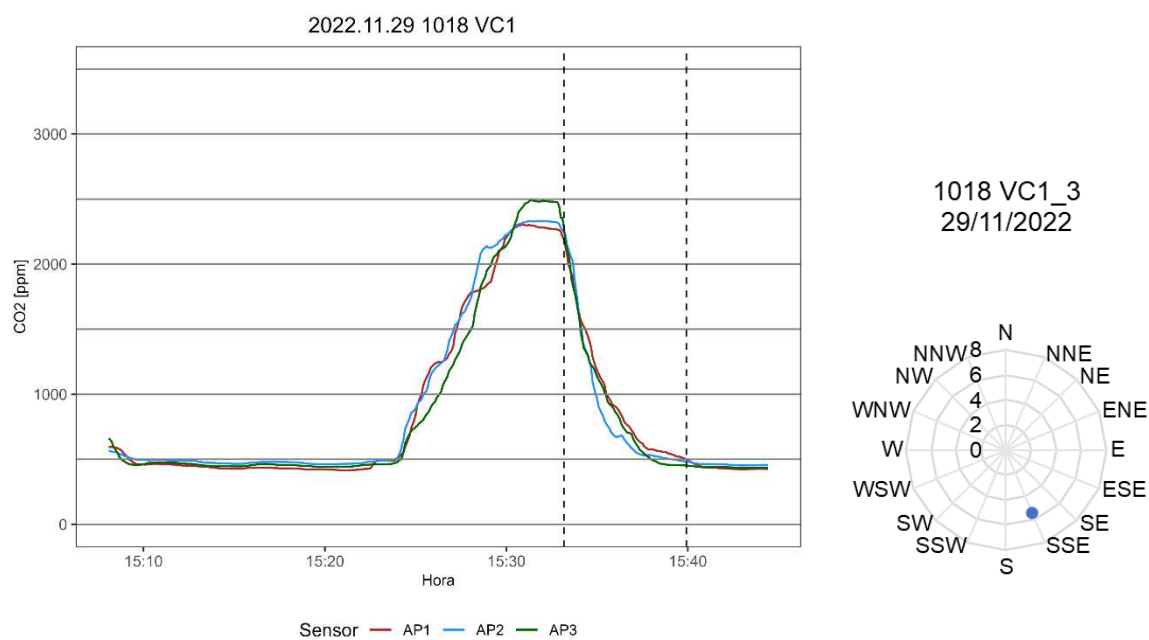
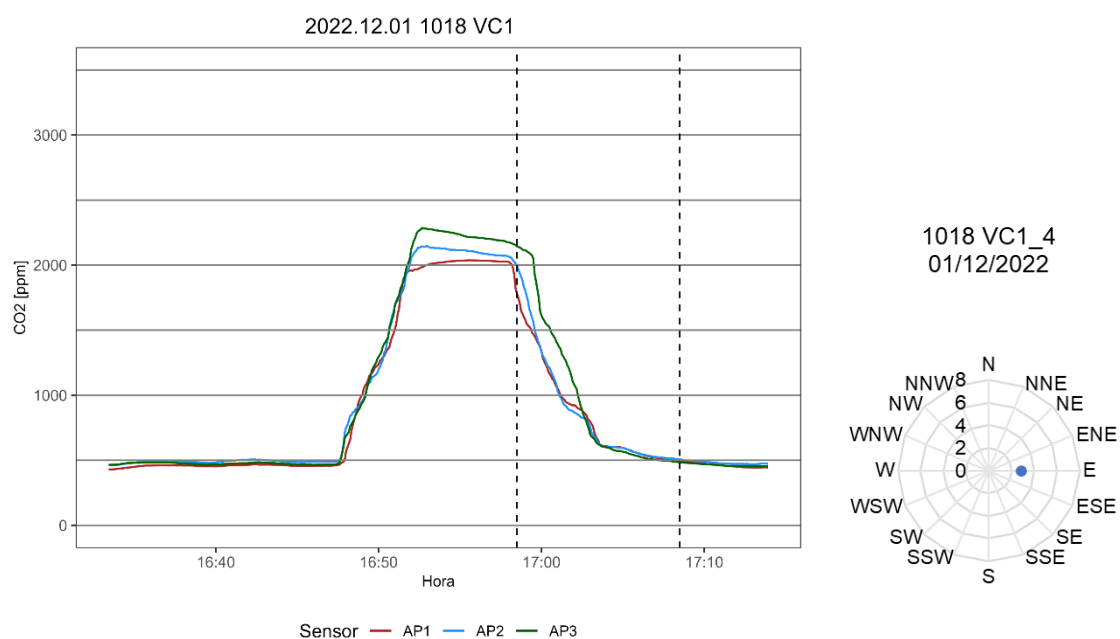
Sala 1018

**Gráfico C-5 – Ensaio de decaimento com cilindro, sala 1018, VC1.1, 01/11/2022**

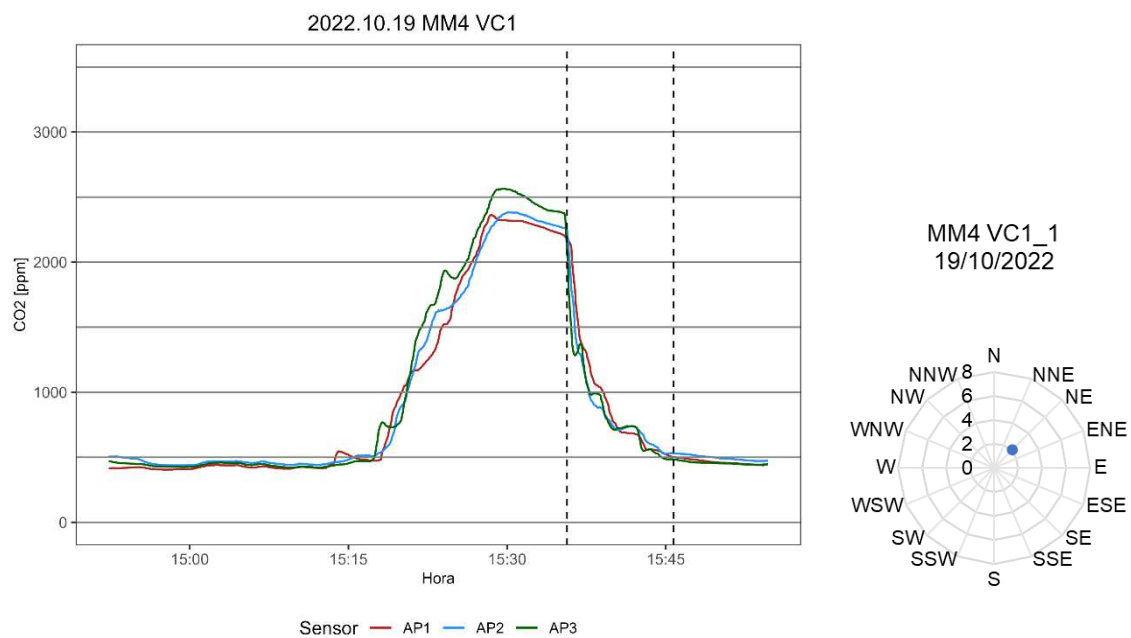
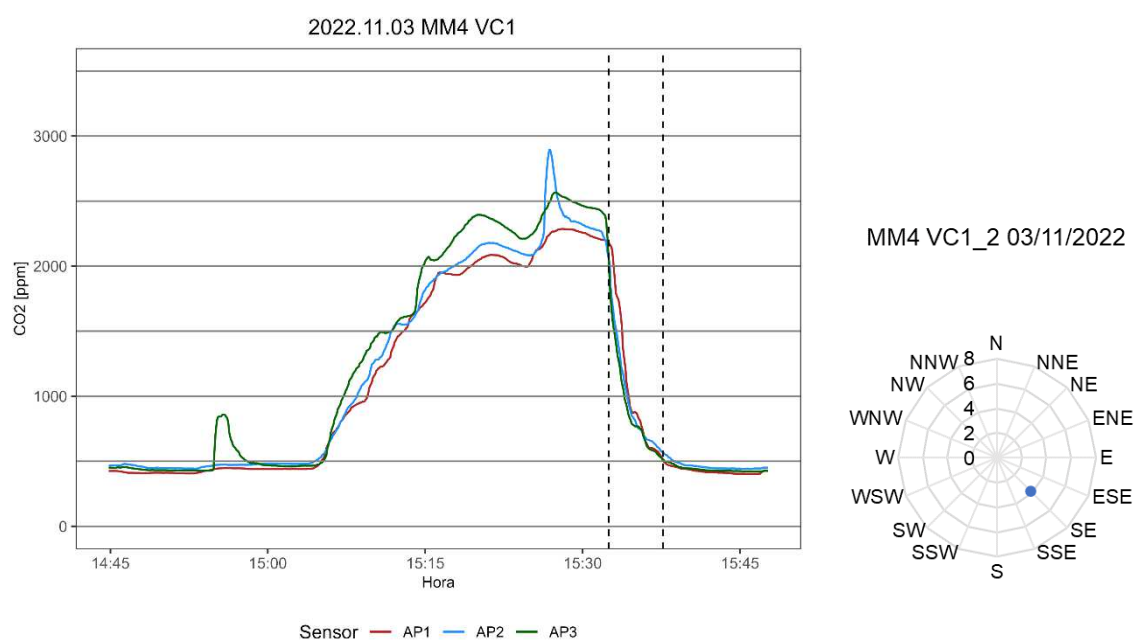


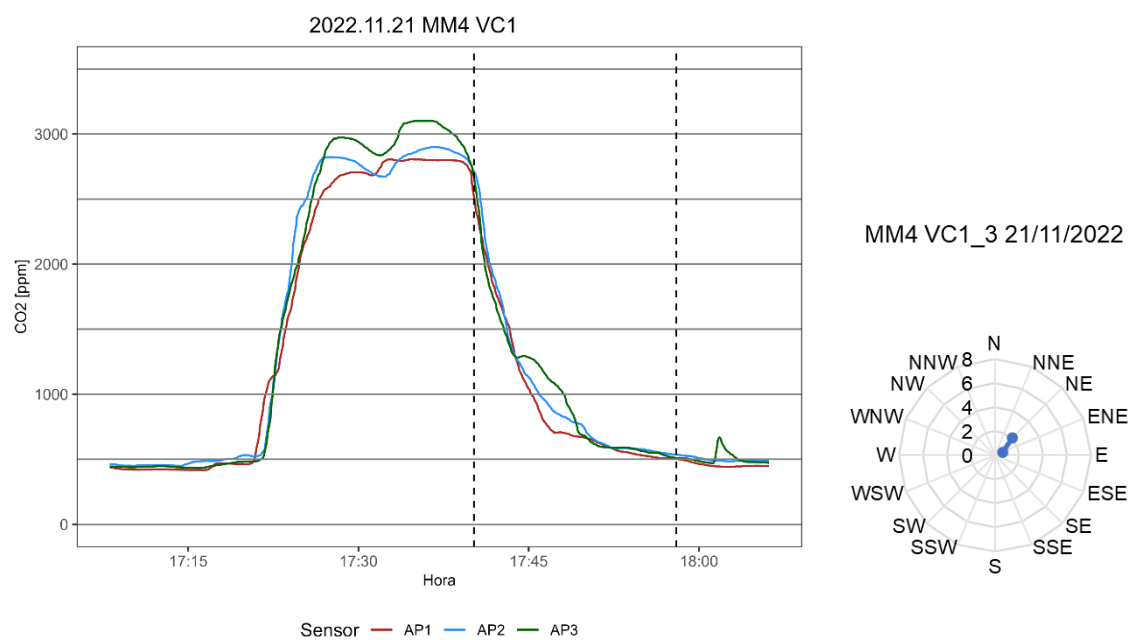
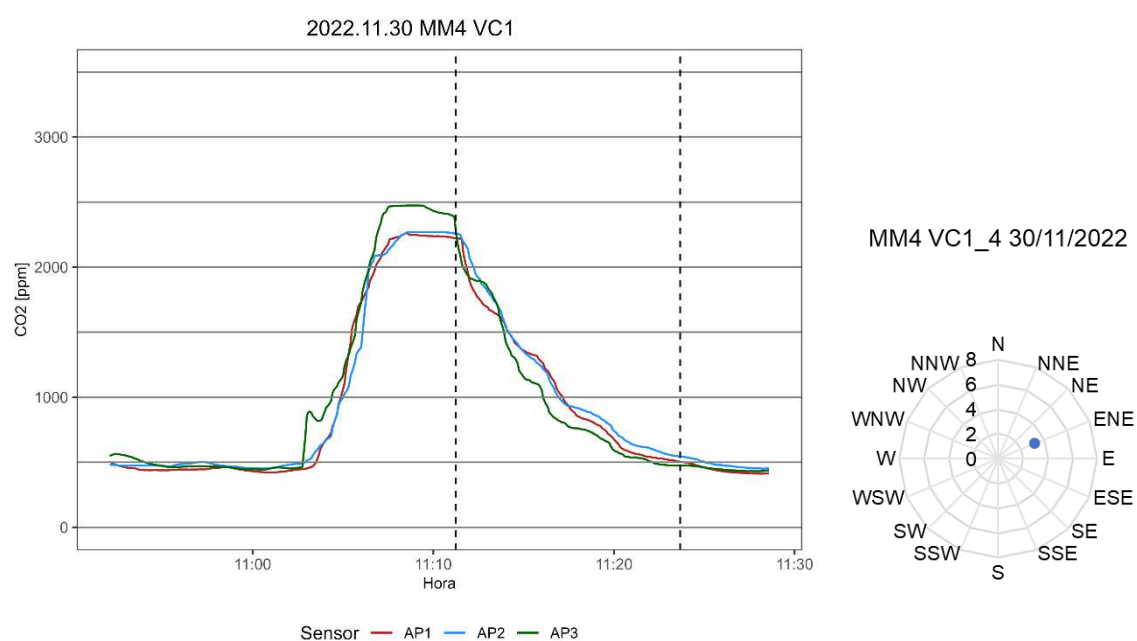
**Gráfico C-6 – Ensaio de decaimento com cilindro, sala 1018, VC1.2, 25/11/2022**



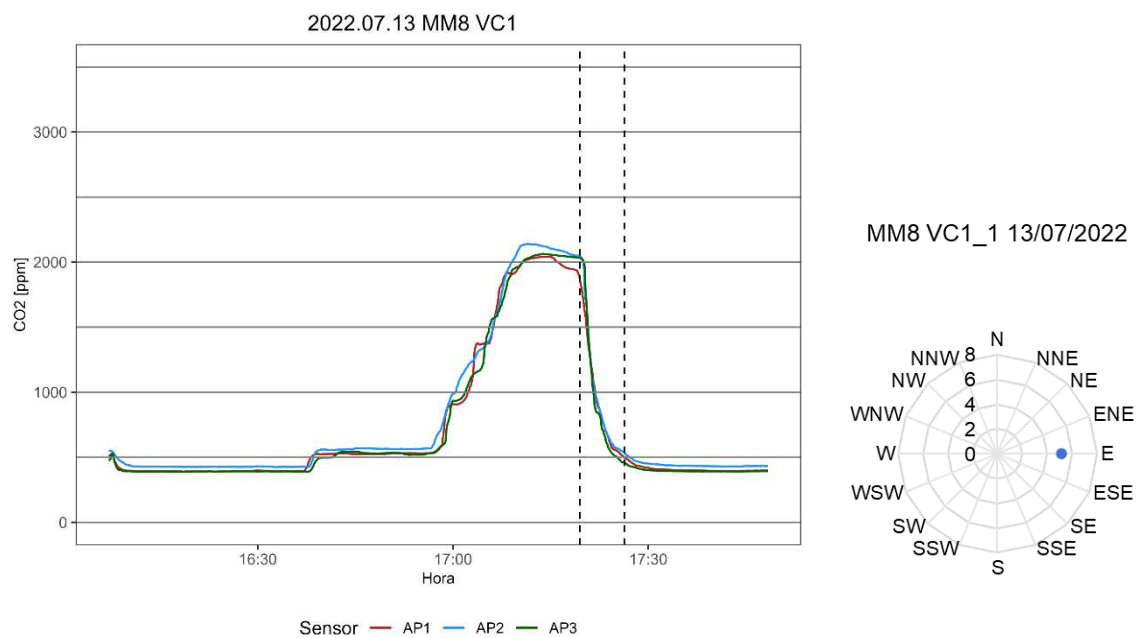
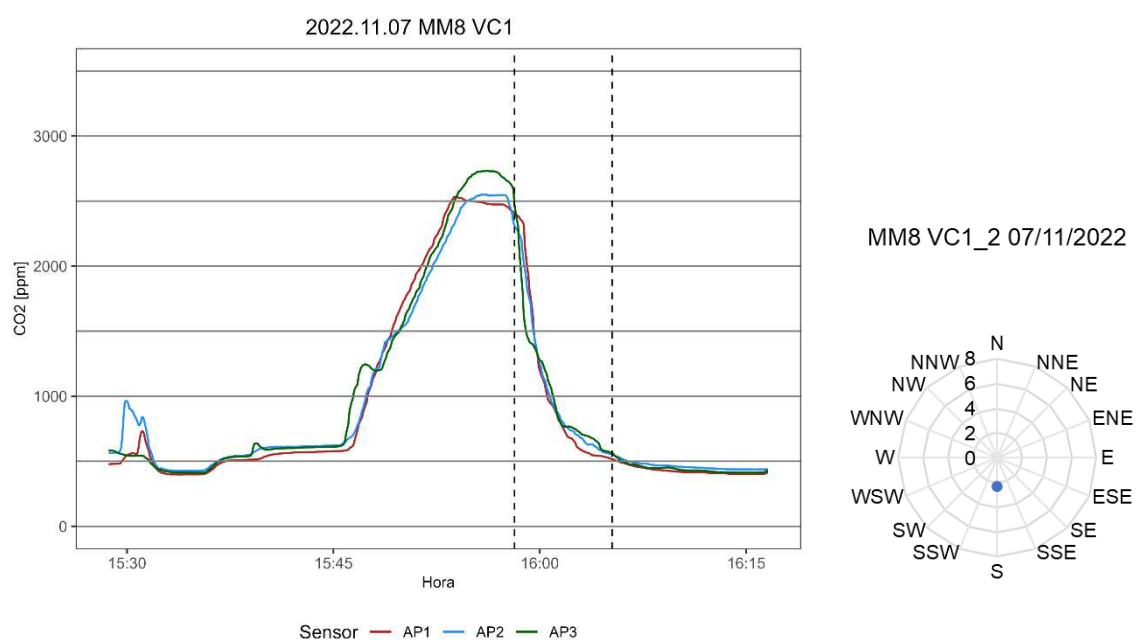
**Gráfico C-7 – Ensaio de decaimento com cilindro, sala 1018, VC1.3, 29/11/2022****Gráfico C-8 – Ensaio de decaimento com cilindro, sala 1018, VC1.4, 01/12/2022**

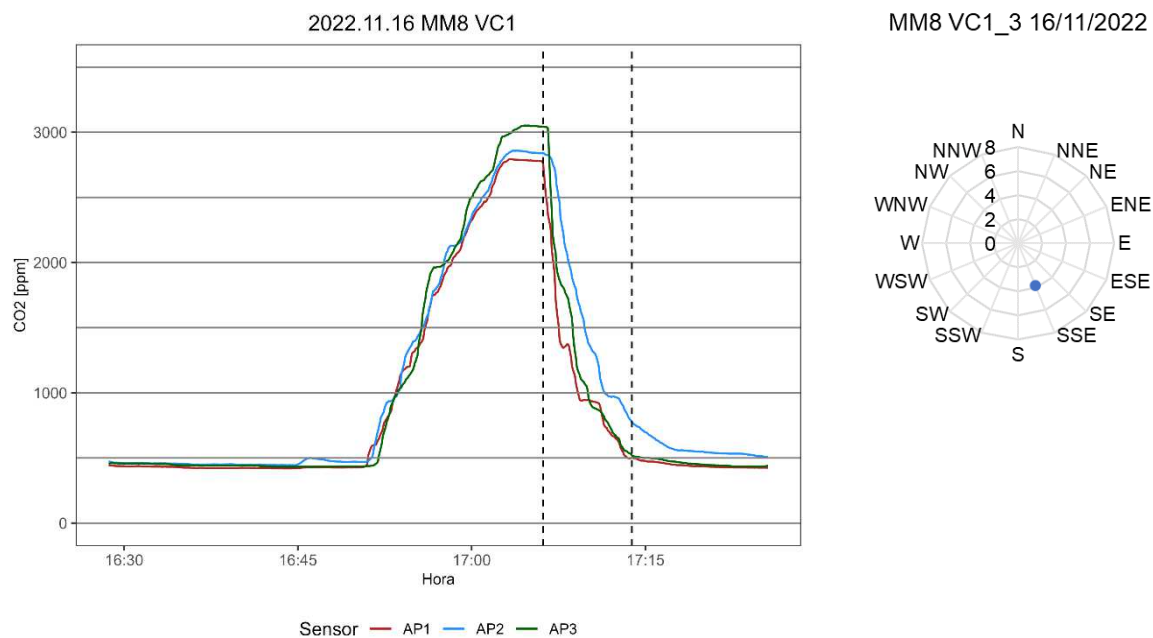
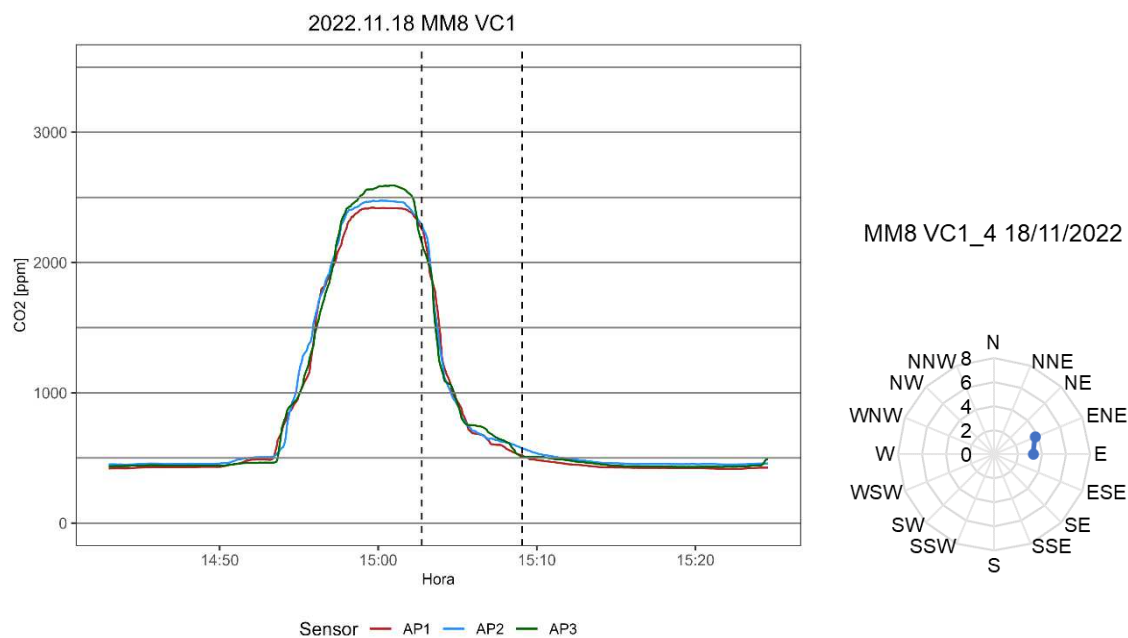
## Sala MM4

**Gráfico C-9** – Ensaio de decaimento com cilindro, sala MM4, VC1.1, 19/10/2022**Gráfico C-10** – Ensaio de decaimento com cilindro, sala MM4, VC1.1, 03/11/2022

**Gráfico C-11 – Ensaio de decaimento com cilindro, sala MM4, VC1.3, 21/11/2022****Gráfico C-12 – Ensaio de decaimento com cilindro, sala MM4, VC1.4, 30/11/2022**

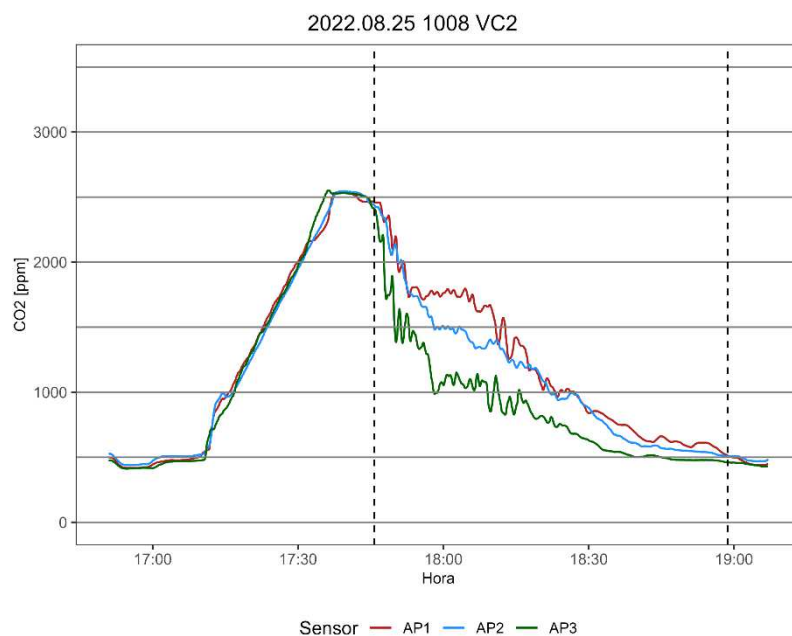
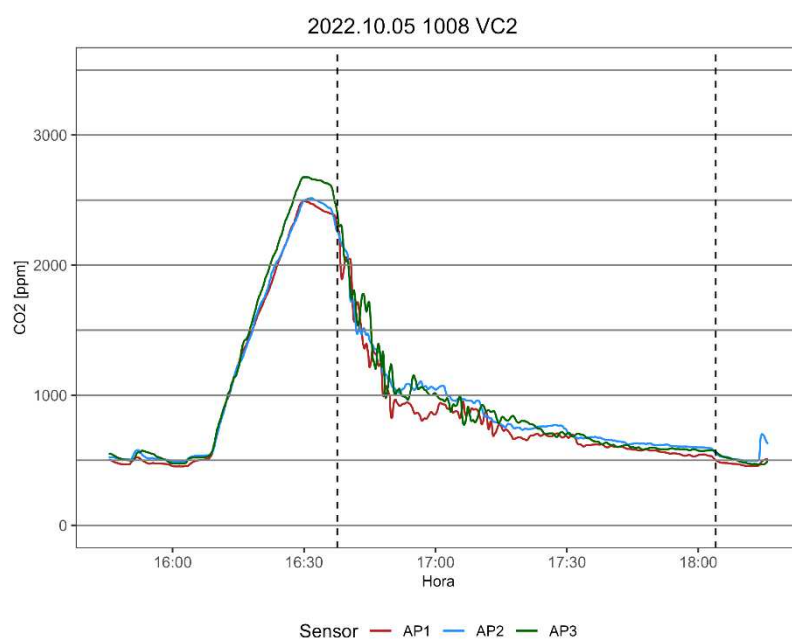
Sala MM8

**Gráfico C-13 – Ensaio de decaimento com cilindro, sala MM8, VC1.1, 13/07/2022****Gráfico C-14 – Ensaio de decaimento com cilindro, sala MM8, VC1.2, 07/11/2022**

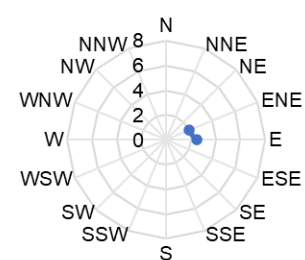
**Gráfico C-15 – Ensaio de decaimento com cilindro, sala MM8, VC1.3, 16/11/2022****Gráfico C-16– Ensaio de decaimento com cilindro, sala MM8, VC1.4, 18/11/2022**

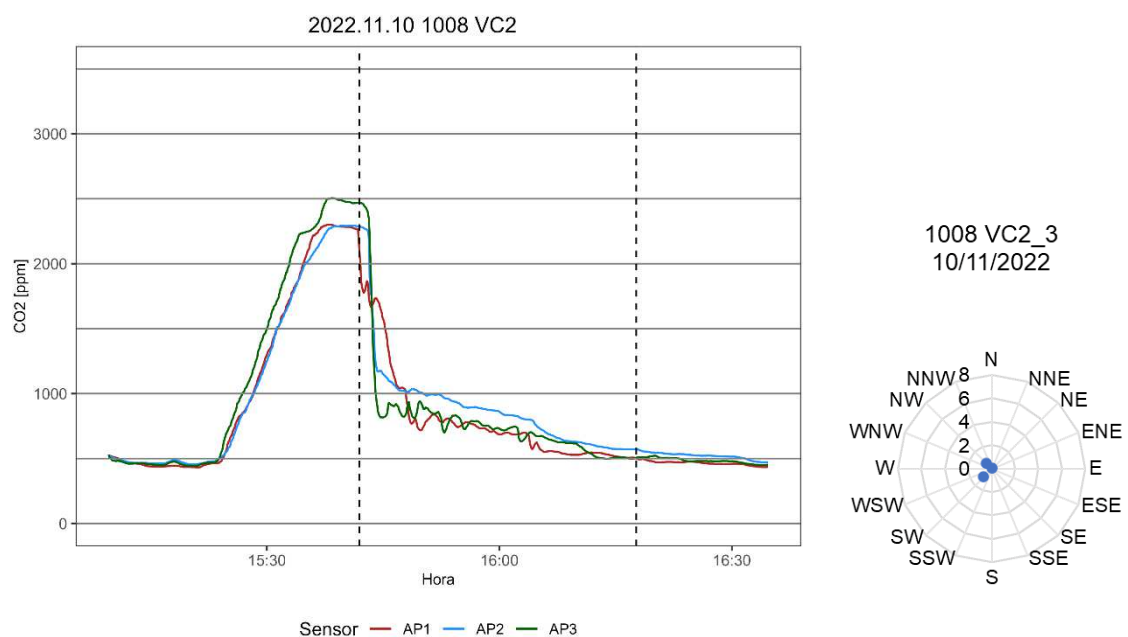
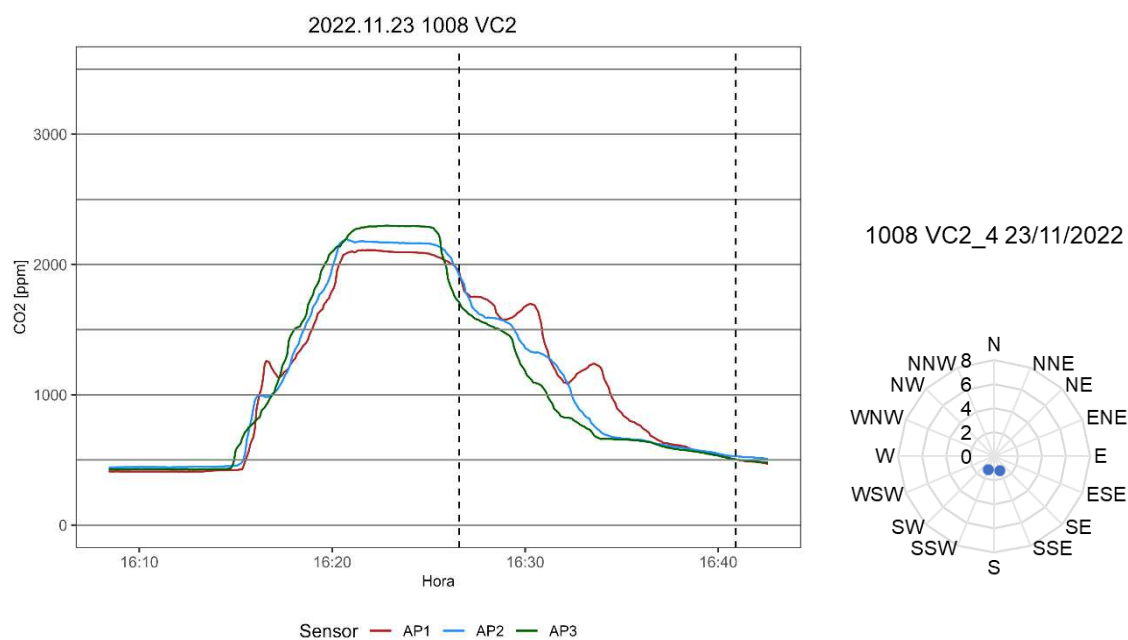
## C.2 VENTILAÇÃO CRUZADA 2

Sala 1008

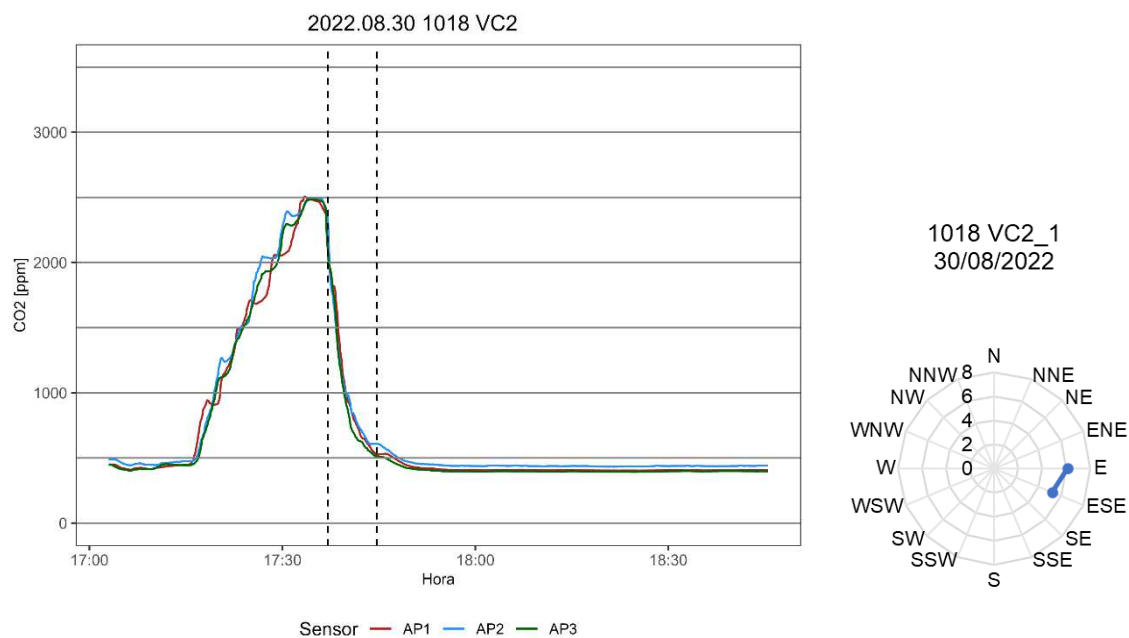
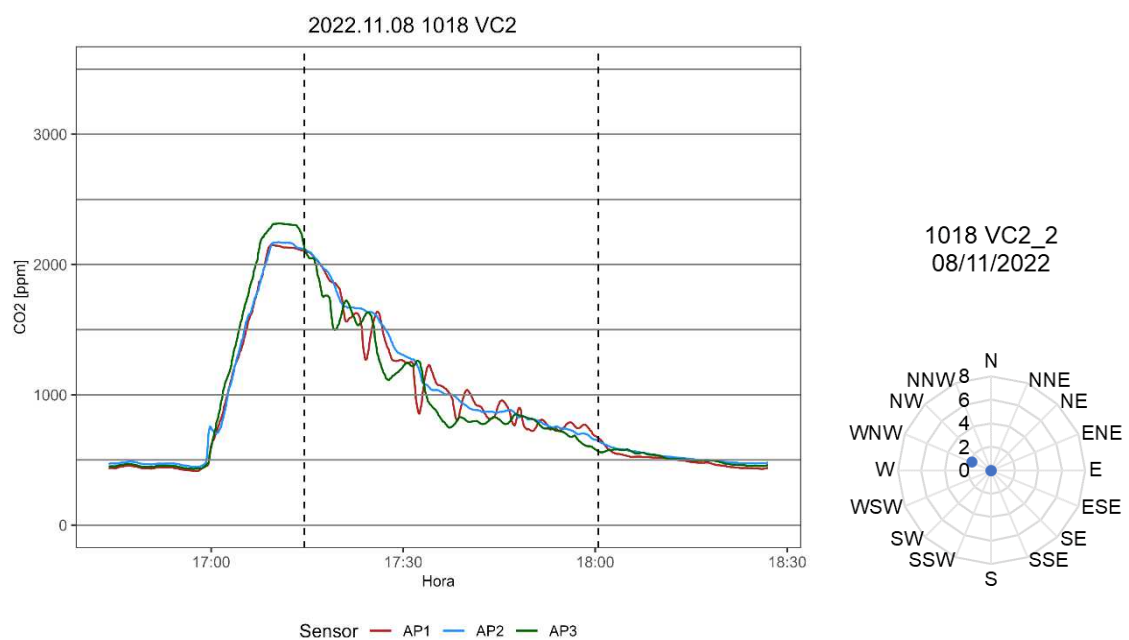
**Gráfico C-17**– Ensaio de decaimento com cilindro, sala 1008, VC2.1, 25/08/2022**Gráfico C-18**– Ensaio de decaimento com cilindro, sala 1008, VC2.2, 18/11/2022

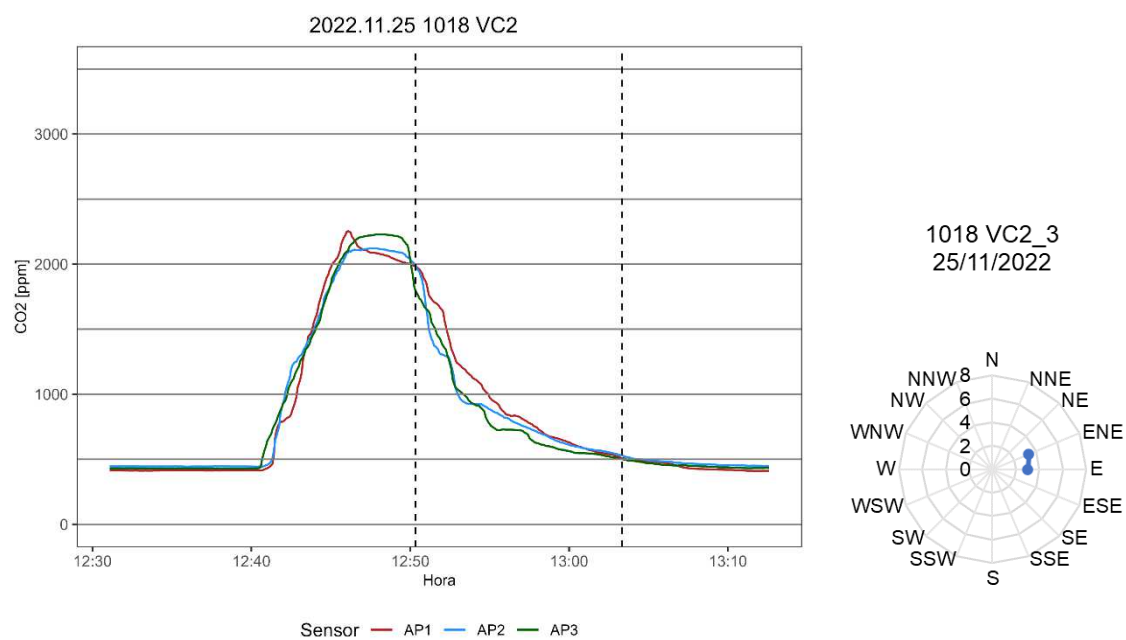
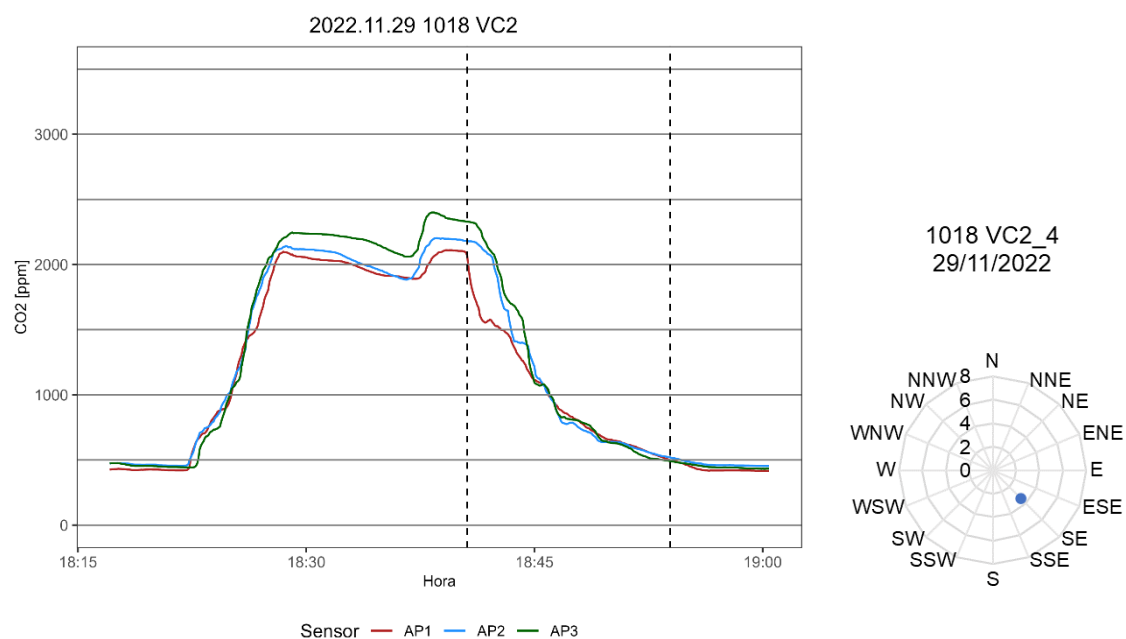
1008 VC2\_2 05/10/2022



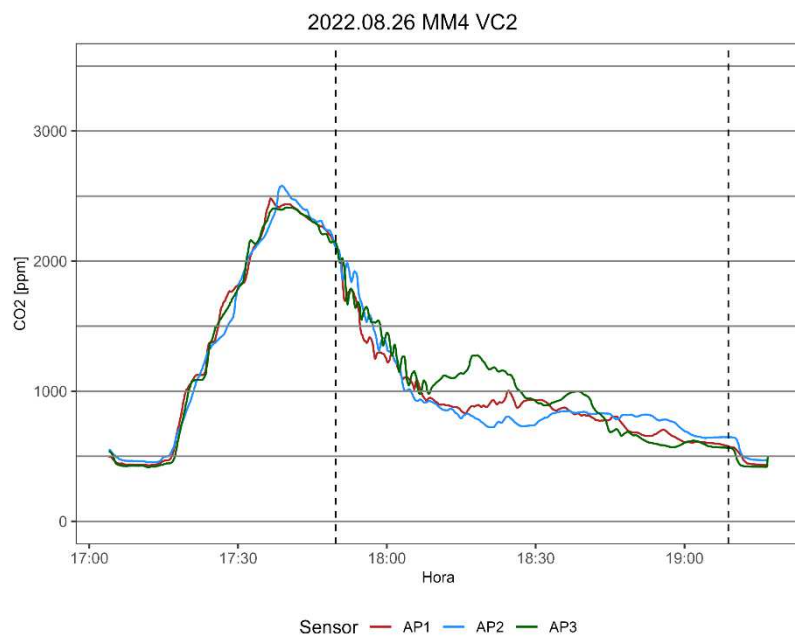
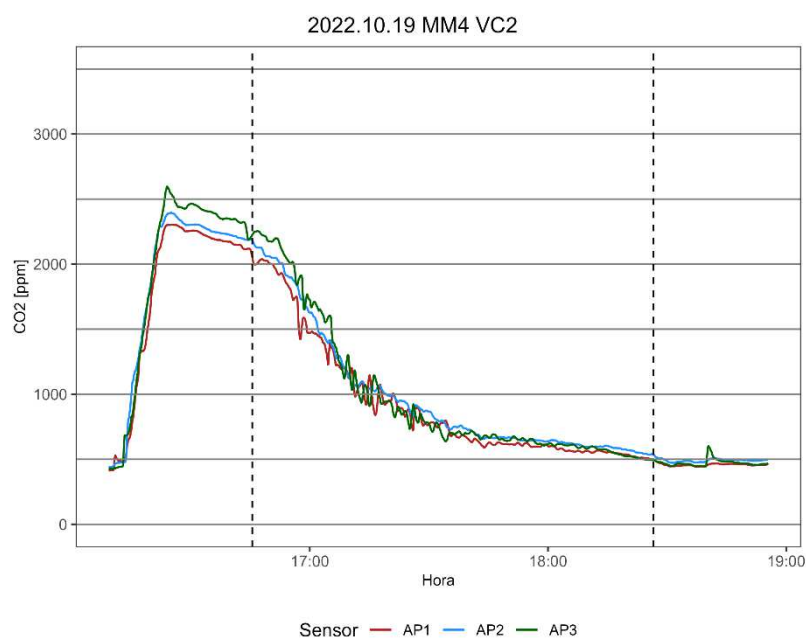
**Gráfico C-19 – Ensaio de decaimento com cilindro, sala 1008, VC2.3, 23/11/2022****Gráfico C-20 – Ensaio de decaimento com cilindro, sala 1008, VC2.4, 23/11/2022**

Sala 1018

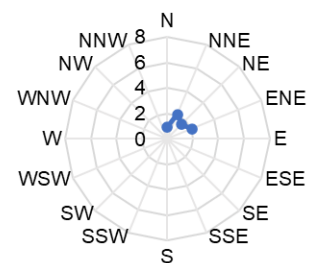
**Gráfico C-21 – Ensaio de decaimento com cilindro, sala 1018, VC2.1, 30/08/2022****Gráfico C-22 – Ensaio de decaimento com cilindro, sala 1018, VC2.2, 08/11/2022**

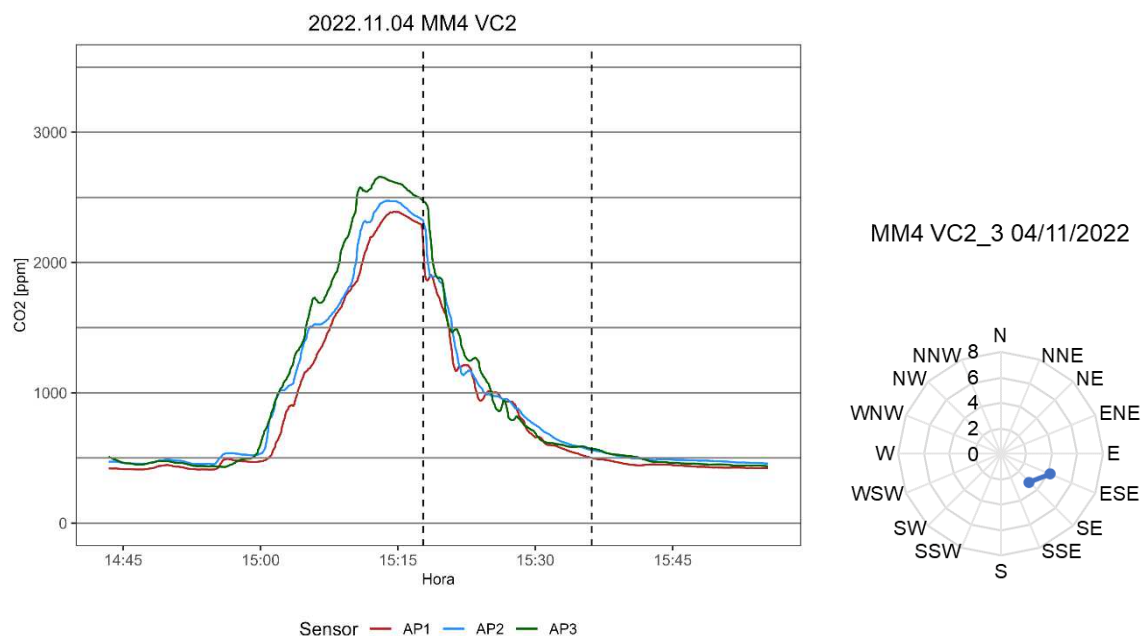
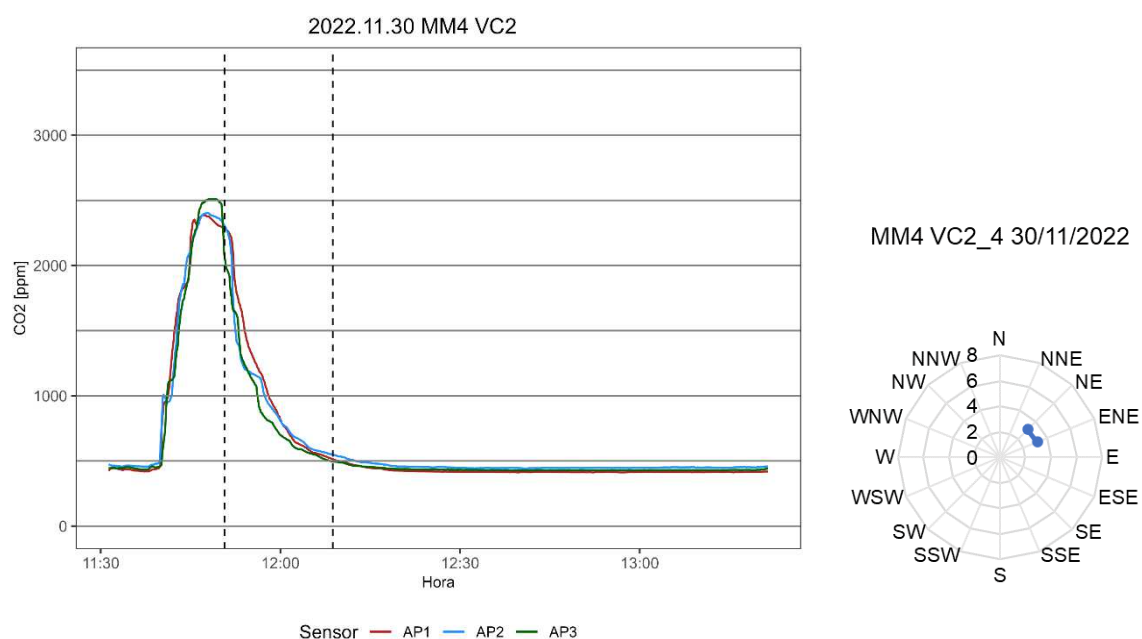
**Gráfico C-23 – Ensaio de decaimento com cilindro, sala 1018, VC2.3, 25/11/2022****Gráfico C-24 – Ensaio de decaimento com cilindro, sala 1018, VC2.4, 29/11/2022**

## Sala MM4

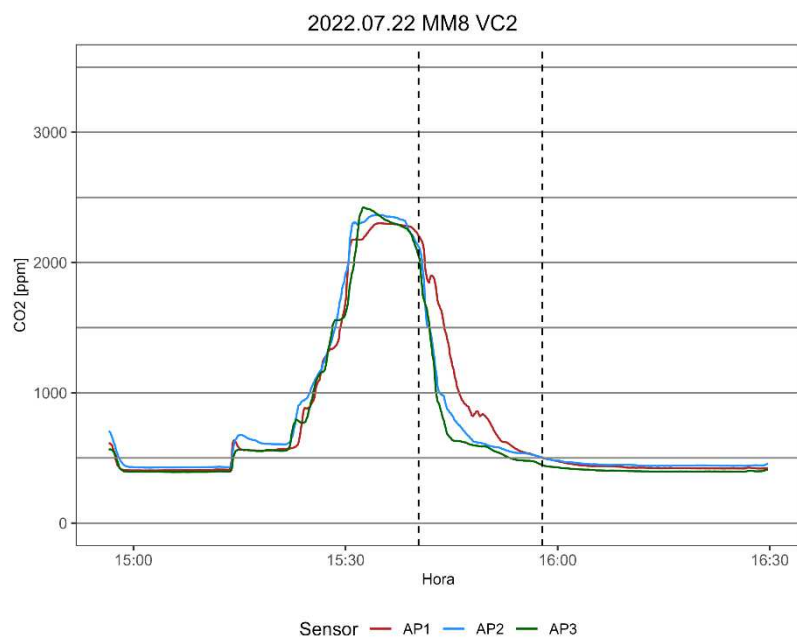
**Gráfico C-25 – Ensaio de decaimento com cilindro, sala MM4, VC2.1 26/08/2022****Gráfico C-26 – Ensaio de decaimento com cilindro, sala MM4, VC2.2 19/10/2022**

MM4 VC2\_2 19/10/2022

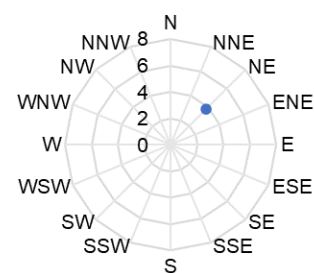
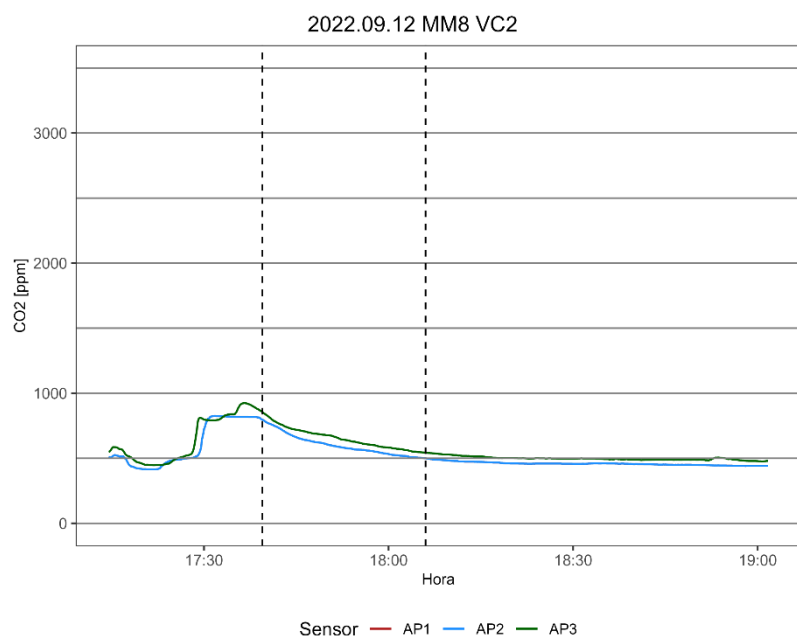


**Gráfico C-27 – Ensaio de decaimento com cilindro, sala MM4, VC2.3 04/11/2022****Gráfico C-28 – Ensaio de decaimento com cilindro, sala MM4, VC2.4 30/11/2022**

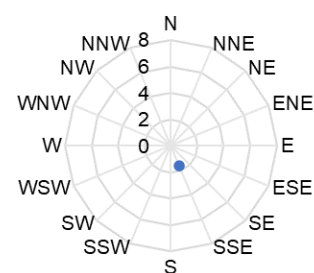
## Sala MM8

**Gráfico C-29 – Ensaio de decaimento com cilindro, sala MM8, VC2.1 22/07/2022**

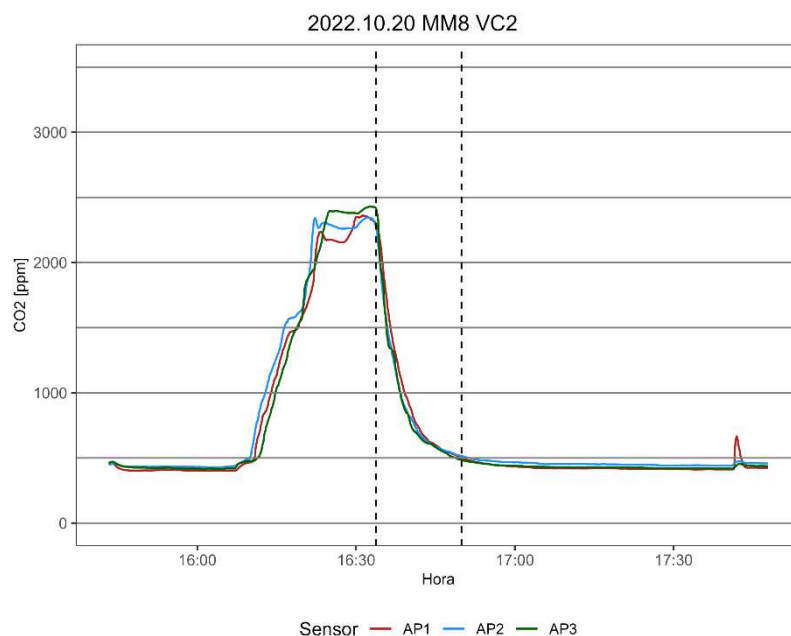
MM8 VC2\_1 22/07/2022

**Gráfico C-30 – Ensaio de decaimento com cilindro, sala MM8, VC2.2 12/09/2022**

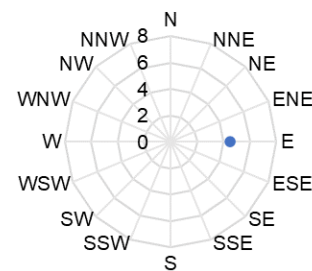
MM8 VC2\_2 12/09/2022



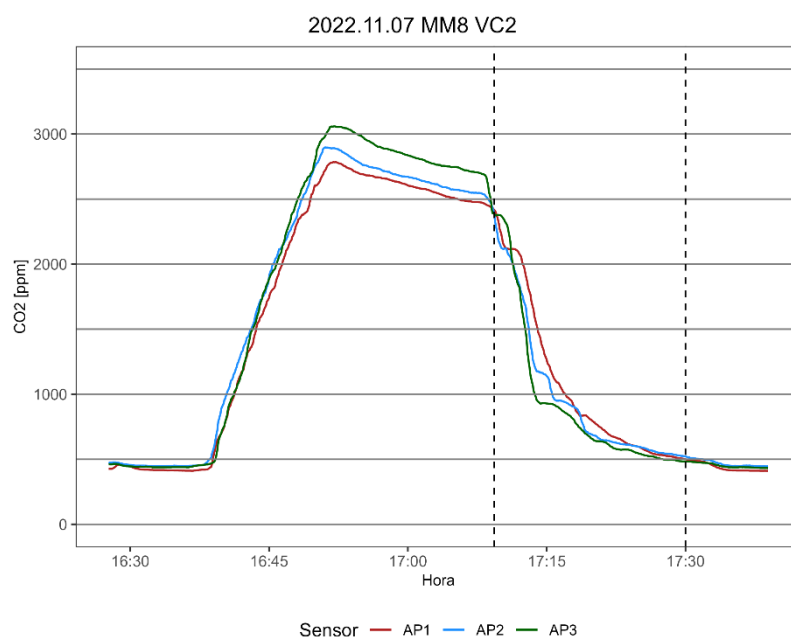
**Gráfico C-31 – Ensaio de decaimento com cilindro, sala MM8, VC2.3 20/10/2022**



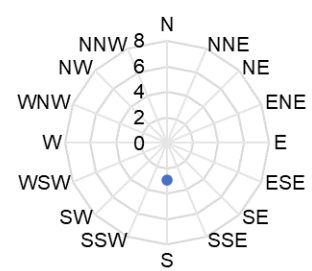
MM8 VC2\_3 20/10/2022



**Gráfico C-32 – Ensaio de decaimento com cilindro, sala MM8, VC2.4 07/11/2022**

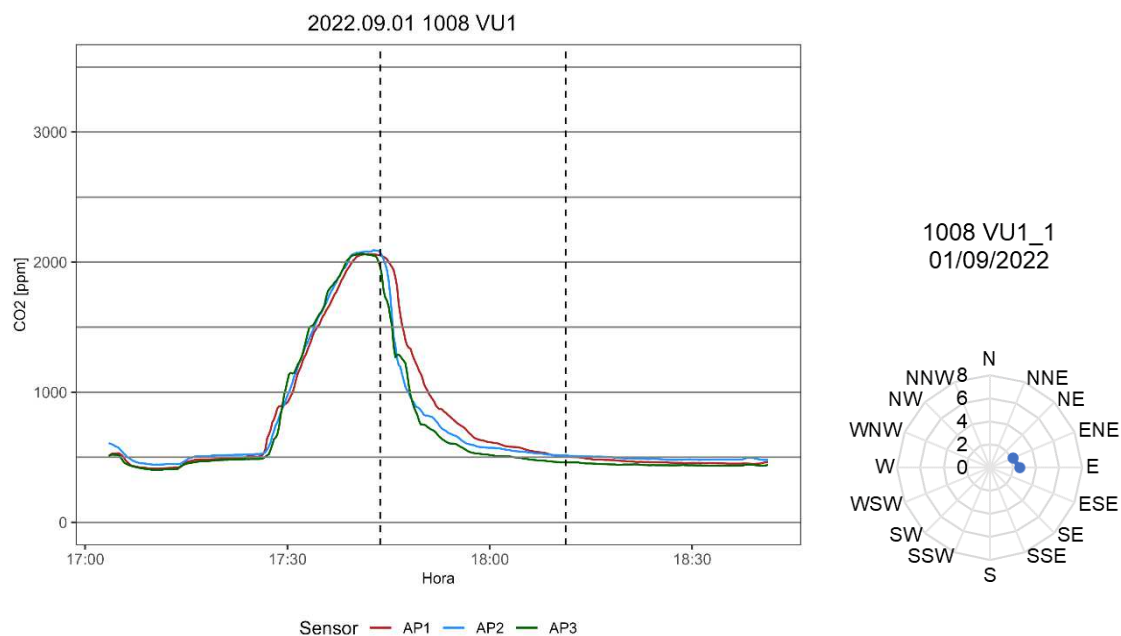
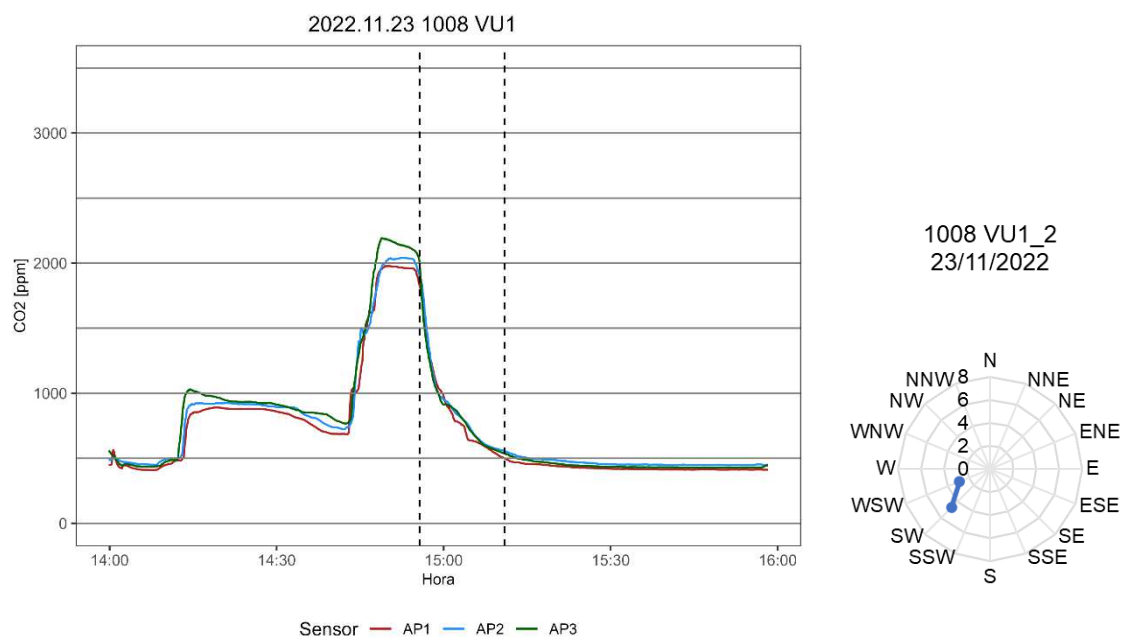


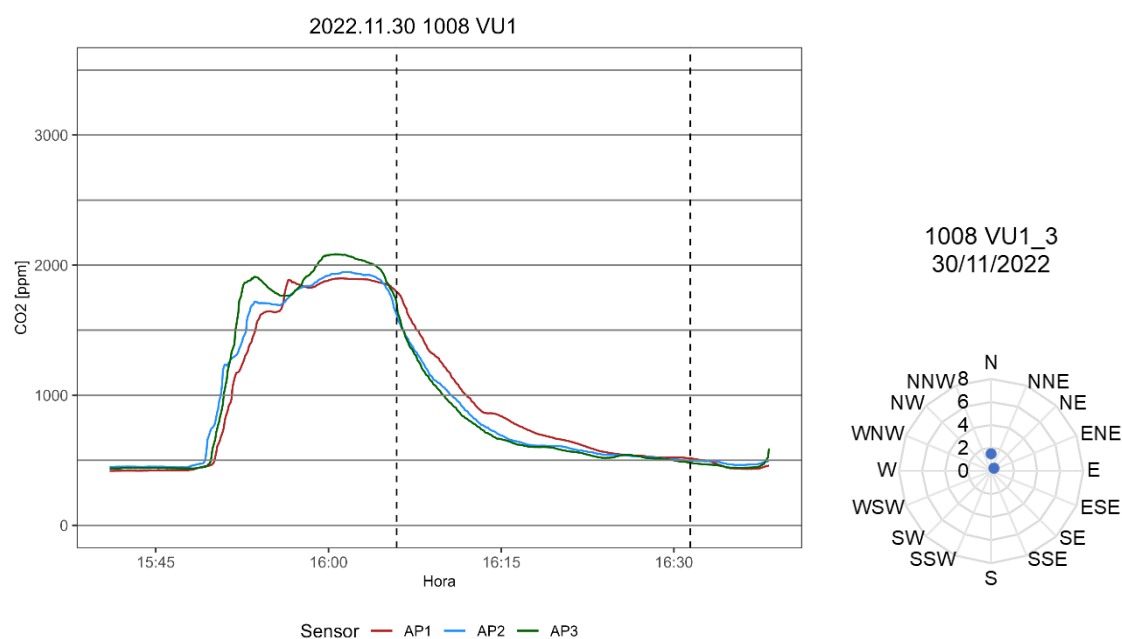
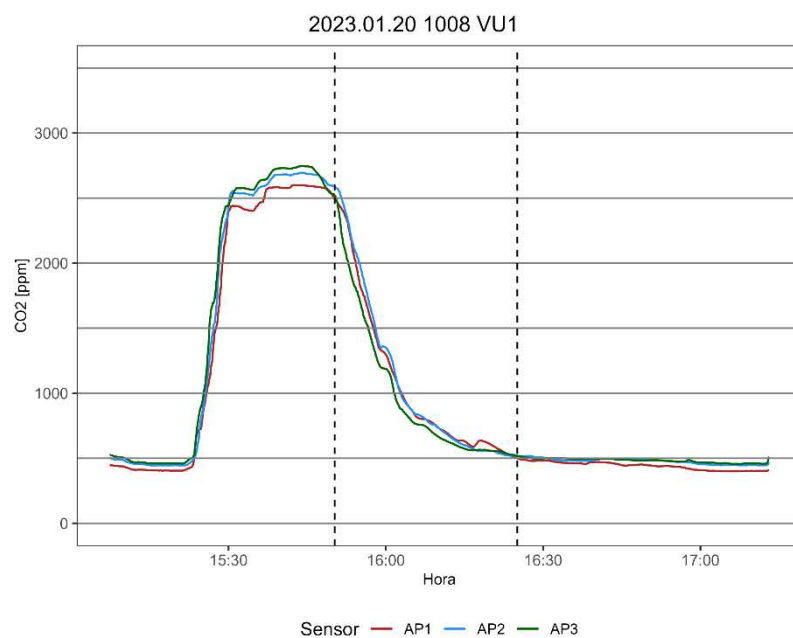
MM8 VC2\_4 07/11/2022



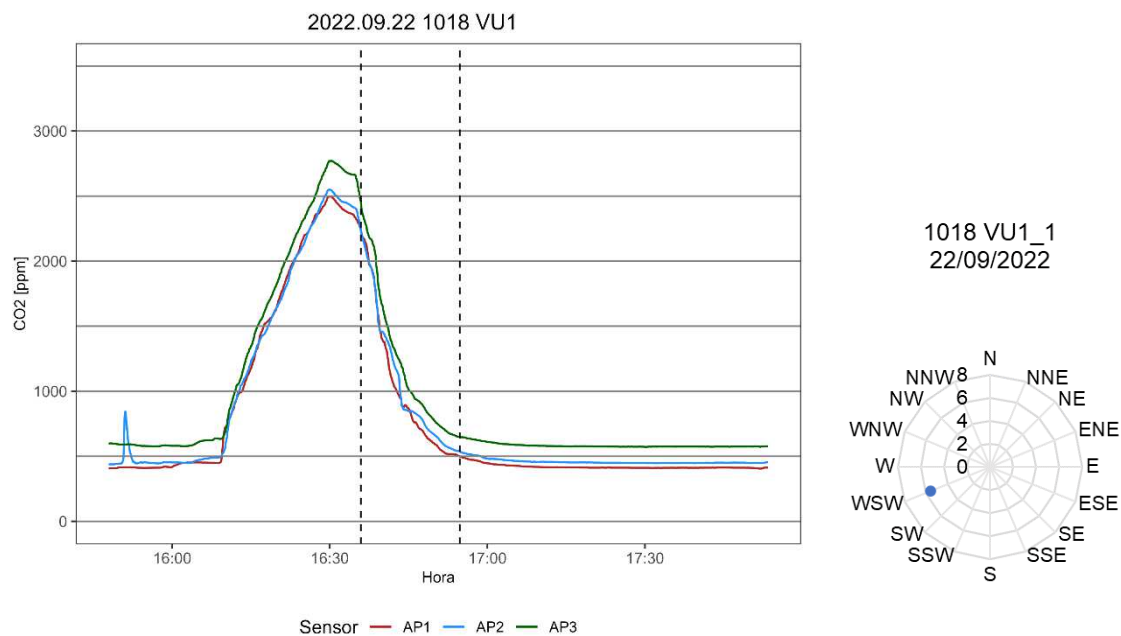
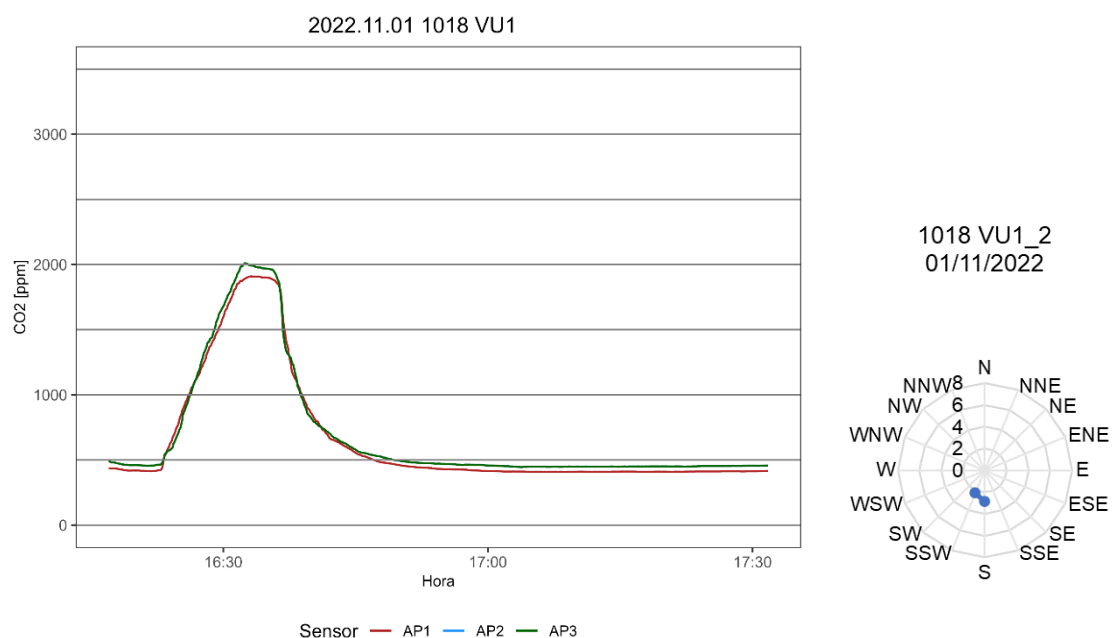
## C.3 VENTILAÇÃO UNILATERAL 1

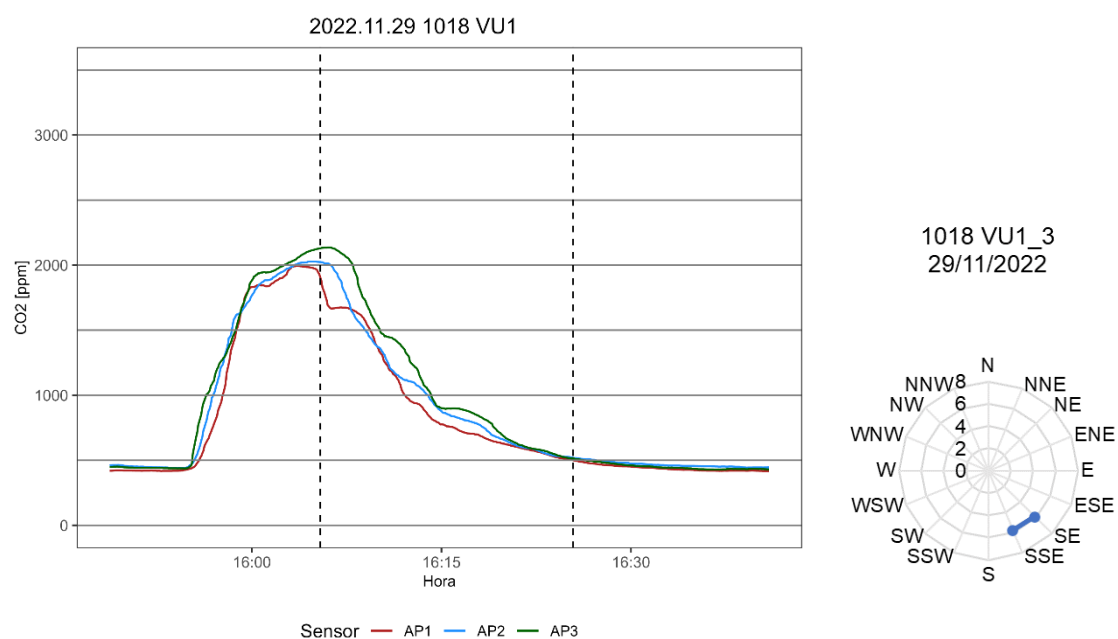
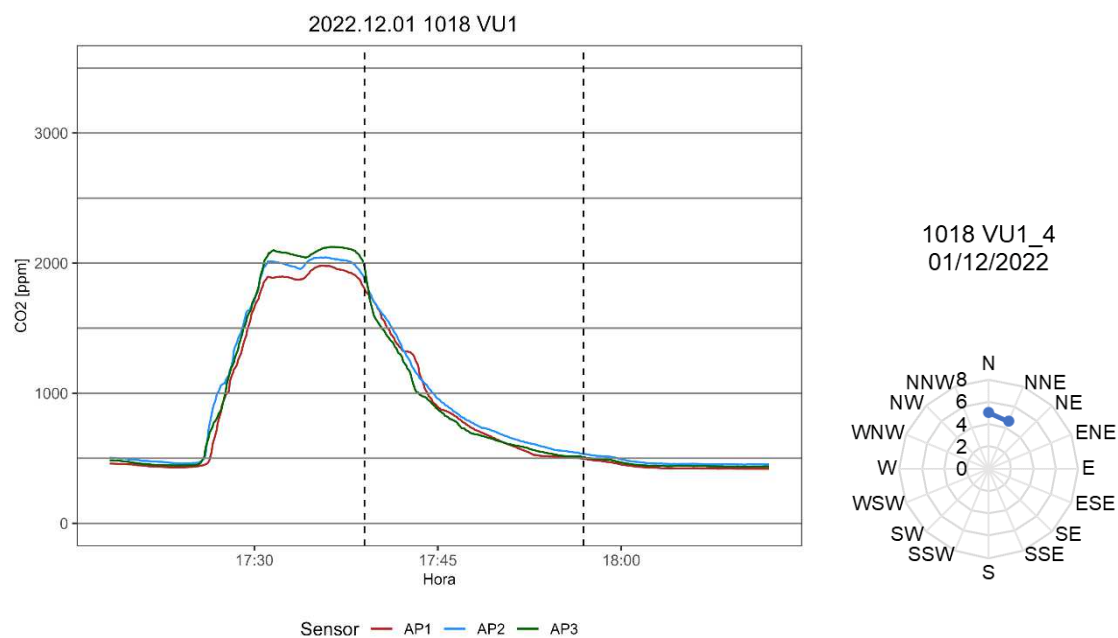
Sala 1008

**Gráfico C-33** – Ensaio de decaimento com cilindro, sala 1008, VU1.1 01/09/2022**Gráfico C-34** – Ensaio de decaimento com cilindro, sala 1008, VU1.2 23/11/2022

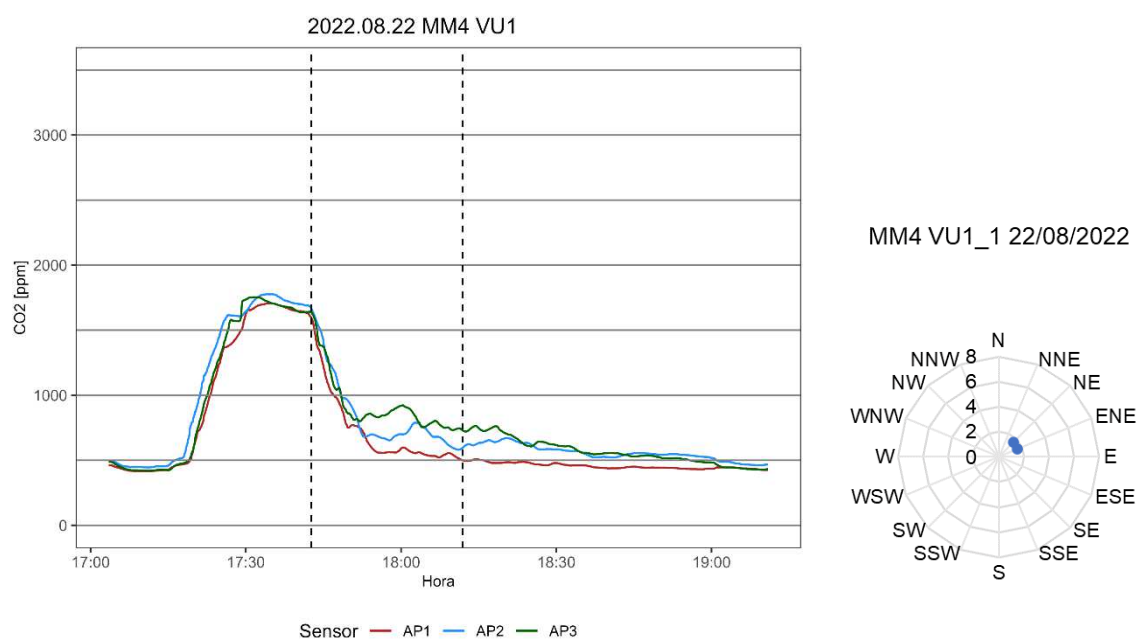
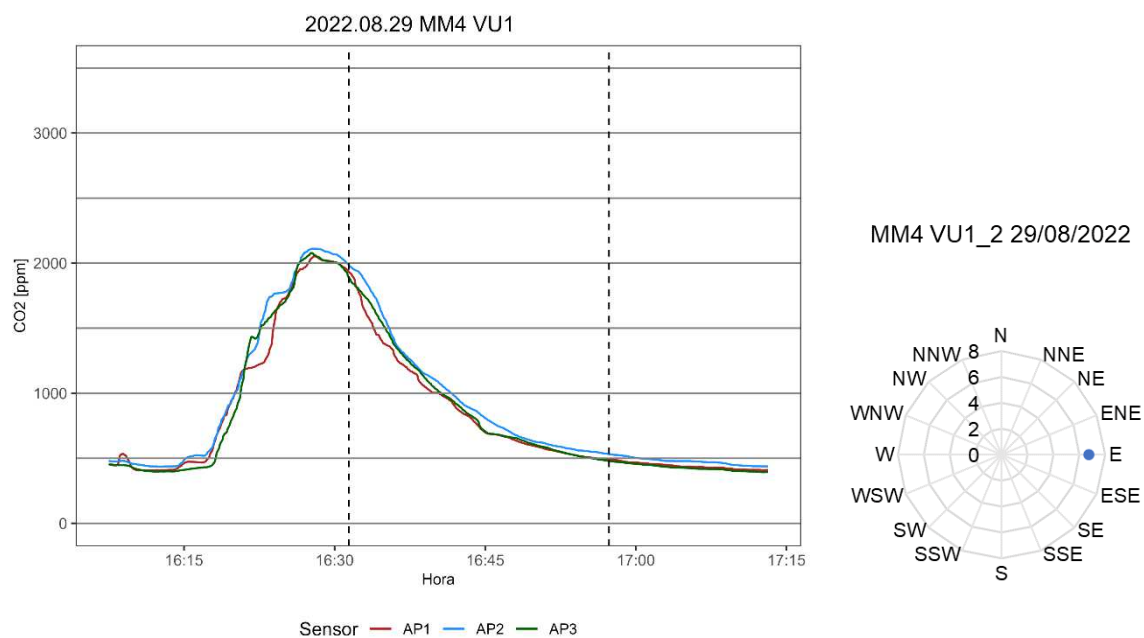
**Gráfico C-35 – Ensaio de decaimento com cilindro, sala 1008, VU1.3 30/11/2022****Gráfico C-36 – Ensaio de decaimento com cilindro, sala 1008, VU1.4 20/01/2023**

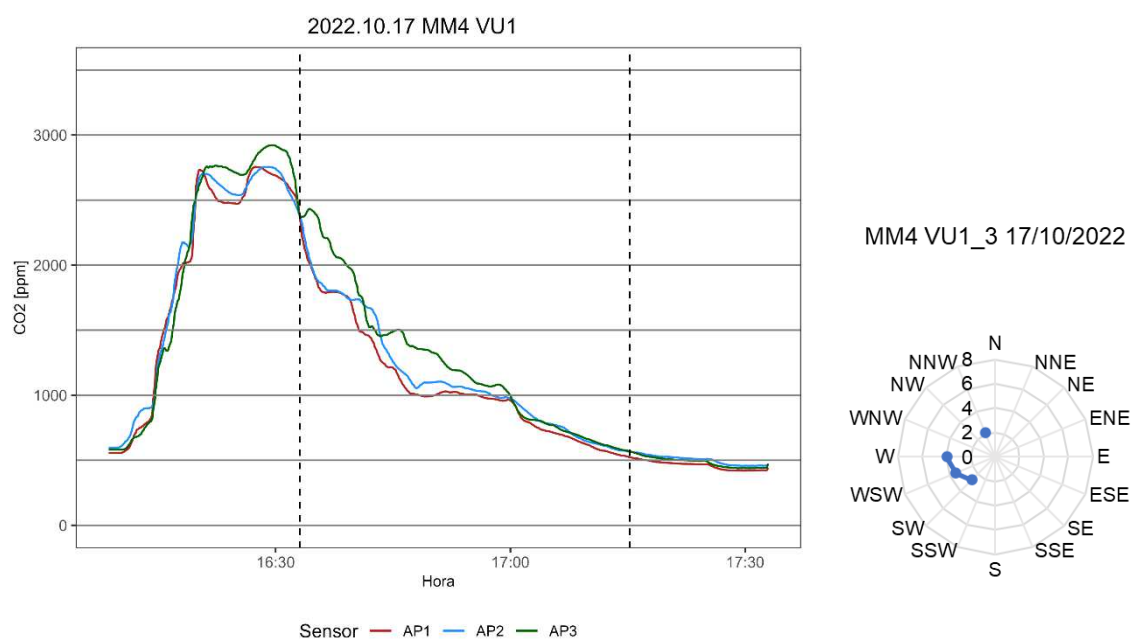
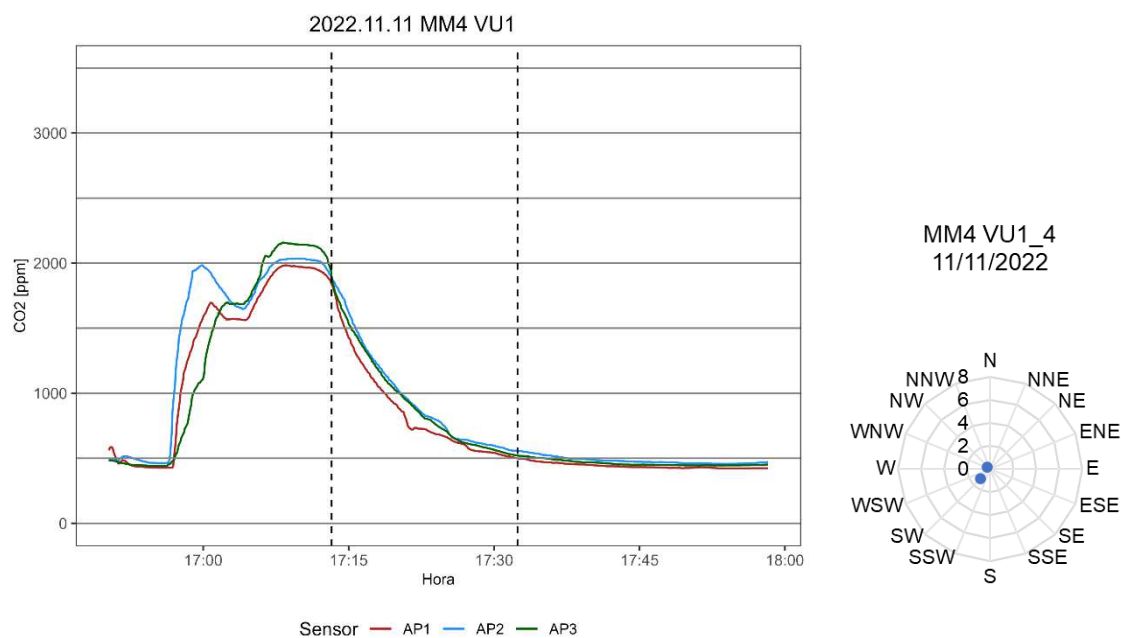
Sala 1018

**Gráfico C-37**– Ensaio de decaimento com cilindro, sala 1018, VU1.1 22/09/2022**Gráfico C-38** – Ensaio de decaimento com cilindro, sala 1018, VU1.2 01/11/2022

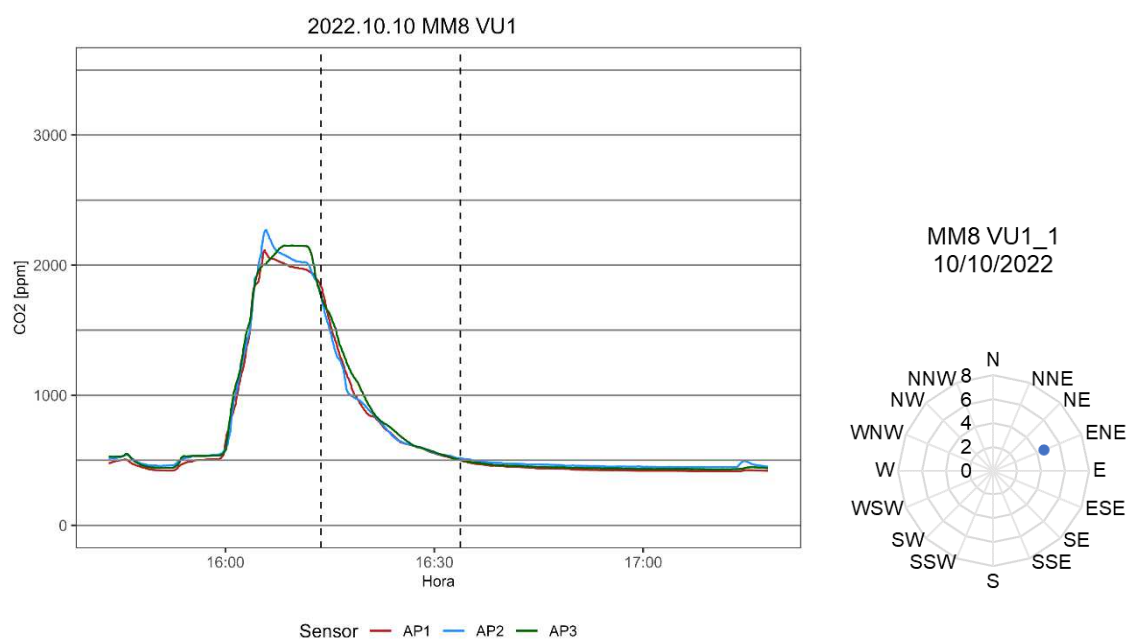
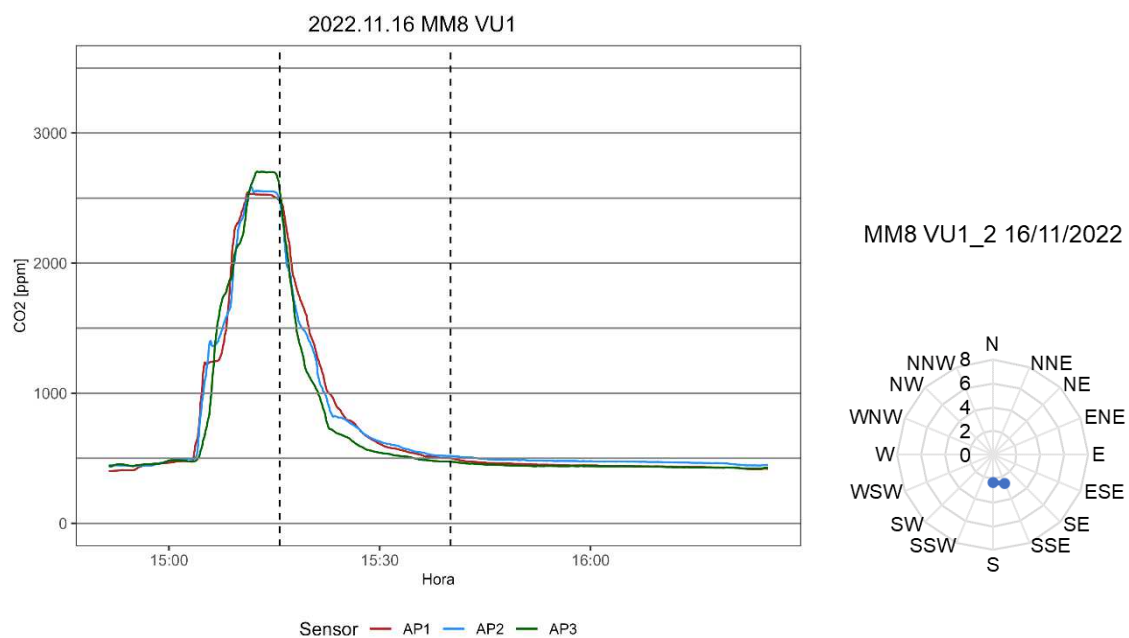
**Gráfico C-39** – Ensaio de decaimento com cilindro, sala 1018, VU1.3 29/11/2022**Gráfico C-40** – Ensaio de decaimento com cilindro, sala 1018, VU1.4 01/12/2022

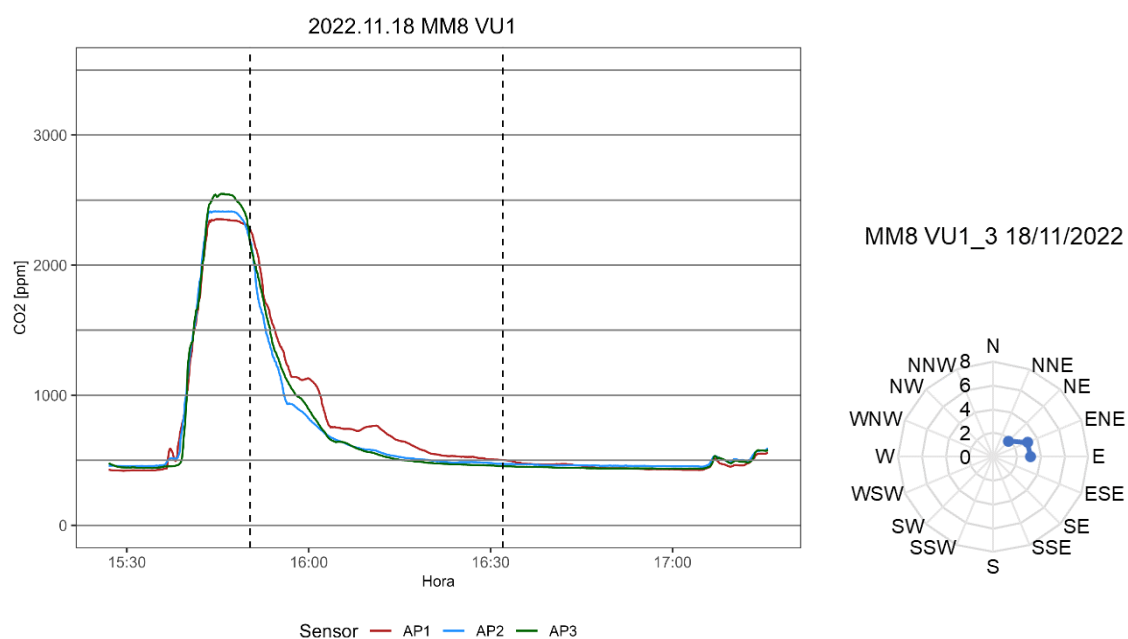
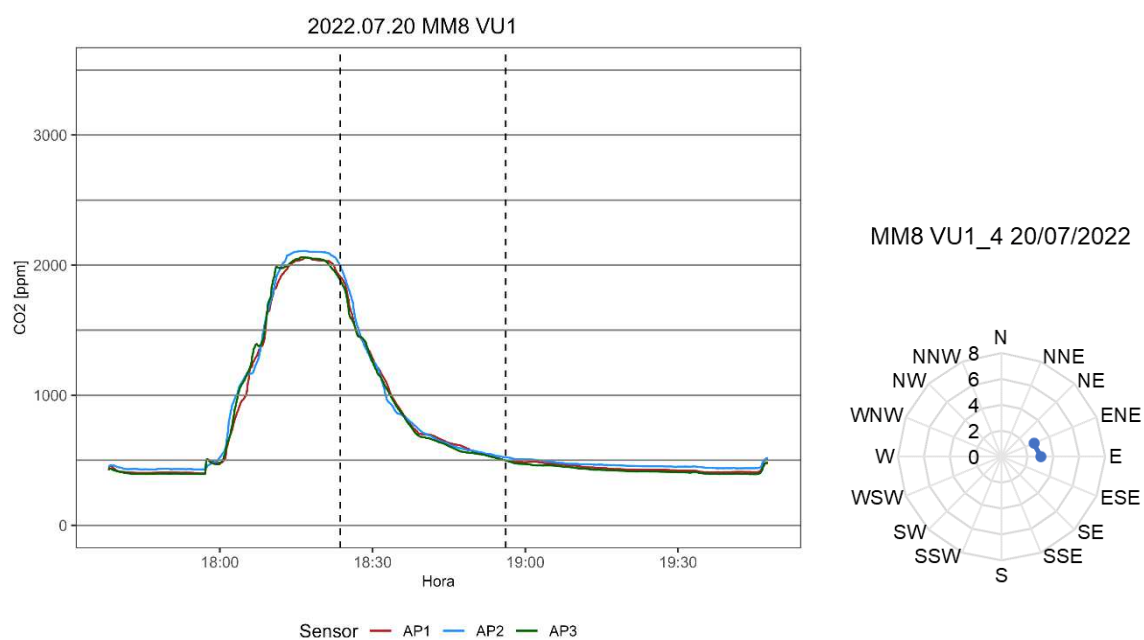
## Sala MM4

**Gráfico C-41** – Ensaio de decaimento com cilindro, sala MM4, VU1.1 22/08/2022**Gráfico C-42** – Ensaio de decaimento com cilindro, sala MM4, VU1.2 29/08/2022

**Gráfico C-43** – Ensaio de decaimento com cilindro, sala MM4, VU1.3 17/10/2022**Gráfico C-44** – Ensaio de decaimento com cilindro, sala MM4, VU1.42 11/11/2022

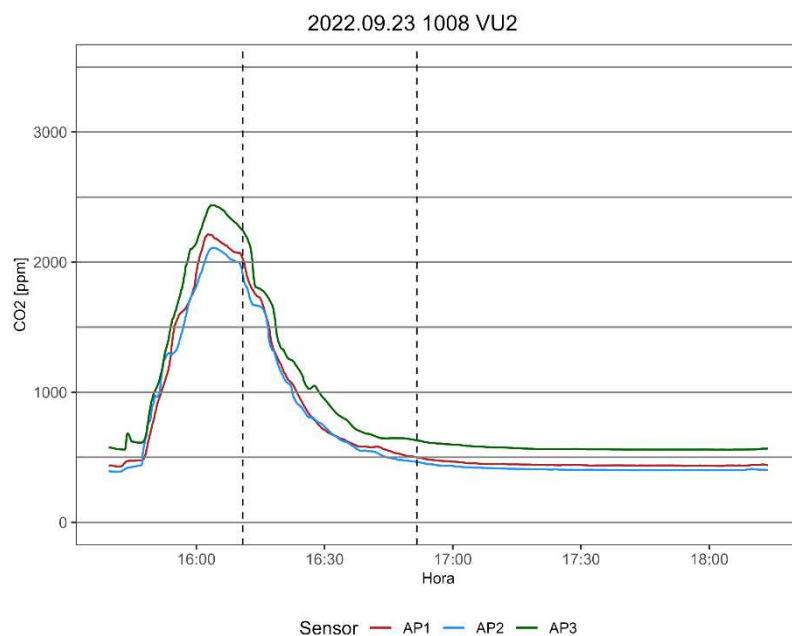
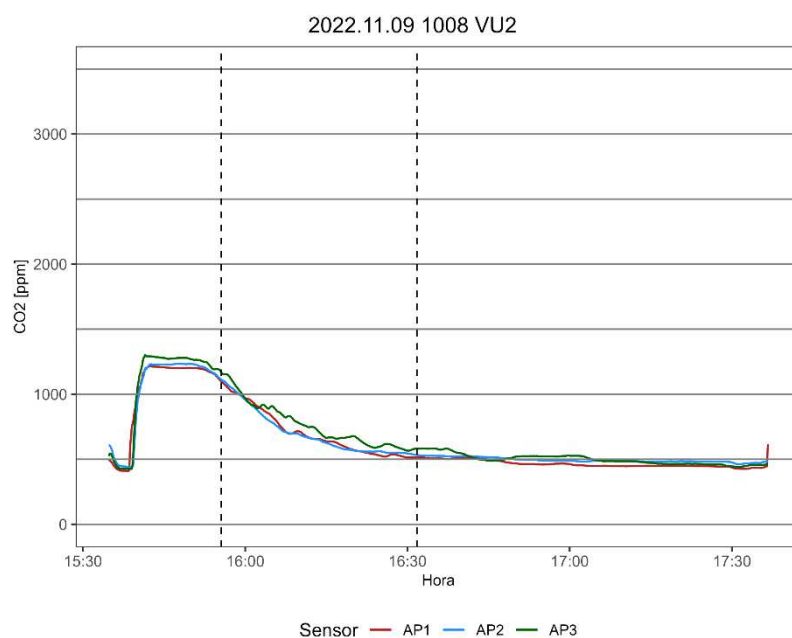
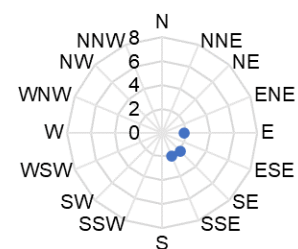
## Sala MM8

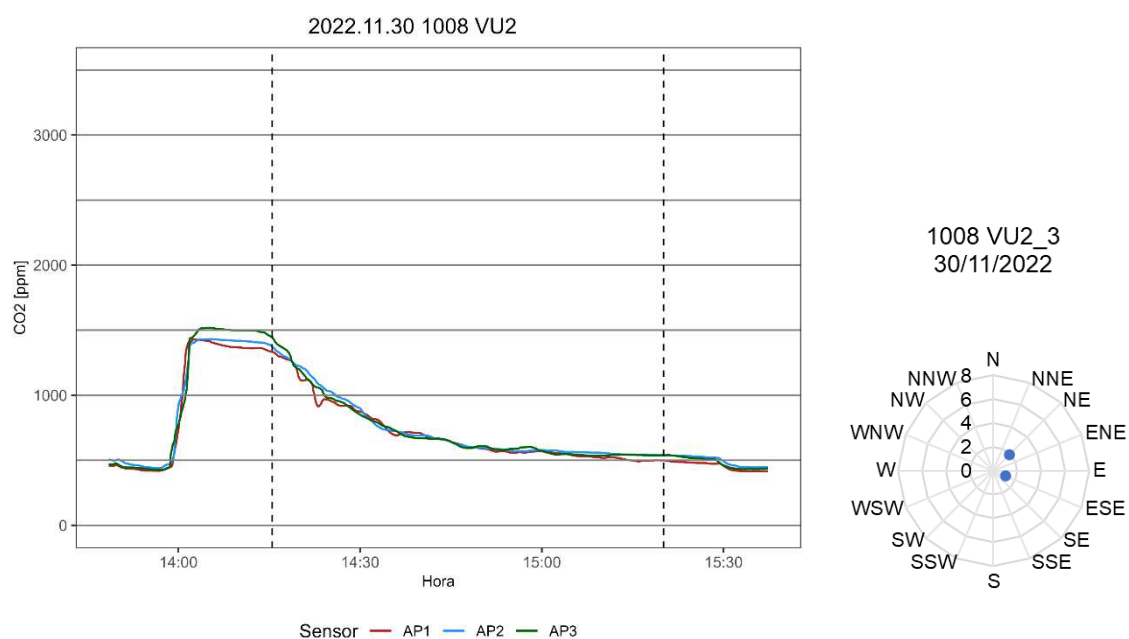
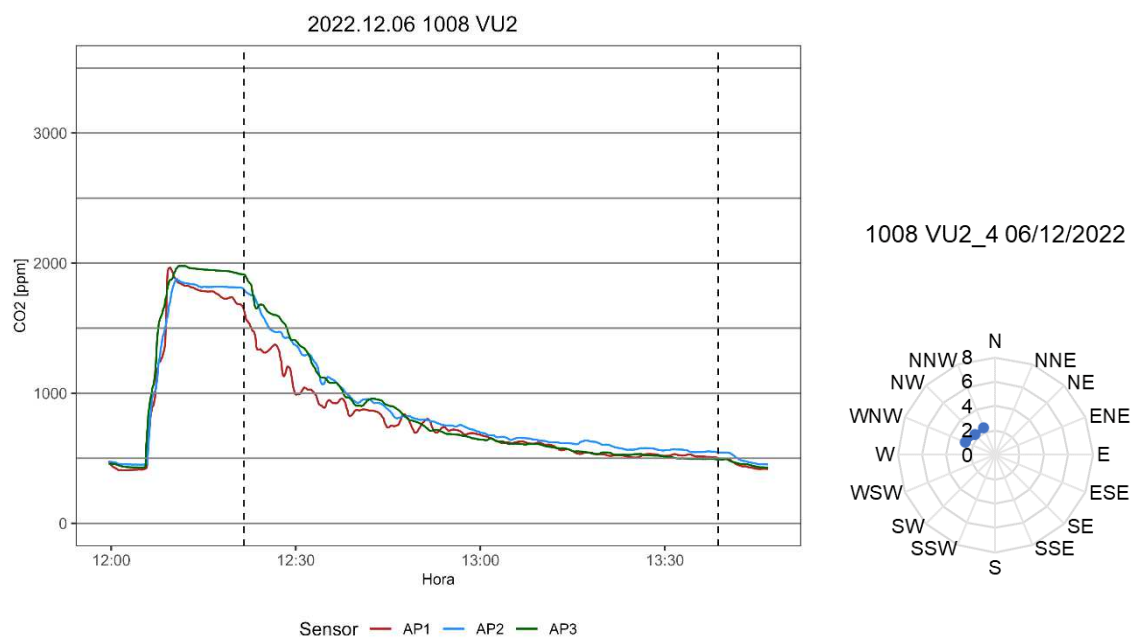
**Gráfico C-45** – Ensaio de decaimento com cilindro, sala MM8, VU1.1 10/10/2022**Gráfico C-46** – Ensaio de decaimento com cilindro, sala MM8, VU1.2 16/11/2022

**Gráfico C-47 – Ensaio de decaimento com cilindro, sala MM8, VU1.3 18/11/2022****Gráfico C-48 – Ensaio de decaimento com cilindro, sala MM8, VU1.4 20/07/2022**

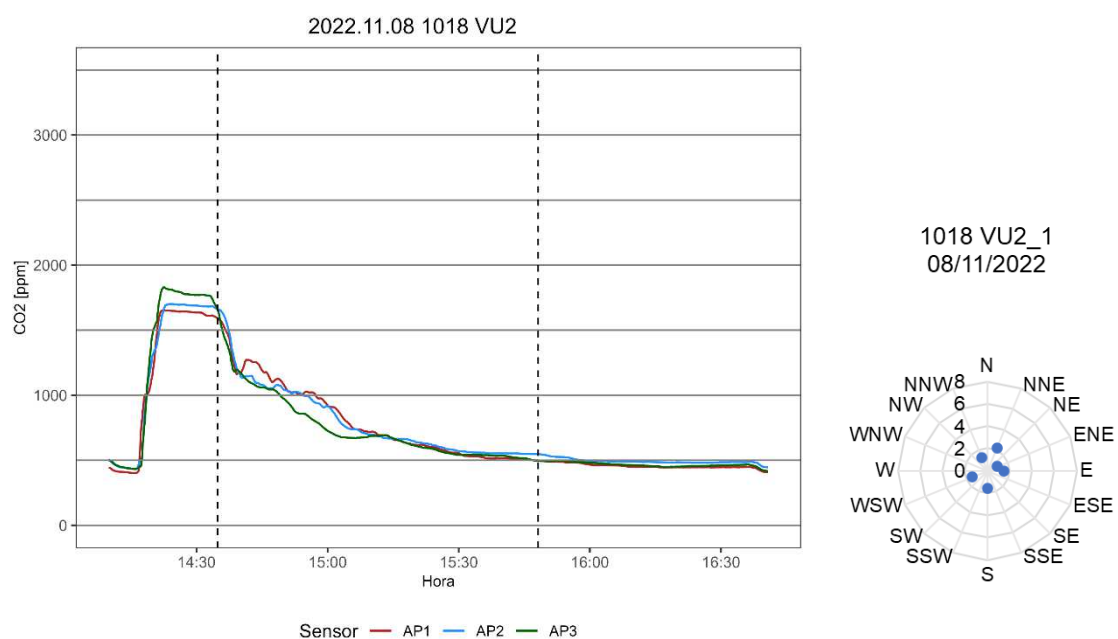
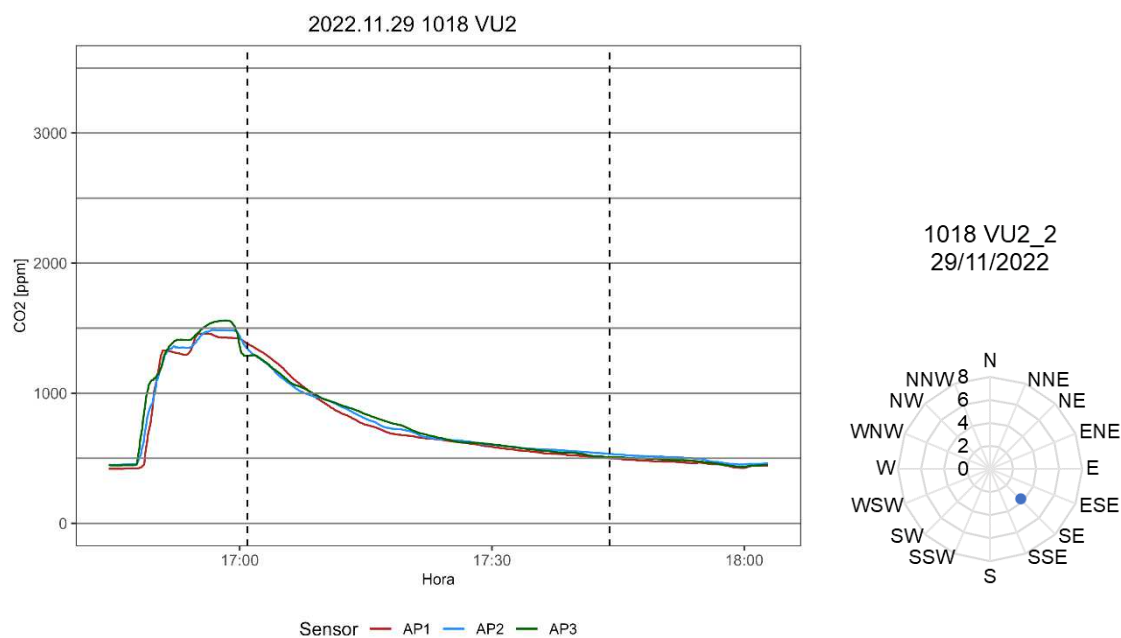
## C.4 VENTILAÇÃO UNILATERAL 2

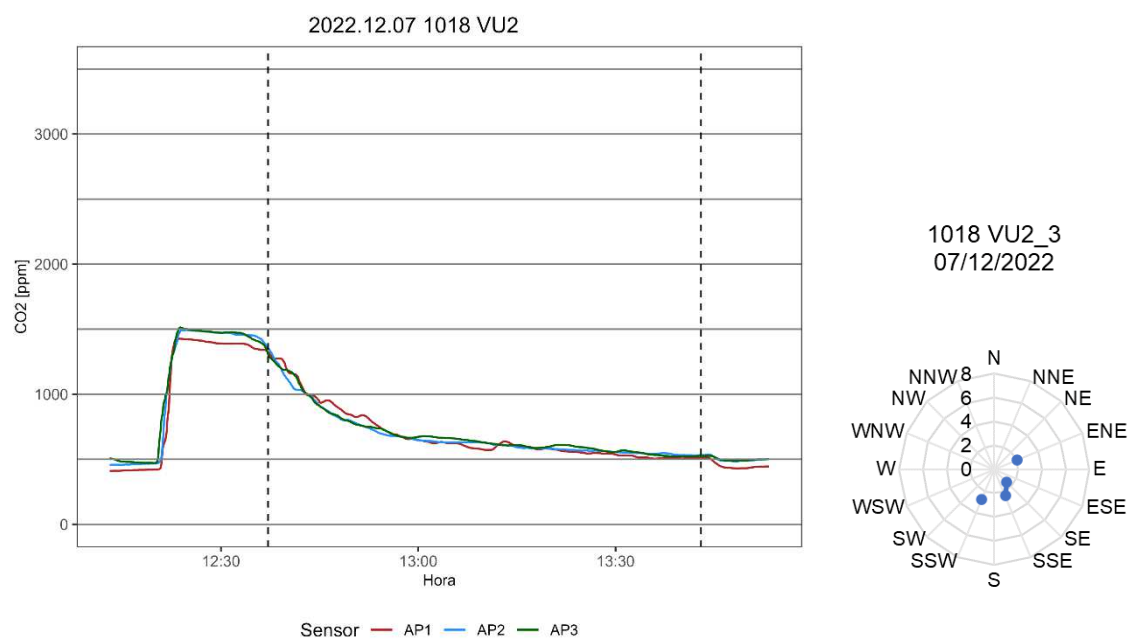
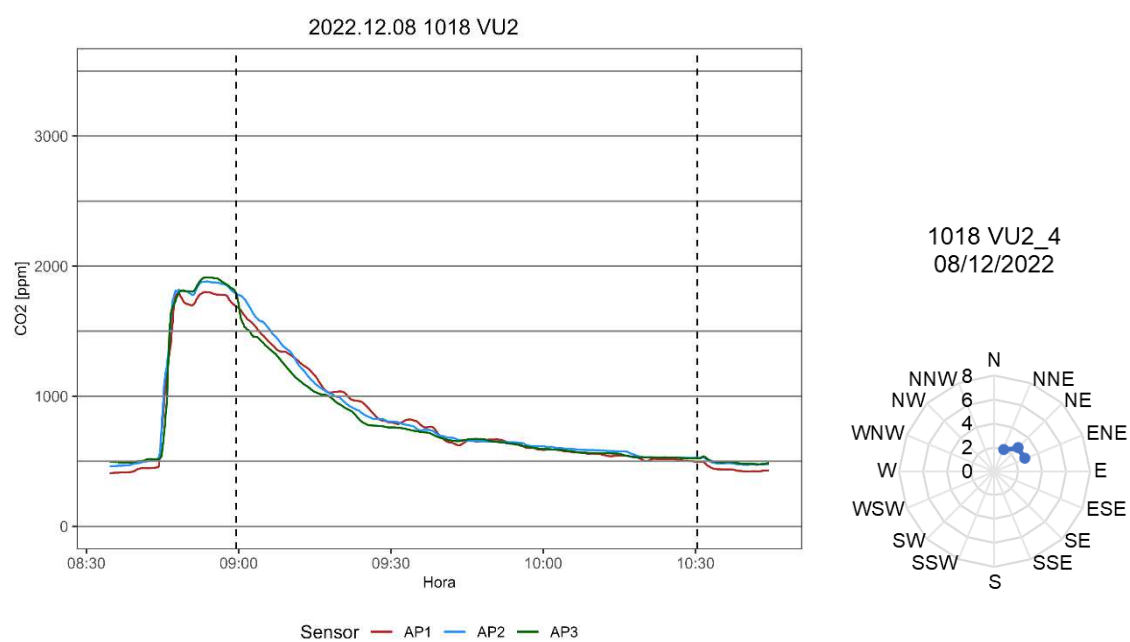
Sala 1008

**Gráfico C-49** – Ensaio de decaimento com cilindro, sala 1008, VU2.1 23/09/2022**Gráfico C-50** – Ensaio de decaimento com cilindro, sala 1008, VU2.2 09/11/20221008 VU2\_2  
09/11/2022

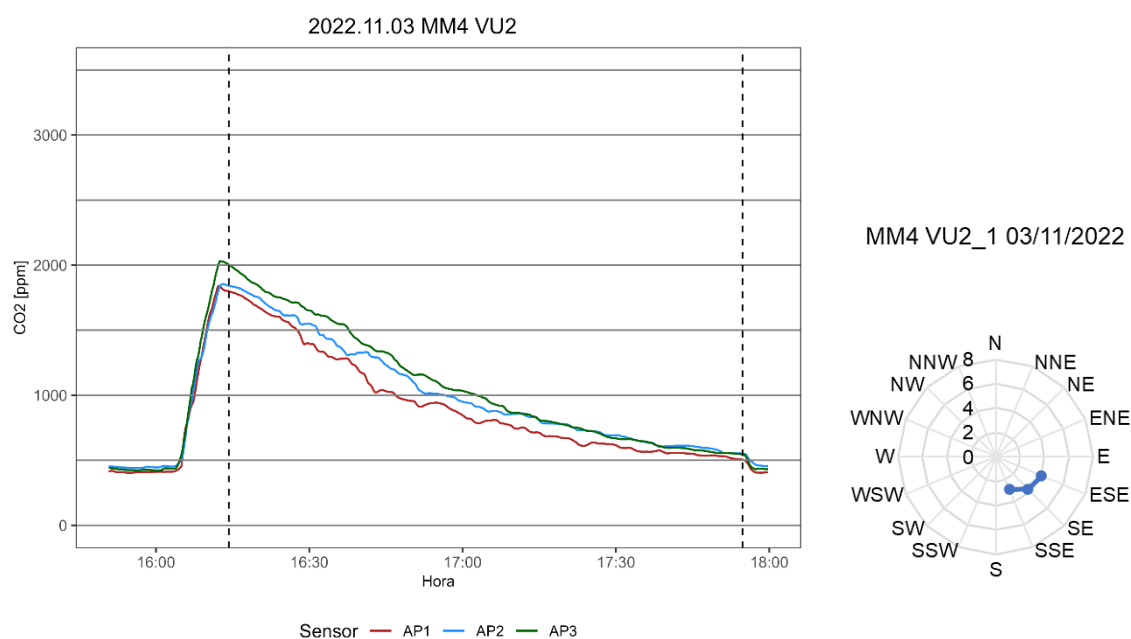
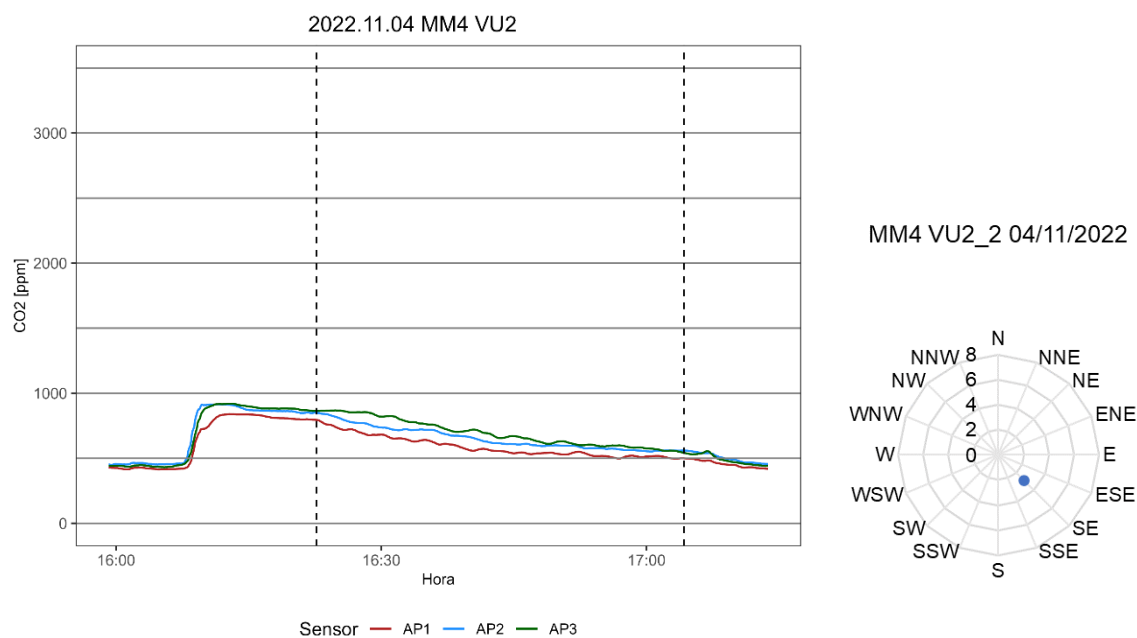
**Gráfico C-51** – Ensaio de decaimento com cilindro, sala 1008, VU2.3 30/11/2022**Gráfico C-52** – Ensaio de decaimento com cilindro, sala 1008, VU2.3 06/12/2022

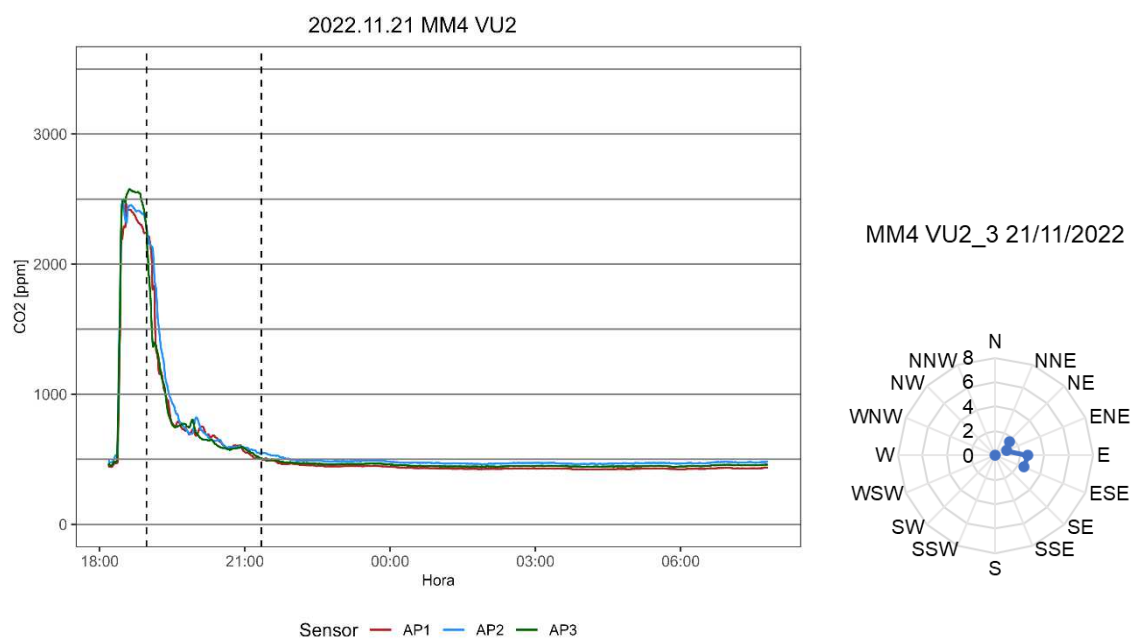
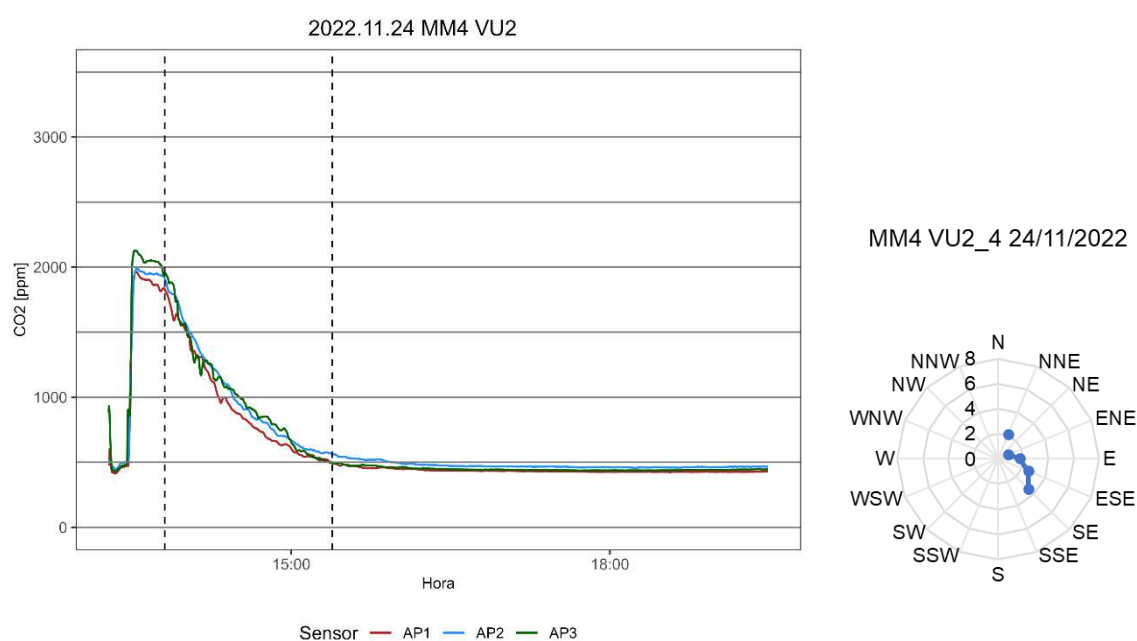
Sala 1018

**Gráfico C-53** – Ensaio de decaimento com cilindro, sala 1018, VU2.1 08/11/2022**Gráfico C-54** – Ensaio de decaimento com cilindro, sala 1018, VU2.2 29/11/2022

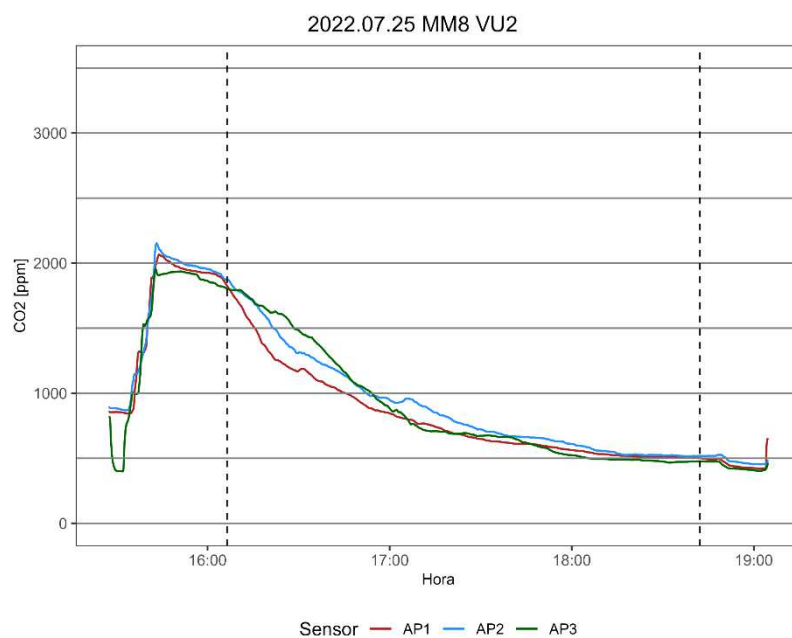
**Gráfico C-55** – Ensaio de decaimento com cilindro, sala 1018, VU2.3 07/12/2022**Gráfico C-56** – Ensaio de decaimento com cilindro, sala 1018, VU2.4 08/12/2022

Sala MM4

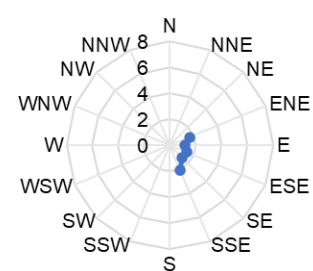
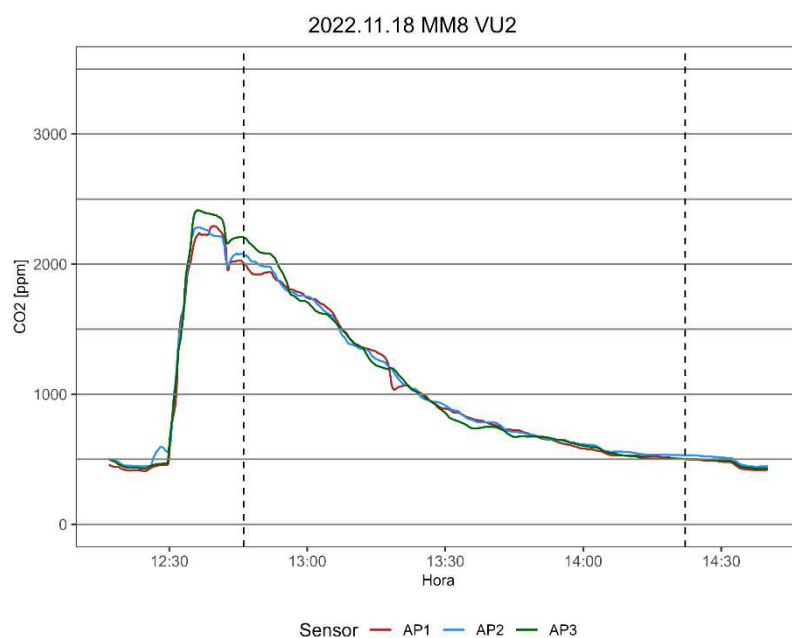
**Gráfico C-57** – Ensaio de decaimento com cilindro, sala MM5, VU2.1 03/11/2022**Gráfico C-58** – Ensaio de decaimento com cilindro, sala MM4, VU2.2 04/11/2022

**Gráfico C-59** – Ensaio de decaimento com cilindro, sala MM4, VU2.3 21/11/2022**Gráfico C-60** – Ensaio de decaimento com cilindro, sala MM4, VU2.4 24/11/2022

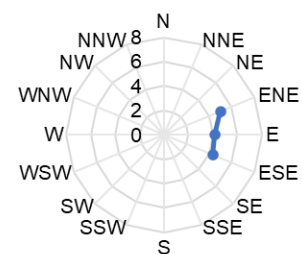
Sala MM8

**Gráfico C-61** – Ensaio de decaimento com cilindro, sala MM8, VU2.1 25/07/2022

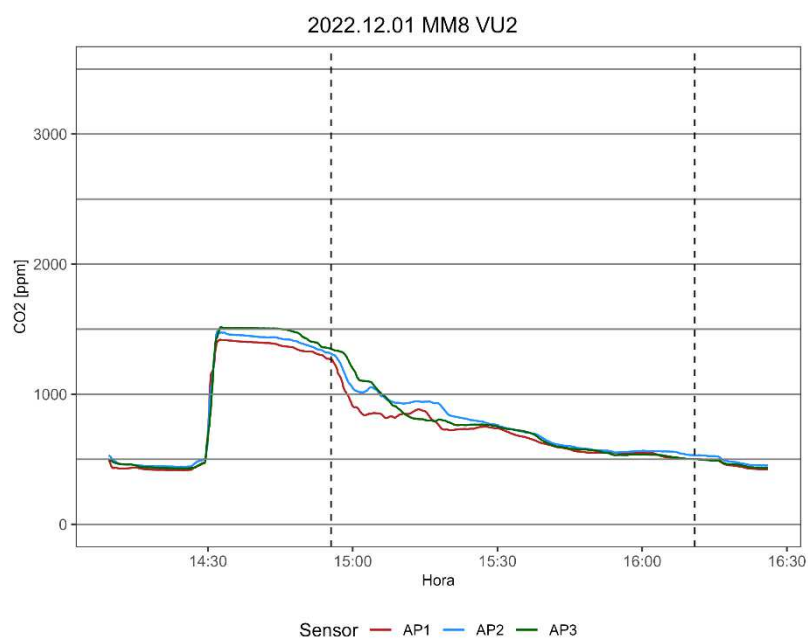
MM8 VU2\_1 25/07/2022

**Gráfico C-62** – Ensaio de decaimento com cilindro, sala MM8, VU2.2 18/11/2022

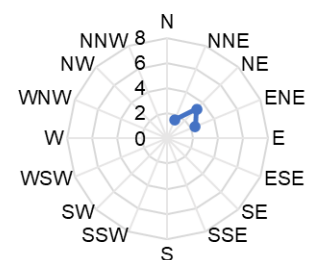
MM8 VU2\_2 18/11/2022



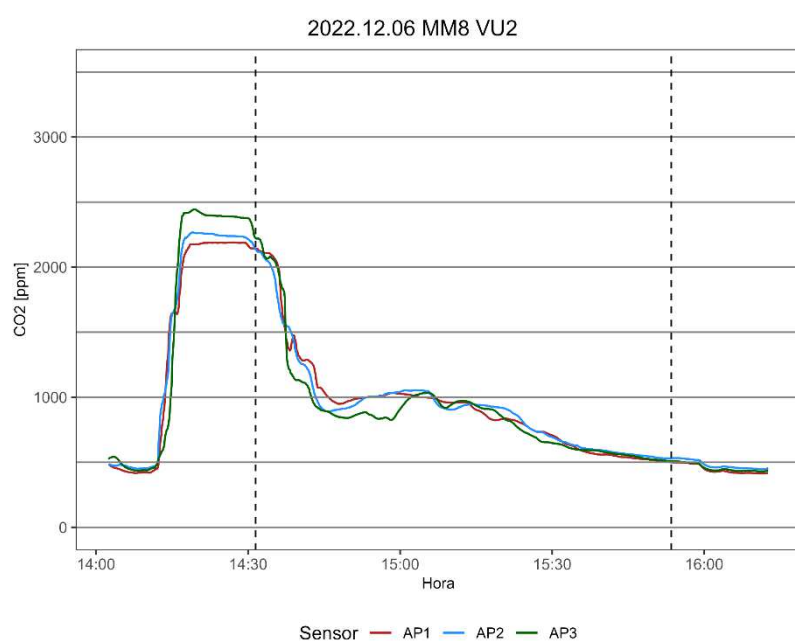
**Gráfico C-63 – Ensaio de decaimento com cilindro, sala MM8, VU2.3 01/12/2022**



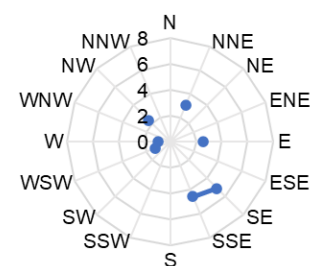
MM8 VU2\_3 01/12/2022



**Gráfico C-64 – Ensaio de decaimento com cilindro, sala MM8, VU2.4 06/12/2022**

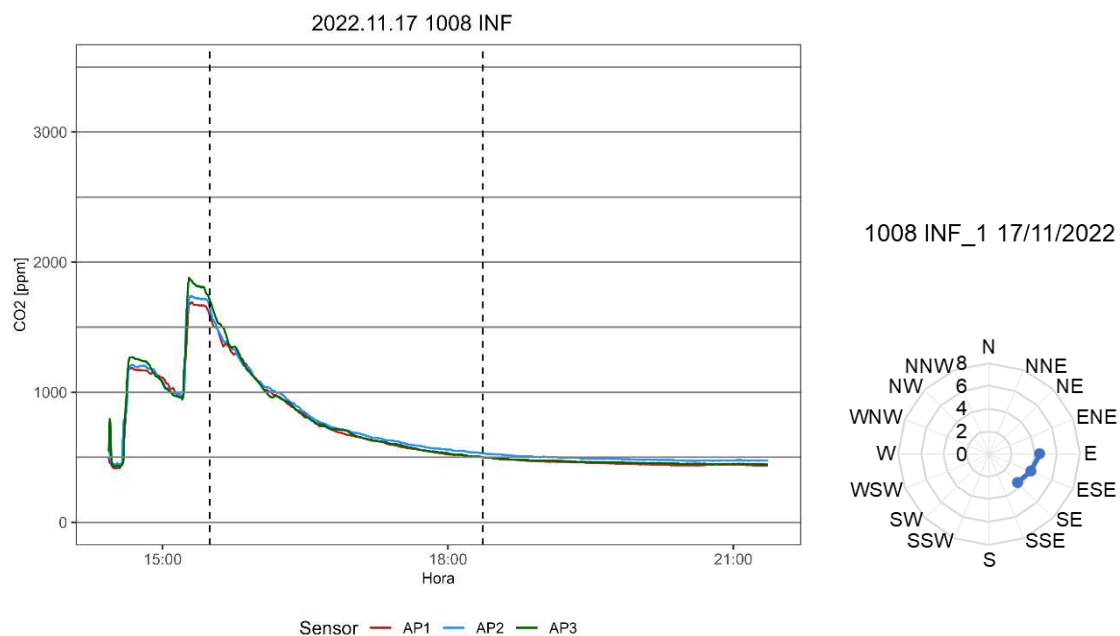
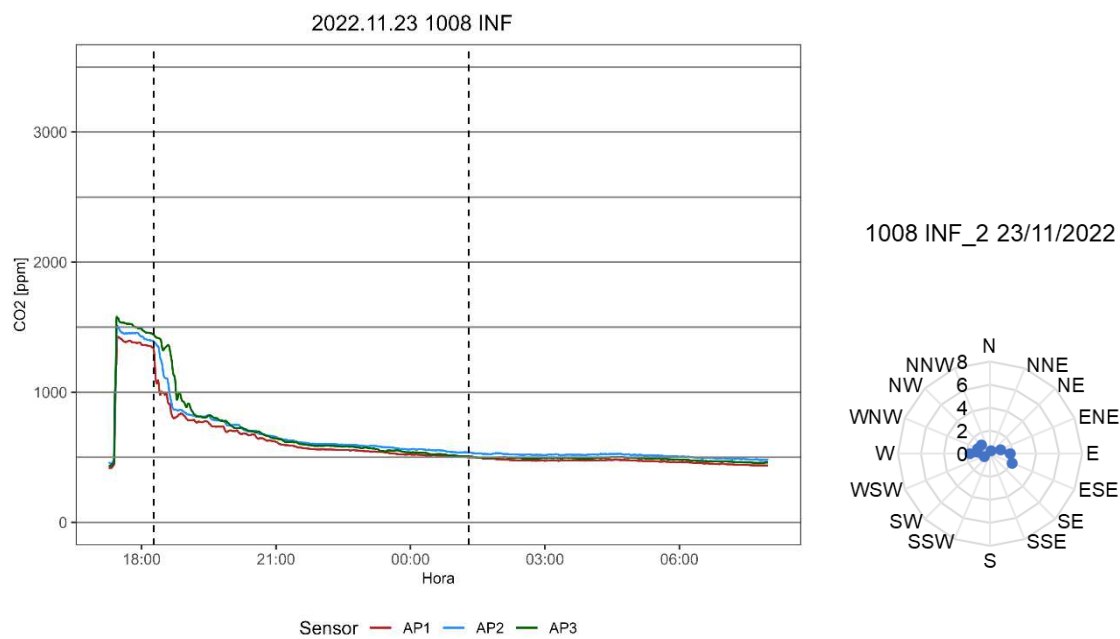


MM8 VU2\_4 06/12/2022

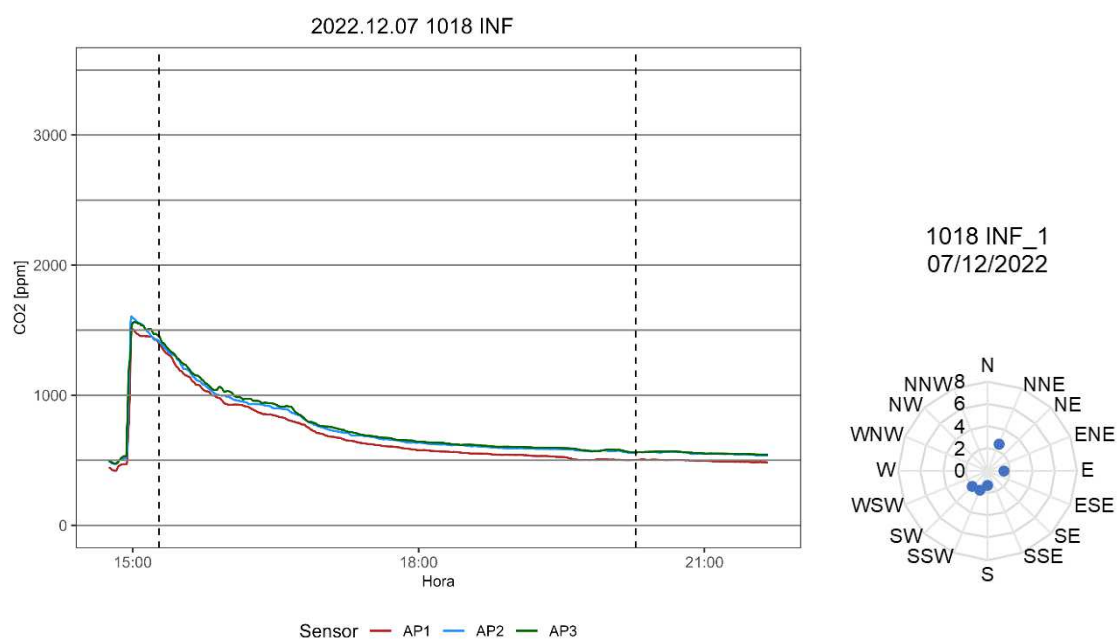
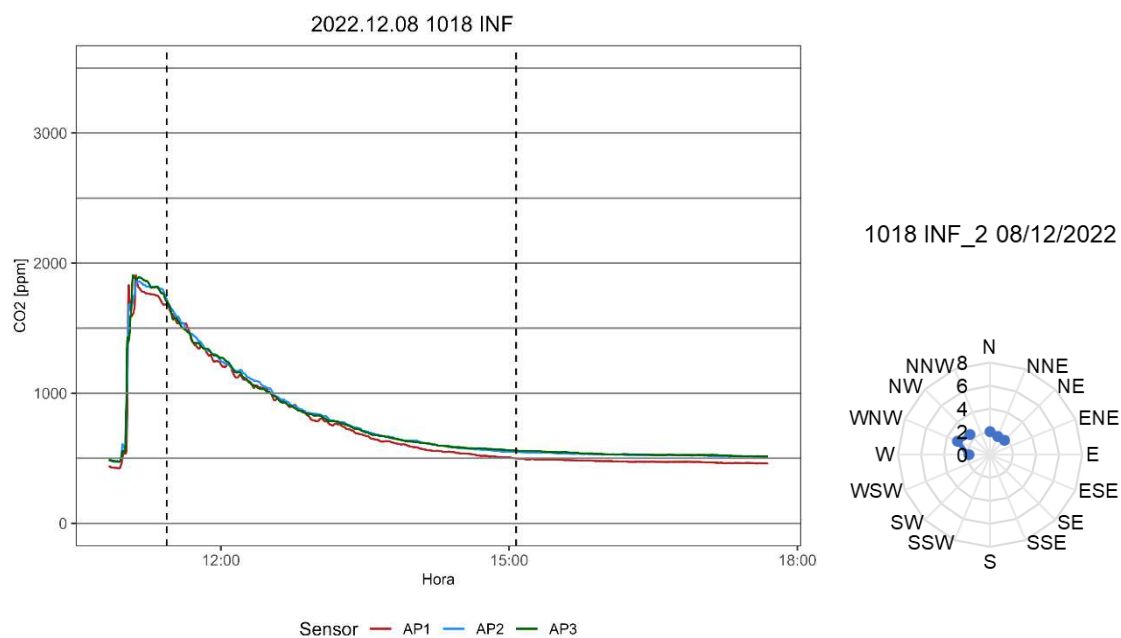


## C.5 Infiltração

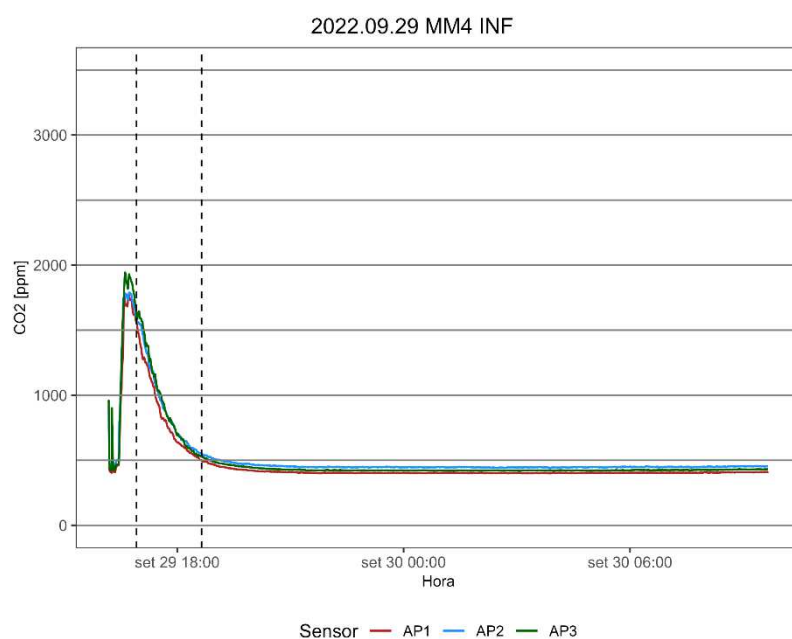
Sala 1008

**Gráfico C-65** – Ensaio de decaimento com cilindro, sala 1008, INF.1 17/11/2022**Gráfico C-66** – Ensaio de decaimento com cilindro, sala 1008, INF.2 23/11/2022

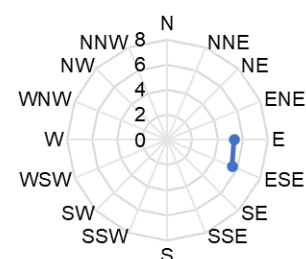
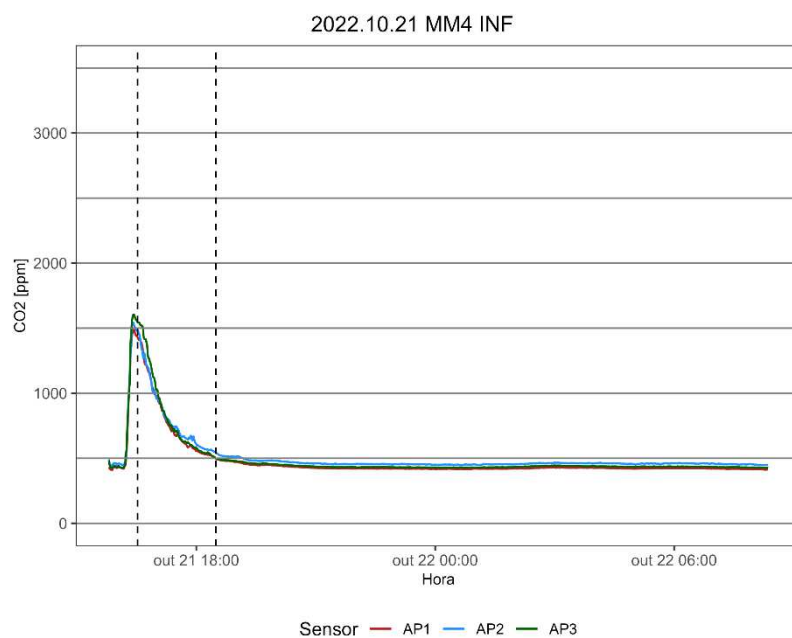
Sala 1018

**Gráfico C-67 – Ensaio de decaimento com cilindro, sala 1018, INF.1 07/12/2022****Gráfico C-68 – Ensaio de decaimento com cilindro, sala 1018, INF.2 08/12/2022**

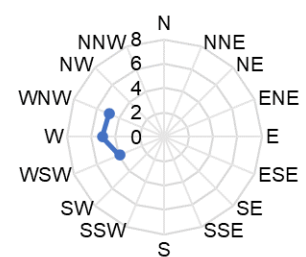
Sala MM4

**Gráfico C-69** – Ensaio de decaimento com cilindro, sala MM4, INF.1 29/09/2022

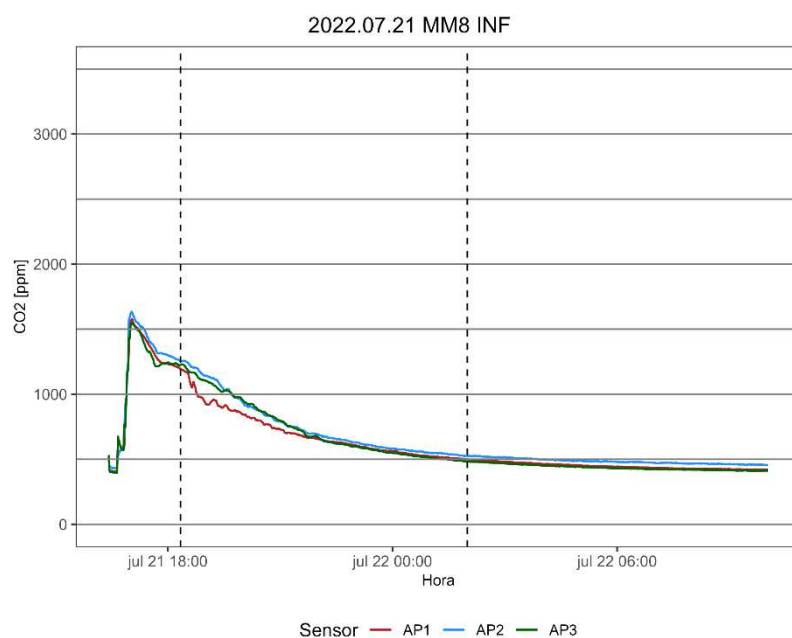
MM4 INF\_1 29/09/2022

**Gráfico C-70** – Ensaio de decaimento com cilindro, sala MM4, INF.2 10/21/2022

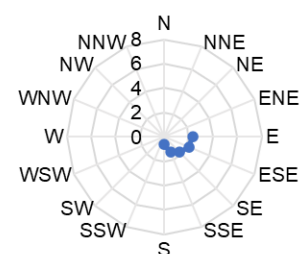
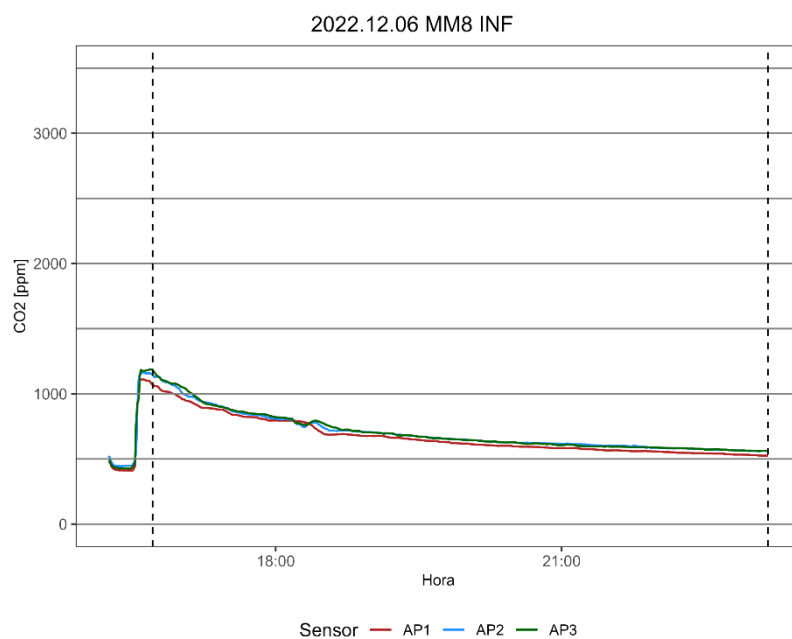
MM4 INF\_2 21/10/2022



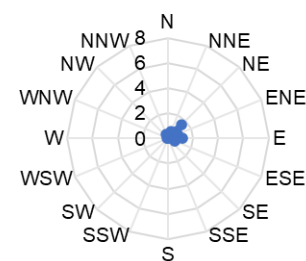
Sala MM8

**Gráfico C-71 – Ensaio de decaimento com cilindro, sala MM8, INF.1 21/07/2022**

MM8 INF\_1 21/07/2022

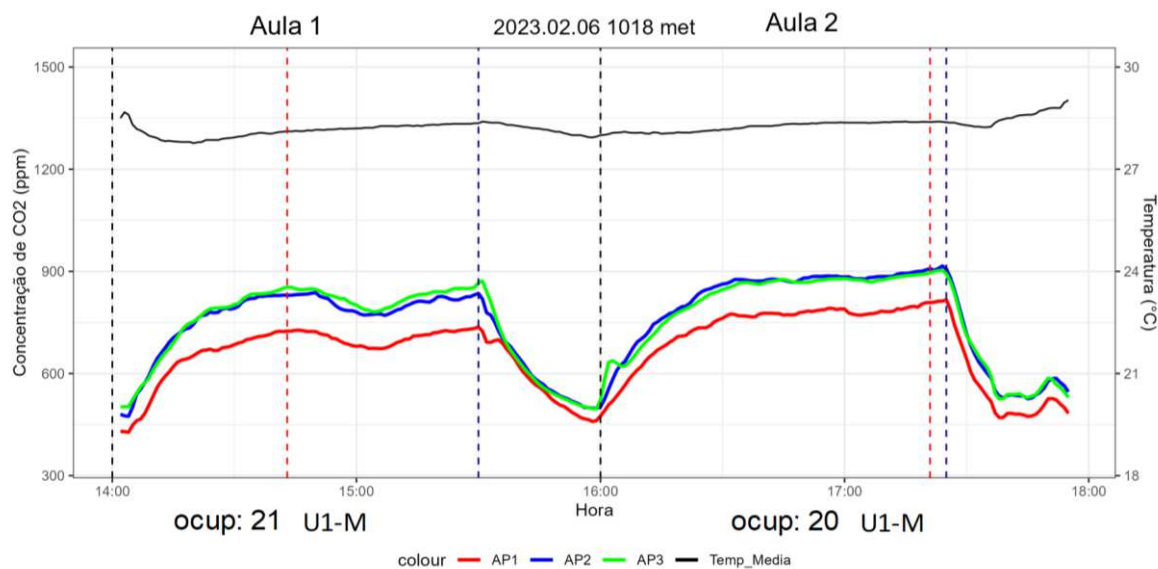
**Gráfico C-72 – Ensaio de decaimento com cilindro, sala MM8, INF.2 06/12/2022**

MM8 INF\_2 06/12/2022

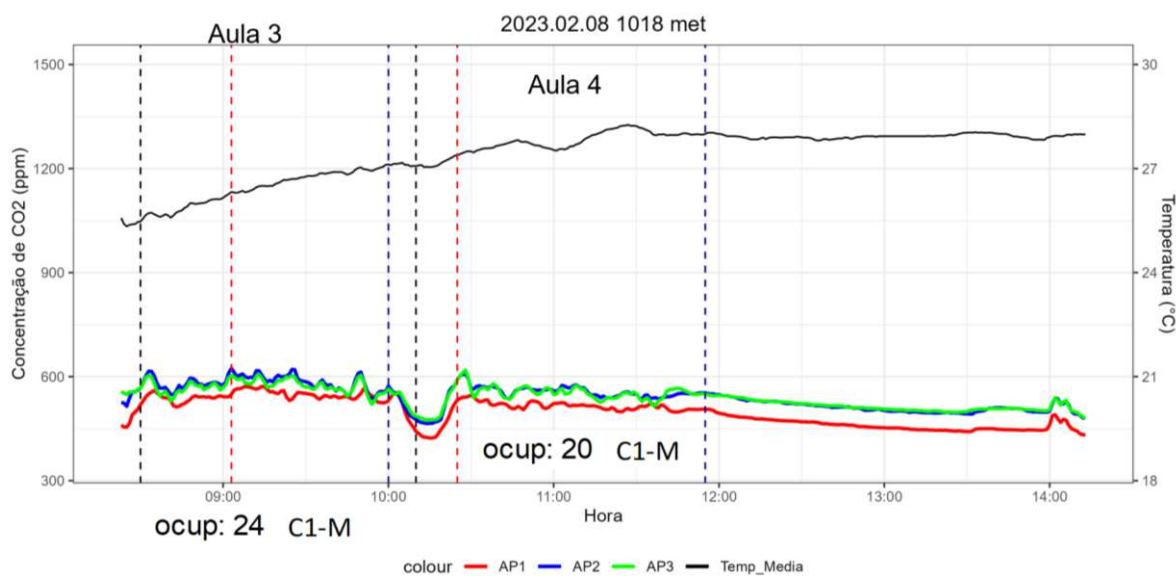


## APÊNDICE D – ENSAIOS COM CO<sub>2</sub> METABÓLICO

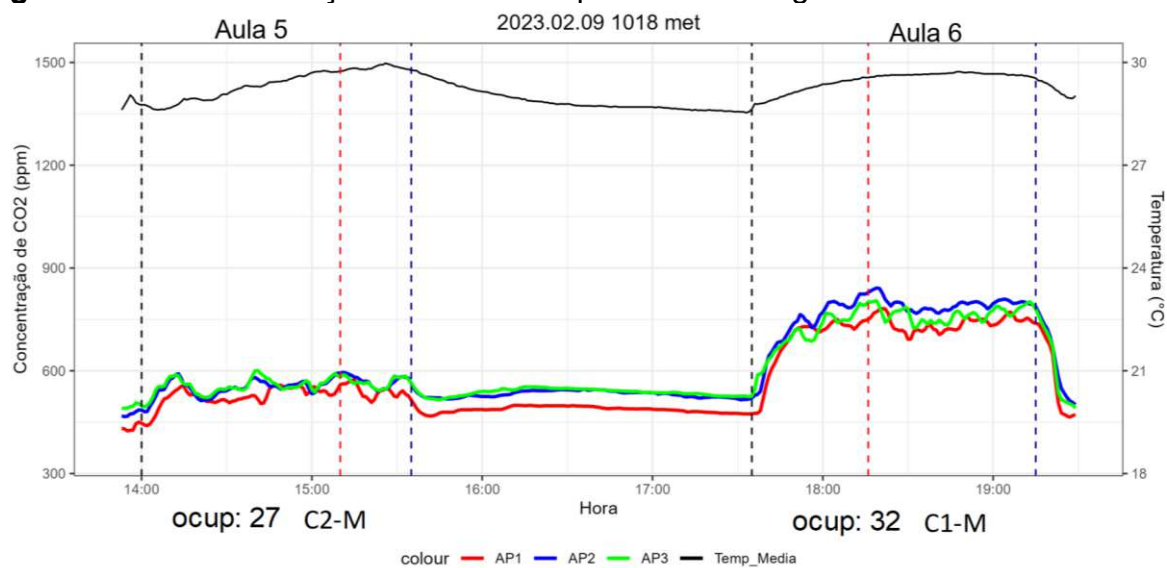
**Figura D-1 – Concentração de CO<sub>2</sub> e temperatura ao longo do dia 06/02/2023**



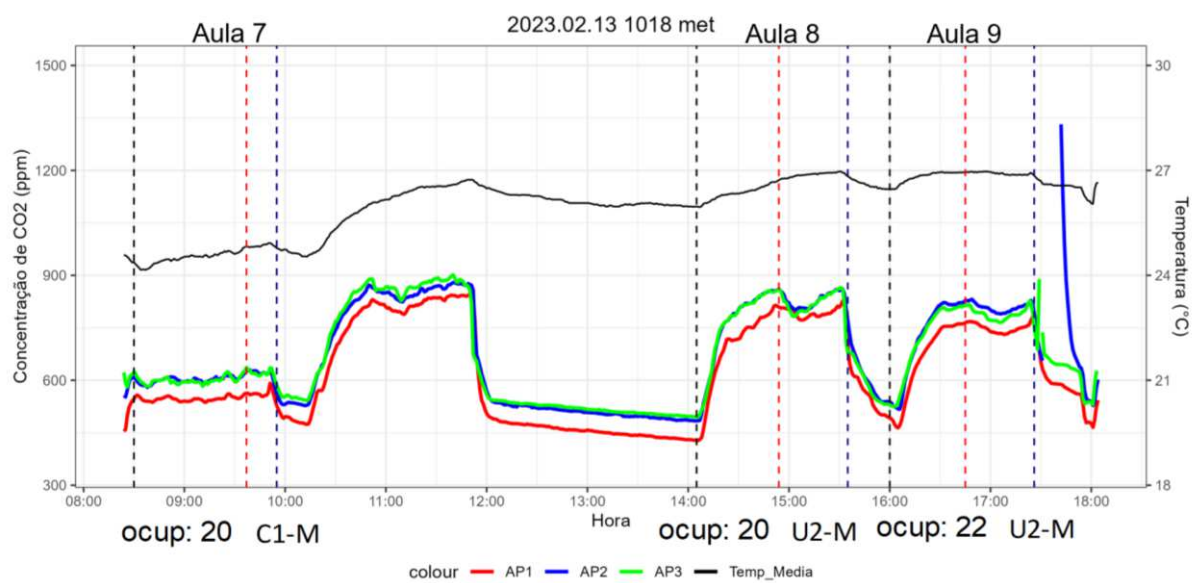
**Figura D-2 – Concentração de CO<sub>2</sub> e temperatura ao longo do dia 08/02/2023**



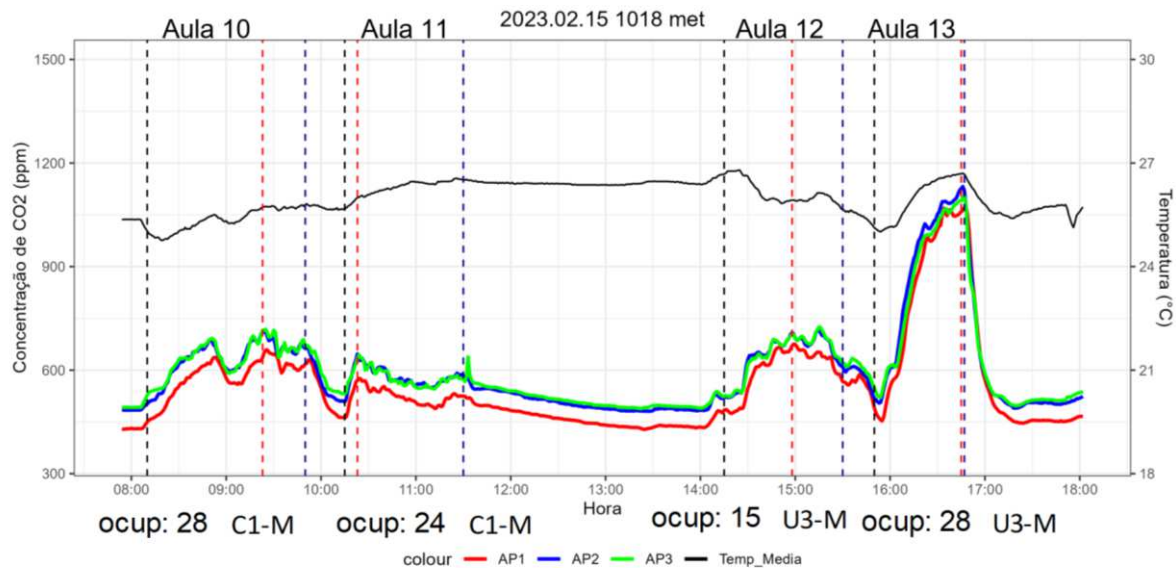
**Figura D-3 – Concentração de CO<sub>2</sub> e temperatura ao longo do dia 09/02/2023**



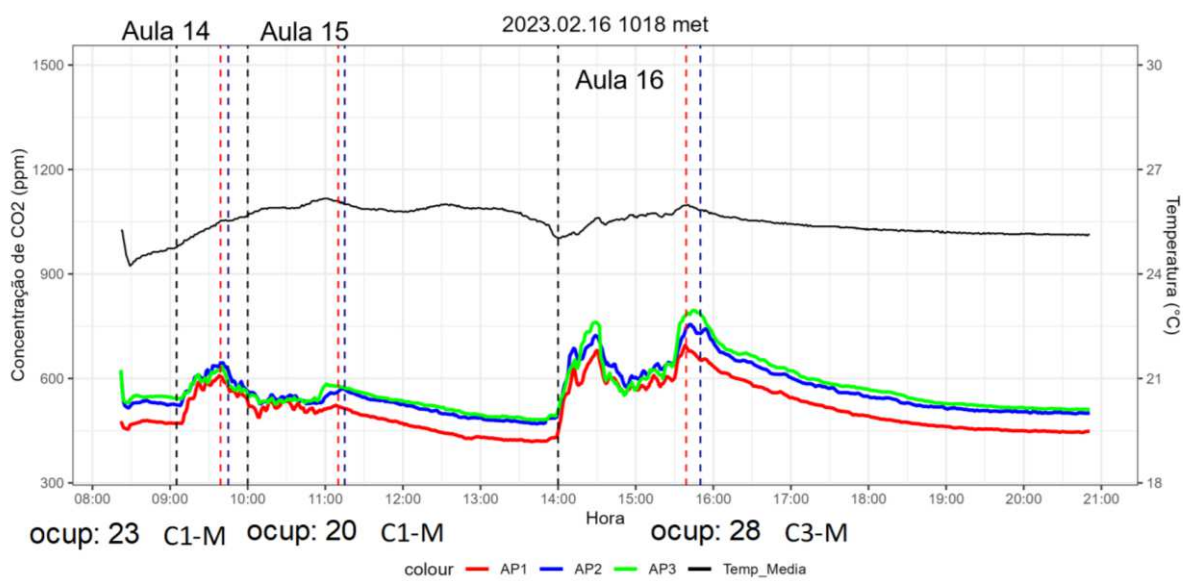
**Figura D-4 – Concentração de CO<sub>2</sub> e temperatura ao longo do dia 13/02/2023**



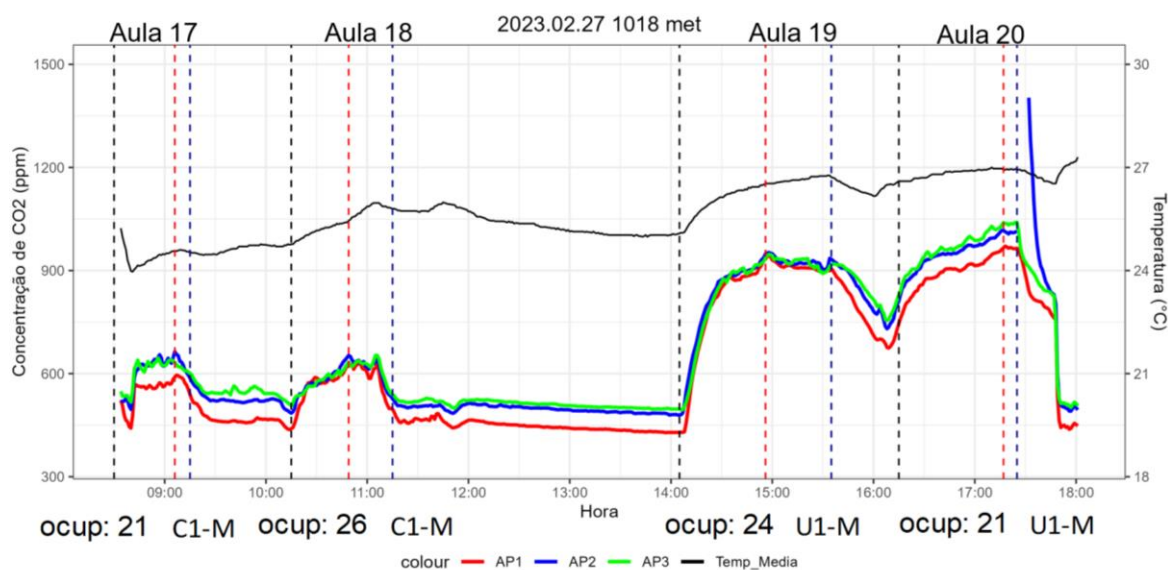
**Figura D-5 – Concentração de CO<sub>2</sub> e temperatura ao longo do dia 15/02/2023**



**Figura D-6 – Concentração de CO<sub>2</sub> e temperatura ao longo do dia 16/02/2023**



**Figura D-7 – Concentração de CO<sub>2</sub> e temperatura ao longo do dia 27/02/2023**



**Figura D-8 – Concentração de CO<sub>2</sub> e temperatura ao longo do dia 28/02/2023**

