



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ARQUITETURA E URBANISMO

Tiago Vieira Pereira

**Simulação do impacto da renovação do ar em salas de aula situadas em Florianópolis,
Brasília e Macapá para alcançar a Qualidade Interna do Ar**

Florianópolis
2022

Tiago Vieira Pereira

**Simulação do impacto da renovação do ar em salas de aula situadas em Florianópolis,
Brasília e Macapá para alcançar a Qualidade Interna do Ar**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do título de Mestre em Arquitetura e Urbanismo.

Orientador: Prof^ª. Dr^ª. Veridiana Atanasio Scalco.

Coorientador: Prof. Dr. Caio Frederico e Silva.

Florianópolis

2022

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Pereira, Tiago Vieira

Simulação do impacto da renovação do ar em salas de aula situadas em Florianópolis, Brasília e Macapá para alcançar a Qualidade Interna do Ar / Tiago Vieira Pereira ; orientadora, Veridiana Atanasio Scalco, coorientador, Caio Frederico e Silva, 2023.

101 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Florianópolis, 2023.

Inclui referências.

1. Arquitetura e Urbanismo. 2. Qualidade interna do ar. 3. Simulação computacional. 4. COVID-19. 5. Escolas brasileiras. I. Atanasio Scalco, Veridiana. II. Silva, Caio Frederico e . III. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo. IV. Título.

Tiago Vieira Pereira

**Simulação do impacto da renovação do ar em salas de aula situadas em Florianópolis,
Brasília e Macapá para alcançar a Qualidade Interna do Ar**

O presente trabalho em nível de qualificação de mestrado foi avaliado e aprovado por banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof^a Veridiana Atanasio Scalco, Dra. - Orientadora
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Caio Frederico e Silva, Dr. - Coorientador
Universidade de Brasília

Prof. Roberto Lamberts, PhD.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Martin Ordenes Mizgier, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Leonardo S. Bittencourt, PhD.
Universidade Federal de Alagoas

Certificamos que esta é a **versão original e final** do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para qualificação no mestrado em Arquitetura e Urbanismo.

Coordenação do Programa de Pós-Graduação

Prof^a Veridiana Atanasio Scalco, Dra. - Orientadora

Florianópolis, 2022.

Este trabalho é dedicado aos meus familiares e aos pesquisadores acadêmicos que lutaram e lutam nesse período tão complicado para a ciência

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus orientadores Veridiana Scalco e Caio Frederico que ao longo desse processo de crescimento acadêmico e profissional souberam me guiar para a elaboração dessa pesquisa. Agradeço a dois professores/mentores e amigos Rodrigo Leitske e Thiago Montenegro que me deram suporte e me ensinaram muito.

Aos meus pais, minha avó e ao meu irmão João por me apoiar nos momentos difíceis da trajetória, torcendo pelo meu sucesso e dando todo suporte necessário

A Thais, meu amor que me incentivou a começar essa caminhada, me fez acreditar que era possível e esteve ao meu lado sempre.

Aos amigos que me deram palavras de apoio e me ajudaram em muitos momentos. Aos amigos do curso que me ajudaram, apoiaram, compartilharam momentos difíceis e felizes nesse modo remoto. Aos amigos que conheci também de forma remota e me ajudaram a construir esse trabalho Talita Muniz, João Marcos e Isabella Barros.

A Deus por ter me concedido toda a estrutura necessária e a possibilidade de encontrar essas pessoas incríveis que me auxiliaram.

RESUMO

Ambientes educacionais expostos a poluentes do ar, sem um sistema eficaz para retirada destes, podem gerar um espaço inóspito para seus usuários, pela acumulação de poluente no ar. A manutenção de níveis aceitáveis de qualidade interna do ar (IAQ) é um fator crucial na promoção da saúde e melhoria no desenvolvimento de atividades. Esta dissertação objetiva avaliar o impacto que a inserção de uma taxa constante de ventilação pode ter na qualidade interna do ar e no consumo energético para condicionamento térmico. O método por simulação computacional avaliou uma sala de aula do padrão de escolas do Fundo Nacional para o Desenvolvimento da Educação - FNDE por meio de simulação computacional em três cidades com zonas bioclimáticas (ZB) distintas: Florianópolis (ZB3), Brasília (ZB4) e Macapá (ZB8). Adota-se o programa de EnergyPlus inserido no grasshopper por meio do plugin Honeybee e é estabelecido como critério de avaliação o consumo energético para condicionamento térmico ideal e um percentual de horas em qualidade interna do ar. Este critério foi subdividido em dois: Calculadora de COVID e Concentração de CO₂ em ppm. As simulações serão avaliadas em três Casos: o primeiro será o caso base, o segundo há a inserção de uma taxa de ventilação constante com base em diretrizes voltadas ao controle da pandemia de COVID-19 (10 L/s para cada pessoa); e o terceiro caso além da inserção de uma taxa de ventilação constante, há um controle dessa ventilação pela demanda de ocupação (DCV). Todos esses três casos serão simulados na condição sem ventilação natural, climatizado 100% do tempo ocupado e no com ventilação natural nos horários nos quais é possível se alcançar conforto térmico através do condicionamento passivo, quando este não for suficiente, serão adotadas as cargas ideais para climatização.

Os resultados apontam que Macapá teve seu melhor resultado ao inserir as taxas constantes de ar no ambiente sem o DCV, enquanto Brasília e Florianópolis obtiveram o melhor resultado com o DCV. É possível indicar que a taxa média de 9 trocas de ar por hora, essa troca sendo constante, é suficiente para atendimento dos critérios de IAQ analisados nas escolas do FNDE, nos padrões apresentados. Escolas que adotem climatização 100% do tempo sem um dispositivo que possa inserir taxas constantes de ar iguais a 10 L/s para cada pessoa presente no ambiente ou que utilizem da ventilação natural sem o uso de insufladores estão suscetíveis a não manutenção de níveis aceitáveis de IAQ. Os Cenários com o modo misto demonstraram uma resposta positiva quando utilizada com inserção de taxas constantes de ar externo no ambiente para manutenção dos níveis aceitáveis de IAQ e para redução da carga ideal para condicionamento térmico.

Palavras-chave: IAQ; simulação computacional; simulação energética; covid-19; escolas brasileiras.

ABSTRACT

Educational environments exposed to air pollutants, without an effective system to remove them, can generate an inhospitable space for their users, due to the accumulation of pollutants in the air. Maintaining acceptable levels of indoor air quality (IAQ) is a crucial factor in promoting health and improving the development of activities. This dissertation aims to evaluate the impact that the insertion of a constant ventilation rate can have on indoor air quality and energy consumption for thermal conditioning. The computer simulation method evaluated a classroom of the National Fund for Education Development - FNDE standard schools through computer simulation in three cities with distinct bioclimatic zones (ZB): Florianópolis (ZB3), Brasília (ZB4) and Macapa (ZB8). The EnergyPlus program inserted in the grasshopper through the Honeybee plugin is adopted and energy consumption for ideal thermal conditioning and a percentage of hours in indoor air quality are established as evaluation criteria. This criterion was subdivided into two: COVID Calculator and CO₂ concentration in ppm. The simulations will be evaluated in three cases: the first will be the base case, the second will include the insertion of a constant ventilation rate based on guidelines aimed at controlling the COVID-19 pandemic (10 L/s for each person); and the third case, in addition to the insertion of a constant ventilation rate, there is a control of this ventilation by occupancy demand (DCV). All these three cases will be simulated in the condition without natural ventilation, air-conditioned 100% of the occupied time and in the one with natural ventilation at times when it is possible to achieve thermal comfort through passive conditioning, when this is not enough, the ideal loads will be adopted for air conditioning.

The results indicate that Macapá had its best result when inserting constant rates of air in the environment without DCV, while Brasília and Florianópolis obtained the best result with DCV. It is possible to indicate that the average rate of 9 air changes per hour, this change being constant, is sufficient to meet the IAQ criteria analyzed in the FNDE schools, in the standards presented. Schools that adopt air conditioning 100% of the time without a device that can insert constant rates of air equal to 10L/s for each person present in the environment or that use natural ventilation without the use of insufflators are susceptible to not maintaining acceptable levels of IAQ. Scenarios with the mixed mode demonstrated a positive response when used with the insertion of constant rates of external air in the environment to maintain acceptable levels of IAQ and to reduce the ideal load for thermal conditioning.

Keywords: IAQ; computer simulation; energy simulation; Covid-19; Brazilian schools.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Estrutura da pesquisa	18
Figura 2 - Fluxo de exposição (“ <i>environmental pathway</i> ”)	23
Figura 3 - Ciclo da infecção.	24
Figura 4 - Poluentes químicos	25
Figura 5 - Simulação de CO ₂ por concentração.....	36
Figura 6- Simulação de CO ₂ por concentração.....	37
Figura 7 - Simulação de CO ₂ por DCV.	37
Figura 8 - Estudos encontrados por estado.....	41
Figura 9 - Método	45
Figura 10 - Estados analisados e suas respectivas Zonas bioclimáticas.....	46
Figura 11 - Poluição do ar atmosférico no mundo e no Brasil em 2017	47
Figura 12 - Temperaturas médias e faixa de conforto pelo modelo adaptativo com 80% de aceitabilidade ao fundo do gráfico na cidade de Florianópolis-SC	49
Figura 13 - Radiação Global Horizontal ao longo do ano em Florianópolis-SC	50
Figura 14 - Predominância da direção e velocidade dos ventos em Florianópolis-SC	50
Figura 15 - AQI da cidade de Florianópolis	51
Figura 16 - Temperaturas médias e faixa de conforto pelo modelo adaptativo com 80% de aceitabilidade ao fundo do gráfico na cidade de Brasília-DF.....	51
Figura 17 - Radiação Global Horizontal ao longo do ano em Brasília-DF	52
Figura 18 - Predominância da direção e velocidade dos ventos em Brasília	52
Figura 19 - AQI da cidade de Brasília	53
Figura 20 - Temperaturas médias e faixa de conforto pelo modelo adaptativo com 80% de aceitabilidade ao fundo do gráfico na cidade de Macapá-AP	54
Figura 21 - Radiação Global Horizontal ao longo do ano em Macapá-AP.....	54
Figura 22 - Predominância da direção e velocidade dos ventos em Macapá-AP.....	55
Figura 23 - AQI da cidade de Macapá - Satélite	56
Figura 24 - AQI da cidade de Macapá – Medidor físico	56
Figura 25 - Modelo de salas de aula.	59
Figura 26 - Indicação das janelas no modelo	61
Figura 27 - Tipologias de janelas: JA-11 à esquerda e JA-7 à direita.	61
Figura 28 - Corte da sala.....	62

Figura 29 - Estrutura de simulação.....	63
Figura 30 - Cenários de avaliação	64
Figura 31 - Simulação para definição da operação das aberturas.....	67
Figura 32 - Definição do <i>setpoint</i> para acionamento e desligamento do ar condicionado	68
Figura 33 - Rotina de uso e operação	70
Figura 34 - Estrutura de componente para avaliação do critério 01.1: Redução de contaminantes.	75
Figura 35 - Estrutura de resultados: SN como Sem ventilação Natural, CN como com Ventilação Natural.....	77
Figura 36 - Médias de ACHs para cada cidade	78
Figura 37 - Resultados percentuais de IAQ para cada cidade	78
Figura 38 - Consumo energético para condicionamento térmico total nas cidades	80
Figura 39 - Consumo energético para aquecimento	82
Figura 40 - Consumo energético para resfriamento	83
Figura 41 - Variação do consumo energético para as cargas de resfriamento e aquecimento ao adotar o Modo Misto	84

LISTA DE QUADROS

Quadro 1- Fatores que podem interferir na Qualidade interna do ar (Continua)	21
Quadro 2- Efeitos das concentrações de CO ₂ na saúde do ser humano.....	26
Quadro 3- Taxas de Quanta emitidos para diferentes atividades.	35
Quadro 4 - Artigos selecionados na revisão de literatura.....	39
Quadro 5 - Objetivos específicos e procedimentos metodológicos.....	44
Quadro 6 - Escala de poluição do ar atmosférico – WHO	47
Quadro 7- Escala de poluição do ar atmosférico – US EPA (continua).....	48
Quadro 8 – Resumo dos fatores externos.	58
Quadro 9 - Composição componentes construtivos	60
Quadro 10 - <i>Inputs</i> da simulação	69
Quadro 11 - Resultados de cada Cenário.....	85

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Tipo de publicação em números percentuais.....	39
Gráfico 2 – Percentual de artigos encontrados e o direcionamento geográfico no globo.....	40
Gráfico 3 – Tipo de pesquisa realizada.....	41

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANVISA	Agência Nacional de Vigilância Sanitária
ASHRAE	<i>American Society Of Heating Refrigerating And Air Conditioning Engineers</i>
WHO	<i>World Health Organization</i> – Organização Mundial da Saúde
PM1	Partículas com diâmetro aerodinâmico inferior a 1 µm
PM10	Partículas com diâmetro aerodinâmico inferior a 10 µm
PM2.5	Partículas com diâmetro aerodinâmico inferior a 2,5 µm
AHU	<i>Air Handling Units</i>
Amin	Área mínima de abertura interna
BDTD	Biblioteca Digital Brasileira de Teses e Dissertações
BRI	<i>Building Related Illness</i>
CAMS	<i>Copernicus Atmosphere Monitoring Service</i>
CO ₂	Dióxido de Carbono
CODIN	Coordenação de Desenvolvimento e Infraestrutura
DCV	<i>Demand Control Ventilation</i>
FNDE	Fundo Nacional de Desenvolvimento da Educação
GH	<i>GrassHopper</i>
HVAC	<i>Heating, Ventilation and Air-conditioning</i>
IAQ	<i>Indoor Air Quality</i>
IEQ	<i>Indoor Environment Quality</i>
PDE	Plano de Desenvolvimento da Educação
PM	<i>particulate matter</i>
PPM	Partes Por Milhão
Proinfância	Programa Nacional de Reestruturação e Aquisição de Equipamentos para a Rede Escolar Pública de Educação Infantil
SARS	<i>Severe Acute Respiratory Syndrome</i>
SBS	<i>Sick Building Syndrome</i>
TV	Taxa de Ventilação
Vv	Velocidade do vento
ZB	Zona Bioclimática

VN

Ventilação Natural

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO E PROBLEMATIZAÇÃO.....	15
1.2	OBJETIVOS	17
1.2.1	Objetivo geral.....	17
1.2.2	Objetivos específicos.....	17
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO	18
2	REVISÃO DE LITERATURA.....	20
2.1	QUALIDADE INTERNA DO AR.....	20
2.1.1	Poluentes e contaminantes e o impacto na saúde.....	22
2.1.1.1	<i>Poluentes biológicos (contaminantes) - COVID.....</i>	<i>23</i>
2.1.1.2	<i>Poluentes químicos - Dióxido de carbono.....</i>	<i>25</i>
2.1.2	Efeito da qualidade do ambiente interno na cognição	27
2.2	IAQ E CONFORTO TÉRMICO	29
2.2.1	Ventilação natural e mecânica.....	31
2.2.2	Impacto do Covid nos sistemas HVAC.....	34
2.2.3	Ventilação controlada por demanda.....	35
2.3	PESQUISA DESENVOLVIDA NO BRASIL.....	38
2.3.1	Escolas Padrão do FNDE.....	41
3	MATERIAIS E MÉTODOS	44
3.1	DEFINIÇÕES DO CONTORNO	45
3.1.1	Fatores externos e direcionamento para as simulações	46
3.1.2	Modelo de simulação	59
3.2	METODOLOGIA DE SIMULAÇÃO.....	61
3.2.1	Cenários de avaliação.....	62
3.2.1.1	<i>Simulação computacional.....</i>	<i>64</i>
3.2.1.1.1	<i>Simulação prévia para definição dos padrões de abertura para as janelas.....</i>	<i>64</i>
3.2.2	Padrões de uso e ocupação	68
3.2.3	Indicadores.....	69
3.2.3.1	<i>Critério 01: IAQ.....</i>	<i>70</i>
3.2.3.1.1	<i>Critério 01.1: Redução da probabilidade de contaminação por COVID-19.....</i>	<i>70</i>
3.2.3.1.2	<i>Critério 01.2: Concentração de CO₂ nos ambientes</i>	<i>74</i>

3.2.3.2	<i>Critério 02: Consumo energético</i>	75
4	RESULTADOS	76
4.1	IAQ.....	76
4.1.1	Impacto do uso de modo misto para o IAQ	76
4.1.2	Evolução entre os Casos para o IAQ	78
4.2.	CONSUMO ENERGÉTICO.....	78
4.2.1	Impacto do uso do modo misto para o consumo energético	79
4.2.2	Evolução entre os Casos para o consumo energético total	80
4.2.3	Caracterização das cargas para resfriamento e aquecimento	82
4.2.3.1	<i>Impacto do uso do modo misto para o consumo energético detalhado</i>	83
4.2.3.2	<i>Evolução entre os Casos para o consumo energético detalhado</i>	84
4.3	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	87
5	CONCLUSÃO	89
5.1	LIMITAÇÕES E INCERTEZAS	90
5.2	RECOMENDAÇÕES PARA OS TRABALHOS FUTUROS.....	90
	REFERÊNCIAS	91
	APÊNDICE A – ESTRUTURA DE SIMULAÇÃO NO GRASSHOPPER	99

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO E PROBLEMATIZAÇÃO

Em 2020, a Organização Mundial da Saúde - *World Health Organization* (WHO) caracterizou o COVID-19 (coronavírus), vírus ligado à mesma família de vírus da Síndrome Respiratória Aguda Grave ou *Severe Acute Respiratory Syndrome* (SARS), como uma pandemia, afetando diversos países. Os sintomas são semelhantes a de uma gripe comum ou da Influenza, podendo desenvolver febre, tosse, perda do paladar e olfato, dificuldade respiratória, e em casos mais severos pode desenvolver pneumonia ou levar à morte (BENDER, 2020).

Esse contexto pandêmico foi o principal motivador para esta pesquisa, gerou também um aumento das discussões acerca da qualidade interna do ar em espaços fechados, se a forma que os edifícios residenciais, comerciais, institucionais e educacionais estão sendo pensados atualmente proporciona um ambiente saudável ou corrobora para a disseminação de contaminantes. Além disso, os cenários pós-covid apontam para uma maior preocupação com a salubridade de ambientes de trabalho, produzindo espaços mais preocupados com a qualidade do ambiente interno (*Indoor Environment Quality – IEQ*) (PUNGERCAR et al., 2021).

O conforto térmico está intimamente relacionado aos níveis de qualidade interna do ar, comumente citada na literatura internacional como *Indoor Air Quality* (IAQ), e é estabelecido assim uma relação de interdependência entre conforto e saúde (MUJAN et al., 2019). A performance dos alunos em ambientes educacionais depende significativamente da condição de exposição ao clima e à qualidade do ar, nos quais a associação da sensação de conforto à qualidade do ar é compreendida como mecanismo que pode auxiliar na aprendizagem, compreensão do conteúdo e memória (BAKÓ-BIRÓ et al., 2012).

O Brasil apresenta grande extensão geográfica e assim, uma diversidade no panorama climático, no qual cidades situadas em uma única zona bioclimática (ZB) podem possuir características climáticas distintas (BAVARESCO et al., 2017).

Apesar das diferentes dinâmicas que podem ocorrer nas regiões, há um padrão de escolas do Fundo Nacional de Desenvolvimento da Educação (FNDE) proposto pelo Governo Federal, no intuito de atender o déficit de ambientes educacionais no país, entretanto, os projetos podem não sofrer adequações minimamente necessárias como materiais ou métodos construtivos para atender ao conforto térmico (ARAÚJO, 2019).

Estudos apontam que ambientes educacionais expostos a poluentes do ar, sem um sistema eficaz para retirada destes, podem gerar um espaço inóspito para seus usuários. Espaços com essas características tendem acumular elevadas concentrações de poluentes químicos e biológicos, afetando na saúde e cognição dos ocupantes (FERREIRA; CARDOSO, 2014; PULIMENO et al., 2020; TWARDELLA et al., 2012). A renovação do ar é um fator que permite a redução da probabilidade de contaminação em ambientes internos, que podem oferecer maior ou menor risco variando a sua tipologia, taxa ocupacional, as suas aberturas, entre outros fatores (REHVA, 2021).

A ventilação natural é apontada como uma estratégia importante para o aumento do número de renovações de ar e melhoria do IAQ (KRAWCZYK et al., 2016). Acredita-se no uso de sistemas passivos em escolas da rede pública para melhor adaptabilidade, com destaque para o uso da ventilação natural como estratégia passiva a ser testada para auxiliar na qualidade do ar e condicionamento térmico. Entretanto, a ventilação natural não pode ser concebida como único meio possível para se alcançar IAQ, visto que a ventilação possui natureza estocástica e resultados de simulações considerando-a como meio para se alcançar determinados critérios, devem levar em consideração a incerteza, logo, avaliá-la como probabilística e não determinística (HYUN; PARK; AUGENBROE, 2008).

Ao inserir o uso de sistemas mecânicos, há o acréscimo da questão energética que não pode ser ignorada ao tratar da rede de ensino público, por ter um impacto significativo em diversas escolas em toda extensão do país e assim, direcionar para uma variação no custo anual com a adoção dessas medidas. Dessa forma, o trabalho busca a ventilação híbrida, associando a mecânica e a inserção de ar externo artificialmente ou pela operação das janelas (Modo misto), para avaliar se é uma opção eficaz do ponto de vista da qualidade interna do ar e eficiente da perspectiva do consumo energético.

A problemática é relacionada a baixos níveis de conforto térmico e supõe-se baixos níveis de IAQ no padrão de escolas do FNDE. O presente trabalho visa realizar análises de qualidade do ar e energéticas para avaliar o impacto que a inserção de taxas constantes de ventilação pode ter nas diferentes regiões analisadas ao buscar um equilíbrio entre conforto térmico e a ventilação para redução de contaminantes e Dióxido de Carbono (CO₂), considerando o consumo energético envolvido.

Diante do exposto, propõe-se neste trabalho uma pesquisa por meio de simulação computacional em um modelo do padrão das escolas do FNDE frente à critérios de IAQ e consumo energético para condicionamento térmico em três climas distintos no Brasil: Macapá

capital do estado do Amapá, Brasília no Distrito Federal e Florianópolis, capital de Santa Catarina. E assim, verificar o impacto no consumo energético ao buscar o atendimento nos critérios de IAQ.

O trabalho busca tratar do IAQ associado ao condicionamento térmico através de simulação computacional em edifícios educacionais brasileiros.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Objetivo geral: Avaliação do impacto da renovação de ar através da inserção de taxas constantes de ventilação no modelo de escola padrão do FNDE, considerando a qualidade interna do ar e o consumo energético para condicionamento térmico, nos contextos climáticos de Florianópolis, Brasília e Macapá.

1.2.2 Objetivos específicos

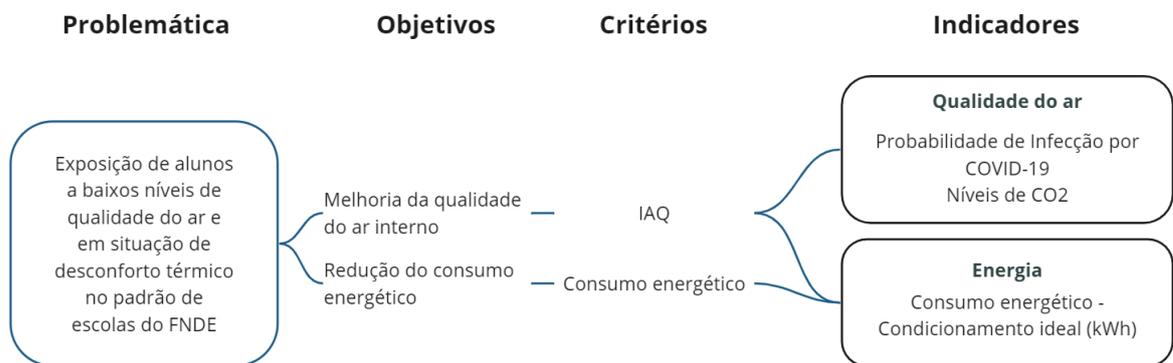
A pesquisa possui como objetivos específicos:

- Avaliar as estratégias mecânicas e híbridas de ventilação no contexto de três diferentes climas brasileiros, associados a padrões de abertura e fechamento das janelas;
- Verificar o impacto de sistemas híbridos para atendimento de critérios de qualidade interna do ar e de condicionamento térmico;
- Avaliar estratégia de controle da ventilação e o impacto no consumo energético.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

A pesquisa busca compreender a problemática que permeia baixos níveis de qualidade do ar, estabelecendo critérios e variáveis que influenciam os indicadores de avaliação como mostra a figura 1.

Figura 1- Estrutura da pesquisa



Fonte: Elaborada pelo autor (2022)

O trabalho está dividido em 4 capítulos principais. No primeiro, apresenta-se a introdução, na qual destaca-se a contextualização e problematização do tema, seguido dos objetivos geral (Subcapítulo 1.2.1) e específicos do estudo (Subcapítulo 1.2.2) e apresentação da estrutura do trabalho (Subcapítulo 1.3).

No segundo capítulo é apresentada a revisão bibliográfica, dividida em três subcapítulos. O primeiro trata da qualidade interna do ar e a sua influência na qualidade de vida das pessoas (Subcapítulo 2.1), ao adentrar em tópicos mais específicos como a forma mais nociva para a saúde humana (Subcapítulo 2.1.1) e destacando os tipos de poluentes: biológicos (Subcapítulo 2.1.1.1) e químicos (Subcapítulo 2.1.1.2). Seguindo para o efeito da qualidade do ar nos processos cognitivos (Subcapítulo 2.1.2).

O segundo subcapítulo (2.2) traz uma compreensão mais voltada para o objeto de estudo, destacando a influência de sistemas de aquecimento, ventilação e ar condicionado (*Heating, Ventilation and Air-conditioning* – HVAC) no IAQ e condicionamento térmico, este subdividido em ventilação natural e mecânica (Subcapítulo 2.2.1), impacto do COVID-19 nos sistemas HVAC (Subcapítulo 2.2.2) e a ventilação controlada por demanda (Subcapítulo 2.2.3).

O terceiro subcapítulo (Subcapítulo 2.3) busca pesquisas relacionadas ao tema no cenário brasileiro, abordando primeiramente uma pesquisa dos trabalhos desenvolvidos com

essa temática e, na sequência, estudos que avaliaram as escolas padrão do FNDE (Subcapítulo 2.3.1).

O terceiro capítulo detalha o método utilizado na presente pesquisa, o qual foi dividido em duas etapas. A primeira mostra o contexto ao qual os modelos serão inseridos (Subcapítulo 3.1), apresentando a caracterização dos climas (Subcapítulo 3.1.1), em seguida a definição do objeto de estudo (Subcapítulo 3.1.2). A segunda etapa é referente ao método de simulação térmica e de qualidade do ar (Subcapítulo 3.2) ao apontar os cenários avaliados (Subcapítulo 3.2.1), como a simulação computacional irá ocorrer (Subcapítulo 3.2.1.1), descrevendo a simulação que antecede os cenários para definição do padrão de aberturas (Subcapítulo 3.2.1.1.1), ainda na metodologia de simulação, são apresentados os padrões de uso e ocupação (Subcapítulo 3.2.2). Os indicadores (Subcapítulo 3.3) de IAQ (Subcapítulo 3.3.1) divididos em redução da probabilidade de contaminação por COVID-19 (Subcapítulo 3.3.1.1) e concentração de CO₂ nos ambientes (Subcapítulo 3.3.1.2) e Consumo energético (Subcapítulo 3.3.2).

Os resultados (Capítulo 4) foram divididos em IAQ (Subcapítulo 4.1) e este apresenta o impacto para uso misto (Subcapítulo 4.1.1) e a evolução entre os Casos (Subcapítulo 4.1.2), da mesma forma para o consumo energético (Subcapítulo 4.2) apresentando o impacto para uso misto (Subcapítulo 4.2.1), a evolução entre os Casos (Subcapítulo 4.2.2) e ainda a caracterização das cargas para resfriamento e aquecimento (Subcapítulo 4.2.3), novamente dividindo entre o impacto para uso misto (Subcapítulo 4.2.3.1) e a evolução entre os Casos (Subcapítulo 4.2.3.2). Por fim, realiza-se uma discussão dos resultados (Subcapítulo 4.3) e na sequência a conclusão (Capítulo 5), limitações e incertezas (Subcapítulo 5.1) e recomendações para trabalhos futuros (Subcapítulo 5.2). Ao final são apresentadas as referências bibliográficas e apêndice.

2 REVISÃO DE LITERATURA

A revisão de literatura se baseia na compreensão da influência de variáveis internas e externas no IAQ e conforto térmico em ambientes internos. A construção desses espaços foi um processo natural como mecanismo de proteção dos fatores do clima, sendo parte constante do processo evolutivo do ser humano, intrinsecamente representado na história com a evolução para as primeiras habitações populares, aglomerados de habitações, organizações que desencadearam nas primeiras civilizações (GONZÁLEZ, 2004).

Passarelli (2009) afirma que o direcionamento para tornar os edifícios mais eficientes energeticamente gerou técnicas arquitetônicas para torná-los herméticos, reduzindo assim as perdas entre o meio interno e externo. O autor acrescenta que a geração interna de poluentes químicos e biológicos pelos próprios ocupantes, desencadeou uma série de problemas relacionados ao trato respiratório.

Coch (1998) entende que esse processo influenciou à arquitetura se moldar e criar invólucros que necessitam de iluminação artificial em detrimento da natural e climatização artificial para suprir as demandas internas de temperatura. O autor entende que, ao ignorar o clima externo, criam-se edifícios com características tão desassociadas com o contexto que são inseridas, que funcionam de maneira inferior ao clima externo. E complementa definindo que essa estratégia se apresenta como uma solução irrealista das demandas que podem ser pensadas em fase de projeto, aproveitando estratégias passivas, criando-se edifícios fisiológica e psicologicamente inóspitos.

Essas condições do edifício hermético geram um impacto indireto voltado para o ser humano e sua percepção do espaço. O processo evolutivo de adaptação aos diferentes climas, seja por estratégias passivas ou ativas, se configura pela capacidade do ser humano de buscar formas para melhor se adaptar ao espaço em que está inserido. As variáveis externas podem impactar de diferentes formas o uso do espaço, desde uma sensação de desconforto que reduz a capacidade do desenvolvimento de tarefas até uma sensação de desconforto extrema, incapacitando o indivíduo no cumprimento dessas (FROTA; SCHIFFER, 2001).

2.1 QUALIDADE INTERNA DO AR

Os espaços internos são substancialmente utilizados na sociedade atual. Estudos apontam que pessoas passam mais tempo em ambientes fechados do que em espaços abertos

(CHITHRA; SHIVA NAGENDRA, 2018; JENKINS et al., 1992; WHO, 2005). No passado, era comum os edifícios possuírem janelas operáveis, porém, atualmente os edifícios possuem uma tendência a não permitir essa possibilidade para o usuário, com fachadas de janelas fixas, como as fachadas de pele de vidro, com o uso de um sistema mecânico de ventilação para troca de ar com o fornecimento de um ar externo relativamente limpo (CARMO; PRADO, 1999).

A poluição do ar por poluentes pode impactar na saúde humana através das vias respiratórias e efeitos cardiovasculares após a inalação, além disso é possível ocorrer absorção cutânea e a exposição ocular, causando irritação na pele ou nos olhos respectivamente (WHO, 2005). Poluentes químicos e biológicos podem se acumular em determinadas partes do edifício quando não existem taxas de ventilação de ar suficientes sendo inseridas e misturadas. É criado assim, um espaço insalubre pela precarização da qualidade do ar interno (CARMO; PRADO, 1999).

Segundo a Agência Nacional de Vigilância Sanitária - ANVISA (2013), o IAQ depende de três fatores, em suas respectivas escalas: a contaminação do ar exterior como fator externo; a eficiência de sistemas HVAC em remover contaminantes do ar que representam o fator de filtragem com o meio externo e interno; e das atividades realizadas nas áreas internas como fatores internos.

Com base no quadro 1, é possível detalhar mais os fatores: em uma escala macro os edifícios são inseridos em um sistema urbano organizado e intrinsecamente conectado, onde o entorno pode influenciar nos níveis de qualidade do ar interno. Fábricas, automóveis, queimadas e até fenômenos como a inversão térmica, são compreendidos como fontes potenciais de disponibilidade de poluentes que podem gerar maiores níveis de contaminação do ar em espaços fechados. Segundo Braga et al. (2001), grandes cidades tendem a experimentar problemas relacionados à poluição atmosférica, acarretando doenças agudas e crônicas no trato respiratório. A NBR 16401 (ABNT, 2008) aponta que deve ser avaliada a instalação de dispositivos específicos para renovar o ar e retirar estes poluentes quando a única fonte disponível de ar exterior está contaminada por determinados poluentes.

Quadro 1- Fatores que podem interferir na Qualidade interna do ar (Continua)

Internos	Externos
Densidade ocupacional	Distância do tráfego de veículos
Tipo de edifício	Proximidade com indústrias

Área do piso	Ausência de ventos
Número de horas ocupadas	Inversão térmica
Tipo de material do piso	Queimadas
Taxa de renovação do ar	
Limpeza do espaço	
Equipamentos de climatização	

Fonte: Elaborado pelo autor 2021 (ANVISA, 2013; BRAGA et al., 2001; MENTESE; T ASDIBI, 2017)

Como já foi demonstrado, o IAQ tem um impacto na saúde e produtividade de maneira geral, na sequência será abordado de que forma a saúde dos ocupantes pode ser prejudicada pela insalubridade relacionada ao ar na sua forma mais nociva.

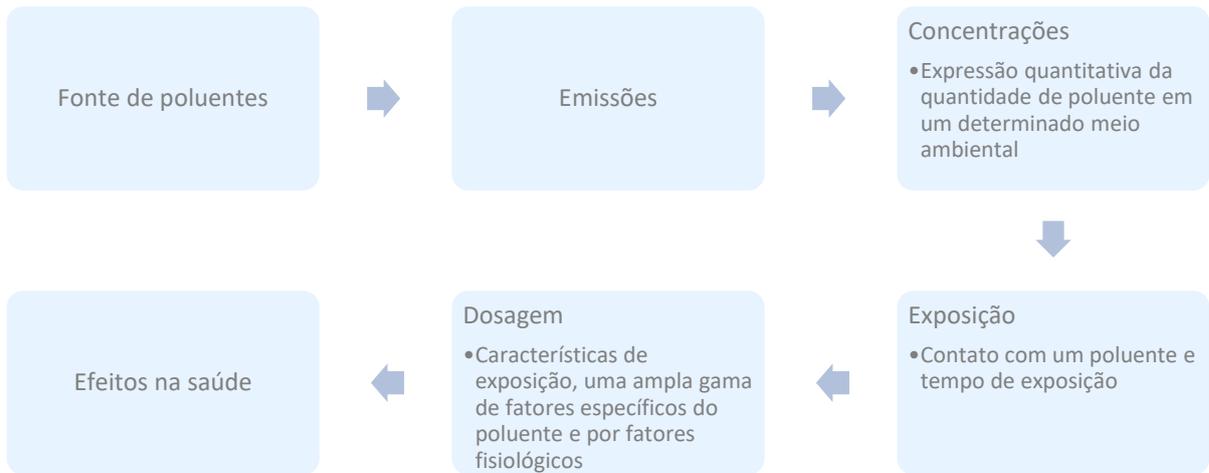
2.1.1 Poluentes e contaminantes e o impacto na saúde

A Organização Mundial de Saúde – *World Health Organization* (WHO, 2005) define que exposição está relacionada ao contato de uma pessoa com um poluente em determinada concentração em um determinado período de tempo e ao tratar da exposição relacionada à poluição do ar, esta é determinada pela concentração de poluentes atmosféricos nos ambientes onde as pessoas ficam e a quantidade de tempo que passam nos ambientes. A organização aponta que é necessário avaliar o impacto de um poluente na saúde e o gerenciamento de riscos que muitas vezes se concentra (direta ou indiretamente) na redução da exposição das pessoas nos ambientes internos.

É possível realizar uma distinção entre os tipos de poluentes que podem afetar a saúde do ser humano, caracterizando-os como biológicos ou químicos. Pela respiração há a emissão de efluentes biológicos humanos (bioefluentes), também resultados da atividade metabólica das pessoas, logo, quanto maior número de pessoas ou tempo de permanência o ambiente tende a ficar mais suscetível à propagação de bactérias, protozoários, fungos e vírus (ABNT, 2008).

A figura 2 demonstra o fluxo de exposição, desde a fonte até o ser humano. Um aspecto importante ao avaliar a qualidade do ar é compreender que existem grupos de maior suscetibilidade para adquirir doenças ou efeitos mais graves em função da poluição do ar, e isso pode se dar do contexto vivido ou do aspecto individual (WHO, 2005).

Figura 2 - Fluxo de exposição (“*environmental pathway*”)



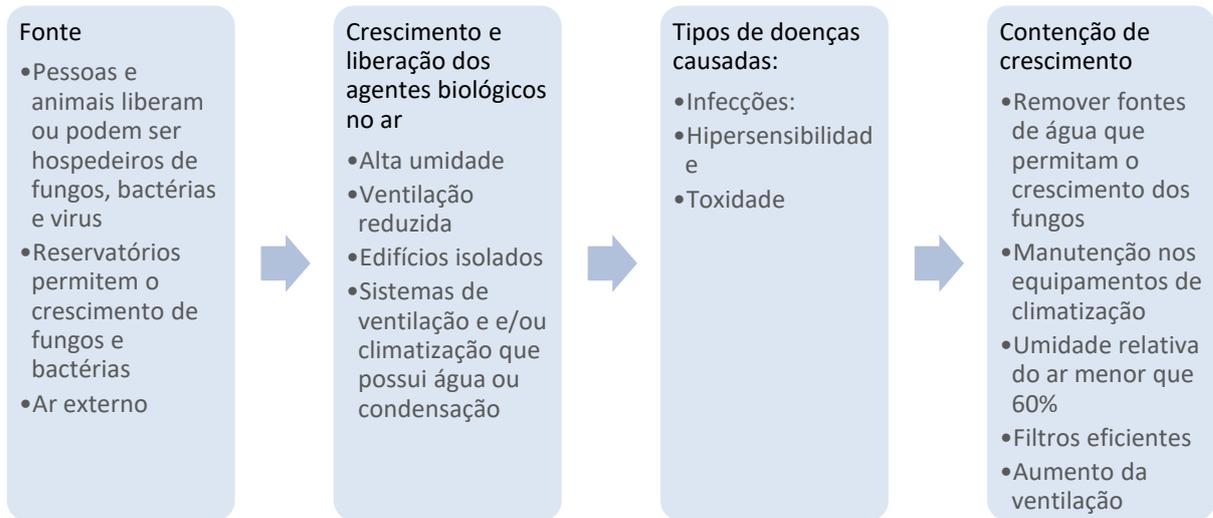
Fonte: Adaptada pelo autor 2021 (WHO, 2005).

A idade é um fator que pode sugerir maior vulnerabilidade, no qual as crianças têm sistemas imunológicos imaturos e as consequências observadas da exposição no início da vida a níveis adversos de poluentes atmosféricos incluem a diminuição da função pulmonar e o aumento da suscetibilidade a doenças respiratórias agudas e asma (BATESON; SCHWARTZ, 2008). Pessoas de baixa renda são mais suscetíveis a desenvolver doenças relacionadas a poluentes do ar por possuir um estado nutricional inadequado, acesso limitado a cuidados de saúde e exposições mais elevadas (WHO, 2002).

2.1.1.1 Poluentes biológicos (Contaminantes) – COVID

Os poluentes/contaminantes biológicos podem ser bactérias, fungos, protozoários, vírus, algas, pólen, artrópodes e animais (ANVISA, 2003a). A figura 3 ainda conclui com métodos para evitar o crescimento de agentes patogênicos ou reduzir a sua concentração.

Figura 3 - Ciclo da infecção.



Fonte: Elaborada pelo autor 2022 (ANVISA, 2003b; CARMO; PRADO, 1999; IRVINE, C et al., 1994; US EPA, 1991).

Em 2020, a WHO caracterizou o COVID-19 (coronavírus), vírus ligado à mesma família de vírus da Síndrome Respiratória Aguda Grave ou *Severe Acute Respiratory Syndrome* (SARS), como uma pandemia, afetando diversos países. Os sintomas são semelhantes a uma gripe comum ou a Influenza, podendo desenvolver febre, tosse, perda do paladar e olfato, dificuldade respiratória, e em casos mais severos, pode desenvolver a pneumonia ou levar à morte (BENDER, 2020).

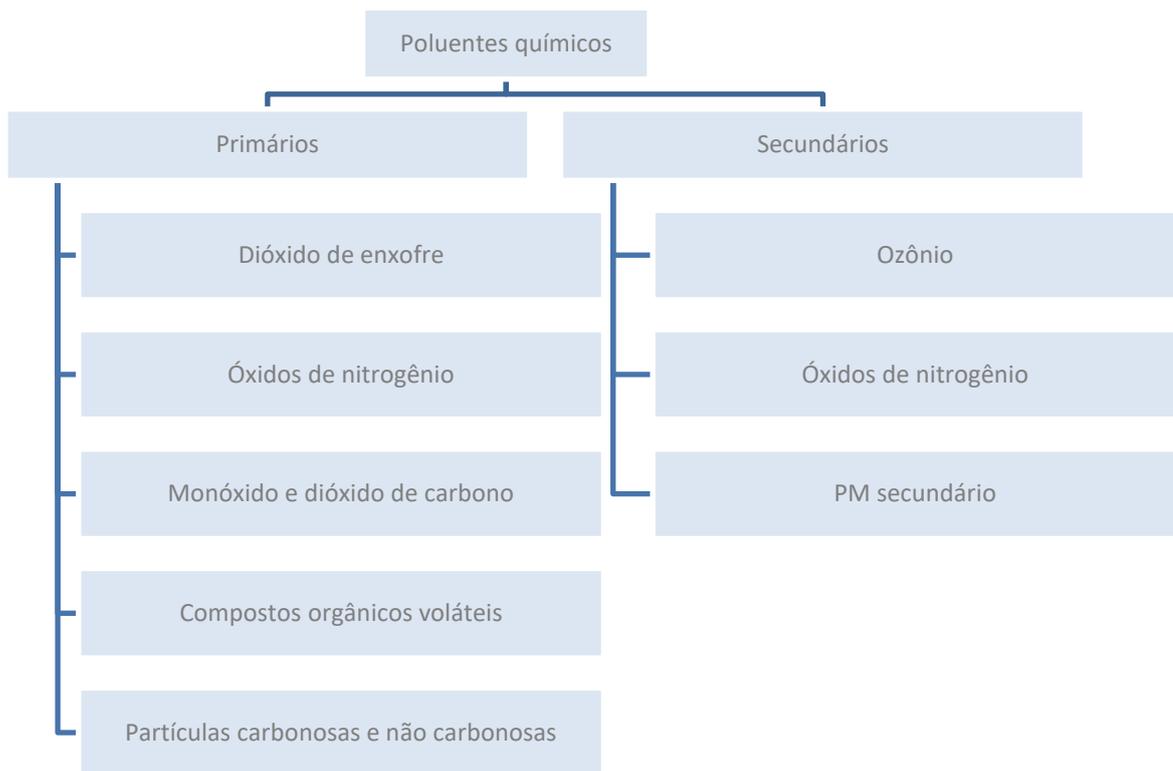
REHVA (2021) explica que as vias de transmissão podem ser por gotículas ao falar, espirrar ou tossir que permanecem pouco tempo no ar; micro gotículas que permanecem no ar por horas e podem ser transportadas; pelo toque em superfícies contaminadas ao entrar em contato com a boca, olhos e nariz; e a via fecal-oral. É possível entender que ambientes internos se tornaram os locais de maior probabilidade de contaminação, devido à renovação do ar ser mais limitada que em ambientes externos e que o edifício pode oferecer maior ou menor risco variando a sua tipologia, taxa ocupacional, as suas aberturas, entre outros fatores.

As indicações para ambientes fechados tendem a um equilíbrio entre o aumento de renovações e ao mesmo tempo verificar as taxas de velocidade do ar e de ventilação cruzada para que estes fatores não auxiliem na dissipação dos contaminantes (REHVA, 2021). Assim como o vírus da COVID-19, a renovação de ar no ambiente interno pode impactar na melhoria dos níveis de IAQ e assim reduzir a possibilidade de contaminação por outras doenças transmitidas pelo ar.

2.1.1.2 Poluentes químicos – Dióxido de carbono

Poluentes atmosféricos primários são aqueles emitidos para a atmosfera a partir de uma fonte como uma chaminé de uma fábrica ou tubo de escape (em sua maioria por combustão) ou através da suspensão de poeiras contaminadas pelo vento. Poluentes atmosféricos secundários são aqueles formados na própria atmosfera, advindos de reações químicas de poluentes primários, possivelmente envolvendo os componentes naturais da atmosfera. Os poluentes primários e secundários (Figura 4) podem causar problemas respiratórios e dependendo dos níveis inalados, podem desencadear doenças graves e em alguns casos podem ser fatais (ALBERTS, 1994; ANVISA, 2003a; WHO, 2005).

Figura 4 - Poluentes químicos



Fonte: Adaptada pelo autor (2022) (WHO, 2005)

Carmo e Prado (1999) consideram o dióxido de carbono um gás como relativamente não tóxico, apesar de controlar as taxas de respiração em uma pessoa e, conforme seu nível de concentração aumenta, a pessoa sente como se não houvesse ar suficiente no ambiente. A taxa respiratória aumenta no sentido de compensar essa falta de ar.

O aumento da vedação entre o ambiente interno e externo, pode ocasionar um aumento nas concentrações de CO₂ nos ambientes internos gerando um decaimento da qualidade interna do ar, pelo aumento das partes por milhão (PPM) e por estar associado à liberação de agentes biológicos na expiração (ABNT, 2008; PENG; DENG; TENORIO, 2017). Segundo Ferreira e Cardoso (2014), os níveis elevados de CO₂ foram relacionados a sintomas e patologias respiratórios, prevalecendo nas crianças crises de espirros, rinite alérgica, estertores/sibilos e asma. A proporção em Partes Por Milhão (ppm) para as concentrações de CO₂ podem afetar o ser humano de forma escalonar, como pode ser visto no quadro 2.

Quadro 2- Efeitos das concentrações de CO₂ na saúde do ser humano

Concentração de CO ₂		Efeito
%	ppm	
3	30.000	Respiração profunda forte
4	40.000	Dores de cabeça, pulso, tontura, emoções psíquicas
5	50.000	Depois de 30 minutos a 1 hora pode levar a óbito
8-10	80.000-100.000	Morte súbita

Fonte: (SARBU; SEBARCHIEVICI, 2013).

As concentrações mais altas de dióxido de carbono tendem a ser encontradas nas áreas dos ambientes onde os usuários despendem maior parte do tempo e está vinculada ao número de usuários, sendo diretamente relacionada com o número de ocupantes. A ventilação insuficiente desencadeia um aumento potencial no ppm o que pode exceder os parâmetros mínimos de ppm somente pelo metabolismo humano (CARMO; PRADO, 1999).

A liberação de CO₂ está associada a bioefluentes, tornando-o um indicador viável para avaliação de poluentes no ambiente e um indicador para verificação e adequação das taxas de ventilação. Porém, ele não é considerado um substituto viável para avaliar a concentração de poluentes químicos gerados internamente ou externamente como aqueles relacionados ao tráfego (ABNT, 2008; CHATZIDIAKOU; MUMOVIC; SUMMERFIELD, 2015; MENTESE; TASDIBI, 2017).

Além desses efeitos mais nocivos do dióxido de carbono à saúde, ele prejudica processos cognitivos que impactam no desenvolvimento de atividades como será visto no capítulo 2.3.2.

2.1.2 Efeito da qualidade do ambiente interno na cognição

Segundo Sternberg (2008), o processo cognitivo é compreendido como a capacidade de pensamento do ser humano que está diretamente associada ao cumprimento de uma atividade. O autor define que a cognição se dá a partir de funções como a atenção, a consciência, a percepção, a memória, a solução de problemas, a criatividade, a tomada de decisões e o raciocínio, o que por sua vez, podem ser ferramentas para auxiliar na avaliação da qualidade dos espaços.

As funções cognitivas podem ser afetadas significativamente pela IEQ, que engloba a IAQ, temperatura, som, iluminação e efeitos não visuais da luz. Estes fatores, por afetarem a cognição, podem desencadear uma resposta mais ou menos eficaz dos usuários (WANG et al., 2021).

É possível citar como exemplo a capacidade de adaptação corporal (homeotermia) ao espaço que está inserido, tanto para o calor quanto para o frio, busca um estado de equilíbrio com o meio através dos mecanismos termorreguladores, no qual o esforço necessário para adaptar-se às condições de temperatura podem gerar uma queda na produtividade do indivíduo (FROTA; SCHIFFER, 2001).

Dessa maneira, é possível associar as funções cognitivas aos fatores de IEQ para avaliação e compreensão da qualidade do espaço interno, bem como a performance na conclusão de tarefas, a partir de diferentes abordagens, adotando fatores específicos e seus impactos diretos em funções distintas (WANG et al., 2021). Cria-se um elo conectando características estruturais para avaliação do espaço interno com características humanas que podem ser afetadas, e assim um método de análise objetivando uma arquitetura adaptada, mais eficiente e que pode oferecer um ambiente de melhor qualidade ao seu usuário.

Segundo Pungercar et al. (2021), quando se analisa o IEQ a partir da temperatura, umidade relativa e a concentração de carbono, independente das melhorias no envelope da edificação, esta depende do sistema de ventilação e da ocupação, compreendida como o comportamento e densidade de ocupação.

Como visto no capítulo 2.1.1, as crianças são particularmente vulneráveis aos efeitos da poluição do ar na saúde e, como passam uma grande parte do tempo na escola, este é um ambiente de importante exposição das crianças à poluição do ar (BENNETT et al., 2019).

Em se tratando de IAQ e métodos de avaliação dos espaços, é comum encontrar estudos adotando o Dióxido de Carbono como poluente de avaliação, como foi citado no

capítulo 2.1.1.2. Ao tratar de ambientes educacionais, o IAQ afeta a atenção dos alunos em seu desempenho escolar. Testes padronizados administrados a alunos expostos a baixos níveis de IAQ sistematicamente resultam em piores resultados em comparação com alunos que permanecem em ambientes saudáveis de sala de aula (FERREIRA; CARDOSO, 2014; PULIMENO et al., 2020; TWARDELLA et al., 2012).

Nessa lógica, um estudo desenvolvido na Inglaterra avaliou a capacidade de assimilação dos estudantes a partir da exposição destes a diferentes níveis de CO₂, foram escolhidos como mecanismos de avaliação do processo cognitivo a capacidade de reação (*Choice Reaction*), atenção com as palavras coloridas (*Colour Word Vigilance*), memória visual (*Picture Memory*) e reconhecimento de palavras (*Word Recognition*) (BAKÓ-BIRÓ et al., 2007, 2008, 2012). Os autores concluem que o aumento das taxas elevadas de ventilação demonstraram uma condição de maior capacidade de aprendizado do que a condição de baixa taxa de ventilação, e essas taxas variaram do estudo de 2007 de 0.3-0.5 para 13-16 L/s por pessoa (BAKÓ-BIRÓ et al., 2007) e 1 l/s por pessoa para 8 l/s por pessoa no estudo de 2012 (BAKÓ-BIRÓ et al., 2012).

Twardella et al. (2012) apontam que há indícios de que o aumento dos níveis de CO₂ pode afetar negativamente a precisão do processamento, aumentando assim, os níveis de erro. A *American Society Of Heating Refrigerating And Air Conditioning Engineers -ASHRAE* (2019) estabelece níveis de concentração ideais para um sistema DCV, o padrão corresponde a 600 e 1000 ppm quando medido ao nível do mar a 25 ° C.

Em contraste a esse estudo, Satish et al. (2012) verificaram em seu estudo que esse “limite” de 1000 ppm já não representa um valor ideal, ao considerar que essa taxa de concentração de CO₂ pode prejudicar significativamente o desenvolvimento de atividades internas. O estudo avaliou nove métricas de desempenho na tomada de decisão e ao comparar a concentração de 600 ppm para 1.000 ppm de CO₂, a performance foi significativamente diminuída em seis métricas e ao comparar com 2.500 ppm de CO₂ a performance foi reduzida em sete métricas de desempenho. Neste último caso algumas métricas apresentaram níveis com performance marginal ou disfuncional. REHVA (2021) apontam que no período pandêmico é aconselhável reduzir ainda mais esse *setpoint* máximo para 550ppm.

2.2 IAQ E CONFORTO TÉRMICO – SISTEMAS HVAC

Segundo WHO (2005), ao tratar de poluição do ar são estabelecidas duas estratégias principais, sendo a primeira reduzir a fonte de poluição, logo, em uma escala maior, com maior impacto e maior custo econômico. A segunda estratégia seria em uma perspectiva mais reduzida, na qual é possível minimizar a exposição ao informar/educar as populações suscetíveis. Destaca-se na segunda estratégia, a melhoria da ventilação em microambientes.

Segundo Carmo e Prado (1999), na perspectiva do ambiente interno, a maneira mais efetiva de manter o IAQ é através do controle de poluentes, porém controlar todas as fontes ou mitigar suas emissões pode não ser possível ou praticável, como quando os próprios usuários são a fonte através de bioefluentes. Os autores definem que a ventilação pode ser compreendida como o movimento do ar dentro do edifício, a introdução de ar externo para dentro do ambiente, a retirada do ar viciado de dentro de um edifício, condicionamento e mistura do ar por todas as partes do edifício. A ventilação natural ou mecânica, torna-se o segundo meio mais efetivo para se alcançar o IAQ.

De acordo com a Agência Nacional De Vigilância Sanitária (2013), a ventilação fornece ar limpo e isso provoca a movimentação e renovação adequada do ar e, assim, provoca uma diluição e/ou remoção dos contaminantes gerados no interior de salas e participa da criação e manutenção de diferenciais de pressão entre áreas. A ventilação adequada nos ambientes internos representa um fator determinante para garantir uma boa qualidade do ar e prevenir a disseminação de doenças transmitidas pelo ar (MENTEŞE et al., 2009; OLIVEIRA; RUPP; GHISI, 2021).

O estudo de Peng, Deng e Tenorio (2017) avalia a qualidade do ar externo em relação ao IAQ, demonstrando que a poluição interfere significativamente na forma como os projetistas e engenheiros irão pensar no sistema HVAC para os ambientes internos. Os autores afirmam que para grandes centros urbanizados, com taxas de poluição atmosférica elevadas, como na cidade de Tai'na, na China, indica-se o uso de sistemas que isolem melhor o edifício, ao adotar ventilação mecânica associada a filtros para tratamento do ar internamente. Em contraste a essa estratégia, estudos apontam na direção oposta quando a poluição do ar atmosférico não apresenta uma ameaça à saúde na região, ao adotar um aumento da permeabilidade entre o ar interno e externo para melhoria do IAQ (AVIV et al., 2021; BAKÓ-BIRÓ et al., 2007; OLIVEIRA; RUPP; GHISI, 2021).

A ANVISA (2013) define os sistemas HVAC como uma tecnologia destinada a proporcionar conforto e também qualidade do ar interior aceitáveis em ambientes fechados. O contexto climático é essencial para compreender as dinâmicas que serão exigidas para que esse sistema HVAC atenda às demandas internas de temperatura (RACKES; MELO; LAMBERTS, 2016). Omrani et al. (2021) descrevem que o corpo humano está em constante troca de calor com seu meio ambiente por meio da evaporação, radiação, condução e convecção, logo o sistema HVAC desempenhará um papel decisivo nos usuários do espaço interno.

Chatzidiakou, Mumovic e Summerfield (2015) entendem que a qualidade interior do ar é definida somente por uma associação de fatores como uma seleção correta de materiais de construção e dos materiais internos e eliminação de fontes internas de poluentes podem melhorar o IAQ das salas de aula (através dos sistemas HVAC). O IAQ ao se relacionar ao conforto térmico há o estabelecimento de uma relação de interdependência, na qual, fatores de geometria (tamanho, orientação, parede externa) ou ocupação (comportamento e densidade) irão influenciar significativamente aos aspectos relacionados a conforto e saúde, caracterizando uma avaliação que pode ser compreendida como IEQ, por considerar a qualidade do ambiente interno (MUJAN et al., 2019; PUNGERCAR et al., 2021).

Melikov e Kaczmarczyk (2012) apontam os efeitos do aumento do movimento do ar nos ambientes como a diminuição do impacto negativo do aumento da temperatura do ar, da umidade relativa, da poluição na aceitabilidade do ar, na percepção do frescor do ar. Omrani et al. (2021) dialogam com esse pensamento ao descrever que o aumento da velocidade do vento tem impacto não somente na qualidade do ar, mas também influencia na taxa de transferência de calor por convecção e acelera a evaporação do suor, resultando em uma sensação térmica mais fria, melhorando a satisfação do ocupante com a percepção da temperatura do ambiente ao seu redor (conforto térmico).

Porém, o aumento da velocidade de forma exponencial não é uma solução ideal, a ASHRAE (2017) estabelece a faixa limite de 0,8 m/s quando o ocupante não controla a ventilação local. Entende-se que além deste valor, há a geração de desconforto. De Vecchi (2011), buscando uma adaptabilidade ao clima de Florianópolis, demonstra em seu estudo que há uma aceitabilidade para valores acima desse padrão, destacando que o valor limite seria 0,90 m/s.

2.2.1 Ventilação natural e mecânica

Em um estudo realizado no México, país de clima quente, o uso da ventilação natural representou uma estratégia que pode impactar por sua capacidade de alcançar níveis de temperatura que proporcionem conforto térmico e ao mesmo tempo prospecta uma redução da carga térmica para refrigeração e assim o consumo energético (OROPEZA-PEREZ; OSTERGAARD, 2014).

Segundo Yu, He e Feng (2015), apesar de representar uma estratégia importante para o decaimento dos níveis de CO₂, a ventilação natural não representa, isoladamente, uma estratégia ótima para eliminar a poluição do ar interno ao considerar que o fluxo pode ser interrompido, ocasionando um decaimento dos níveis de IAQ. Ao concluir isso, os autores indicam a introdução da ventilação mecânica como garantia efetiva do IAQ, definida por Sekhar et al. (2020) como o fornecimento de taxa de ventilação em termos de abastecimento da ventilação, avaliando a quantidade de fluxo de ar (L/s.m², L/s.pessoa) ou as taxas de troca de ar por hora (*Air Change Per Hour - ACH*) (h⁻¹); ou ventilação de exaustão avaliando a quantidade de fluxo de ar (L / s) ou o ACH (h⁻¹).

Hyun, Park e Augenbroe (2008) desenvolveram um estudo a partir de simulação computacional validando que a ventilação natural não pode ser concebida como único meio possível para se alcançar IAQ, visto que a ventilação possui natureza estocástica e quando há resultados de simulações considerando-a como meio para se alcançar determinados critérios, deve-se levar em consideração a incerteza, logo, avaliá-la como probabilística e não determinística. Os autores afirmam que a ventilação natural é influenciada por diversos fatores: a natureza estocástica do vento, comportamento do ocupante, componentes do edifício e incerteza nos parâmetros de simulação. Ben-David e Waring (2016), ao discutirem uma abordagem sobre prevalência da ventilação natural em relação à mecânica, sugerem que o uso da ventilação natural necessita de uma avaliação entre uma estrutura monetária e de saúde como uma compensação entre a economia de energia e a piora do IAQ para determinar a adequação e aderência em relação à ventilação mecânica.

Li et al. (2021) realizaram uma análise experimental e numérica para avaliar as características de transmissão de aerossol em estado estacionário em uma sala de tamanho real usando um sistema de ar externo dedicado acoplado a ventiladores de teto, logo uma estratégia de ventilação mecânica. Ao considerar que a transmissão aérea interna depende muito da distribuição e ventilação do ar, os ventiladores de teto geraram movimento de ar local e ar

misturado dentro do espaço, e uma maior velocidade de operação contribuiu para uma distribuição de concentração mais uniforme. Com melhor dispersão dos aerossóis, a operação do ventilador de teto reduziu as concentrações na zona de respiração da pessoa exposta em mais de 20%. Os autores apontam que os ventiladores de teto mostram o potencial de reduzir o risco de infecção cruzada em um espaço com ar-condicionado com um aumento da troca de ar por hora de 4,5 para 5,6 e 7,5 reduziu as concentrações médias nos pontos de amostragem em 18% e 38%, respectivamente.

Duarte, Gomes e Rodrigues (2017) desenvolveram um estudo em Lisboa, Portugal, para avaliar salas de aula e verificar essa correlação entre temperaturas internas e a possibilidade de abertura das janelas. Eles apontam que o uso da ventilação mecânica se torna necessário, pela ventilação natural possuir natureza estocástica e em determinados períodos, sua ausência pode indicar concentrações elevadas de poluentes internos, bem como prejudicar o conforto térmico. Nesse último aspecto, quando as temperaturas são muito baixas, a ventilação natural como meio de melhoria do IAQ, pode prejudicar os níveis de conforto térmico (DUARTE; GOMES; RODRIGUES, 2017; PENG; DENG; TENORIO, 2017).

A ventilação natural é analisada também em climas quentes e secos e é possível citar como exemplo um estudo em salas de aula no Kuwait, para verificação do impacto da ventilação natural nos níveis de CO₂ quando comparados a esses ambientes climatizados artificialmente (AL-RASHIDI; LOVEDAY; AL-MUTAWA, 2012). Eles discutem que o modelo split instalado no estudo de caso não consegue alcançar um limiar de IAQ estipulado, indicando que a ventilação natural teve uma resposta mais efetiva para a redução do dióxido de carbono. Porém, os autores demonstram preocupação com o clima muito rigoroso e, assim, na tomada de decisão, evidenciando a necessidade do ar-condicionado para conforto térmico dos usuários e apontaram que os climatizadores testados não introduzem diretamente ar fresco no espaço, portanto, alguma forma de ventilação adicional apropriada é sugerida.

Os autores elencam estratégias possíveis, mas enfatizam que estas precisam ser melhor avaliadas: Aumento do número de intervalos curtos durante as aulas, para reduzir as concentrações de CO₂ nas salas; Uso da ventilação híbrida, alternando ventilação natural e ventilação mecânica com ar condicionado; e a troca de modelos dos sistemas de condicionamento de ar testados.

Oliveira, Rupp e Ghisi (2021) corroborando com os autores supracitados, em seu estudo realizado em Florianópolis, apontaram que pessoas que trabalham em edifícios, nesse clima, com o uso misto de condicionamento com a ventilação natural, tendem a aceitar mais a

temperatura do ambiente de acordo com a teoria do conforto adaptativo. Além disso, a estratégia de ventilação híbrida proporciona melhorias no IAQ e é recomendada para economia de energia, pois há diminuição do uso de ar-condicionado.

Krawczyk et al. (2016) desenvolveram uma pesquisa medindo os níveis de CO₂ e elaborou um modelo para simular e estimar a concentração de CO₂ ao longo do tempo. Esse tipo de estratégia corrobora com a construção de mecanismos de prospecção e análise do espaço.

Rodrigues (2013) desenvolveu uma pesquisa correlata ao avaliar as concentrações de CO₂ como mecanismo de avaliação do IAQ em salas de aula em Portugal. Foram condicionados os níveis de CO₂ de acordo com a abertura das janelas e assim os efeitos da ventilação e temperatura do ambiente. O autor desenvolveu uma ferramenta com interface para avaliação de CO₂ e dessa maneira, conseguiu verificar a influência de diversas variáveis em uma perspectiva de gestão preventiva da qualidade do ar desses espaços.

O estudo conduzido por Jeffe (2015) analisa a ventilação natural e mecânica e seus efeitos na correlação entre conforto térmico e qualidade do ar em ambientes hospitalares. É um estudo importante por elaborar uma estratégia de correlação em referências brasileiras, em um clima quente e úmido de São Paulo. O estudo conta com uma avaliação de conforto adaptativo da ANSI/ASHRAE *Standard 55* (ASHRAE, 2013) atrelado a taxas de ventilação mínimas estabelecidas pelo documento *Natural Ventilation for Infection Control in Health-care Settings* (WHO, 2009) e a ANSI/ASHRAE *Standard 62.1* (ASHRAE, 2007).

A pesquisa de Jeffe (2015) representa uma avaliação através de simulação computacional, um método de prever taxas de renovações para testagem para conforto e qualidade do ar, delineando um passo importante para avaliação e previsão dos espaços com foco em módulos híbridos de ventilação.

O uso da ventilação híbrida se destaca como uma alternativa eficaz e é abordada em diversos estudos que visam estabelecer alternativas econômicas para uma melhoria da qualidade do ambiente interno pelo conforto ambiental e pelo IAQ (AL-RASHIDI; LOVEDAY; AL-MUTAWA, 2012; DUARTE; GOMES; RODRIGUES, 2017). Adicionalmente mecanismos de simulação, prospecção e análise do espaço são ferramentas viáveis e metodologicamente testadas para prever e avaliar o espaço, tanto em aspectos de conforto térmico, quanto de IAQ (JEFFE, 2015; KRAWCZYK et al., 2016; REHVA, 2022; RODRIGUES, 2013).

2.2.2 Impacto do Covid nos sistemas HVAC

Ao tratar dos impactos da COVID na sociedade atual, é importante delinear a preocupação com os ambientes fechados, visto que estes possuem dinâmicas e atividades metabólicas internas que influenciam nas taxas de emissão Quanta¹ e assim, impactam diretamente nos sistemas HVAC (BUONANNO; MORAWSKA; STABILE, 2020). Elsaid e Ahmed (2021) afirmam em seu artigo de revisão, ao abordar o contexto pandêmico do ano de 2021, que deve ser evitado o uso de ventiladores em ambientes públicos sem a inserção de ar limpo no ambiente, o que dialoga com a lógica de evitar o uso de recirculação de ar. O autor faz referência em muitos momentos sobre a contribuição do aumento da velocidade do ar como estratégia positiva para a disseminação do vírus. Os estudos ainda indicam o uso da ventilação híbrida, ao permitir uma maior entrada de ventilação natural, mantendo o fluxo de ar fornecido pela ventilação mecânica.

Ao buscar formas de avaliar a qualidade do ar interno, com foco no COVID, foi possível encontrar dois documentos: Roteiro para melhorar e garantir uma boa ventilação interna no contexto do COVID-19 (WHO, 2021) e o Documento orientativo REHVA COVID-19 (REHVA, 2021). Esses documentos fornecem informações para a redução da concentração de contaminantes no ar, e assim reduzir a probabilidade de contaminação. O roteiro e o documento orientativo estabelecem como parâmetros mínimos para melhoria da qualidade do ar uma taxa de renovação mínima de 8-10 L/s para cada pessoa em ambientes de salas de aula.

Além desses dois documentos há um documento da *REHVA COVID-19 Ventilation Calculator documentation (version 2.0, August 1, 2021)*(REHVA, 2022) que propõe uma forma de avaliar a concentração do vírus SARS-CoV-2 através de uma calculadora para a avaliar a probabilidade de infecção do vírus.

Segundo REHVA (2022), há muitas considerações possíveis sobre como o nível de probabilidade aceitável de infecção alvo pode ser selecionado. Segundo Morawska et al., (2021) e Shen et al. (2020), o nível de probabilidade aceitável para uma sala específica pode ser definido com base no número de reprodução do evento R e este é definido como o número de novos casos de doença dividido pelo número de infectantes. REHVA (2022) adotam para a calculadora o $R = 0,5$ e a probabilidade individual máxima aceitável pode ser limitada a 0,1.

¹ O risco de infecção calculado usando um modelo padrão Wells-Riley de transmissão de doenças transmitidas pelo ar, calibrado para COVID-19 (REHVA, 2022)

Segundo Buonanno, Morawska e Stabile (2020), a emissão de quanta de uma pessoa infecciosa tem uma distribuição de probabilidade de acordo com a atividade específica e devem ser usados para calcular o efeito resultante para cenários de exposição com ventilação e ocupação constantes. No quadro 3 são apresentadas as taxas quanta em relação a diferentes atividades. Em salas de aula é considerado 10% dos alunos falando e 90% em repouso e com respiração oral, indicando 1.6 quanta/h (REHVA, 2022). Desde o início da pandemia, o vírus sofreu mutações e é possível citar duas de maior destaque a Alpha, a Delta e a Ômicron. A variante Ômicron do SARS-CoV-2 é estimada para ser 2.5 vezes mais infecciosa e ao tratar desse cenário o valor altera para 4.0 quanta/h (REHVA, 2022).

Quadro 3- Taxas de Quanta emitidos para diferentes atividades.

Atividade	Taxa de Quanta emitidos - quanta/(h pers)
Em repouso, respiração oral	0.72
Atividade leve, falando	9.7
Atividade leve, falando alto ou cantando	62
Atividade pesada, respiração oral	4.9

Fonte: (REHVA, 2022).

O estudo de Mokhtari e Jahangir (2020) busca essa correlação entre o sistema HVAC e a contaminação pela COVID-19. O estudo conclui o quanto estratégias para minimizar a contaminação do vírus (Taxa de troca de ar do prédio, duração das aulas e horário de funcionamento da universidade) podem reduzir o consumo energético total de ambientes escolares.

Para concluir o capítulo é importante ressaltar que a escolha da ventilação natural, mecânica e híbrida, deve ser pensada de forma global, desde aspectos que influenciem na qualidade do ar até a sensação de conforto.

2.2.3 Ventilação controlada por demanda

Ao tratar dos sistemas HVAC é necessário pautar o consumo energético associado, por representar parcela significativa no consumo energético total dos edifícios. Nessa lógica, quando faz-se necessário avaliar o custo benefício de sistemas HVAC, é possível encontrar na

literatura o conceito da ventilação controlada por demanda que pode ser realizado de duas maneiras: através da taxa de ocupação e através dos níveis de CO₂ (BELMONTE; BARBOSA; ALMEIDA, 2019; CHENARI et al., 2017). A ASHRAE (2019) define o sistema DCV como: qualquer meio pelo qual o fluxo de ar externo da zona de respiração pode ser variado para o espaço ocupado com base no número real ou estimado de ocupantes, requisitos de ventilação da zona ocupada ou ambos. Yang et al. (2016) indicam que a variabilidade da ocupação diária é um fator chave que influencia no consumo energético ao tratar de edifícios institucionais

O estudo de Chenari et al. (2017) tem essa estratégia metodologicamente testada pelo programa *EnergyPlus*. Nele foram realizados quatro cenários teste (Figura 5): A inserção de ar necessário considerando a ocupação máxima, sempre que os horários de ocupação estavam ativos; uma taxa de inserção de ar balizada pelo número de ocupantes (DCV); uma taxa de inserção de ar quando se alcança o limiar máximo de 1000 ppm de concentração de CO₂; e por fim, uma taxa de inserção de ar quando se tem um *setpoint* entre 500 e 1000 ppm de concentração de CO₂, sendo ativado quando ultrapassa 1000ppm e desativado somente quando fica abaixo de 500ppm. Foi possível alcançar um valor de redução de 22% no consumo energético ao adotar o controle de ventilação pela demanda de ocupação (Cenário 02 quando comparado ao cenário 01). O controle pelo sensor de CO₂ no limite máximo de 1000 ppm (Cenário 03) se destacou como melhor redução de consumo. Porém os autores apontam que o melhor desempenho quando se trata de IAQ e consumo energético é a ventilação controlada pela demanda de ocupantes (Cenário 02) e quando há o *setpoint* mínimo e máximo de CO₂ (Cenário 04).

Figura 5 - Simulação de CO₂ por concentração.

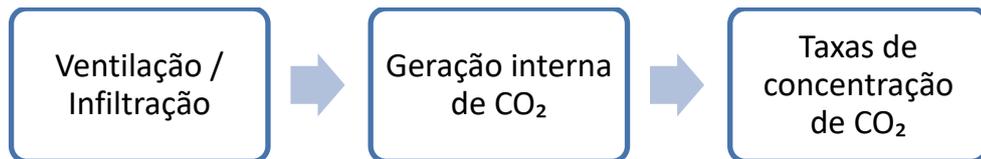
Cenário 01	Cenário 02	Cenário 03	Cenário 04
<ul style="list-style-type: none"> • Ocupação total 	<ul style="list-style-type: none"> • Nível de ocupação 	<ul style="list-style-type: none"> • Concentração de CO₂ máxima de 1000 ppm 	<ul style="list-style-type: none"> • Setpoint de concentração de CO₂ de 500 a 1000 ppm

Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

Belmonte, Barbosa e Almeida (2019) desenvolvem em seu estudo duas formas de avaliação com o Dióxido de Carbono, uma para avaliação dos níveis de concentração através de medição e a segunda para avaliar e controlar a demanda de ventilação (*demand controlled*

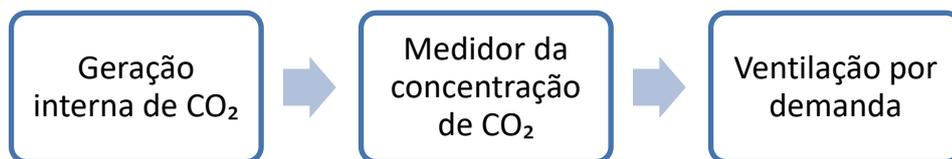
ventilation – DCV) através de simulação. No primeiro caso (Figura 6), avalia-se a concentração de CO₂ no espaço a partir das taxas de infiltração e ventilação que irão diminuir as taxas de geradas internamente pelos ocupantes. No segundo caso (Figura 7), mede-se a concentração de CO₂ no ambiente e o software permitirá maior ou menor taxa de entrada de ar limpo.

Figura 6- Simulação de CO₂ por concentração.



Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

Figura 7 - Simulação de CO₂ por DCV.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

O estudo conduzido por Belmonte, Barbosa e Almeida (2019) utilizou o método e inseriu uma rede de ventilação natural e os valores de infiltração para analisar a concentração dos níveis de CO₂. Os autores ainda afirmam que o *EnergyPlus* faz uma suposição implícita ao realizar os balanços de massa e energia, no qual o ar contido dentro das zonas é modelado como um volume bem misturado, calculando a média CO₂ concentrações, uma abordagem que difere de uma abordagem de dinâmica de fluídos computacional (CFD) onde diferentes concentrações de CO₂ podem estar presentes dentro do volume da zona como resultado dos campos térmicos e de velocidade dados no volume analisado.

As duas estratégias apresentam aspectos positivos no campo do IAQ, e há uma tendência nas pesquisas para o DCV por esta estratégia poder favorecer na redução do consumo energético, permitindo somente a entrada de ar necessária e por cumprir as necessidades de IAQ (BELMONTE; BARBOSA; ALMEIDA, 2019; CHENARI et al., 2017; O'NEILL et al., 2020).

2.3 PESQUISAS SOBRE IAQ DESENVOLVIDAS NO BRASIL

Como visto em capítulos anteriores, a ventilação é um fator determinante para o condicionamento térmico e melhoria do IAQ do ambiente, mas é necessário compreender essa correlação com os climas percebidos em território brasileiro. Ao buscar referências nacionais sobre a correlação foi possível encontrar diversos estudos conduzidos objetivando uma maior compreensão dos espaços educacionais em relação à ventilação e às temperaturas operativas internas sem, no entanto, tratar do IAQ (BUONOCORE, 2018; DE VECCHI, 2011; MAYA, 2014). As pesquisas citam a contribuição da ventilação para o IAQ na sua revisão, porém o assunto não é utilizado como métrica de avaliação do espaço, a ventilação é mais pautada na sua contribuição para o conforto térmico.

A partir de uma revisão de literatura realizada em toda a América Latina, publicada em janeiro de 2020, é possível perceber um arcabouço de pesquisas relacionadas ao conforto térmico em ambientes educacionais brasileiros, o que implica positivamente no desenvolvimento de pesquisas relacionadas ao tema (VALDERRAMA-ULLOA et al., 2020). Entretanto, a pesquisa aponta também que essa não é uma realidade para o IAQ, apesar de ser um dos países da América Latina com mais publicações na área, é possível perceber uma lacuna de estudos ao relacionar o conforto térmico e IAQ e simulações computacionais no Brasil.

Buscou-se realizar uma nova revisão, objetivando ampliar a visão sobre o tema e procurar novas publicações nesse período de 2020 a 2021, dado o contexto pandêmico e a necessidade de melhoria no IAQ. Foi aplicada uma metodologia no intuito de mapear a produção científica dos últimos 5 anos envolvendo o Brasil, como será visto no item a seguir.

A pesquisa foi desenvolvida visando responder as principais perguntas relacionadas ao tópico no cenário brasileiro:

- Há pesquisas vinculando IAQ e Conforto térmico?
- O IAQ está sendo adotado como método de avaliação?
- Há estudos focados em simulação de IAQ?

A pesquisa foi feita no dia 05 de novembro de 2021 na base de dados Scopus, na Biblioteca Digital Brasileira de Teses e Dissertações (BDTD), *Scielo* e *Google acadêmico*. A *string* e operadores booleanos em inglês foram utilizados para as bases *Scopus*, *Scielo* e *Google acadêmico*: "*comfort*" AND ("*indoor air quality*" OR "*iaq*") AND ("*classrooms*" OR "*school*" OR "*University building*") AND "*Brazil*").

A *string* e operadores booleanos em português foi utilizada para a BDTD e também para o *Google* acadêmico: "conforto" AND "qualidade do ar interior" OR "qualidade interna do ar" AND "escolas" OR "salas de aula" OR "universidades" AND "Brasil" AND "simulação". Ainda, foi utilizada uma *string* em espanhol para o *Google* acadêmico: "confort" AND ("calidad del aire interior" OR "iaq") AND ("salón de clases" OR "escuela" OR "Edificio universitario") AND "Brazil".

O objetivo foi encontrar estudos envolvendo a correlação entre a qualidade interna do ar e o conforto térmico, apresentados no quadro 4. Foram analisadas as primeiras 10 páginas do *Google* acadêmico.

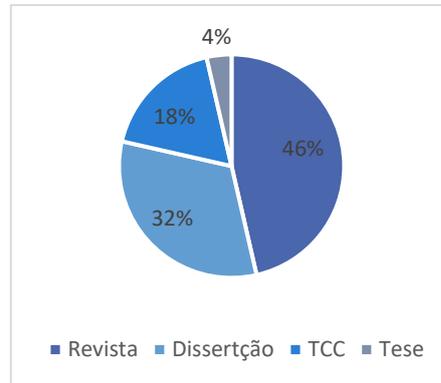
Quadro 4 - Artigos selecionados na revisão de literatura.

	<i>Scopus</i>	BDTD	<i>Scielo</i>	<i>Google</i> acadêmico		
	Inglês	Português	Inglês/ Português	Inglês	Português	Espanhol
Total de artigos	2	24	0	1600	198	40
Artigos analisados	2	24	0	100	100	40
Artigos selecionados	2	1	0	11	15	3

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Para os critérios de seleção foram analisados os trabalhos que abordassem a inserção do Brasil em pesquisas que envolvessem IAQ, vinculados ou não a outros fatores de IEQ. O filtro foi iniciado pela leitura do título e palavras-chave, seguindo pelo resumo e metodologia. No total, foram selecionados 32 artigos, entre artigos de revista, trabalhos de conclusão de curso e especializações, dissertações acadêmicas e profissionais e teses, como pode ser visualizado no quadro 4. Do total de artigos selecionados foram retirados 4 estudos que se repetiam entre as bases de dados, totalizando 28 (Gráfico 1).

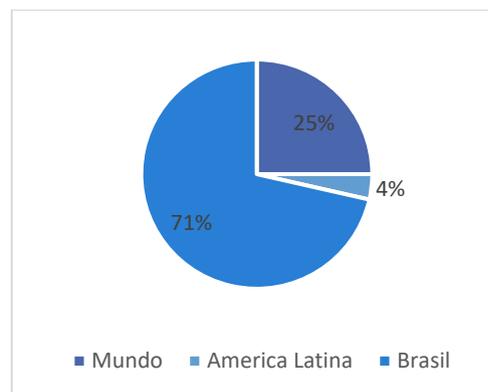
Gráfico 1 - Tipo de publicação em números percentuais



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Apesar do foco da pesquisa ser o cenário do IAQ no Brasil, foi possível encontrar, através das bases de dados, resultados de revisões sistemáticas do mundo todo, que inseriam pesquisas brasileiras no seu escopo (Gráfico 2). Os trabalhos não são o foco da revisão, mas eles contribuem para a compreensão do Brasil no contexto mundial frente à qualidade interna do ar e representaram 25% de todos os resultados. Foi possível encontrar um estudo que tratava somente de pesquisas sobre o IAQ na América Latina. Os outros trabalhos estavam mais próximos do objetivo principal, no contexto brasileiro, representando 71%.

Gráfico 2 - Percentual de artigos encontrados e o direcionamento geográfico no globo.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Dentre as pesquisas com enfoque nacional, elaborou-se a figura 8 apontando o seu foco de estudo nos estados brasileiros. Este é um dado interessante por demonstrar que a maioria das pesquisas está concentrada no sudeste e sul, enquanto regiões norte e nordeste possuem um estudo e a região Centro-Oeste não possui nenhum estudo sobre IAQ dentro do recorte na revisão realizada.

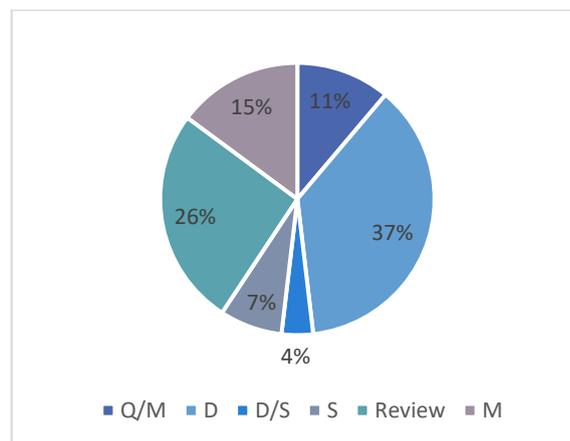
Figura 8 - Estudos encontrados por estado.



Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

Outro dado importante, relaciona-se com o tipo de pesquisa realizada (Gráfico 3), 26% são Revisões Sistemáticas de Literatura (RSL), 37% destas abordam o assunto, por vezes de maneira superficial ou no contexto do IEQ ao analisar certificações como o LEED ou AQUA. Dessa forma, menos da metade das produções encontradas realmente trazem o IAQ no método, destacando as medições e simulações realizadas.

Gráfico 3 - Tipo de pesquisa realizada.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Tornou-se necessária essa revisão das publicações recentes sobre o tema, devido à carência de pesquisas na área, entretanto é possível comprovar com esse recorte de realizado a lacuna de conhecimento sobre o IAQ em ambientes educacionais no Brasil e ainda é possível

salientar que grande parte dos estudos realizados, mencionam de forma superficial ou embutida entre outros fatores do IEQ. Os trabalhos que envolvem o IAQ como processo intrínseco, apresentando medições ou mesmo simulações (avaliando o número de renovações) totalizam 29%, sendo 8 no total nesse recorte de tempo e *string* de pesquisa.

2.3.1 Escolas Padrão do FNDE

Com o objetivo de avaliar espaços educacionais, as escolas Padrão do FNDE aparecem constantemente em pesquisas relacionadas ao tema, ao considerar sua relevância por prestar assistência financeira ao Distrito Federal e aos municípios (ARAÚJO, 2019; LOPES, 2020). E assim, é possível deduzir o impacto econômico e no número de pessoas afetadas por essas construções.

O Programa Nacional de Reestruturação e Aquisição de Equipamentos para a Rede Escolar Pública de Educação Infantil (Proinfância), foi instituído como uma das ações do Plano de Desenvolvimento da Educação (PDE) do Ministério da Educação visando garantir o acesso de crianças a creches e escolas, bem como à melhoria da infraestrutura física da rede de Educação Infantil (FNDE, 2017a, 2017b).

Trata-se de uma política pública voltada para o fornecimento de espaços para o desenvolvimento de atividades educacionais, apresentadas em projetos Padrão, que se diferem somente pelo número de estudantes e faixa etária. Os estudos sobre o padrão de escolas no FNDE buscam melhor adaptação aos locais de implantação, indicando que a padronização de projetos necessita de uma melhor adaptação do espaço para que possa favorecer o desempenho dos alunos e criar uma sensação de conforto adequada (ARAÚJO, 2019; GONZALES et al., 2021; LOPES, 2020).

Lopes (2020) defende a compreensão da caracterização climática, para assim, desenvolver estratégias que melhorem o desempenho e sensação de conforto dessas escolas ao se aproximar da lógica bioclimática, representando uma quebra de paradigma à padronização. O que é coerente em países como o Brasil, que possuem temperaturas elevadas em grande parte de suas zonas, necessitando de um equilíbrio entre ventilação natural e mecânica como alternativa eficaz para o IAQ e o conforto térmico.

Araújo (2019) e Lopes (2020) descrevem em seu trabalho a importância de se pensar na adaptabilidade espacial dos edifícios educacionais, destacando o impacto positivo que isso trará para os estudantes. Os autores assemelham-se ao elaborar diretrizes para as 8 zonas

climáticas brasileiras, evidenciando o potencial que mudanças construtivas ou estratégias podem impactar em salas de aula.

Os trabalhos supracitados explicitam a necessidade de adaptação do espaço construído destinado à educação e utilizam a ventilação natural como input, entretanto, o aspecto de qualidade do ar não é abordado como métrica ou parte da avaliação. É importante ressaltar nesse contexto que, como foi visto no capítulo 2.1.1, crianças são apontadas como mais vulneráveis a um baixo IAQ e ao considerar que as escolas públicas atendem crianças de baixa renda, outro fator de maior suscetibilidade, e assim, as escolas de Padrão do FNDE possuem no seu escopo de ocupantes, indivíduos duplamente mais suscetíveis ao desenvolvimento de doenças caso os níveis de IAQ sejam inadequados (PERERA, 2018; WHO, 2005).

Considerar a manutenção de uma boa IAQ é uma estratégia para proteção da saúde pública, pois ela impacta diretamente na saúde humana ao reduzir a perda de trabalho por doenças ou despesas com tratamentos médicos, o que pode gerar um impacto econômico significativo (MENTESE et al., 2020). Compreender a necessidade da renovação do ar interno permeia não somente melhoria do conforto térmico, conforme Frota e Schiffer (2001), ou redução do consumo energético, de acordo com Passarelli (2009), mas também a qualidade de vida e prevenção de doenças a curto e longo prazo conforme citado pela Organização Mundial de Saúde (WHO, 2005).

Pensar e traçar uma estratégia de melhoria na qualidade do ambiente interno são mecanismos para se criar um espaço mais saudável e produtivo, ao reduzir o número de faltas dos ocupantes, despesas com tratamento médico e fatores associados à indisposição pela insalubridade ambiental (FROTA; SCHIFFER, 2001; MENTESE et al., 2020; PASSARELLI, 2009).

Estudos brasileiros demonstram a importância da simulação computacional para a construção de modelos e análise prévia de edifícios, aos quais é possível prever a influência da localização, geometria, operação do edifício e as propriedades dos materiais (ARAÚJO, 2019; LOPES, 2020; RACKES; MELO; LAMBERTS, 2016).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentados os procedimentos necessários para o desenvolvimento da pesquisa. Propõe-se um método experimental, semelhante àqueles adotados nas pesquisas de Araújo (2019), Lopes (2020) e para ambientes escolares, onde são testados cenários e são avaliados os impactos no objeto de estudo. Neste trabalho é preservada a análise de conforto térmico, porém é acrescentada a análise de IAQ (Quadro 5) e esta se destaca como o objetivo principal, semelhante ao demonstrado na pesquisa de Chenari et al. (2017).

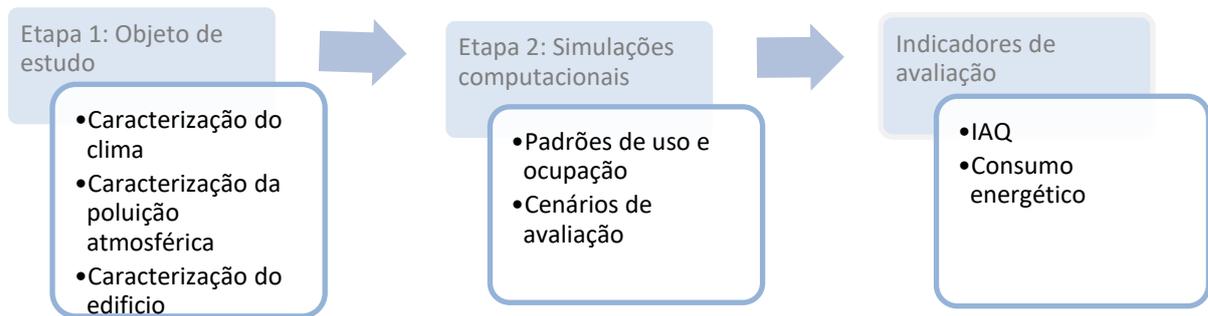
Quadro 5 - Objetivos específicos e procedimentos metodológicos

Objetivos específicos	Procedimentos metodológicos
Avaliar as estratégias mecânicas e híbridas	<ul style="list-style-type: none"> ○ Simulação computacional com programas e/ou calculadoras para avaliar a concentração dióxido de carbono e contaminantes associado ao condicionamento térmico ○ Inserção de ventilação mínima para redução dos níveis de CO₂ e da probabilidade de infecção por contaminantes
Verificar o impacto de sistemas híbridos	<ul style="list-style-type: none"> ○ Avaliação da variação do consumo para atendimento dos níveis aceitáveis de IAQ e condicionamento térmico
Avaliar estratégia de eficiência energética	<ul style="list-style-type: none"> ○ Uso da demanda de ventilação controlada (DCV)

Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

O método (Figura 9) divide-se em três etapas principais: a caracterização dos instrumentos que definem a avaliação, metodologia adotada para as simulações computacionais e indicadores. Na primeira etapa é realizada a caracterização do contexto climático, poluição atmosférica das cidades avaliadas e da edificação de referência. Na etapa de simulações computacionais são descritos os cenários testados no edifício e os padrões de uso e ocupação. Por fim, são apresentados os indicadores, sendo: os procedimentos de análises de qualidade interna do ar e o impacto no consumo energético.

Figura 9 - Método



Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

3.1 DEFINIÇÕES DO CONTORNO

O Brasil possui grande variação no clima devido a sua extensão e, assim, diferentes exposições em relação ao sol, regime de ventos e outras variáveis macroclimáticas e microclimáticas (ROMERO, 2001). Atualmente o Brasil apresenta 8 zonas bioclimáticas NBR 15.220 (ABNT, 2005). As classificações variam em climas tropicais e temperados, úmidos e secos, variações de altitude entre outras características que podem gerar diferentes escalas de desconforto a partir da exposição do indivíduo ao clima.

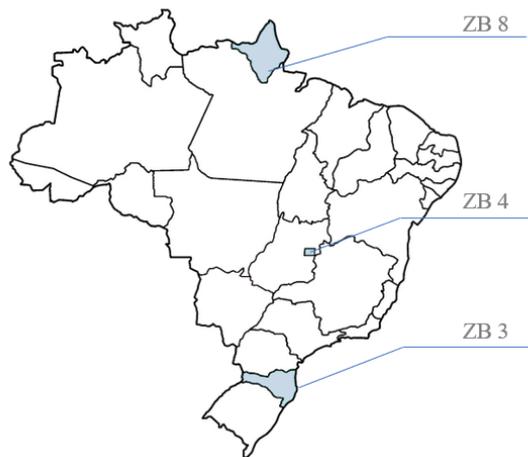
Por outro ponto de vista, a poluição atmosférica é um fator delineador na composição de estratégias para melhoria do IAQ, como mencionado no capítulo 2.1.1. A poluição atmosférica de um grande centro urbano, como São Paulo, não pode se comparar a uma cidade de pequeno porte, como uma cidade satélite em Brasília, bem como as soluções para o IAQ não serão semelhantes.

O clima e a poluição atmosférica são eixos delimitadores neste trabalho, necessários para elencar estratégias para escolas no contexto brasileiro. É um desafio elaborar métricas e diretrizes para o Brasil diante de sua complexa variedade de condicionantes climáticas. Entretanto, faz-se necessário efetuar um recorte de acordo com as zonas bioclimáticas disponíveis e o tempo de execução desta pesquisa de mestrado.

Nesse sentido, foi estabelecido um recorte geográfico em três cidades com diferentes climas e em diferentes zonas climáticas (Figura 10): Florianópolis-SC (ZB 3), Brasília-DF (ZB 4) e Macapá-AP (ZB 8), correspondentes às regiões Sul, Centro-Oeste e Norte, respectivamente. Como elementos para a escolha da amostra, foram consideradas a maior

variação possível de latitudes, visto sua influência no ganho de radiação solar, e a disponibilidade de arquivos climáticos para as simulações, impactando assim, diretamente o conforto térmico. Ao possuir diferenças climáticas há uma diferença no padrão de abertura das janelas, isto devido a necessidade de fechamento quando as temperaturas são muito elevadas ou muito baixas. Com uma variação na operação das aberturas, há uma diferença no número de renovações para cada cidade, devido à vazão que ocorre quando as janelas estão fechadas e abertas, logo, há uma diferença no IAQ. A caracterização climática foi realizada através do *Climate Consultant 6.0* e no *Lady Bug tools*.

Figura 10 - Estados analisados e suas respectivas Zonas bioclimáticas.



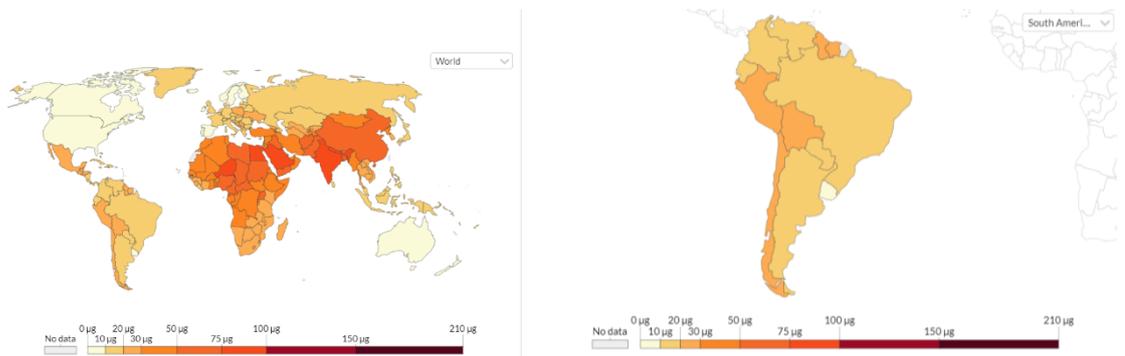
Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

3.1.1 Fatores externos e direcionamento para as simulações

Neste item serão apresentadas as cidades que foram escolhidas para o escopo de análise, destacando sua localização, classificação segundo a NBR 15.220 (ABNT, 2005), Köppen-Geiger e horas em conforto de acordo com a ASHRAE (2017) considerando limites de aceitabilidade de 80%. Serão apresentadas como as variáveis climáticas as temperaturas médias encontradas nas cidades, a radiação global, direção e velocidade dos ventos.

Como visto nos capítulos anteriores, a possibilidade de utilizar a ventilação natural para a qualidade do ar depende da poluição do ar externo no local de implantação do edifício. Na figura 11 nota-se que as concentrações de PM 2,5 são baixas no Brasil, não ultrapassando 20 μg o que é considerada como um Índice de qualidade do ar (*Air Quality Index – AQI*) moderado (Quadro 6).

Figura 11 - Poluição do ar atmosférico no mundo e no Brasil em 2017



Fonte: (“*Combating An Invisible Killer: New WHO Air Pollution Guidelines Recommend Sharply Lower Limits*”, 2021)

Quadro 6 - Escala de poluição do ar atmosférico – WHO

Baixa poluição 0-20	O ar é límpido e os níveis de poluição estão abaixo dos limites de exposição para um ano de exposição à poluição.
Poluição moderada 21-50	A qualidade do ar é considerada aceitável, embora acima do limite recomendado por um ano. Indica que somente terá efeitos adversos à saúde se essa condição se manter durante um ano inteiro.
Alta poluição 51-100	O ar está altamente poluído, acima das recomendações de exposição de 24 horas. Todos podem começar a sentir efeitos adversos à saúde, e aqueles com sensibilidade devem ter cuidado ao realizar atividades ao ar livre.
Poluição muito elevada >100	Todos podem começar a sentir efeitos mais graves para a saúde nesses níveis, e a exposição a longo prazo constitui um risco real para a saúde. Os níveis excederam o limite de exposição recomendado por uma hora. Em níveis mais altos de poluição acima de 200 ou até 300, os avisos constituem condições de emergência. Pode haver impactos prejudiciais para o público em geral, mesmo no caso de exposição de curta duração. Todos os indivíduos devem evitar atividades físicas até que a poluição diminua, independentemente das sensibilidades.

Fonte: *Plume Labs* (2021) com base nas recomendações da WHO

Levantou-se dados da poluição atmosférica nas cidades analisadas com o objetivo de ter um parâmetro dos níveis de qualidade do ar atmosférico. Entretanto somente na cidade de Macapá-AP foi possível encontrar um sensor físico (CONTRIBUIDORES DO OPENSTREETMAP, 2021) com medições de PM 2,5. Dada esta limitação, para Brasília,

Florianópolis e também Macapá, adotou-se os dados monitorados pelo *Copernicus Atmosphere Monitoring Service* (CAMS) por satélite e modificado pela página na *web Plume Labs* (2021). Desta forma é possível realizar uma avaliação com mais poluentes: PM_{2.5}, PM₁₀, NO₂ e O₃.

A classificação das cidades foi feita com base no site *Plume Labs* (2021), de acordo com as recomendações da WHO (Quadro 6). Para a cidade de Macapá foi realizada uma classificação de acordo com a taxa de poluição de acordo com PM_{2.5}, na qual o índice utilizado para calcular a qualidade do ar foi da *United States Environmental Protection Agency* - US EPA PM_{2.5} AQI, descrito pelo quadro 7. Foi adotada esta classificação pois a plataforma *Purple air* (2021) apresenta esta métrica para avaliação. Além disso, a agência americana especifica quando a qualidade do ar atmosférico está favorável à atividade física externa em escolas. Nesta pesquisa, esse indicador foi considerado como favorável ao uso da ventilação natural dentro das salas de aula.

Quadro 7- Escala de poluição do ar atmosférico – US EPA (continua)

	PM _{2.5} [24-hour] µg/m ³	Influência nos seres humanos	Atividades escolares ao ar livre
Bom 0-50	0 – 12.0	A qualidade do ar é satisfatória e a poluição do ar apresenta pouco ou nenhum risco com 24 horas de exposição.	Favorável à atividade física externa
Moderado 51-100	12.1 – 35.4	A qualidade do ar é aceitável. No entanto, pode haver um risco para algumas pessoas com 24 horas de exposição, especialmente aquelas que são excepcionalmente sensíveis à poluição do ar.	Estudantes que são excepcionalmente sensíveis à poluição podem desenvolver sintomas
Insalubre para grupos sensíveis 101-150	35.5 – 55.4	Membros de grupos sensíveis podem experimentar efeitos na saúde com 24 horas de exposição. O público em geral tem menos probabilidade de ser afetado.	É possível realizar atividades ao ar livre curtas. Evitando atividades mais longas, como a prática de esportes, faça mais pausas e atividades menos intensas.
Insalubre 151-200	55.5 – 150.4	Alguns membros do público em geral podem experimentar efeitos na saúde com 24 horas de exposição; membros de	Para todas as atividades ao ar livre, faça mais pausas e

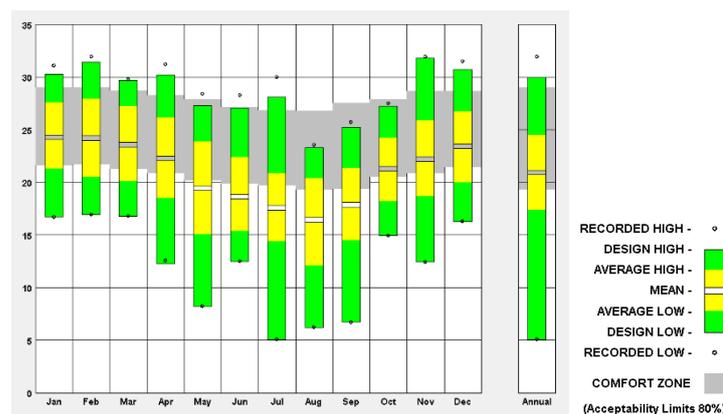
		grupos sensíveis podem experimentar efeitos mais graves para a saúde.	atividades menos intensas, com curto prazo de duração
Muito prejudicial à saúde 201-300	150.5 – 250.4	Alerta de saúde: O risco de efeitos para a saúde aumenta para todos com 24 horas de exposição.	Não é aconselhado atividades ao ar livre
Perigoso >301	250.5 – 500.4	Alerta de saúde para condições de emergência: todos têm maior probabilidade de serem afetados com 24 horas de exposição.	

Fonte: (US EPA, 2014, 2015, 2018)

Florianópolis – SC

Capital de Santa Catarina, Florianópolis está localizada na região Sul do Brasil, com latitude -27,60 e longitude -48,55, com altitude de aproximadamente 2,00m. De acordo com a NBR 15.220 (ABNT, 2005), Florianópolis está inserida na ZB3. Segundo a classificação de Köppen-Geiger, Florianópolis se classifica como subtropical úmido (C) clima oceânico, sem estação seca (f) com verão temperado (b)– Cfb (ALVARES et al., 2013). De acordo com a ASHRAE (2017) considerando os limites de aceitabilidade de 80%, 51% das horas do ano em na capital os moradores estão em situação de desconforto, em sua maioria por frio (Figura 12).

Figura 12 - Temperaturas médias e faixa de conforto pelo modelo adaptativo com 80% de aceitabilidade ao fundo do gráfico na cidade de Florianópolis-SC

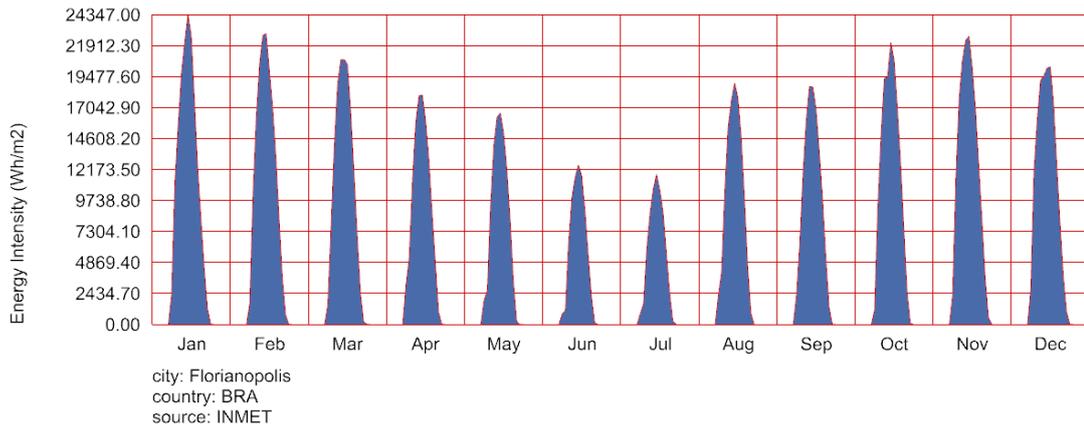


Fonte: Elaborada no *software Climate Consultant 6* (LIGGETT; MILNE, 2020) e por meio do arquivo climático EPW de Florianópolis do INMET (2010).

A temperatura média anual na cidade é 20,91°C, enquanto a umidade relativa média anual é de 74,75%. Em relação à radiação global as maiores taxas são observadas entre os meses

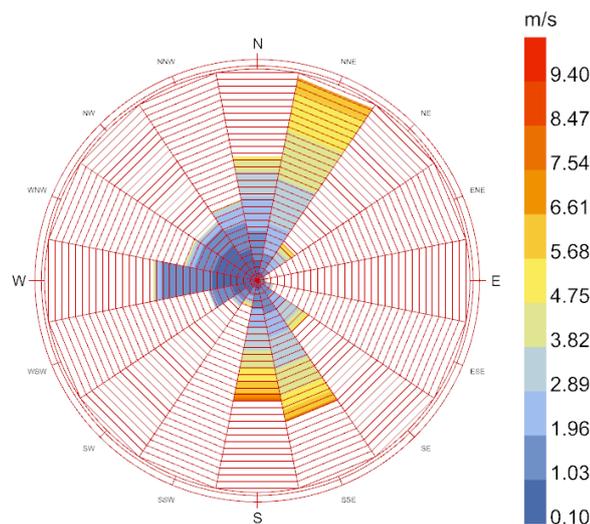
de janeiro, fevereiro e novembro, ultrapassando 21912 Wh/m² (Figura 13). A cidade apresenta predominância de incidências de ventilação nas direções Nordeste e Sudeste, com velocidades entre 0 e 6,27 m/s, com média anual de 2,43 m/s (Figura 14).

Figura 13 - Radiação Global Horizontal ao longo do ano em Florianópolis-SC



Fonte: Elaborada no *software Rhino* com os *plugins Grasshopper e Ladybug* e por meio do arquivo climático EPW de Florianópolis do INMET (2010).

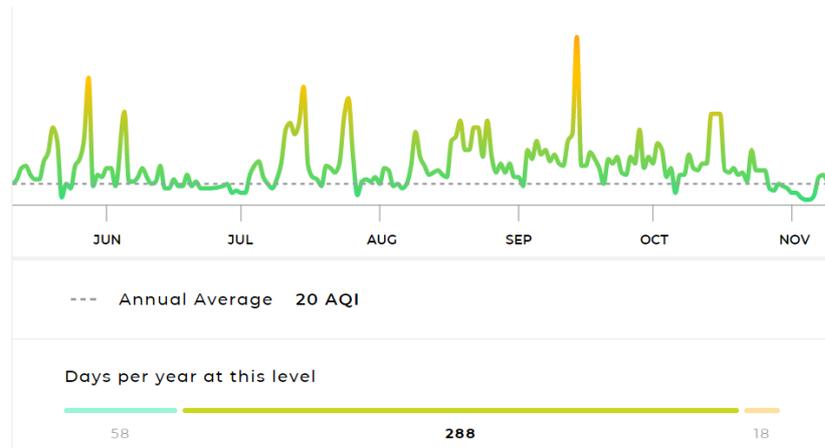
Figura 14 - Predominância da direção e velocidade dos ventos em Florianópolis-SC



Fonte: Elaborada no *software Rhino* com os *plugins Grasshopper e Ladybug* e por meio do arquivo climático EPW de Florianópolis do INMET (2010).

Para Florianópolis, analisando o período de um ano, a média de AQI é 20, como mostra a figura 15, indicando uma boa qualidade do ar. Em 346 dias do ano se mantém níveis bons de AQI e assim um potencial para ventilação natural para os ambientes internos como visto no quadro 6. Em 18 dias do ano é possível encontrar altas concentrações de poluentes.

Figura 15 - AQI da cidade de Florianópolis

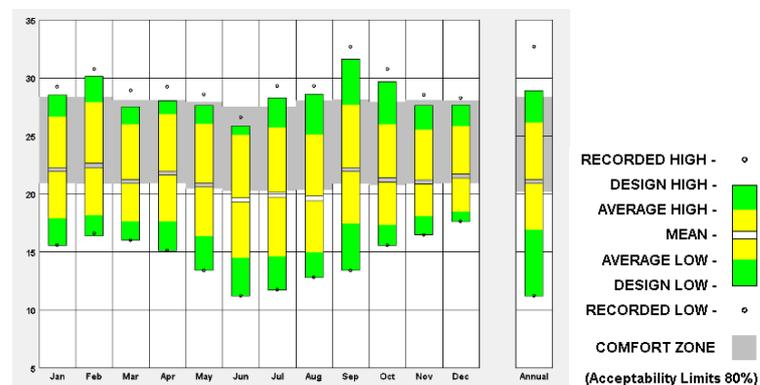


Fonte: (<https://air.plumelabs.com/air-quality-in-florianópolis-ewwf, 2021>)

Brasília – DF

Capital do Distrito Federal, Brasília está localizada na região Centro-Oeste do Brasil, com latitude $-15,77$ e longitude $-47,92$, com altitude de aproximadamente $1.160,00\text{m}$. Está inserida na ZB4, para a qual a NBR 15.220 (ABNT, 2005). Segundo a classificação de Köppen-Geiger, Brasília se classifica como tropical (A) de savana (w) – Aw. Brasília é considerada pela classificação como tropical com inverno seco (ALVARES et al., 2013). De acordo com a ASHRAE (2017) considerando os limites de aceitabilidade de 80%, Brasília apresenta 59% das horas do ano em situação de desconforto, em sua maioria por frio (Figura 16).

Figura 16 - Temperaturas médias e faixa de conforto pelo modelo adaptativo com 80% de aceitabilidade ao fundo do gráfico na cidade de Brasília-DF

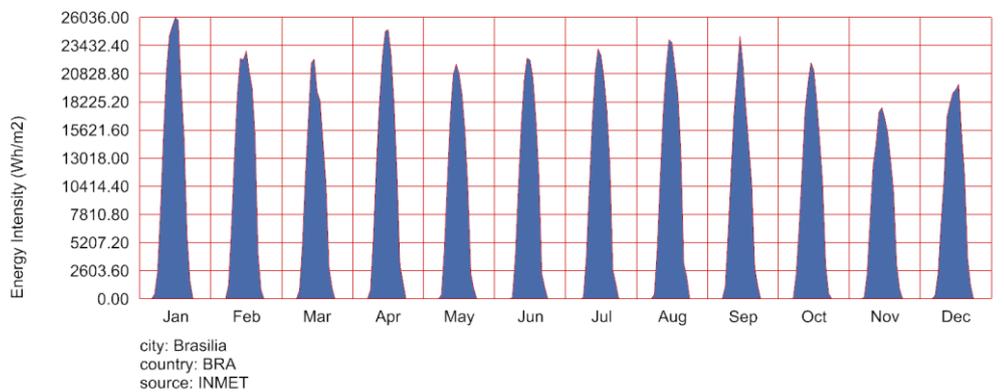


Fonte: Elaborada no software *Climate Consultant 6* (LIGGETT; MILNE, 2020) e por meio do arquivo climático EPW de Brasília do INMET (2010).

Em relação à temperatura média anual na cidade é de 21,08°C, enquanto a umidade relativa anual de 66,24%. Segundo Romero (2001), Brasília se caracterizaria pelo clima tropical de altitude por sua localização e assim ele possui elevada amplitude diária, o que provoca temperaturas elevadas durante o dia enquanto durante a madrugada ocorre o oposto.

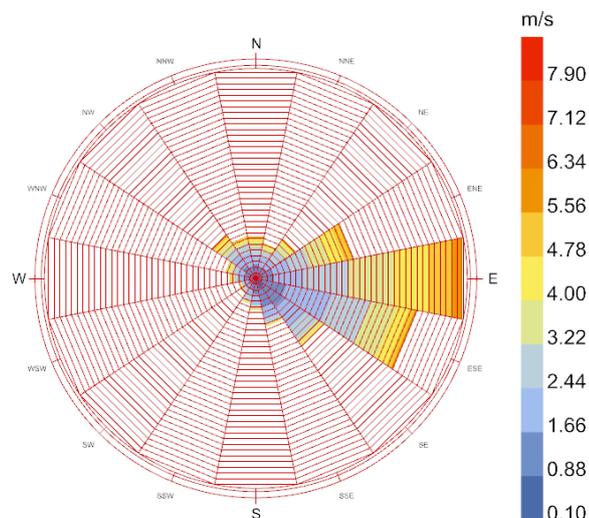
Em relação à radiação global as maiores taxas são observadas entre os meses de janeiro, fevereiro e novembro, ultrapassando 23432 Wh/m² (Figura 17). Em relação aos ventos, Brasília apresenta predominância de incidências das direções Leste e Sudeste, com velocidades variando aproximadamente entre 0 e 5,90m/s, com média anual de 2,46 m/s (Figura 18).

Figura 17 - Radiação Global Horizontal ao longo do ano em Brasília-DF



Fonte: Elaborado no *software Rhino* com os *plugins Grasshopper* e *Ladybug* e por meio do arquivo climático EPW de Florianópolis do INMET (2010).

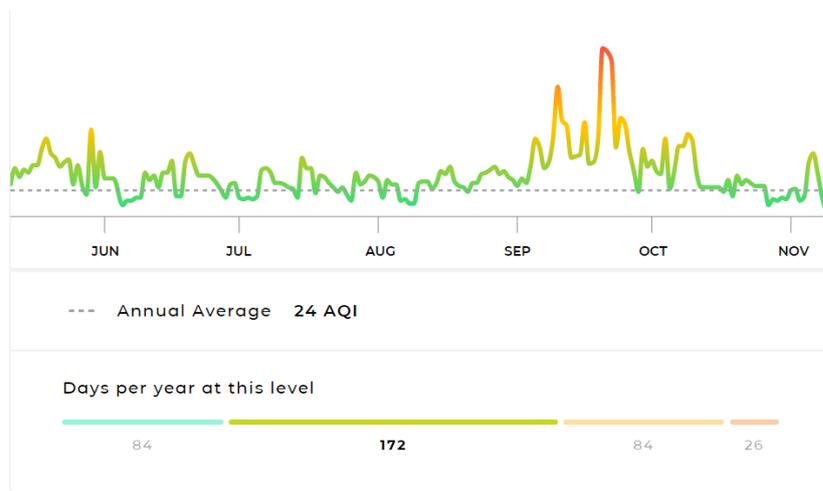
Figura 18 - Predominância da direção e velocidade dos ventos em Brasília



Fonte: Elaborado no *software Rhino* com os *plugins Grasshopper* e *Ladybug* e por meio do arquivo climático EPW de Brasília do INMET (2010).

Analisando o período de um ano em Brasília, a média de AQI é de 24 como mostra a figura 19, indicando uma qualidade do ar média moderada, de acordo com o quadro 6, representado por 172 dias do ano no total. Essa condição só irá influenciar negativamente se ela se manter durante todo o ano, o que não ocorre. Em 84 dias do ano a qualidade do ar atmosférico é considerada boa e assim, é possível somar um total de 256 dias com um potencial para ventilação natural para os ambientes internos como visto no quadro 6. Em 84 dias é possível indicar valores de alta poluição, e 26 dias de poluição muito elevada, nesses casos, é necessária uma avaliação para suspensão das aulas nesses dias específicos ou alguma medida para amenizar a entrada de ar externo poluído.

Figura 19 - AQI da cidade de Brasília

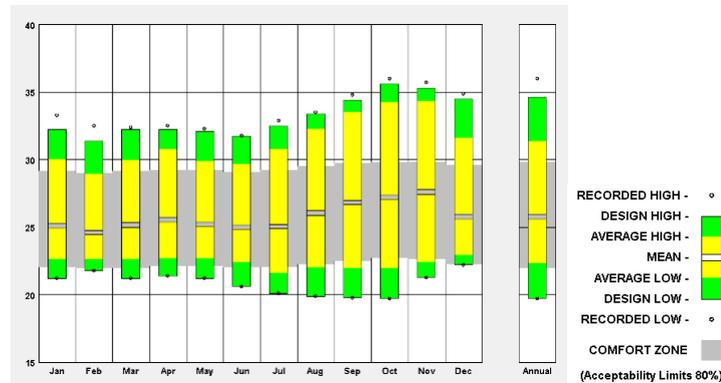


Fonte: (<https://air.plumelabs.com/air-quality-in-brasilia-eysy>, 2021)

Macapá – AP

Capital do estado do Amapá, localiza-se na região Norte do Brasil, com latitude e Longitude – 51,07 e altitude 15,00m. De acordo com a NBR 15.220 (ABNT, 2005), está inserida na ZB 8. Segundo a classificação de Köppen-Geiger, Macapá se classifica como tropical (A) de monção (m) – Am (ALVARES et al., 2013). A cidade apresenta 29% de desconforto ao longo do ano, em sua maioria por calor, considerando o modelo adaptativo para 80% de aceitabilidade (Figura 20).

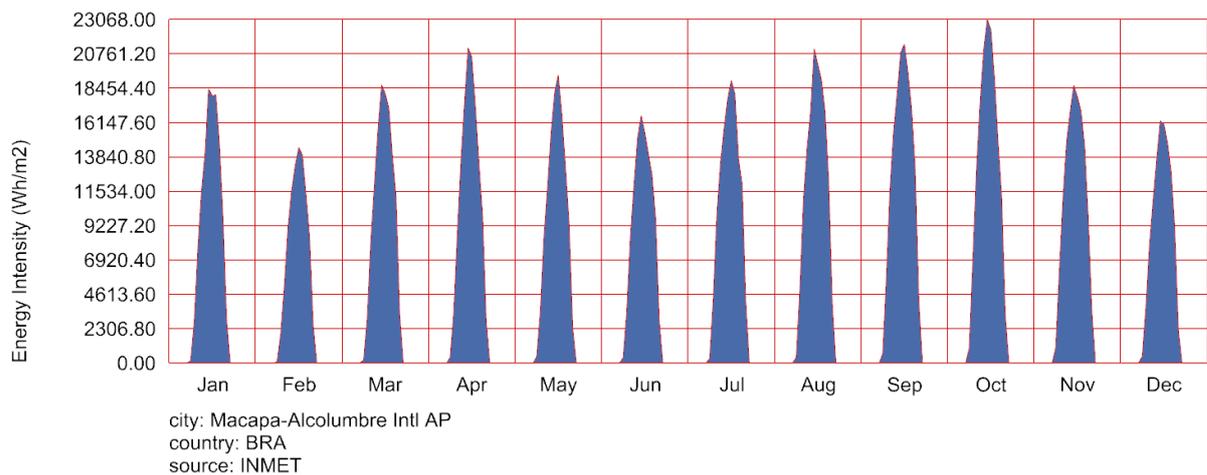
Figura 20 - Temperaturas médias e faixa de conforto pelo modelo adaptativo com 80% de aceitabilidade ao fundo do gráfico na cidade de Macapá-AP



Fonte: Elaborada no *software Climate Consultant 6* (LIGGETT; MILNE, 2020) e por meio do arquivo climático EPW de Macapá do INMET (2010).

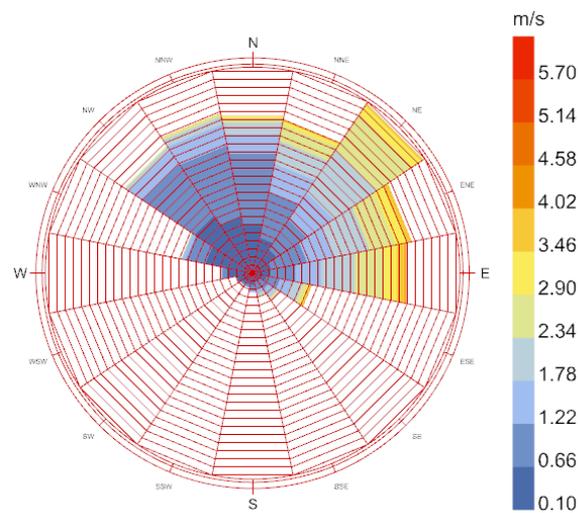
Macapá apresenta uma média de temperatura de 25.77°C e umidade equivalente a 83,07%. A incidência média de radiação solar apresenta máximas nos meses de abril, agosto, setembro e outubro, este último com os maiores valores alcançando 23068 Wh/m² (Figura 21). Em relação aos ventos, Macapá apresenta predominância de incidências das direções Nordeste e Leste, com velocidades entre 0 e 3,77 m/s, com média anual de 1,25 m/s (Figura 22).

Figura 21 - Radiação Global Horizontal ao longo do ano em Macapá-AP



Fonte: Elaborada no *software Rhino* com os *plugins Grasshopper e Ladybug* e por meio do arquivo climático EPW de Macapá do INMET (2010).

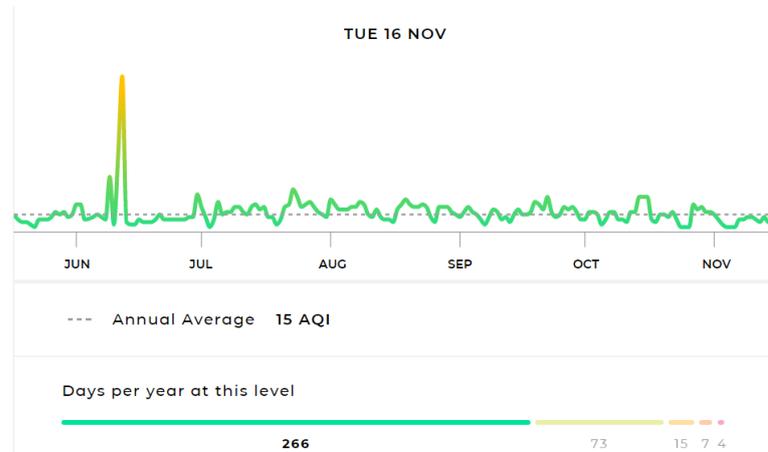
Figura 22 - Predominância da direção e velocidade dos ventos em Macapá-AP



Fonte: Elaborada no *software Rhino* com os *plugins Grasshopper* e *Ladybug* e por meio do arquivo climático EPW de Macapá do INMET (2010).

A cidade de Macapá apresentou os melhores resultados ao analisar o período de um ano, no qual a média ficaria em 15 AQI como mostra a figura 23, indicando uma boa qualidade do ar média de acordo com o quadro 6. Ainda com base neste quadro, em 266 dias do ano se mantém níveis bons de AQI e assim um potencial para ventilação natural para os ambientes internos. Valores de poluição moderada podem ser vistos, em apenas 73 dias do ano, não representando parcela significativa do ano considerando que essa condição só poderá influenciar negativamente se ela se manter durante todo o ano. É possível destacar 15 dias de poluição alta, 11 de poluição muito elevada.

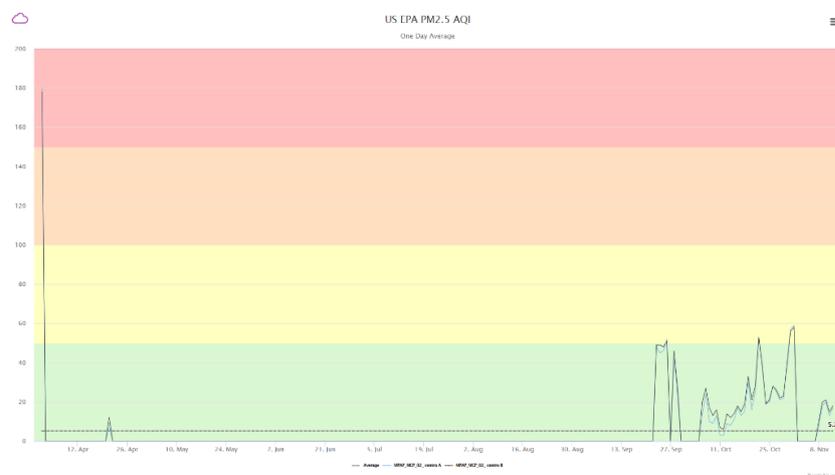
Figura 23 - AQI da cidade de Macapá - Satélite



Fonte: (<https://air.plumelabs.com/air-quality-in-macapá-efss>, 2021)

Ao avaliar as medições do sensor físico de uma estação de avaliação da qualidade do ar localizada no centro da cidade de Macapá (Figura 24), foi possível perceber valores incompatíveis. As medições indicam baixas concentrações material particulado (PM2.5) sendo a média de 5.2 no período de 1º de abril a 11 de novembro, se mantendo na maior parte do período nos níveis de concentração considerados como bons (Quadro 7), ultrapassando em poucos dias para a concentração considerada moderada (CONTRIBUIDORES DO OPENSTREETMAP, 2021). Isto pode indicar que pode haver uma variação e maior concentração dos outros poluentes analisados pelo satélite da CAMS, o que não é detectado pelo medidor físico de Macapá ou que realmente há uma falha na coleta de dados de um dos meios.

Figura 24 - AQI da cidade de Macapá – Medidor físico



Fonte: (Purple air, 2021)

Com base nos dados explicitados, foi elaborado o quadro 8, contendo as características climáticas das três cidades e a média de poluição do ar. Com base nestas informações é possível estabelecer que são cenários com climas variados, e foram escolhidos dessa forma para permitir um maior alcance da pesquisa, podendo atender diferentes variáveis climáticas como climas que tendem mais para o desconforto para o frio, como Florianópolis e Brasília, ou para o calor, como Macapá; variando a altitude, em destaque Brasília por se tratar de um planalto, e climas litorâneos como Macapá e Florianópolis.

Quadro 8 – Resumo dos fatores externos.

	Florianópolis-SC	Brasília-DF	Macapá-AP
Latitude	-27,60	- 15,77	0,03
Longitude	-48,55	-47,92	- 51,07
Altitude	2,00m	1.160,00m	15,00m
Classificação NBR	ZB3	ZB4	ZB8
Classificação <i>Koppen</i>	Cfb*	Aw**	Am***
Horas em desconforto	Frio - 51%	Frio - 59%	Calor - 29%
Temperatura média anual	20,91°C	21,08°C	25.77°C
Umidade relativa	74,75%	66,24%	83,07%
Radiação global horizontal máxima	24347 Wh/m ²	26036 Wh/m ²	23068 Wh/m ²
Predominância da direção dos ventos	Nordeste e Sudeste	Leste e Sudeste	Nordeste e Leste
Velocidade dos ventos	0 e 6,27 m/s Média anual de 2,43 m/s	0 e 5,90m/s Média anual de 2,46 m/s	0 e 3,77 m/s Média anual de 1,25 m/s
Média da poluição do ar atmosférico (Satélite)	Baixa poluição 20 AQI	Poluição moderada 24 AQI	Baixa poluição 15 AQI
Sensor PM 2,5			Nível Bom 5,2 AQI

* Subtropical úmido (C) clima oceânico, sem estação seca (f) com verão temperado

** tropical (A) de savana (w)

*** tropical (A) de monção (m)

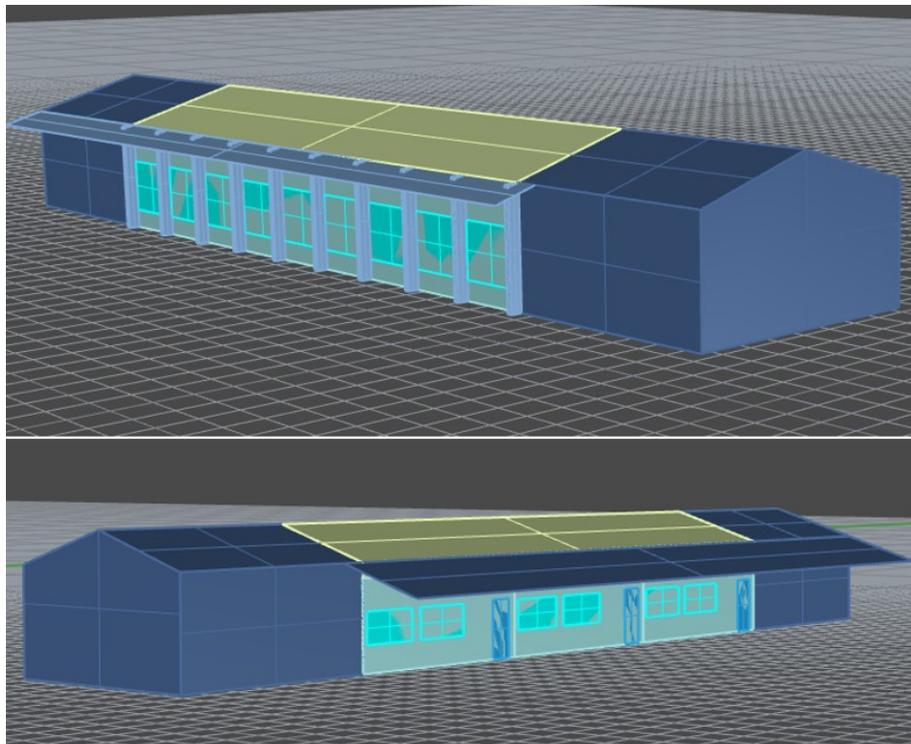
Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

A partir da caracterização da poluição do ar atmosférico, é estabelecido para esta pesquisa que o ar exterior é considerado aceitável para uso da ventilação natural, por apresentar valores médios e na maior parte do ano em níveis aceitáveis. De acordo com o quadro 7 nos casos de poluição moderada ou elevada, é necessária alguma medida para evitar o ar externo poluído, o que se reflete também para as outras cidades. Essa consideração não é adicionada ao escopo desta pesquisa.

3.1.2 Modelo de simulação

Foi escolhida uma sala de aula da tipologia de 12 salas das escolas padrão do FNDE como modelo representativo, por oferecer em um único modelo a possibilidade de simulações rápidas, enquanto a dinâmica de simular e avaliar todas as salas não impactariam tanto o resultado, visto que o objetivo principal é avaliar a diferença entre os cenários nesta pesquisa. Outro fator que motivou a escolha foi por possuir características comuns com a outras tipologias e, assim, possibilitar múltiplas simulações. O módulo representativo, apresenta três salas e um bloco de sombreamento representando os banheiros (Figura 25). A sala analisada situa-se entre duas salas, todas padronizadas, e as salas adjacentes foram modeladas para compreensão da influência mútua entre as cargas dos ambientes, e assim, alcançar cargas internas mais próximas da realidade. A composição dos componentes construtivos está descrita no quadro 9, a composição 01 foi adotada para as cidades de Macapá e Brasília, enquanto a composição 02 foi utilizada em Florianópolis conforme indicado por Araújo (2019), por possuir configurações que melhor se adaptam para cada uma dessas Zonas Bioclimáticas.

Figura 25 - Modelo de salas de aula.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

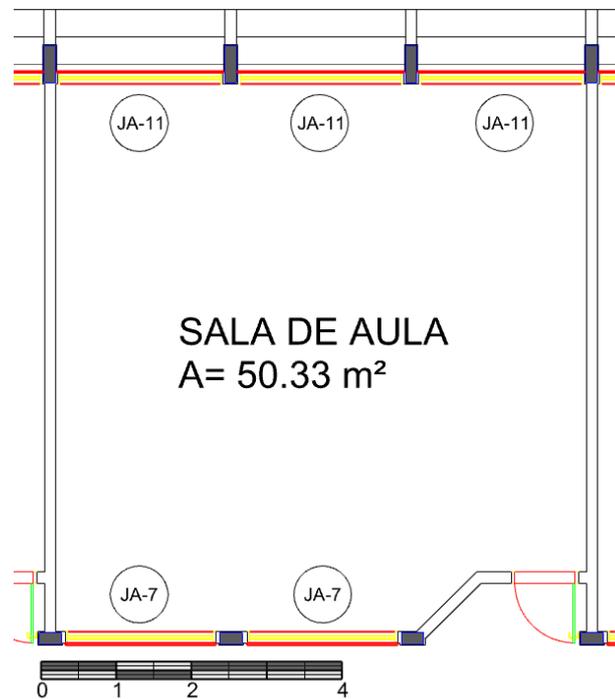
Quadro 9 - Composição componentes construtivos

Composição 01	Parede - Absortância de 0,2	Argamassa 2,5 cm
		Tijolo cerâmico 6 furos
		Argamassa 2,5 cm
	Cobertura - Absortância de 0,48 telha do tipo paulistinha (DORNELLES, 2021)	Cerâmica 1 cm
		Lã de vidro 5 cm
		Camada de ar >5cm
		Argamassa 2,5 cm
		Concreto 10 cm
	Argamassa 2,5 cm	
Composição 02	Parede – Absortância de 0,2	Gesso 1,25 cm
		EPS 9,5 cm
		Gesso 1,25 cm
	Cobertura – Absortância de 0,47: Telha fibrocimento 6mm com acabamento natural 0,47 (DORNELLES, 2021)	Fibrocimento
		Camada de ar >5cm
		EPS 5 cm

Fonte: Elaborado pelo autor com base no trabalho de Araújo (2019).

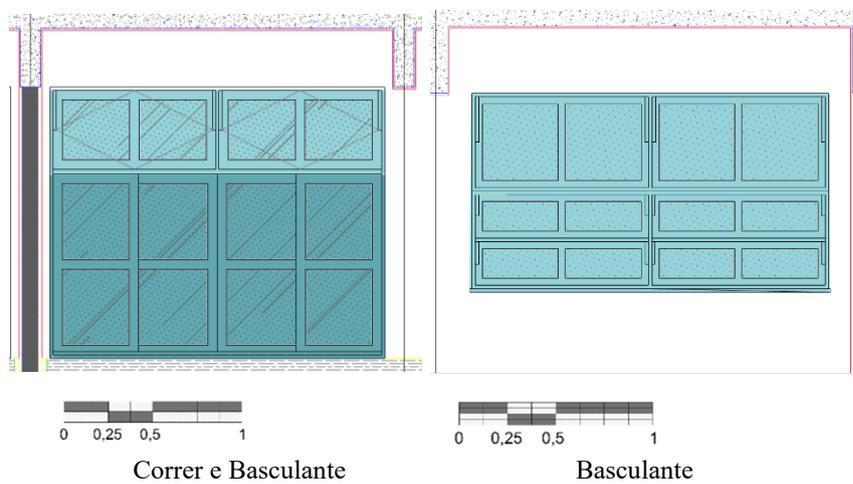
O modelo foi desenvolvido para avaliar os cenários e seu impacto nos usuários. Atualmente os projetos apresentam dois padrões de abertura, basculante (95% de abertura) e de correr (45% de abertura), conforme a figura 26 e figura 27. Somadas as áreas de abertura de janelas totalizam 11,11 m². Foi adotado o vidro simples com fator solar de 0,87 e transmitância térmica de 5,70 W/(m².K). O *LadyBug tools* oferece 3 opções de infiltração: edifício impermeável (*Tight Building*), edifício com infiltração média (*Average building*) e o edifício com vazamento (*Leaky building*). Foi configurado no modelo uma taxa de infiltração equivalente a 0.0006 (m³/s por m² de fachada) considerando como edifício com vazamento, isso devido às esquadrias brasileiras padronizadas de acordo com o documento de especificações técnicas do FNDE (FNDE, 2015) não especificar elas com isolamento em relação a área externa. As portas foram modeladas como portas de madeira comum.

Figura 26 - Indicação das janelas no modelo



Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

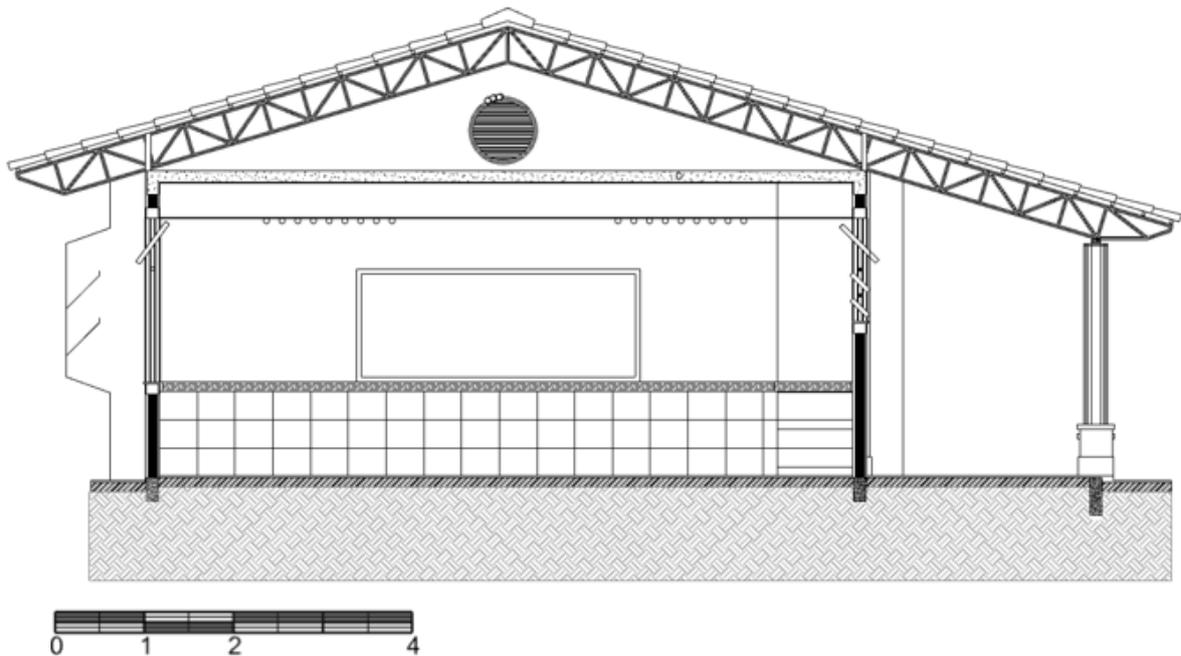
Figura 27 - Tipologias de janelas: JA-11 à esquerda e JA-7 à direita.



Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

As salas possuem dois beirais, como representado na figura 28, na qual o beiral localizado à direita protege o acesso. A zona térmica possui altura de 4,85m e o pé direito considerado foi de 3,15m.

Figura 28 - Corte da sala



Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

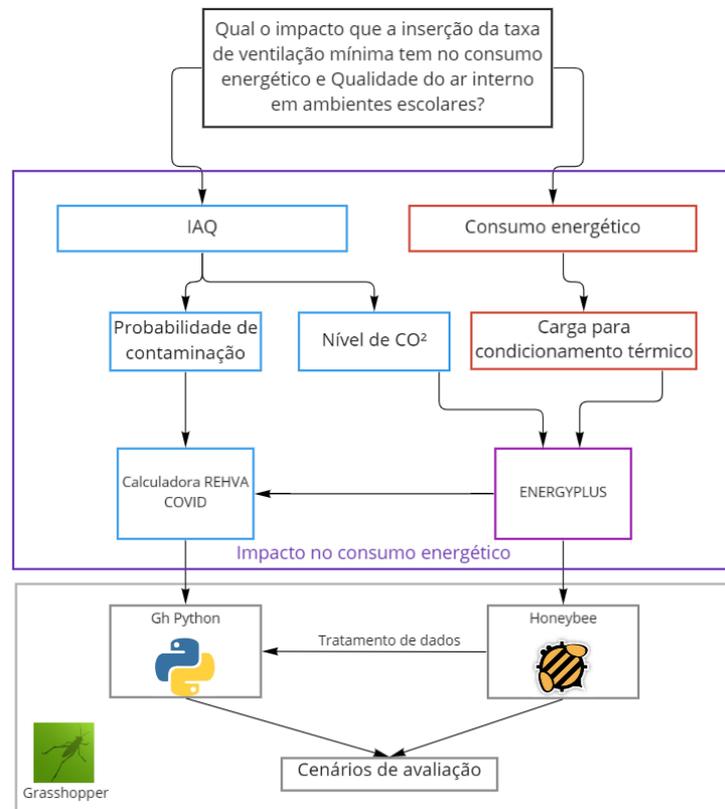
O piso foi modelado de acordo com laje de concreto de 10cm e piso cerâmico. E para as trocas de calor com o solo, este foi configurado através do método *Finite Difference* do objeto *Ground Domain*, no qual as temperaturas do solo são calculadas de maneira iterativa (ELI et al., 2019).

3.2 METODOLOGIA DE SIMULAÇÃO

As simulações computacionais desempenham papel importante na avaliação do espaço antes da construção, durante esta ou no pós-ocupação para análise de *retrofit*. Como visto na revisão de literatura, a simulação computacional se mostra eficaz como ferramenta de avaliação dos espaços.

O método de simulação computacional (Figura 29) adotou uma avaliação qualitativa de cenários em aspectos de IAQ e consumo para condicionamento térmico. Foi utilizado o programa *Rhino 7.0* como interface gráfica para modelagem da escola. O seu *plugin Grasshopper* para inserção das ferramentas de simulação. Importante ressaltar que a simulação ocorreu no *Grasshopper*, bem como o tratamento de dados. A estrutura da simulação inserida no programa é apresentada no Apêndice A.

Figura 29 - Estrutura de simulação



Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

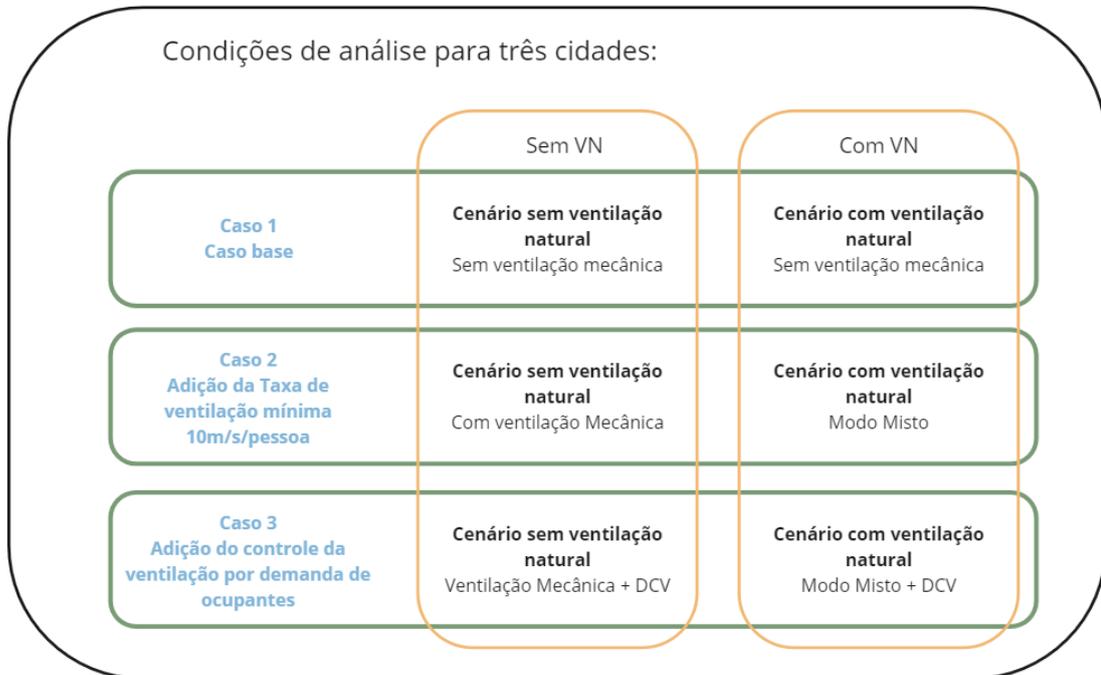
3.2.1 Cenários de avaliação

Para a construção dos cenários de avaliação, tomou-se como base as pesquisas apresentadas na revisão de literatura, nas quais há sempre comparações entre a ventilação natural, mecânica e híbrida, esta última apontada em grande parte dos trabalhos como a solução que melhor atende às demandas de IAQ e conforto térmico, com menor consumo energético. Há um destaque para o estudo de Chenari et al. (2017) que elaborou cenários teste semelhantes ao que se propõe nesta etapa.

É apresentado na figura 30 os casos que serão analisados, seguindo a lógica de comparação entre uma simulação sem ventilação, com ventilação natural, com sistema de ventilação mecânica e o sistema de ventilação misto. A ASHRAE (2019) define o sistema misto como um sistema híbrido que utiliza a ventilação natural e a ventilação mecânica para manutenção dos níveis de IAQ e temperaturas internas aceitáveis. Os Casos são apresentados

em uma estrutura de duas simulações (Figura 30), na qual uma é sem ventilação natural (SN) e a segunda com uso da ventilação natural (CN).

Figura 30 - Cenários de avaliação



Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

O Caso base é utilizado para entender o consumo energético exigido pela edificação e a probabilidade de atendimento aos critérios de IAQ. No Cenário SN1 a simulação não utiliza inserção de ar limpo, há somente o uso da carga ideal para condicionamento térmico. No Cenário CN1 há o uso da ventilação natural quando há a possibilidade de condicionamento térmico naturalmente e quando esse condicionamento não é atendido, há o acionamento dos dispositivos para alcançar a carga ideal para climatização.

A partir do Caso 2 há a inserção da taxa de ventilação mínima, através da Ventilação Mecânica. Como parâmetro da taxa de renovação mínima foi adotada a inserção de um fluxo de ar externo de 10 L/s para cada pessoa presente no ambiente, estabelecida no documento “Roteiro para melhorar e garantir uma boa ventilação interna no contexto do COVID-19” (WHO, 2021) e “Documento orientativo REHVA COVID-19” (REHVA, 2021), este considera a taxa de ar mínima sendo inserida constantemente pelo número total de usuários (33 ocupantes) durante todo o período de ocupação. O Cenário SN2 mantém as cargas ideais para condicionamento, inserindo taxas de ar constantes através da Ventilação Mecânica. O Cenário

CN2 adota um Sistema Misto, utilizando simultaneamente a Ventilação Natural com a Ventilação Mecânica, e quando não for possível alcançar conforto térmico no ambiente de forma passiva, haverá o fechamento das aberturas com acionamento das cargas ideais para condicionamento térmico associadas a Ventilação Mecânica.

Esta pesquisa traz em sua revisão bibliográfica o impacto que as taxas de ar inseridas no ambiente interno possibilitam também melhoria na capacidade de aprendizagem como demonstrado em estudos no subcapítulo “Efeito da qualidade do ambiente interno na cognição” (BAKÓ-BIRÓ et al., 2007 e BAKÓ-BIRÓ et al., 2012). O valor adotado (10 L/s para cada pessoa no ambiente) se insere dentro dos valores testados no estudo de campo, garantindo renovação de ar suficiente para não afetar nos processos cognitivos.

O Caso 3 segue a mesma lógica do Caso 2 e insere um controle da ventilação pela demanda de ocupação, dessa forma, será inserida a taxa de ventilação mínima de acordo com o número de ocupantes calculados hora a hora de acordo com a ocupação descrita no item 3.2.2.

Foi utilizado o programa *EnergyPlus* (versão 22.1.0) como motor de simulação, por ser um programa validado de código aberto, amplamente utilizado em pesquisas e publicações, devido à confiabilidade do seu algoritmo no que diz respeito ao comportamento térmico de edificações. Como interface gráfica para o *EnergyPlus* e vinculação ao *Grasshopper* foi adotado o *plugin Honeybee no Ladybug tools* (versão 1.5).

3.2.1.1 Simulação computacional

Para que a simulação ocorra se aproximando o máximo possível da realidade, foram necessárias duas etapas ao longo do processo, sendo a primeira com simulações prévias para balizar e preparar o modelo para a segunda etapa de simulação de avaliação dos cenários. A etapa 1 - uma simulação prévia para a definição dos padrões de abertura das janelas e acionamento do ar condicionado, na qual serão realizadas 3 simulações, uma para cada cidade. Estas simulações ocorreram sempre antecedendo a simulação dos cenários. E, por fim, as simulações dos cenários de avaliação, serão 3 casos e dois cenários em cada caso, totalizando 6 simulações.

3.2.1.1.1 Simulação prévia para definição dos padrões de abertura para as janelas

A simulação híbrida exigiu duas etapas. Na primeira foi realizada uma simulação de Ventilação natural, com as janelas abertas 100% do tempo, sem o uso de condicionamento para climatização, isto para dimensionar as horas ocupadas que atendem aos parâmetros do conforto adaptativos indicado pela ASHRAE (2017). Como demonstrado no subcapítulo 2.2.1 pessoas que trabalham em edifícios, em climas quentes e úmidos como o de Florianópolis, com o uso misto de condicionamento com a ventilação natural, tendem a aceitar mais a temperatura do ambiente de acordo com a teoria do conforto adaptativo (OLIVEIRA; RUPP; GHISI, 2021).

A ASHRAE (2017) especifica as condições térmicas ambientais aceitáveis para adultos em pressão atmosférica equivalente a altitudes de até 3.000 m em ambientes internos que foram projetados para ocupação humana por períodos acima de 15 minutos. A norma estabelece como fatores ambientais a temperatura, a radiação térmica, a umidade e a velocidade do ar enquanto os fatores pessoais são os de atividade e vestimenta.

Aplica-se apenas a espaços onde os ocupantes estão envolvidos em atividades físicas quase sedentárias, com taxas metabólicas variando de 1,0 a 1,3 metros. A faixa permitida de roupas aceitáveis deve ser de pelo menos 0,5 a 1,0 clo. Para os fins desta norma, espaços naturalmente condicionados controlados pelos ocupantes são aqueles espaços onde as condições térmicas do espaço são reguladas principalmente pelos ocupantes através da abertura e fechamento de fenestração no envelope.

A norma apresenta um modelo adaptativo que relaciona as temperaturas de projeto interno ou faixas de temperatura aceitáveis aos parâmetros meteorológicos ou climatológicos externos. Para isso ela apresenta três métodos: Método gráfico de zona de conforto, método analítico da zona de conforto e método de elevada velocidade do ar da zona de conforto. Para o método desta pesquisa foi adotado o analítico da zona de conforto que utiliza a equação 1 para alcançar a temperatura operativa. O *plugin honeybee* adota um valor constante de 0,1 m/s na condicionante A da fórmula.

$$T_o = A T_a + (1 - A) - T_r$$

(Equação 1)

Onde:

T_o = Temperatura operativa

T_a = Média da temperatura do ar

T_r = temperatura radiante média

A = depende da velocidade do ar: $<0.2 \text{ m/s} = 0.5$; $0.2 \text{ to } 0.6 \text{ m/s} = 0.6$ ou $0.6 \text{ to } 1.0 \text{ m/s} = 0.7$

Adotou-se as fórmulas das equações 2 e 3 para os limites do conforto adaptativo. As horas que excedem tanto para acima do limite superior quanto abaixo do limite inferior no espaço ocupado que estão fora da zona de conforto são consideradas fora da faixa de conforto.

$$0.31 t_{pma}(\text{out}) + 21.3$$

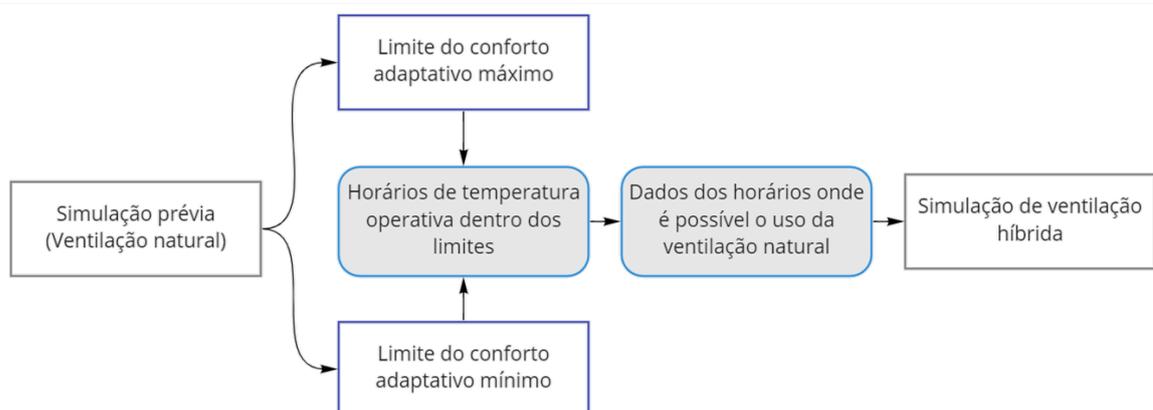
(Equação 2)

$$0.31 t_{pma}(\text{out}) + 14.3$$

(Equação 3)

Assim, foi estabelecido que a hora ocupada atenderá a 80% de aceitabilidade em conforto térmico quando a temperatura operativa se estabelecer entre o limite superior e inferior. Ao finalizar essa primeira simulação, é utilizado esse dado hora a hora no ano, com os dados das horas nas quais se atende à faixa de conforto indicada para cada mês, para delimitar os horários nos quais as janelas podem ser abertas durante o ano na simulação seguinte como representada na figura 31.

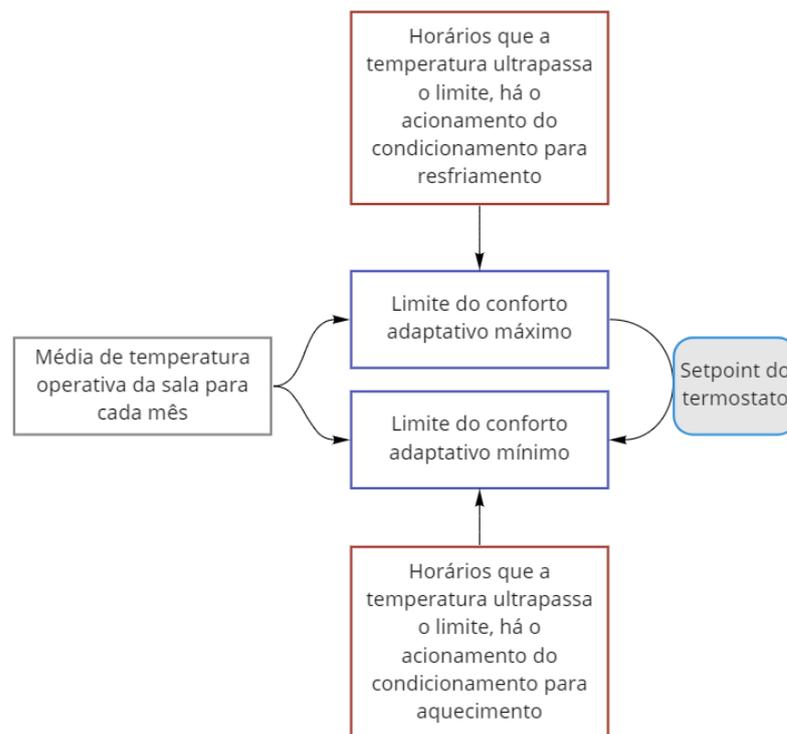
Figura 31 - Simulação para definição da operação das aberturas



Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

Além disso, esta simulação prévia adota as médias de temperatura operativas internas para encontrar os limites de temperatura para climatização. O termostato aconteceria em duas temperaturas: Valores de temperaturas limites máximas (para acionamento e desligamento do sistema de resfriamento) e limites mínimos (para acionamento e desligamento do sistema de aquecimento), de acordo com as fórmulas de conforto adaptativo da ASHRAE (2017). Dessa forma, o *setpoint* de temperatura para resfriamento e aquecimento (Figura 32) serão indicados de acordo com a média de temperatura do mês analisado. A mesma lógica se repete a cada mês, estabelecendo um padrão de temperaturas mínimas e máximas para acionamento do ar condicionado.

Figura 32 - Definição do *setpoint* para acionamento e desligamento do ar condicionado



Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

Há então dois inputs importantes para as simulações com o uso da Ventilação Natural (CN), aquele que aciona a abertura das janelas nos horários nos quais há um atendimento da temperatura operativa de acordo com a simulação prévia de ventilação natural e o acionamento das cargas ideais para condicionamento térmico ao se ultrapassar as temperaturas limites estabelecidas pelo conforto adaptativo.

O trabalho de Eli (2020) indica um equívoco na simulação da ventilação híbrida no *EnergyPlus* que também foi verificado ao utilizar a interface gráfica *Ladybug tools*, no qual o algoritmo não obedece o comando para interrupção da ventilação natural e acionamento para climatização, ocasionando da ocorrência simultânea. A estratégia adotada pela autora foi o uso do *Energy Management System* (EMS), função indisponível na interface utilizada nesta pesquisa.

Além disso, há uma questão abordada neste trabalho não considerada por Eli (2020), que seria a inserção da ventilação mínima, como esta é configurada no mesmo componente que o *Ideal Loads*, a completa desativação do sistema poderia resultar na não ativação da inserção de ar mínima, não permitindo a ventilação híbrida (abertura das janelas e inserção do ar mecanicamente) prejudicando a Qualidade Interna do Ar. Dessa forma, para este trabalho foi considerado mais adequado manter a simulação híbrida, variando o *setpoint* de acordo com o conforto adaptativo para acionamento e desligamento do condicionamento térmico, através das cargas ideais, minimizando possíveis excedentes de carga para condicionamento térmico.

3.2.2 Padrões de uso e ocupação

Para o perfil de ocupação das salas de aula das escolas do FNDE, os projetos disponibilizados no site do fundo (FNDE, 2017c) permitiram contabilizar o número de ocupantes equivalente a 32 alunos e o professor.

O número de ocupantes, densidade de potência de iluminação e de equipamentos e nível de atividade são descritos no quadro 10. Ao considerar a ocupação de um ambiente é necessário considerar a variabilidade de ocupação do usuário, para isso, foi adotado como mostra a figura 33 elaborada por Lopes (2020) em discussões com a equipe técnica da Coordenação de Desenvolvimento e Infraestrutura (CODIN) do FNDE, o padrão de ocupação do espaço escolar.

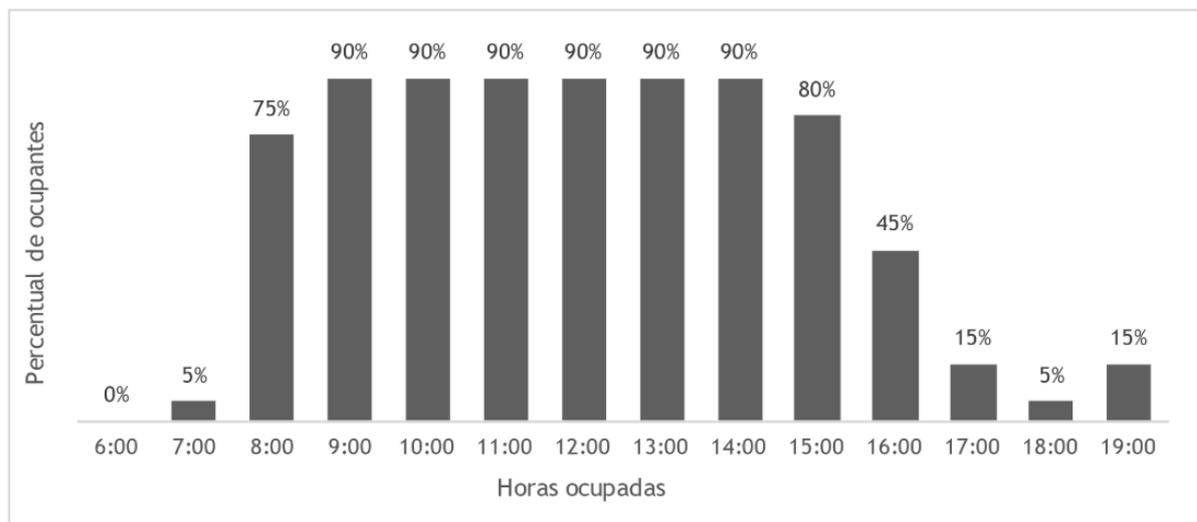
Quadro 10 - *Inputs* da simulação (Continua)

Input	Dado	Referência
Número de pessoas pela área (32 alunos e 1 professor)	0,66	Com base no layout dos projetos do FNDE

DPI - Densidade de potência de iluminação (W/m ²)	15,5	Condição de referência do INI-C (INMETRO, 2021)
DPE - Densidade de potência de equipamentos (W/m ²)	15	Condição de referência do INI-C (INMETRO, 2021)
Nível de atividade (W/pessoas)	106	(LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014)

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Figura 33 - Rotina de uso e operação



Fonte: LOPES (2020).

3.3 INDICADORES

Para o desenvolvimento das simulações computacionais foram estabelecidos dois critérios, sendo um voltado para o IAQ, avaliando a concentração de CO₂ e a probabilidade de infecção pela COVID-19, e um critério relacionado ao consumo energético.

3.3.1 Critério 01: IAQ

Para a construção do critério de IAQ busca-se atender 100% do período de ocupação atendendo dois subcritérios: o primeiro é a probabilidade de infecção pelo vírus da COVID-19 inferior a 0,5 do evento R; e o segundo subcritério no qual as concentrações de CO₂ devem ser inferiores a 800 ppm.

Os dados horários referentes a esses dois subcritérios serão tratados e avaliados nas horas ocupadas da sala de aula, o programa *EnergyPlus* irá calcular o fluxo de ar e a concentração de CO₂. Assim será estabelecido que a hora ocupada estará de acordo com os níveis esperados de IAQ, se atender aos dois subcritérios. Ao final os dados anuais serão convertidos para um percentual de horas ocupadas em qualidade interna do ar.

3.3.1.1 Critério 01.1: Redução da probabilidade de contaminação por COVID-19

Com o objetivo de medir a concentração do vírus SARS-CoV-2, é apresentado um método baseado no documento *REHVA COVID-19 Ventilation Calculator documentation (version 2.0, August 1, 2021)* que discorre sobre a estrutura da calculadora para avaliar a probabilidade de infecção, citado no subcapítulo 2.2.2 Impacto do Covid nos sistemas HVAC. Metodologia semelhante é adotada no estudo de Mokhtari e Jahangir (2020), ao utilizar a lógica associada a simulações no Energy para avaliar a probabilidade de infecção pelo vírus da COVID-19.

Nesse sentido foi realizado um tratamento dos *outputs* do *EnergyPlus*, em seus valores horários, referentes à taxa de fluxo de ar no ambiente - *Zone Ventilation Current Density Volume Flow Rate*, à taxa de fluxo mecânico de ar do ambiente - *Zone Mechanical Ventilation Current Density Volume Flow Rate* e à taxa de fluxo de ar por infiltração do ambiente - *Zone Infiltration Current Density Volume Flow Rate*. Estes valores foram somados para se encontrar o fluxo total de ar a cada hora ocupada e então estes dados foram divididos pelo número de ocupantes ao longo das simulações para se encontrar a taxa de ventilação por pessoa. Esta etapa de tratamento do *output* da simulação é inversa ao *input* inserido de 10 L/s por cada pessoa, pois são somados os fluxos de ar no ambiente interno e divididos pelas pessoas na sala de aula para inserir na calculadora.

Apresenta-se um método baseado no documento que discorre sobre a estrutura da calculadora para avaliar a probabilidade de infecção. Utilizou-se o modelo de risco de infecção devido à transmissão por aerossol baseado na formulação de *Wells-Riley* (NICAS;

NAZAROFF; HUBBARD, 2005; NOAKES; ANDREW SLEIGH, 2009). Segundo REHVA (2022), usando o modelo *Wells-Riley* de transmissão de doenças transmitidas pelo ar padrão calibrado para COVID-19 com a fonte correta (taxas de emissão de quanta), o risco de infecção pode ser calculado para diferentes atividades e salas. O autor destaca que neste modelo, a carga viral emitida é expressa em termos da taxa de emissão quanta (E, quanta / h), sendo um quantum definido como a dose de núcleos de gotículas transportadas pelo ar necessária para causar infecção em 63% das pessoas suscetíveis.

A primeira etapa da calculadora é avaliar a taxa de troca de ar (*Air Change Rate*) pela (equação 4).

$$ACR = \frac{A*TV*3,6}{V}$$

(Equação 4)

Onde:

$ACR = \textit{Air Change Rate}$

A = Área de piso

TV = Taxa de Ventilação por pessoa

V = Volume

Avalia-se o *Total first order loss rate*, adotando o *air change rate* (Equação 5). A ventilação no coeficiente de taxa de primeira ordem (*first-order loss rate coeficiente*) é tratada como uma ventilação ou infiltração de ar externo, livre de vírus.

$$FOLR = \frac{ACR+IRV+DS+ACM}{V}$$

(Equação 5)

Onde:

$FOLR = \textit{Total first order loss rate}$

IRV = Taxa de inativação do vírus (*Inactivation rate of the virus* - Constante = 0,63)

DS = Deposição nas superfícies (*Deposition to surfaces* - Constante = 0,24)

ACM = Medidas adicionais de controle (*Additional control measures* - Constante = 0)

V = Volume

Para a concentração de estado estacionário (*x steady state concentration*) adota-se a (equação 6). Nessa equação é exigido o número máximo de horas ocupadas naquela configuração, a avaliação aqui apresentada se dá em valores contabilizados hora a hora, optou-se por considerar o valor total de horas ocupadas equivalente a 6, indicando aquela estrutura naquele horário (número de ocupantes, taxa de ventilação por pessoa) ao projetar a perspectiva daquela configuração ao longo das horas de ocupação. Adotou-se essa estratégia devido ao tempo de permanência no espaço influenciar na probabilidade de infecção, caso fosse adotado o valor igual a 1, haveria alta rotatividade e diminuiria muito a probabilidade de infecção, o que, portanto, não representaria o que acontece na prática. A ocupação igual a 6 indicaria a troca de turmas por turnos, dividindo-o em duas turmas, uma no período da manhã, de 7 às 13 horas, e a segunda no período da tarde, de 14 às 19 horas.

$$X = 1 - \frac{1}{(FOLR*O)*(1-e^{(-FOLR*O)})}$$

(Equação 6)

Onde:

X = concentração x de estado estacionário (*x steady state concentration*)

FOLR = *Total first order loss rate*

O = Tempo de ocupação (Constante = 6)

Para calcular a média de concentração quanta é aplicado um modelo de equilíbrio de material totalmente misturado de zona única para a sala (Equação 7). A taxa de emissão quanta é gerada por pessoas infectadas, levando em consideração a eficiência da máscara facial, a taxa de emissão. Como mostrado no subitem 2.1.3.2, foi considerada a variante Ômicron para as simulações, logo o valor quanta/h considerado foi de 4.0. A simulação considerou a não utilização de máscaras e o número de uma única pessoa infectada.

$$C_{avg} = \frac{(1-MI)*NI*QE}{(FOLR*V)*X}$$

(Equação 7)

Cavg = concentração de quanta infecciosa no ar dependente do tempo (quanta/m³)

MI = Eficiência da máscara para pessoas infectadas (Constante = 0)

NI = Número de pessoas infectadas (Constante = 1)

QE = Quantas emitidos (*Quanta emission*)

FOLR = *Total first order loss rate*

V = Volume

Os quanta inalados (Equação 8) (n , quanta) dependem da concentração média de quanta no tempo (C_{avg} - quanta / m^3), da taxa de respiração volumétrica de um ocupante (Q_b - m^3 / h) e da duração da ocupação (O - h) e se uma pessoa está usando máscara, a eficiência da máscara facial (n_s) reduz os quanta inalados para pessoa suscetível. Os níveis diferentes de suscetibilidade não são considerados.

$$QI = C_{avg} * O * Q_b (1 - MS)$$

(Equação 8)

Onde:

QI = Quanta inalado

QB= Taxa de respiração (*volumetric breathing rate of an occupant* - m^3/h)

MS = Eficiência da máscara para pessoas suscetíveis (Constante = 0)

Por fim, avalia-se a probabilidade de infecção (Equação 9) e na sequência o evento R (Equação 10).

$$P = 1 - e^{-QI}$$

(Equação 9)

Onde:

P = a probabilidade de infecção para pessoas suscetíveis

QI = Quanta inalado

$$R = \frac{P \cdot NS}{NI}$$

(Equação 10)

Onde:

R = Evento R

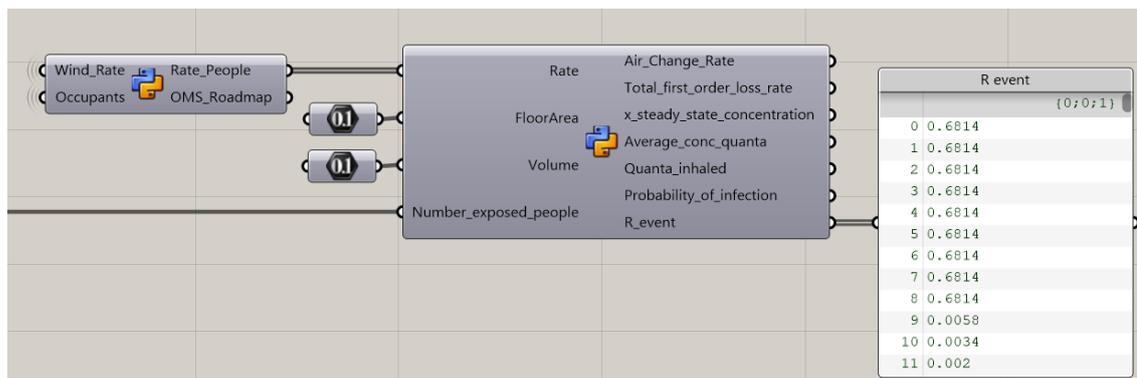
P = a probabilidade de infecção para pessoas suscetíveis

NS = o número de pessoas suscetíveis no ambiente

NI = Número de pessoas infectadas (Constante = 1)

Para construção do método para tratamento de dados considerando este modelo matemático, foi necessário importar a calculadora para o *Grasshopper*. Adotou-se a linguagem de programação *Python*, no qual a equação foi traduzida para o *Gh python script* como componentes (Figura 34).

Figura 34 - Estrutura de componente para avaliação do critério 01.1: Redução de contaminantes.



Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

3.3.1.2 Critério 01.2: Concentração de CO₂ nos ambientes

Com o desenvolvimento da revisão bibliográfica, foi possível perceber a importância de avaliar e quantificar a concentração de Dióxido de Carbono nos ambientes internos de salas

de aula. Por indicar proporcionalmente níveis de contaminantes biológicos, afetar na cognição e afetar na sensibilidade para a sensação de desconforto.

Para avaliação desta variável ambiental, foi utilizado o programa *EnergyPlus*, que quantifica os níveis de concentração de CO₂ no ambiente interno a partir de inputs fornecidos, sejam as fontes como o número de ocupantes ou os mecanismos de dispersão como as taxas de infiltração, ventilação constante, rede de ventilação a partir das aberturas, ventilação mecânica e/ou sistemas de climatização.

O dado de entrada da taxa de geração de dióxido de carbono por pessoa tem a unidade de m³/sW. A taxa total de geração de dióxido de carbono considera o número de pessoas, o horário de ocupação, atividade desenvolvida e a taxa de geração de Dióxido de carbono. O valor padrão é 3.45 E-8 m³/s-W (obtido do valor ASHRAE *Standard* 62,1-2007 em 0,0084 cfm/met/pessoa sobre a população adulta em geral). O valor máximo pode ser 10 vezes o valor padrão (DOE, 2021). Segundo a NBR 16401 (ABNT, 2008) a concentração de dióxido de carbono no ar exterior oscila entre 400-600 ppm, nesse sentido foi adotada a concentração de CO₂ externo de 400 ppm.

O critério 01.2 será avaliado a partir do *output Zone Air CO₂ Concentration [ppm]* do *EnergyPlus* que representa o nível de concentração de dióxido de carbono em partes por milhão (ppm) para cada zona (DOE, 2021).

A ASHRAE (2019) estabelece que quando houverem sensores para um sistema DCV, as concentrações devem ser de 600 a 1000 ppm de CO₂. Entretanto, como foi visto no capítulo 2.1.2 por Satish et al. (2012) a variação entre 600 ppm e 1.000 ppm prejudicou o desempenho em seis métricas avaliadas. REHVA (2021) apontam que durante um período epidêmico é recomendado indicar o *setpoint* de 800 ppm como alerta e acima de 1000 ppm como um indicador de inserção de maior quantidade de ar limpo no ambiente. Foi assumido para este trabalho que os níveis de CO₂ devem ser de 800 ppm nas salas de aula.

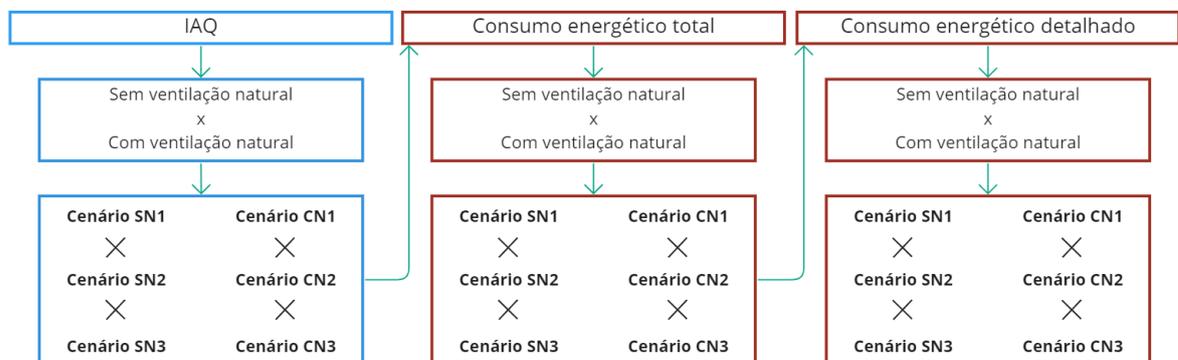
3.3.2 Critério 02: Consumo energético

Para avaliação do consumo energético total, serão somadas a quantidade de energia para resfriamento e aquecimento da sala analisada e realizada a divisão pela área do ambiente. Os valores apresentados serão anuais e terão como unidade kWh/m².

4 RESULTADOS

Os resultados serão apresentados (Figura 35) comparando o desempenho entre os cenários sem o uso da ventilação natural e com o uso da ventilação natural e na sequência a variação dos Casos entre si. Primeiramente serão apresentados os resultados dos percentuais de IAQ, expondo também as trocas de ar por hora em cada cenário, seguido pela avaliação do consumo energético total em cada cenário, a variação entre eles e a caracterização entre o consumo para aquecimento e resfriamento.

Figura 35 - Estrutura de resultados: SN como Sem ventilação Natural, CN como com Ventilação Natural



Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

4.1 IAQ

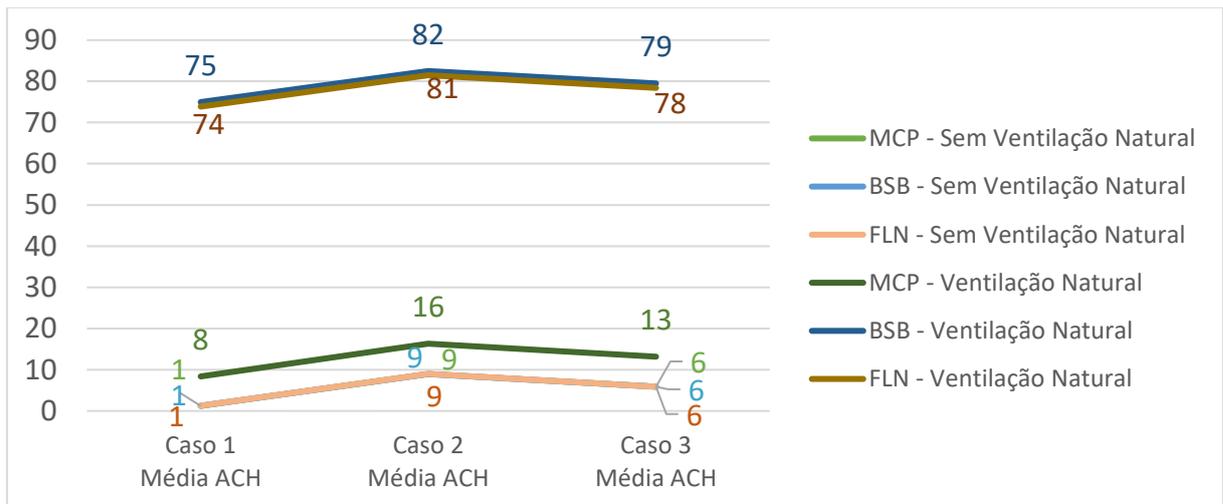
4.1.1 Impacto da ventilação natural para o IAQ

No Caso 1 ao configurar as janelas para não operarem ao longo do dia, as médias das taxas de renovação de ar nos horários apresentaram valores muito baixos (Figura 36) e consequentemente os níveis de IAQ (

Figura 37). Durante os testes, foi possível perceber que esses valores não são nulos devido à taxa de infiltração inserida como input da simulação. A lógica da simulação muda quando as janelas realizam uma operação de abertura e fechamento de acordo com a possibilidade de atendimento ao conforto térmico, fornecendo ventilação natural, no qual os valores das médias de trocas de ar por hora (ACHs) sobem consideravelmente e os valores do

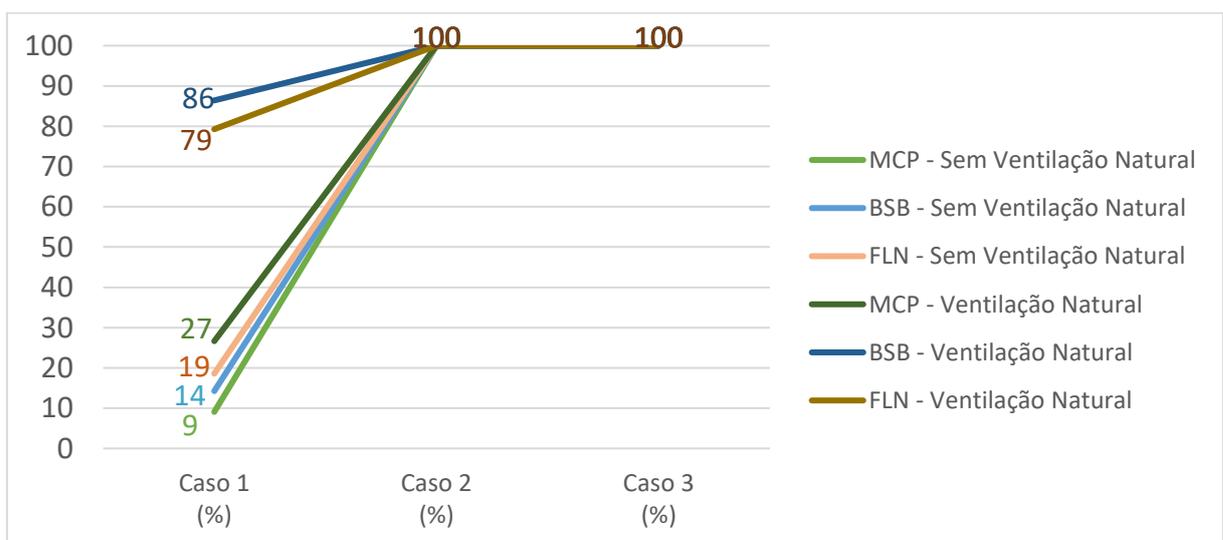
percentual de IAQ seguem a tendência. Ressalta-se que os valores referentes ao IAQ neste Cenário tratam-se de uma perspectiva probabilística da simulação computacional, por incluir diversas variáveis que podem influenciar nesse fluxo de ar interno (Subcapítulo 2.2.1).

Figura 36 - Médias de ACHs para cada cidade



Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

Figura 37 - Resultados percentuais de IAQ para cada cidade



Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

É possível perceber que a cidade de Macapá possui baixa variação das trocas de ar por hora entre os cenários com e sem VN quando comparada às outras duas cidades. Isto é justificado pelo clima da cidade ter temperaturas elevadas em grande parte do ano e assim implicar em menos horas com a adoção da abertura das janelas para ventilação, impactando em menos horas com as janelas permitindo a troca de ar natural. De 4.745 horas ocupadas, Macapá permite a abertura das janelas durante 549 horas, Brasília salta desse valor para 3.808 horas, próximo a Florianópolis com 3.397 horas.

Os resultados das simulações seguem essa tendência nos cenários posteriores, nos quais as médias de ACHs têm valores díspares entre os cenários, nos quais, aqueles com o uso da ventilação natural, possuem maior número de renovações.

4.1.2 Evolução entre os Casos para o IAQ

Ao comparar os Casos 1 e 2, a tendência de aumento com as ACHs não se reflete nos percentuais de IAQ. Como exemplo, Brasília que obteve a maior média de ACH equivalente a 75 no Caso 1 com VN, este não apresenta uma constância, enquanto o Caso 2 sem o uso da VN, apenas com média de 9 ACHs consegue atender a demanda dos percentuais de IAQ.

Ao avaliar a evolução dos Casos é possível perceber que as médias de ACHs em todos os cenários sofrem variações, alcançando seus maiores valores no Caso 2 até reduzir com o controle por demanda de ocupação (Caso 3).

Nos cenários sem a VN as ACHs apresentam um aumento médio do Caso 1 para o Caso 2 de 8 ACHs e redução na média do Caso 2 para último Caso equivalente a 3 trocas de ar por hora. Nos Cenários com VN, a variação dos do Caso 1 para o Caso 2 é um acréscimo de 8 ACHs para Macapá e Florianópolis e 7 ACHs para Brasília, enquanto todas as cidades apresentam uma redução de 3 trocas de ar por hora do segundo para o último Caso.

Ao tratar dos percentuais de IAQ, a partir dos cenários com inserção da ventilação mínima, nos Casos 2 e 3, os dados apresentam atendimento em todos os horários tanto a calculadora de COVID (REHVA, 2022) quanto a concentração de 800 ppm de CO₂.

Os cenários com a demanda de ventilação controlada, Caso 3, não implicaram em alteração nos resultados ou impediram o atendimento dos critérios de Qualidade Interna do Ar (

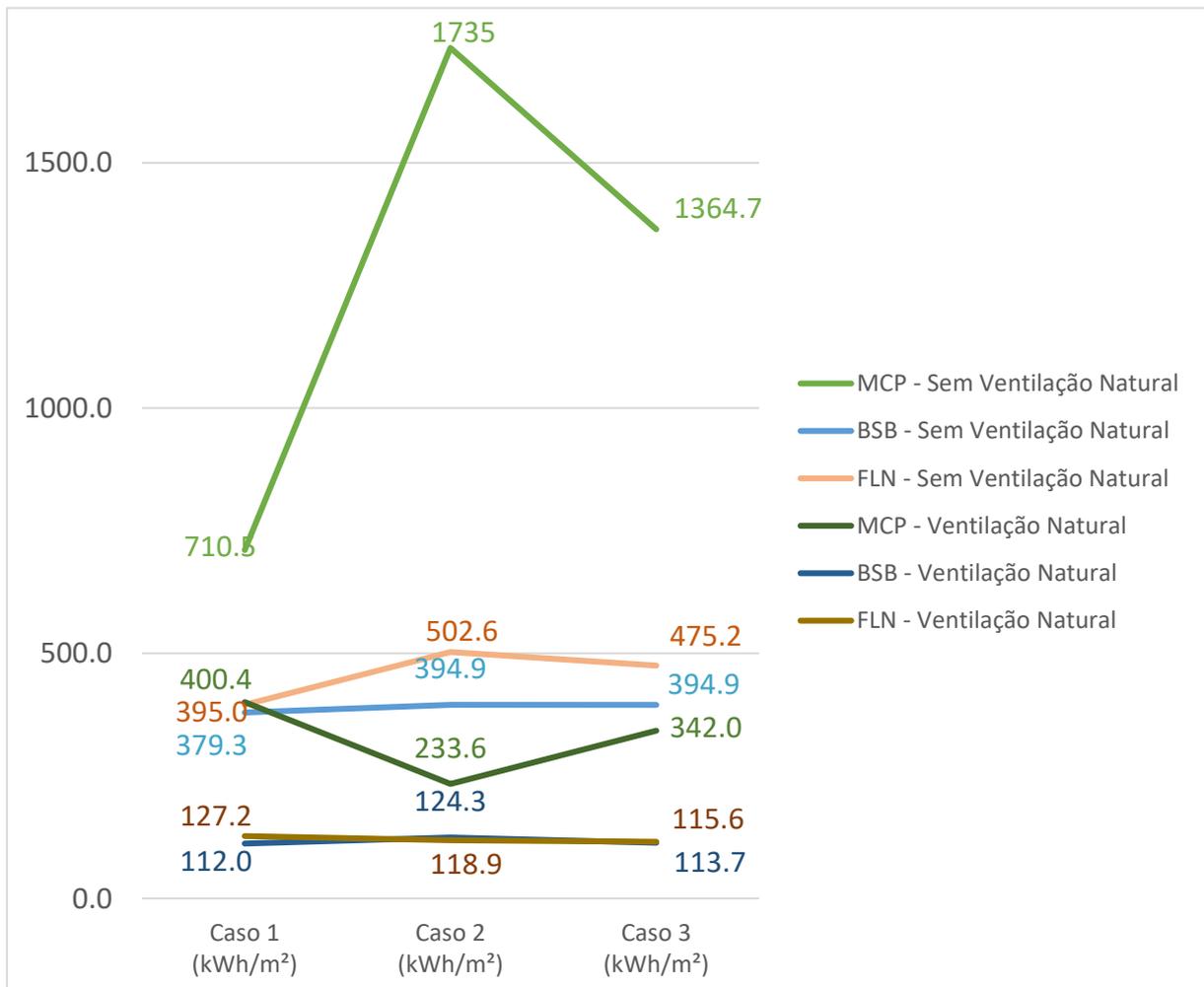
Figura 37). Isso se justifica pela manutenção da taxa mínima de ventilação inserida como input, com a diferença da inserção ser controlada pelo número de ocupantes a cada hora.

O papel do último cenário seria somente controlar a Taxa mínima de acordo com o número equivalente de ocupação da sala.

4.2 CONSUMO ENERGÉTICO

O consumo energético total é a soma do consumo ideal para resfriamento e aquecimento para as 3 cidades. A cidade de Macapá apresenta o maior consumo total quando comparado às outras duas cidades em todos os cenários (Figura 38). Brasília e Florianópolis apresentam valores aproximados entre si em quase todos os cenários.

Figura 38 - Consumo energético para condicionamento térmico total nas cidades



Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

4.2.1 Impacto da ventilação natural para o consumo energético

Dentre todos os cenários é possível perceber que entre aqueles sem a operação das janelas (sem VN) que todas as cidades tiveram o menor consumo no Caso 1; em Macapá e Florianópolis o Caso 2 desponta como o cenário com maior consumo energético total, havendo redução desse consumo no Caso 3; Brasília tem consumo com mesmo valor para os Casos 2 e 3. Apesar dos valores iguais, o impacto para aquecimento e resfriamento são diferentes, que será visto nos próximos itens.

Nos cenários com VN não se estabelece um padrão, em Macapá no Caso 1 possui o maior consumo enquanto o Caso 2 o menor; Florianópolis tem o maior consumo no Caso 1 e o menor no Caso 3; Brasília apresenta o maior consumo no Caso 2 e menor no Caso 1.

Ao comparar os Cenários sem VN em relação aos Cenários com VN (Figura 38), todas as três cidades apresentam redução do consumo energético para condicionamento em números totais quando há o uso da ventilação natural. A redução do consumo é maior para a cidade de Macapá ao comparar os três Casos, Florianópolis segue em segundo lugar e Brasília tem os menores percentuais de redução. Os Cenários com uso da VN, mais especificamente que adotam o Modo Misto (Casos 2 e 3), despontam como uma alternativa mais eficiente e que proporciona maior número de trocas de ar por hora.

4.2.2 Evolução entre os Casos para o consumo energético total

Ao tratar do consumo energético total para condicionamento térmico os Cenários sem operação das janelas (Sem VN) apresentaram um aumento entre o Caso 1 em relação ao Caso 2. Quando há VN, entre os Casos 1 e 2, Brasília demonstrou aumento no consumo, enquanto Macapá e Florianópolis apresentaram redução (Figura 38).

A comparação entre o Caso 2 e 3 (Figura 38) para os cenários sem VN segue a lógica do que foi proposto, havendo uma tendência de redução nas três cidades. Quando se avalia o Cenário com VN, as cidades de Brasília e Florianópolis seguem a mesma tendência, entretanto a cidade de Macapá, resulta em um aumento do consumo energético total.

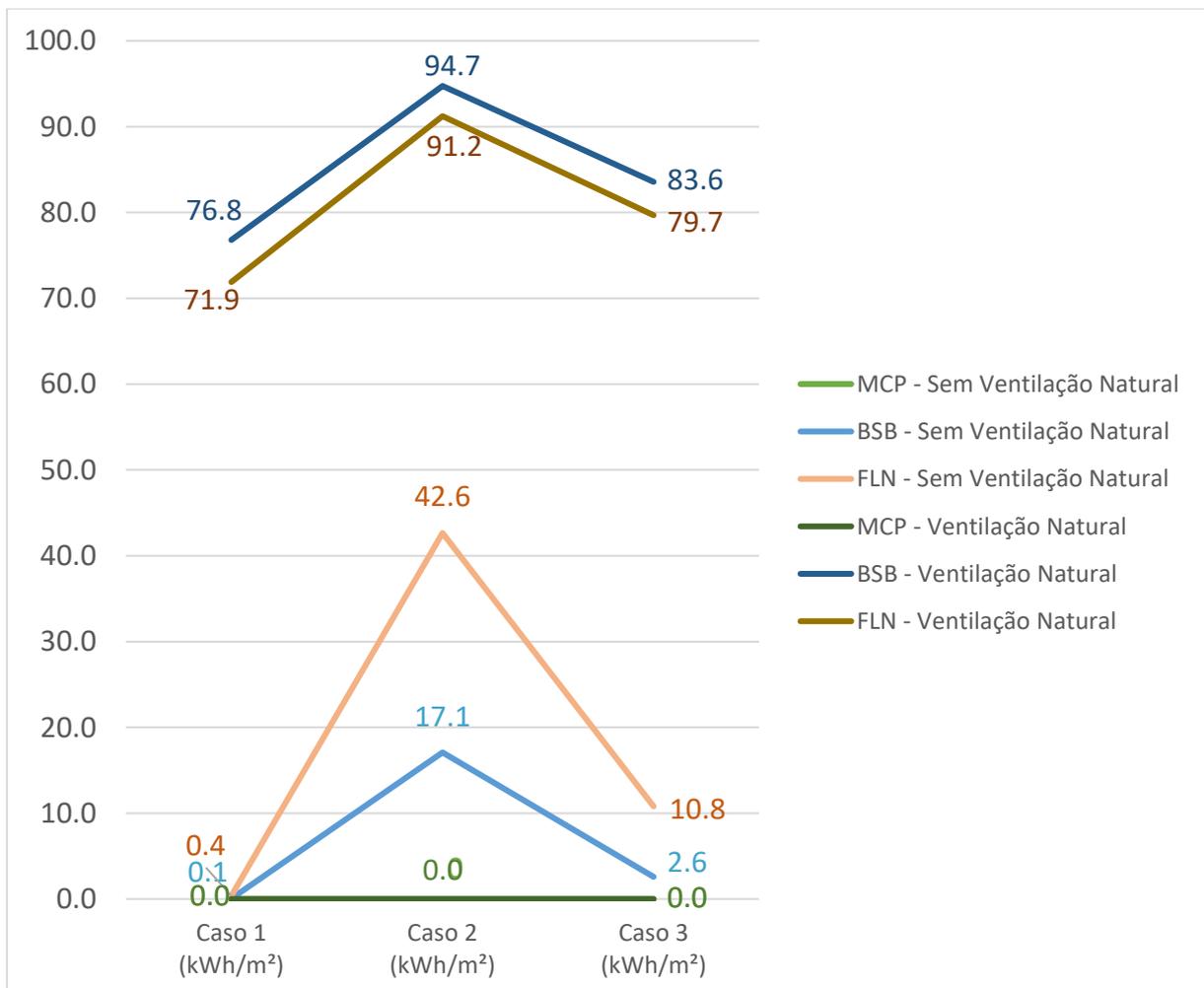
Há ainda uma comparação entre os Casos 1 e 3, nela os Cenários sem operação de janelas seguem a tendência de aumento do consumo do primeiro para o último Caso, isso pode se justificar pela inserção do ar na temperatura externa, gerando maior consumo para os

climatizadores alcancem os 24°C. Os resultados com VN demonstram que Brasília mantém a lógica, no entanto, Macapá e Florianópolis apresentam redução do consumo no Caso 3.

4.2.3 Caracterização das cargas para resfriamento e aquecimento

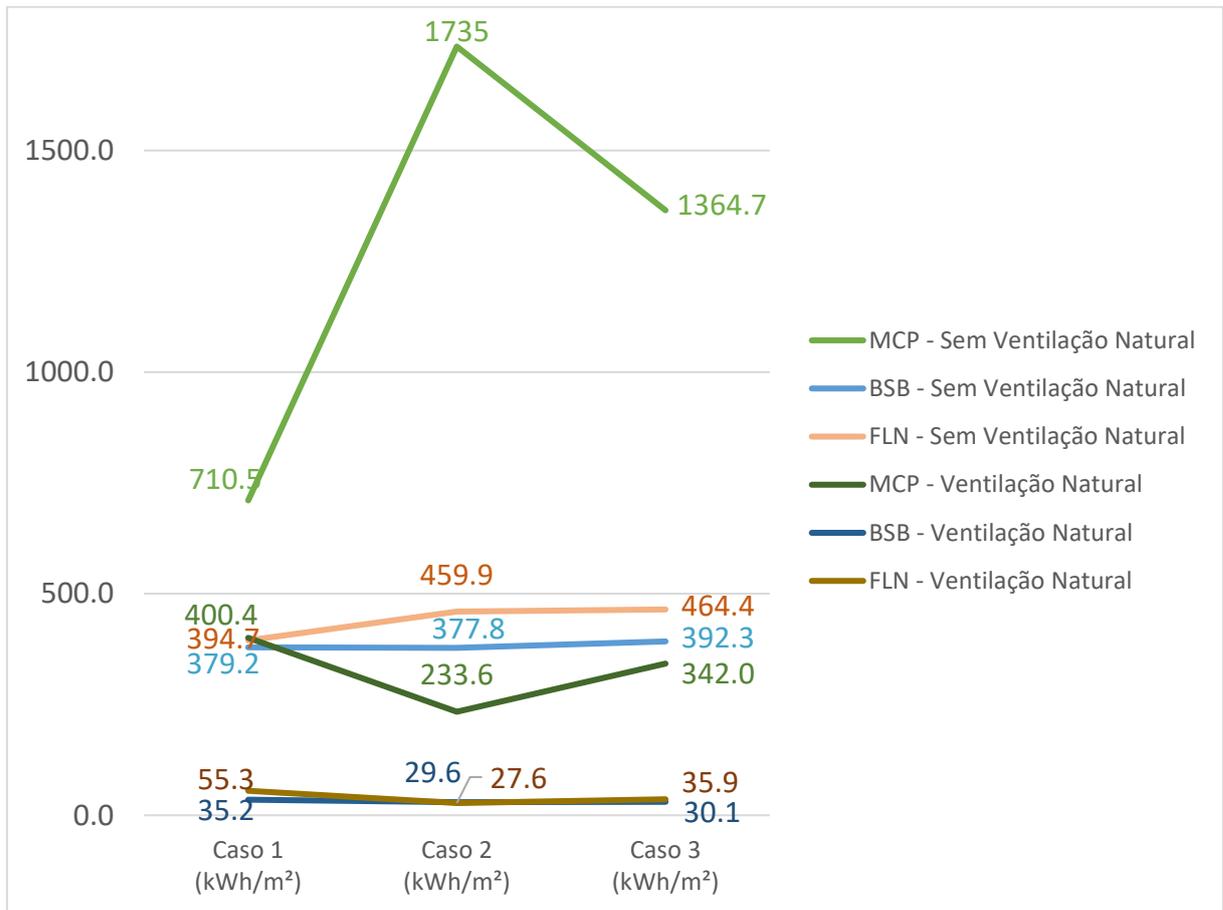
A caracterização do consumo energético de acordo com as cargas para aquecimento (Figura 39) e resfriamento (Figura 40) indicam que Macapá não possui consumo para aquecimento e possui o maior consumo para resfriamento em todos os cenários. Florianópolis e Brasília apresentam maior consumo para resfriamento nos Cenários sem VN, situação se inverte nos Cenários com VN.

Figura 39 - Consumo energético para aquecimento



Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

Figura 40 - Consumo energético para resfriamento

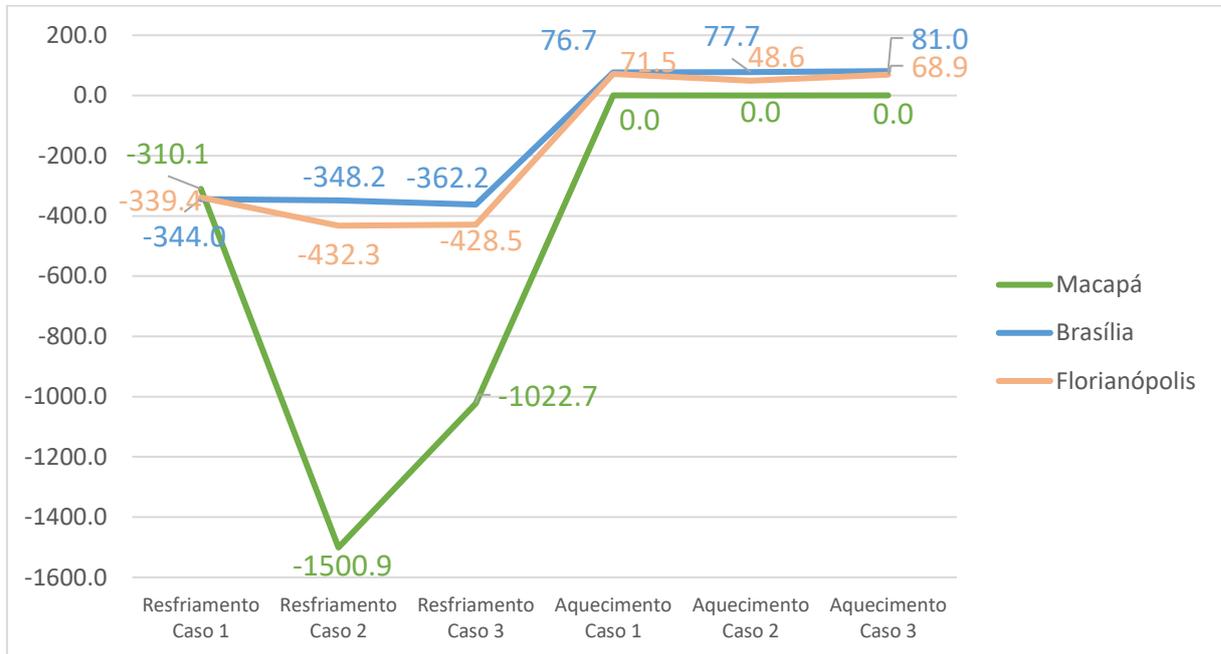


Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

4.2.3.1 Impacto do uso do modo misto para o consumo energético detalhado

Ao comparar os Cenários sem VN e com o uso da VN (Figura 41), é possível perceber que há redução no consumo para resfriamento em todas as cidades, a cidade de Brasília possui a maior redução no Caso 1, enquanto Macapá apresenta maior redução nos Caso 2 e 3. Nos três casos, Brasília e Florianópolis apresentam aumento no consumo para aquecimento.

Figura 41 - Variação do consumo energético para as cargas de resfriamento e aquecimento ao adotar o Modo Misto



Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

4.2.3.2 Evolução entre os Casos para o consumo energético detalhado

Quando é feita comparação entre casos sem VN é possível perceber que entre o Caso 1 e 2 há aumento do consumo para resfriamento (Figura 40) em Macapá e Florianópolis, enquanto Brasília demonstra pequena redução. Há um aumento no consumo para aquecimento (Figura 39) no caso de Brasília e Florianópolis, Macapá não apresenta valores relevantes.

Ao evoluir os cenários com VN, do Caso 1 para o 2 todas as cidades apresentam redução do consumo para resfriamento (Figura 40), indicando que a inserção da taxa de ventilação mínima contribuiu positivamente nesse aspecto. A inserção dessa ventilação muda a dinâmica interna da sala, auxiliando na retirada do calor interno, e isso pode justificar também o aumento do consumo para aquecimento (Figura 39) nas cidades de Brasília e Florianópolis.

Entre os Casos 2 e 3 sem VN há um decaimento do consumo em resfriamento (Figura 40) para Macapá, mas Brasília e Florianópolis apresentam aumento. Brasília e Florianópolis apresentam redução de consumo para aquecimento (Figura 39). Quando a operação das janelas é ativada (Cenários com VN) há um aumento no consumo para resfriamento (Figura 40) entre o Caso 2 e 3 para todas as cidades, enquanto há uma redução do consumo para aquecimento (Figura 39) em Brasília e Florianópolis.

Entre os Casos 1 e 3 sem VN, todas as cidades apresentam aumento no consumo para resfriamento, e aumento no consumo para aquecimento para Brasília e Florianópolis. A lógica muda ao comparar os Cenários com VN, onde as três cidades demonstram uma redução no consumo para resfriamento e aumenta-se o consumo para aquecimento em Brasília e Florianópolis.

4.3 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

O objetivo principal do trabalho é avaliar o impacto que a inserção de uma taxa mínima para ventilação tem no parâmetro de IAQ e consumo energético para condicionamento térmico. Ao avaliar três cidades diferentes, adotando a estratégia da ventilação híbrida, com e sem o uso da ventilação natural, foi possível encontrar diferentes respostas para cada cenário.

Ao analisar os resultados de cada cenário (Quadro 11) é possível dizer, a partir dos critérios estabelecidos, que os cenários de Modo Misto apresentaram a melhor performance quando se busca o atendimento dos percentuais de IAQ e o menor consumo energético, dos quais Brasília e Florianópolis tiveram o melhor resultado no Caso 3 e Macapá no Caso 2.

Quadro 11 - Resultados de cada Cenário

	Macapá		Brasília		Florianópolis	
Caso 1	SN	CN	SN	CN	SN	CN
Caso 2	SN	CN	SN	CN	SN	CN
Caso 3	SN *	CN	SN *	CN	SN *	CN
Legenda	Não atende aos critérios de IAQ		Atende aos critérios de IAQ		Atende aos critérios de IAQ e possui o menor consumo energético	

* Cenários sem VN com atendimento aos critérios de IAQ e menor consumo energético

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Os cenários sem a operação das janelas seguiram os resultados previstos para todas as cidades, nos quais o Caso 1 não atende aos critérios de IAQ e tem o menor consumo; o Caso 2 atende aos critérios de IAQ e tem uma elevação no consumo energético total; e o Caso 3,

buscando uma estratégia de redução do consumo energético, mantém o atendimento aos critérios de IAQ, enquanto há uma redução do consumo total, com exceção de Brasília que manteve o valor.

Ao tratar dos cenários com Ventilação natural em Macapá, o Caso 1 não atendeu aos critérios de IAQ e teve o segundo maior consumo; o Caso 2 se destacou como o melhor cenário, atendendo aos critérios de IAQ e atingindo o menor consumo; seguido pelo Caso 3 com atendimento dos critérios de IAQ e indicando um consumo maior que o Caso 2. O melhor resultado obtido para Macapá foi o Caso 2 com VN associada a inserção da taxa mínima sem o controle de ventilação pela demanda de ocupação (DCV).

A partir desses resultados pondera-se a importância da ventilação para a retirada do calor do ambiente principalmente em climas com elevadas temperaturas como Macapá. A inserção da taxa mínima multiplicada pelo número de ocupantes total durante todo o período de ocupação demonstrou a importância dessa estratégia não somente para a redução da probabilidade de infecção por doenças relacionadas ao IAQ, mas também para melhoria do condicionamento térmico. Isso ficou mais evidente quando Macapá obteve um resultado com consumo mais elevado quando essa taxa de ventilação foi reduzida no Caso 3 (Com o uso da estratégia de DCV). Dessa forma, a estratégia de DCV por ocupação para Macapá, com a estrutura de simulação apresentada, não representa uma estratégia eficaz para redução do consumo energético o que difere dos resultados encontrados em pesquisas que adotam o DCV (BELMONTE; BARBOSA; ALMEIDA, 2019; CHENARI et al., 2017; O'NEILL et al., 2020), o que pode indicar que mais pesquisas precisem abordar climas com temperaturas mais elevadas.

Os resultados dos cenários de ventilação natural indicaram que Brasília não atendeu aos critérios de IAQ em 100% do tempo no Caso 1 e teve seu menor consumo nesse cenário; o Caso 2 atendeu aos critérios de IAQ e alcançaram o maior consumo; e o Caso 3 com melhor desempenho atendendo aos critérios de IAQ e resultando em um menor consumo. Florianópolis também não atende aos critérios de IAQ no Caso 1 e tem o maior consumo; No Caso 2 passa a atender aos níveis de IAQ, reduzindo o consumo em relação ao cenário anterior; e por fim, o Caso 3 mantém o atendimento dos critérios de IAQ e estabelece o menor consumo. Brasília e Florianópolis obtiveram o melhor resultado com a ventilação controlada por demanda, considerando os dois critérios, em todos os casos e esses resultados estão alinhados com os encontrados por Chenari et al. (2017).

O Modo Misto demonstra capacidade de economia no consumo energético ao adotar a lógica de aberturas das janelas e acionamento do ar condicionado de acordo com o conforto adaptativo da ASHRAE (2017). Esse resultado entra em acordo com trabalhos (AL-RASHIDI; LOVEDAY; AL-MUTAWA, 2012; DUARTE; GOMES; RODRIGUES, 2017; OLIVEIRA; RUPP; GHISI, 2021) que utilizaram esse sistema adotando o termo ventilação híbrida.

Os cenários com VN indicam uma elevação em todos os cenários das médias de ACHs, porém esse aumento no fluxo de ar não indica uma melhor performance em relação ao IAQ. A taxa de fluxo constante estabelecida nos casos 2 e 3 mostram o impacto positivo que a ventilação mecânica pode ter, no entanto, os cenários com a ventilação híbrida com elevadas taxas médias de ACHs devem ser analisadas com maior cautela, por esse fluxo ser mais intenso em determinados horários e gerar a possibilidade de contaminação cruzada.

As comparações entre os cenários sem e com VN demonstram a diferença de impacto que se pode ter a partir da estratégia de condicionamento térmico que está sendo escolhida. Quando não há operação das janelas (sem VN), o *setpoint* do ar condicionado é 24°C, tentará todo o tempo em que a sala estiver ocupada, alcançar este valor. Porém, com a entrada de ar externo nos casos 2 e 3, esse ar externo possui temperaturas equivalentes às temperaturas externas, propiciando uma situação na qual há uma elevação no consumo tanto para aquecimento quanto resfriamento para manter o *setpoint* em 24°C. Essa lógica não se mantém no Modo Misto (Casos 2 e 3 com uso de VN) pelo *setpoint* ser maior, de acordo com o conforto adaptativo, e assim, o ambiente interno tende a ter temperaturas mais aproximadas da temperatura do ar externo, logo, a entrada dessa taxa constante de fluxo de ar externo tende a retirar calor do ambiente, favorecendo o resfriamento (reduzindo seu consumo) nos períodos com temperaturas mais elevadas e prejudicando o aquecimento nos períodos com temperaturas mais baixas.

A partir dos resultados dos cenários sem VN, é possível indicar que a taxa média de 9 trocas de ar por hora, essa troca sendo constante, na configuração da sala e padrão de ocupação apresentado, é suficiente para atendimento dos critérios de IAQ analisados 100% do tempo, mantendo bons padrões de qualidade interna do ar.

5 CONCLUSÃO

No contexto pós-pandêmico atual, a pesquisa realizada aponta resultados positivos para taxas de ar inseridos no modelo simulado equivalentes a 10 L/s para cada pessoa presente no ambiente, proporcionando a manutenção de níveis aceitáveis de IAQ durante todo o período de ocupação no padrão de escolas do FNDE no contexto de Macapá, Brasília e Florianópolis. Essa taxa consegue reduzir a probabilidade de infecção pelo vírus da COVID-19, mantém a concentração de CO₂ para não ultrapassar 800 ppm.

O modo misto (ventilação híbrida) demonstrou uma resposta positiva quando utilizada com inserção de taxas constantes de ar externo (10 L/s por pessoa) no ambiente para manutenção dos níveis aceitáveis de IAQ e para redução da carga ideal para condicionamento térmico. Somente a ventilação natural (Caso 1 com VN) sem a garantia de taxas constantes de ar externo limpo sendo inserido no ambiente não conseguem garantir níveis aceitáveis de IAQ 100% do tempo.

Os cenários sem VN seguiram os resultados previstos para todas as cidades. Não atendendo os critérios de IAQ no Caso 1 sem inserção mecânica de ar externo, atendendo aos critérios de IAQ a partir do Caso 2 ao inserir a ventilação mecânica com elevação do consumo energético e o Caso 3 como estratégia de redução do consumo energético, mantém o atendimento aos níveis de IAQ e reduz o consumo para condicionamento térmico.

Porém os resultados não mantiveram essa lógica quando a ventilação natural ocorreu, o que demonstra que a operação das janelas e a adaptação ao clima inserido é essencial para a avaliação da qualidade interna do ar nesse modelo analisado do padrão de escolas do FNDE. Macapá teve seu melhor desempenho (atendendo aos critérios de IAQ e menor consumo) quando é inserida a taxa constante de ar (Caso 2). e Brasília e Florianópolis quando é inserida a taxa de ar e há o uso do DCV (Caso 3).

Em Macapá, o Caso com a inserção da taxa mínima demonstrou a importância dessa estratégia não somente para a redução da probabilidade de infecção por doenças relacionadas à qualidade interna do ar, mas também para melhoria do condicionamento térmico (reduzindo o consumo para resfriamento), quando há um fluxo constante que não varia de acordo com a ocupação (DCV). Enquanto Brasília e Florianópolis enfrentaram variações ao analisar a caracterização do consumo para aquecimento e resfriamento, indicando que a inserção de ar deve ser avaliada cuidadosamente, por implicar no aumento do consumo para aquecimento e redução no consumo para resfriamento.

É possível indicar, com esses resultados, que escolas que adotem climatização 100% do tempo ou que utilizem da ventilação natural sem um dispositivo que possa inserir taxas constantes de ar iguais a 10 L/s para cada pessoa estão suscetíveis a não manutenção de níveis aceitáveis de IAQ. De acordo com o número de estudantes, sem considerar o padrão de ocupação por horário, é possível indicar que uma taxa de fluxo constante de ar que proporcione 9 trocas de ar por hora pode alcançar os níveis aceitáveis de IAQ.

5.1 LIMITAÇÕES E INCERTEZAS

O modelo assume características e limitações presentes na calculadora de covid, logo os quanta são emitidos a uma taxa constante durante todo o evento - para fins de dimensionamento da ventilação (capacidade), presumimos que pessoas infectadas (uma pessoa) estão presente e permanecem na sala durante todo o evento. Em caso de mistura completa, o aerossol respiratório infeccioso rapidamente se distribui uniformemente por todo o ar ambiente bem misturado. Os quanta infecciosos são removidos por ventilação, filtração, deposição e decomposição do vírus transportado pelo ar. O modelo opera com probabilidade individual de infecção de pessoas suscetíveis para as quais valores aceitáveis podem ser calculados a partir do número de reprodução do evento (REHVA, 2022). Além disso, o número de horas de permanência no ambiente foi de 6 horas, como uma projeção de avaliação a cada hora, visto que considerar a análise como hora a hora, invalidaria a lógica da calculadora e a forma como o vírus pode se espalhar, acumular e se depositar nas superfícies.

O trabalho assume a distribuição completa do ar do ambiente também pelo programa *EnergyPlus*, avalia-se a necessidade de uma análise mais aprofundada por um programa CFD, para melhor garantia dos resultados aqui obtidos.

5.2 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Recomenda-se como trabalhos futuros a avaliação das estratégias adotadas em um cenário com medição real; avaliação das estratégias adotadas em um programa de CFD para análise da dispersão do vírus no espaço simulado; ajuste da quantidade de ar inserido nos períodos mais frios em climas temperados, como mostra as diretrizes do Documento orientativo REHVA COVID-19 (REHVA, 2021) é possível manter a taxa constante em 0,8 L/s para cada pessoa, avaliar o impacto dessas estratégias em outras cidades e configurações de ambientes escolares,

avaliar outros padrões de operação das janelas e acionamento dos dispositivos de climatização mais aproximados da realidade em escolas da rede pública.

REFERÊNCIAS

- ABNT. NBR15220-3-2005: Desempenho térmico de edificações - Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**, p. 1–23, 2005.
- ABNT. NBR 16401-3: Instalações de ar-condicionado — Sistemas centrais e unitários Parte 3: Qualidade do ar interior. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**, p. 8, 2008.
- AL-RASHIDI, K.; LOVEDAY, D.; AL-MUTAWA, N. Impact of ventilation modes on carbon dioxide concentration levels in Kuwait classrooms. **Energy and Buildings**, v. 47, p. 540–549, 2012.
- ALBERTS, W. M. Indoor air pollution : NO , NO 2 , CO , and CO. **The Journal of Allergy and Clinical Immunology**, n. 2, p. 289–295, 1994.
- ALVARES, C. A. et al. Köppen’s climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.
- ANVISA. **Resolução - RE nº 9: Qualidade do ar interior em ambientes climatizados artificialmente de uso público e coletivo**, 2003a.
- ANVISA. **Orientação técnica elaborada por grupo técnico assessor sobre padrões referenciais de qualidade do ar interior em ambientes climatizados artificialmente de uso público e coletivo**. 2003b.
- ANVISA. **Guia da Qualidade para Sistemas de Tratamento de Ar e Monitoramento Ambiental na Indústria Farmacêutica**. p. 56, 2013.
- ARAÚJO, M. L. T. DE. **AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO TÉRMICO EM CRECHE DO PROGRAMA PROINFÂNCIA NAS ZONAS BIOCLIMÁTICAS BRASILEIRAS**. 2019.
- ASHRAE. AMERICAN SOCIETY OF HEATING REFRIGERATING AND AIR CONDITIONING ENGINEERS (ASHRAE). Standard 62.1. **Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality**. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. Atlanta. 2007.
- ASHRAE. American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE). Standard 55. Thermal environmental conditions for human occupancy. **ANSI/ASHRAE Standard - 55**, v. 7, p. 6, 2017.
- ASHRAE. AMERICAN SOCIETY OF HEATING REFRIGERATING AND AIR

CONDITIONING ENGINEERS (ASHRAE). Standard 62.1. **Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality**. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. Atlanta. 2019.

AVIV, D. et al. A fresh (air) look at ventilation for COVID-19: Estimating the global energy savings potential of coupling natural ventilation with novel radiant cooling strategies. **Applied Energy**, v. 292, n. February, p. 116848, 2021.

BAKÓ-BIRÓ, Z. et al. **Ventilation rates in schools and pupils' performance**. Proceedings of Clima. **Anais...2007**

BAKÓ-BIRÓ, Z. et al. Ventilation rates in schools and pupils' performance using computerised assessment tests. **Indoor Air**, n. August, p. 17–22, 2008.

BAKÓ-BIRÓ, Z. et al. Ventilation rates in schools and pupils' performance. **Building and Environment**, v. 48, n. 1, p. 215–223, 2012.

BATESON, T. F.; SCHWARTZ, J. Children's response to air pollutants. **Journal of Toxicology and Environmental Health - Part A: Current Issues**, v. 71, n. 3, p. 238–243, 2008.

BAVARESCO, M. V. et al. Classificação de climas brasileiros empregada na atualização dos Regulamentos Técnicos da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações. **Universidade Federal de Santa Catarina**, p. 8, 2017.

BELMONTE, J. F.; BARBOSA, R.; ALMEIDA, M. G. CO₂ concentrations in a multifamily building in Porto, Portugal: Occupants' exposure and differential performance of mechanical ventilation control strategies. **Journal of Building Engineering**, v. 23, n. October 2018, p. 114–126, 2019.

BEN-DAVID, T.; WARING, M. S. Impact of natural versus mechanical ventilation on simulated indoor air quality and energy consumption in offices in fourteen U.S. cities. **Building and Environment**, v. 104, p. 320–336, 2016.

BENDER, L. Guidance for COVID-19 Prevention and Control. **IASC: Inter-Agency Standing Committee**, n. March, p. 1–13, 2020.

BENNETT, J. et al. Sources of indoor air pollution at a New Zealand urban primary school; a case study. **Atmospheric Pollution Research**, v. 10, n. 2, p. 435–444, 2019.

BRAGA, A. et al. Poluição atmosférica e saúde humana. **Revista USP**, v. 0, n. 51, p. 58, 2001.

BUONANNO, G.; MORAWSKA, L.; STABILE, L. Quantitative assessment of the risk of airborne transmission of SARS-CoV-2 infection: Prospective and retrospective applications. **Environment International**, v. 145, n. September, p. 106112, 2020.

BUONOCORE, C. DE O. **Análise das condições de conforto térmico no clima quente e úmido de São Luís (MA): estudos de campo em salas de aula naturalmente ventiladas e climatizadas.** p. 203, 2018.

CARMO, A. T.; PRADO, R. T. A. Qualidade do Ar Interno. **Controle da Poluição Atmosférica**, p. 1–37, 1999.

CHATZIDIAKOU, L.; MUMOVIC, D.; SUMMERFIELD, A. Is CO₂ a good proxy for indoor air quality in classrooms? Part 1: The interrelationships between thermal conditions, CO₂ levels, ventilation rates and selected indoor pollutants. **Building Services Engineering Research and Technology**, v. 36, n. 2, p. 129–161, 2015.

CHENARI, B. et al. Simulation of Occupancy and CO₂-based Demand-controlled Mechanical Ventilation Strategies in an Office Room Using EnergyPlus. **Energy Procedia**, v. 113, p. 51–57, 2017.

CHITHRA, V. S.; SHIVA NAGENDRA, S. M. A review of scientific evidence on indoor air of school building: Pollutants, sources, health effects and management. **Asian Journal of Atmospheric Environment**, v. 12, n. 2, p. 87–108, 2018.

COCH, H. Bioclimatism in vernacular architecture. **Renewable & sustainable energy reviews**, v. 2, n. 1–2, p. 67–87, 1998.

Combatting An Invisible Killer: New WHO Air Pollution Guidelines Recommend Sharply Lower Limits. Disponível em: <https://givingcompass.org/article/combating-an-invisible-killer-new-who-air-pollution-guidelines-recommend-sharply-lower-limits/?gclid=CjwKCAiA7dKMBhBCEiwAO_crFABVJF5LCz9mm9p75Ch7KGmwOlrypUJkWNELyCrzXoxuJq9MOXT-RxoCqM0QAvD_BwE>. Acesso em: 19 nov. 2021.

CONTRIBUIDORES DO OPENSTREETMAP. **US EPA PM_{2.5} AQI.** Disponível em: <<https://map.purpleair.com/1/a/lb/mAQI/a1440/p2592000/cC0?select=102456#12.51/0.01739/-51.07427>>. Acesso em: 12 nov. 2021.

DE VECCHI, R. **Condições de conforto térmico e aceitabilidade do ar em salas de aula com ventiladores de teto para o clima de Florianópolis/SC.** p. 142pp, 2011.

DOE, U. S. Input Output Reference. **The Encyclopedic Reference to EnergyPlus Input and Output**, n. c, p. 1996–2016, 2021.

DORNELLES, K. A. **Biblioteca de absorvância de telhas: base de dados para análise de desempenho termoenergético de edifícios.** [s.l: s.n.].

DUARTE, R.; GOMES, M. DA G.; RODRIGUES, A. M. Classroom ventilation with manual opening of windows: Findings from a two-year-long experimental study of a Portuguese secondary school. **Building and Environment**, v. 124, p. 118–129, 2017.

ELI, L. G. et al. **Manual de Simulação Computacional de Edifícios com o Uso do Objeto Ground Domain no Programa EnergyPlus - Versão 9.0.1.** 2019.

ELI, L. G. **O Impacto Do Padrão De Uso No Desempenho Térmico De Edificações Unifamiliares No Brasil.** p. 98, 2020.

ELSAID, A. M.; AHMED, M. S. Indoor Air Quality Strategies for Air-Conditioning and Ventilation Systems with the Spread of the Global Coronavirus (COVID-19) Epidemic: Improvements and Recommendations. **Environmental Research**, v. 199, n. February, p. 111314, 2021.

FERREIRA, A. M. DA C.; CARDOSO, M. Qualidade do ar interno e saúde em escolas. **Jornal Brasileiro de Pneumologia**, v. 40, n. 3, p. 259–268, 2014.

FNDE. Memorial Descritivo e Especificações Técnicas. n. 51, p. 1–20, 2015.

FNDE. **Fundo Nacional de Desenvolvimento da Educação.** Disponível em: <<https://www.fnde.gov.br/aceso-a-informacao/institucional>>. Acesso em: 3 nov. 2021a.

FNDE. **Fundo Nacional de Desenvolvimento da Educação - Proinfância.** Disponível em: <FNDE. Fundo Nacional de Desenvolvimento da Educação - Proinfância.>.

FNDE, © 2017. **INFRAESTRUTURA FISICA (ESCOLAR).** Disponível em: <<https://www.fnde.gov.br/programas/par/eixos-de-atuacao/infraestrutura-fisica-escolar>>.

FROTA, A. B.; SCHIFFER, S. R. **Manual do Conforto Térmico.** p. 243, 2001.

GONZALES, T. S. et al. **Dissertação de Mestrado Integração de Estratégias Passivas de Climatização em Escolas no Contexto Climático de Brasília (DF).** 2021.

GONZÁLEZ, J. N. **La arquitectura bioclimática en un entorno sostenible.** [s.l.] Munilla-Lería, 2004.

[HTTPS://AIR.PLUMELABS.COM/AIR-QUALITY-IN-BRASÍLIA-EYSY](https://air.plumelabs.com/air-quality-in-brasilia-eyss). **Qualidade do ar em Brasília.** Disponível em: <<https://air.plumelabs.com/air-quality-in-Brasília-eyss>>. Acesso em: 15 nov. 2021.

[HTTPS://AIR.PLUMELABS.COM/AIR-QUALITY-IN-FLORIANÓPOLIS-EWWF](https://air.plumelabs.com/air-quality-in-florianopolis-ewwf). **Qualidade do ar em Florianópolis.** Disponível em: <<https://air.plumelabs.com/air-quality-in-Florianópolis-ewwf>>. Acesso em: 15 nov. 2021.

[HTTPS://AIR.PLUMELABS.COM/AIR-QUALITY-IN-MACAPÁ-EFSS](https://air.plumelabs.com/air-quality-in-macapá-efss). **Qualidade do ar em Macapá.** Disponível em: <<https://air.plumelabs.com/air-quality-in-Macapá-efss>>. Acesso em: 15 nov. 2021.

HYUN, S. H.; PARK, C. S.; AUGENBROE, G. L. M. Analysis of uncertainty in natural ventilation predictions of high-rise apartment buildings. **Building Services Engineering Research and Technology**, v. 29, n. 4, p. 311–326, 2008.

INMETRO. **Instrução Normativa Inmetro para a Classificação de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas**. p. 139, 2021.

American Lung Association; American Medical Association; U.S. Consumer Product Safety Commission; U.S. Environmental Protection Agency. **An Introduction for Health Professionals**. Chicago, Illinois: American Lung Association; EUA: AMA; EUA: U.S. Consumer Product Safety Commission; EUA: EPA 1994.

JEFFE, A. P. M. **Avaliação do Potencial da Ventilação Natural e mecânica para Conforto, renovação do Ar e Eficiência Energética em Ambientes Hospitalares**. [s.l: s.n.].

JENKINS, P. L. et al. Activity patterns of Californians: Use of and proximity to indoor pollutant sources. **Atmospheric Environment Part A, General Topics**, v. 26, n. 12, p. 2141–2148, 1992.

KRAWCZYK, D. A. et al. CO₂ concentration in naturally ventilated classrooms located in different climates—Measurements and simulations. **Energy and Buildings**, v. 129, p. 491–498, 2016.

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. O. R. **Eficiência Energética na Arquitetura**. 3. ed. Rio de Janeiro: [s.n.].

LI, W. et al. Effects of ceiling fans on airborne transmission in an air-conditioned space. **Building and Environment**, v. 198, n. March, p. 107887, 2021.

LIGGETT, R. (UCLA E. D. T. G.; MILNE, M. E. D. T. G. **Climate Consultant 6.0**. 2020.

LOPES, A. F. O. **Da Simulação ao Projeto : avaliação de conforto térmico em ambiente escolar padronizado**. p. 130, 2020.

MAYA, C. M. Efeito da distribuição dos usuários no comportamento da ventilação natural em espaços educativos. 2014.

MELIKOV, A. K.; KACZMARCZYK, J. Air movement and perceived air quality. **Building and Environment**, v. 47, n. 1, p. 400–409, 2012.

MENTESE, S. et al. A long-term multi-parametric monitoring study: Indoor air quality (IAQ) and the sources of the pollutants, prevalence of sick building syndrome (SBS) symptoms, and respiratory health indicators. **Atmospheric Pollution Research**, v. 11, n. 12, p. 2270–2281, 2020.

- MENTEŞE, S. et al. Bacteria and fungi levels in various indoor and outdoor environments in Ankara, Turkey. **Clean - Soil, Air, Water**, v. 37, n. 6, p. 487–493, 2009.
- MENTEŞE, S.; TASDIBI, D. Assessment of residential exposure to volatile organic compounds (VOCs) and carbon dioxide (CO₂). **Global Nest Journal**, v. 19, n. 4, p. 726–732, 2017.
- MOKHTARI, R.; JAHANGIR, M. H. The effect of occupant distribution on energy consumption and COVID-19 infection in buildings: A case study of university building. **Building and Environment journal**. January, 2020.
- MORAWSKA, L. et al. **A paradigm shift to combat indoor respiratory infection Building ventilation systems must get much better**. 2021.
- MUJAN, I. et al. Influence of indoor environmental quality on human health and productivity - A review. **Journal of Cleaner Production**, v. 217, p. 646–657, 2019.
- NICAS, M.; NAZAROFF, W. W.; HUBBARD, A. Toward understanding the risk of secondary airborne infection: Emission of respirable pathogens. **Journal of Occupational and Environmental Hygiene**, v. 2, n. 3, p. 143–154, 2005.
- NOAKES, C. J.; ANDREW SLEIGH, P. Mathematical models for assessing the role of airflow on the risk of airborne infection in hospital wards. **Journal of the Royal Society Interface**, v. 6, n. SUPPL. 6, 2009.
- O'NEILL, Z. D. et al. Energy savings and ventilation performance from CO₂-based demand controlled ventilation: Simulation results from ASHRAE RP-1747 (ASHRAE RP-1747). **Science and Technology for the Built Environment**, v. 26, n. 2, p. 257–281, 2020.
- OLIVEIRA, C. C. DE; RUPP, R. F.; GHISI, E. Influence of environmental variables on thermal comfort and air quality perception in office buildings in the humid subtropical climate zone of Brazil. **Energy and Buildings**, v. 243, p. 110982, 2021.
- OMRANI, S. et al. Ceiling fans as ventilation assisting devices in buildings: A critical review. **Building and Environment**, v. 201, n. February, p. 108010, 2021.
- OROPEZA-PEREZ, I.; OSTERGAARD, P. A. Energy saving potential of utilizing natural ventilation under warm conditions - A case study of Mexico. **Applied Energy**, v. 130, p. 20–32, 2014.
- PASSARELLI, G. R. Sick building syndrome: An overview to raise awareness. **Journal of Building Appraisal**, v. 5, n. 1, p. 55–66, 2009.
- PENG, Z.; DENG, W.; TENORIO, R. Investigation of indoor air quality and the identification of influential factors at primary schools in the north of China. **Sustainability (Switzerland)**, v. 9, n. 7, 2017.

PERERA, F. Pollution from fossil-fuel combustion is the leading environmental threat to global pediatric health and equity: Solutions exist. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 15, n. 1, 2018.

Plume Labs. Disponível em: <<https://plumelabs.com/en/>>.

PULIMENO, M. et al. Indoor air quality at school and students' performance: Recommendations of the UNESCO Chair on Health Education and Sustainable Development & the Italian Society of Environmental Medicine (SIMA). **Health Promotion Perspectives**, v. 10, n. 3, p. 169–174, 2020.

PUNGERCAR, V. et al. A new retrofitting strategy for the improvement of indoor environment quality and energy efficiency in residential buildings in temperate climate using prefabricated elements. **Energy and Buildings**, v. 241, p. 110951, 2021.

Purple air. Disponível em: <<https://www2.purpleair.com/>>. Acesso 12 nov. 2021

RACKES, A.; MELO, A. P.; LAMBERTS, R. Naturally comfortable and sustainable: Informed design guidance and performance labeling for passive commercial buildings in hot climates. **Applied Energy**, v. 174, p. 256–274, 2016.

REHVA. **REHVA COVID-19 guidance document**. 2021.

REHVA. **COVID-19 Ventilation Calculator documentation**. 2022.

RODRIGUES, F. **Avaliação da qualidade do ar interior em salas de aulas sem sistema AVAC**. p. 96, 2013.

ROMERO, M. A. B. **Principios bioclimaticos para o desenho urbano**. 2001.

SARBU, I.; SEBARCHIEVICI, C. Aspects of indoor environmental quality assessment in buildings. **Energy and Buildings**, v. 60, p. 410–419, 2013.

SATISH, U. et al. Is CO₂ an indoor pollutant? direct effects of low-to-moderate CO₂ concentrations on human decision-making performance. **Environmental Health Perspectives**, v. 120, n. 12, p. 1671–1677, 2012.

SEKHAR, C. et al. Bedroom ventilation: Review of existing evidence and current standards. **Building and Environment**, v. 184, n. August, p. 107229, 2020.

SHEN, J. et al. A systematic approach to estimating the effectiveness of multi-scale IAQ strategies for reducing the risk of airborne infection of SARS-CoV-2. n. January, 2020.

STERNBERG, R. **Psicologia Cognitiva**. [s.l: s.n.].

TWARDELLA, D. et al. Effect of classroom air quality on students' concentration: Results of a cluster-randomized cross-over experimental study. **Indoor Air**, v. 22, n. 5, p. 378–387, 2012.

US EPA. Indoor Air Facts No. 4 Sick Building Syndrome. **EPA - Air & Radiation (6609J), Research and Development (MD-56)**, p. 1–4, 1991.

US EPA. **Air Quality and Outdoor Activity Guidance for Schools Air Quality Index Outdoor Activity Guidance**. 2014.

US EPA. **Air Quality Guide for Particle Pollution**. p. 1–2, 2015.

US EPA. Technical Assistance Document for the Reporting of Daily Air Quality – the Air Quality Index (AQI). **Environmental Protection**, p. 22, 2018.

VALDERRAMA-ULLOA, C. et al. Indoor environmental quality in latin american buildings: A systematic literature review. **Sustainability (Switzerland)**, v. 12, n. 2, p. 1–19, 2020.

WANG, C. et al. How indoor environmental quality affects occupants' cognitive functions: A systematic review. **Building and Environment**, v. 193, n. September 2020, p. 107647, 2021.

WHO. **Initiating an Alliance for Action**. p. 1–30, 2002.

WHO. **Air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide: Global update 2005**. p. 1–21, 2005.

WHO. Natural ventilation for infection control in health-care settings. **World Health Organization**, p. 1–133, 2009.

WHO. **Roadmap to improve and ensure good indoor ventilation in the context of COVID-19**. 2021.

YANG, J. et al. Energy performance model development and occupancy number identification of institutional buildings. **Energy and Buildings**, v. 123, p. 192–204, 2016.

YU, S.; HE, L.; FENG, G. The Transient Simulation of Carbon Dioxide Emission from Human Body Based on CONTAM. **Procedia Engineering**, v. 121, p. 1613–1619, 2015.

APÊNDICE A – ESTRUTURA DE SIMULAÇÃO NO GRASSHOPPER

