O IMPACTO DA RENOVAÇÃO DO AR NA QUALIDADE INTERNA DO AR E NO CONDICIONAMENTO TÉRMICO DE SALAS DE AULA

Tiago Vieira Pereira (1), Veridiana Atanasio Scalco (2), Caio Frederico e Silva (3).
(1) Mestre, Arquiteto e Urbanista, tiagovp03@gmail.com, Laboratório de Conforto Ambiental (LabCon), Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC)
(2) Doutora, Arquiteta e Urbanista, veridi@gmail.com, Laboratório de Conforto Ambiental (LabCon), Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC)
(3) Doutor, Professor da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da UnB, caiosilva@unb.br, Universidade de Brasilia (UnB)

RESUMO
Esta pesquisa tem como objetivo avaliar o impacto que a inserção de uma taxa de ventilação constante pode ter na Qualidade Ineterna do Ar (IAQ) e no consumo de energia para condicionamento térmico. O método experimental avalia uma sala de aula padrão brasileira de escolas do Fundo Nacional de Desenvolvimento da Educação - FNDE por meio de simulação computacional na cidade de Florianópolis-SC. Adotou-se o programa EnergyPlus inserido no Grasshopper por meio do plugin Honeybee e estabeleceu-se como critérios de avaliação as cargas ideais para condicionamento térmico e um percentual de horas em IAQ. Este critério foi subdividido em 2: Calculadora COVID e concentração de CO_2 em ppm. Por meio da simulação, foi avaliada a inserção de uma taxa de ventilação constante baseada em diretrizes voltadas para o controle da pandemia de COVD-19 (10 L/s para cada pessoa) e a ventilação controlada por demanda (DCV). Os resultados indicam que os cenários de ventilação natural (VN) apresentam menor consumo de energia e o modo misto apresenta os melhores resultados em ambos os critérios. O melhor resultado foi com DCV e somente taxa de ventilação constante pode garantir IAQ 100% do tempo.

Palavras-chave: IAQ, Simulação computacional, Simulação energética, Covid-19, Escolas brasileiras.

ABSTRACT
This research aims to evaluate the impact the insertion of a constant ventilation rate can have on Indoor Air Quality (IAQ) and energy consumption for thermal conditioning. The experimental method evaluates a Brazilian standard classroom of schools of the National Fund for the Development of Education - FNDE through computer simulation in the city of Florianópolis-SC. The EnergyPlus program inserted in the grasshopper through the Honeybee plugin was adopted and the ideal loads for thermal conditioning and a percentage of hours in IAQ are established as evaluation criteria. This criterion has been subdivided into 2: COVID Calculator and CO_2 concentration in ppm. The simulations evaluated the impact of inserting a constant ventilation rate based on guidelines aimed at controlling the COVID-19 pandemic (10 L/s for each person) and the demanded control ventilation (DCV). The results indicate the natural ventilation (NV) scenarios have lower energy consumption and mixed-mode has the best results in both criteria. The best result was with DCV and only constant ventilation rate can guarantee IAQ 100% of the time.

Keywords: IAQ, Computational simulation, Energy simulation, Covid-19, Brazilian schools.

1. INTRODUÇÃO

Ambientes internos possuem maior probabilidade de contaminação, em função da limitada renovação do ar, que pode variar de acordo com sua tipologia, taxa de ocupação, suas aberturas, entre outros fatores (REHVA, 2021; WHO, 2021). O aumento da vedação entre o ambiente interno e externo pode causar aumento nas concentrações de CO_2 em ambientes internos, gerando diminuição da qualidade do ar interno (Indoor Air Quality – IAQ), devido ao aumento de partes por milhão (PPM) e está associado à liberação de agentes biológicos na expiração (ABNT, 2008; PENG e colab., 2017).

Quando o IAQ se relaciona com o conforto térmico, é estabelecida uma relação de interdependência, na qual fatores de geometria (tamanho, orientação, parede externa) ou ocupação (comportamento e densidade) influenciarão significativamente os aspectos relacionados ao conforto e à saúde, caracterizando uma avaliação que pode ser entendida como Qualidade do ambiente interno (*Indoor Environment Quality* – IEQ) (MUJAN et al., 2019; PUNGERCAR et al., 2021). Os cenários pós-covid apontam para uma maior preocupação com a salubridade dos ambientes de trabalho, na produção de espaços mais preocupados com a IEQ (PUNGERCAR e colab., 2021).

Uma ventilação adequada em ambientes interiores é um fator determinante para garantir uma boa qualidade do ar e evitar a propagação de doenças transmitidas pelo ar (MENTEŞE e colab., 2009; OLIVEIRA e colab., 2021). O aumento da velocidade do vento não só impacta na qualidade do ar, como também influencia na taxa de transferência de calor por convecção e acelera a evaporação do suor, resultando em uma sensação térmica mais fresca, melhorando a satisfação dos ocupantes com a percepção do ar e conforto térmico (OMRANI e colab., 2021).

Quando as temperaturas são muito baixas, a ventilação natural (VN) como forma de melhorar o IAQ pode prejudicar os níveis de conforto térmico, enquanto a introdução da ventilação mecânica (MV) é indicada como garantia efetiva do IAQ (DUARTE e colab., 2017; PENG e colab., 2017). Há assim um direcionamento para a utilização da ventilação híbrida que se destaca como uma alternativa eficaz e é abordada em estudos que visam estabelecer alternativas econômicas para melhorar a qualidade do ambiente interno por meio do conforto ambiental e da QAI (AL-RASHIDI e colab., 2012; DUARTE e colab., 2017).

Ao abordar questões econômicas, como o custo-benefício dos sistemas HVAC, é possível encontrar na literatura o conceito de ventilação controlada por demanda (DCV) (BELMONTE e colab., 2019; CHENARI e colab., 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 diariamente. No estudo Chenari et al. (2017) os autores apontam que a estratégia DCV tem aspectos positivos no campo da IAQ, permitindo apenas a entrada de ar necessária e para o atendimento das necessidades da IAQ (BELMONTE e colab., 2019; CHENARI e colab., 2017; O'NEILL e colab., 2020).

Há no Brasil políticas públicas voltadas 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. 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 e colab., 2021; LOPES, 2020).

A problemática está relacionada a suposição de baixos níveis de conforto térmico e IAQ no padrão das escolas do FNDE no Brasil. O presente trabalho visa realizar análises computacionais de qualidade do ar interno e cargas ideais para condicionamento térmico para avaliar o impacto que a inserção de taxas de ventilação constantes pode ter nas diferentes regiões analisadas, ao buscar um equilíbrio entre conforto térmico e ventilação para reduzir contaminantes e CO_2, considerando o consumo de energia envolvido.

2. OBJETIVO

Avaliação do impacto da renovação de ar por meio da inserção de taxas constantes de ventilação em salas de aula, considerando a qualidade interna do ar e o consumo energético para condicionamento térmico, no contexto climático de Florianópolis-SC.

3. MÉTODO

A pesquisa se baseia em uma análise qualitativa do ambiente interno por meio de simulações computacionais. A metodologia divide-se tópicos: a caracterização climática, modelo de análise, método de simulação, Cenários, Simulação e indicadores.

3.1 Caracterização climática

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), a capital de Santa Catarina está inserida na ZB3. Segundo a classificação de Köppen-Geiger, a cidade 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. O estudo ocorreu em Florianópolis-SC (Cfb) e a Tabela 1 apresenta as características climáticas.

Tabela 1 – Resumo dos fatores externos.

Latitude	-27,60
Longitude	-48,55
Altitude	2,00m
Classificação de Koppen	Cfb*
Horas de desconforto	Frio - 51%
Temperatura media anual	20,91°C
Humidade relativa	74,75%
Radiação máxima global	24347 Wh/m²
Velocidade do vento	0 e 6,27 m/s

3.1 Modelo de análise

Uma sala de aula, com área de 50,33m², da tipologia de 12 salas das escolas padrão do FNDE foi escolhida como modelo representativo, pois oferece em um único modelo a possibilidade de simulações rápidas, e possui características comuns com outras tipologias. O módulo representativo possui três salas de aula modeladas, um bloco de sombreamento representando outra sala de aula e um bloco de sombreamento representando os banheiros. A sala analisada está localizada entre duas salas, todas padronizadas, e as salas adjacentes foram modeladas para entender a influência mútua entre as cargas dos ambientes e atingir cargas internas mais próximas da realidade. O modelo foi desenvolvido para avaliar cenários e seu impacto nos usuários. A composição dos componentes construtivos está descrita na Tabela 2 conforme indicado por Araújo (2019), pois possui configurações que melhor se adaptam a cada um deste clima.

Tabela 2 – Componentes construtivos.

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

A área de abertura das janelas é de 22% da área útil. Foi adotado vidro simples com fator solar de 0,87 e transmitância térmica de 5,70 W/(m².K). Foi configurada no modelo uma taxa de infiltração equivalente a 0,0006 (m3/s por m² de fachada), considerando-a como uma edificação com vazamento, isso devido as esquadrias brasileiras padronizadas conforme documento de especificação técnica do FNDE (FNDE, 2015) não as especificam isolamento em relação à área externa. As portas foram modeladas como portas comuns de madeira.

A zona térmica tem uma altura de 4,85m. O piso foi modelado em laje de concreto de 10cm e piso cerâmico. E para as trocas de calor com o solo, foi configurado através do método de Finite Difference do objeto Ground Domain, no qual as temperaturas do solo são calculadas de maneira iterativa (ELI e colab., 2019).

3.2 Método de simulação

O método de simulação computacional (Figura 1) adotou uma avaliação qualitativa dos cenários nos aspectos de IAQ e consumo para condicionamento térmico. Foi utilizado o programa Rhino 7.0 como interface gráfica para modelagem e seu plugin Grasshopper para inserção de ferramentas de simulação e processamento de dados. O plugin Honeybee foi adotado nas ferramentas Ladybug (versão 1.5). O programa EnergyPlus (versão 22.1.0) foi adotado como motor de simulação, por ser um programa de código aberto validado, amplamente utilizado em pesquisas e publicações, devido à confiabilidade de seu algoritmo quanto ao comportamento térmico de edificações.

3.3 Cenários

Apresenta-se na Figura 1 os casos que serão analisados, em uma lógica de comparação entre cenários com e sem ventilação natural. O Caso 1 é um caso base, neste caso o Cenário sem ventilação natural usa apenas Ventilação mecânica para condicionamento térmico. No Cenário com ventilação natural, há uma operação de aberturas para fornecer VN quando há possibilidade de condicionamento térmico natural e quando não é alcançado, as cargas ideais para condicionamento foram acionadas e as aberturas são fechadas.

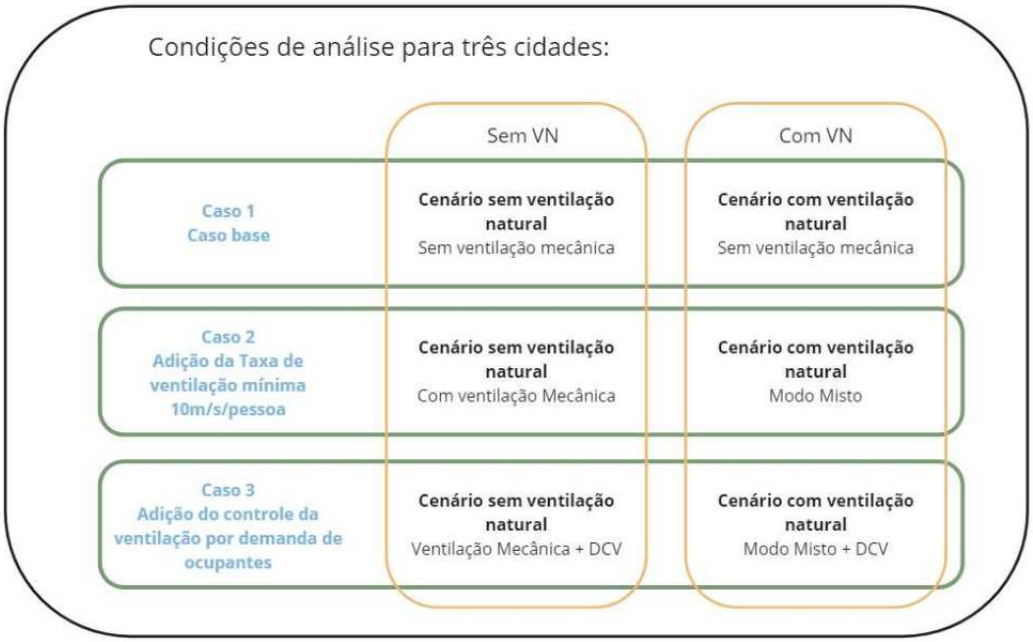


Figura 1 – Cenários de avaliação.

No Caso 2, há a inserção da ventilação mecânica através da taxa mínima de ventilação (10 L/s por pessoa) estabelecida nos documentos da OMS (WHO, 2021) e REHVA (REHVA, 2021), isso considera a constante inserção por o número total de usuários (33 ocupantes) durante todo o período de ocupação. O cenário sem ventilação natural 2 utiliza 100% do tempo as Cargas Ideais para condicionamento térmico e o cenário com ventilação Natural seria aquele que utiliza um sistema de cargas ideais quando VN não era suficiente para atingir os limites de conforto adaptativo, neste cenário utiliza-se a Ventilação híbrida (modo misto), usando VN e VM, inserindo continuamente as taxas mínimas de ar externo no ambiente.

O Caso 3 segue a mesma lógica do Caso 2, mas acrescenta um controle de ventilação por demanda de ocupação, desta forma, a taxa mínima de ventilação será inserida de acordo com o número de ocupantes calculado hora a hora de acordo com a ocupação descrita na Figura 2(LOPES, 2020).

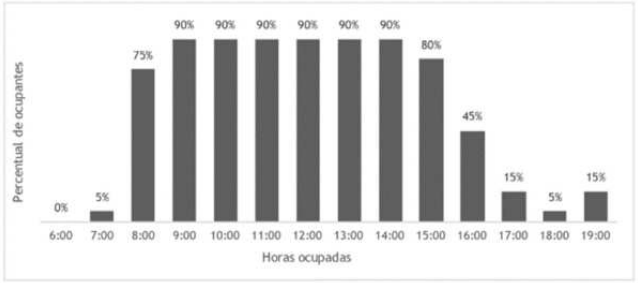


Figura 2 – Taxa de ocupação das salas de aula.

O perfil de ocupação das salas de aula das escolas do FNDE, são 32 alunos e 1 professor (0,66 (FNDE, 2017)), densidade de potência de iluminação 15,5 W/m² (INMETRO, 2021) e densidade de potência dos equipamentos são 15 W/m² (INMETRO, 2021) e nível de atividade são 106 (LAMBERTS e colab., 2014).

3.4 Simulação

Foram realizados dois grupos de simulação. O primeiro não envolvia controle das aberturas, focado somente no condicionamento artificial, nestes cenários que não possuem o modo misto, foi adotado 24º C como setpoint do ar condicionado. A simulação híbrida exigiu duas etapas para encontrar os setpoints. Na primeira foi realizada uma simulação de VN, com as janelas abertas 100% do tempo, sem o uso de ar condicionado para climatização, isso para dimensionar as horas ocupadas que atendem aos parâmetros de conforto adaptativo indicados pela ASHRAE (ASHRAE, 2017).

Passo 1 - simulação prévia para definição dos padrões de abertura das janelas e acionamento das Cargas Ideais para condicionamento térmico. Esta simulação ocorreu sempre antes da simulação dos cenários. Será estabelecido que a hora ocupada atenderá a 80% de aceitabilidade no conforto térmico quando a temperatura de operação estiver estabelecida entre os limites superior e inferior da ASHRAE (2017).

Passo 2 – Os dados de hora ocupada com conforto foram utilizados para delimitar os horários em que as janelas podem ser abertas durante o ano na próxima simulação. Da mesma forma, esta simulação adota as médias de temperatura de operação para encontrar os limites de temperatura para ar condicionado. O termostato teria duas temperaturas: valores limite máximo de temperatura (para ativar o sistema de refrigeração) e limites mínimos (para ativar o sistema de aquecimento), de acordo com as fórmulas de conforto adaptativo da ASHRAE (ASHRAE, 2017). O setpoint de temperatura para resfriamento e aquecimento será indicado de acordo com a temperatura média do mês analisado.

3.5 Indicadores

Para o desenvolvimento das simulações computacionais foram estabelecidos dois critérios, um voltado para a IAQ e um critério relacionado ao consumo de energia. Para a construção do primeiro critério, dividiu-se em dois subcritérios, sendo o primeiro a probabilidade de contágio pelo vírus COVID-19, e o segundo subcritério focado nas concentrações de CO_2 em ppm. Os dados horários referentes a estes dois subcritérios serão processados e avaliados nas horas ocupadas da sala de aula, o programa EnergyPlus calculará o fluxo de ar e a concentração de CO_2. Assim, será estabelecido que o tempo ocupado estará de acordo com os níveis esperados de IAQ, caso atenda aos dois subcritérios. Ao final, os dados anuais serão convertidos em percentual de horas ocupadas no IAQ.

3.5.1 IAQ 1.1 - Redução da probabilidade de contaminação por 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.

Para medir a concentração do vírus SARS-CoV-2, é apresentado um método baseado na documentação do REHVA COVID-19 Ventilation Calculator (REHVA, 2022) (versão 2.0, 1º de agosto de 2021), que discute a estrutura do calculadora para avaliar a probabilidade de infecção.

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 e colab., 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.

Para construir o método de processamento de dados considerando este modelo matemático, foi necessário importar a calculadora para o Grasshopper. Foi adotada a linguagem de programação Python, na qual a equação foi traduzida para o script Gh python como componentes.

3.5.2 IAQ 1.2 - concentração de CO_2:

Foi utilizado o programa EnergyPlus, que quantifica os níveis de concentração de CO_2 no ambiente interno. A taxa total de geração de CO_2 considera o número de pessoas, o tempo de ocupação, a atividade desenvolvida e a taxa de geração de CO_2 e o valor padrão é 3,45 E-8 m3/s-W (em 0,0084 cfm/met/pessoa sobre a população adulta geral) (ASHRAE, 2007). A pesquisa a esse respeito adota uma concentração externa de CO_2 de 400 ppm (Dovjak et al., 2020; Menteşe et al., 2009; Rackes & Waring, 2014; REHVA, 2021; Sarbu & Sebarchievici, 2013). Foi assumido para este trabalho que os níveis de CO_2 deveriam ser de 800 ppm nas salas de aula devido às altas concentrações externas (REHVA, 2021).

A avaliação será baseada na saída EnergyPlus Zone Air CO_2 Concentration [ppm], que representa o nível de concentração de CO_2 em partes por milhão (ppm) para cada zona (DOE, 2021).

3.5.3 Consumo de energia

Para avaliar o consumo total de energia, será somada a quantidade de energia para resfriamento e aquecimento da sala analisada e dividida pela área do ambiente. Os valores apresentados serão anuais e terão a unidade kWh/m².

4. RESULTADOS

Os resultados aqui apresentados irão abordar o IAQ, por meio dos dois critérios, e as cargas ideais para condicionamento térmico didvidos nos subtópicos 4.1 e 4.2 respectivamente.

4.1 IAQ

No Caso 1, ao configurar as janelas para não funcionarem ao longo do dia, foram observadas baixas taxas médias de renovação de ar (Figura 3) e consequentemente os níveis de IAQ (Figura 4). Durante os testes, foi possível perceber que esses valores não são nulos devido à taxa de infiltração inserida como entrada da simulação. Os resultados mudam no cenário com uso da ventilação natural de acordo com a possibilidade de atendimento ao conforto térmico, em que os valores médios de renovações de ar por hora (ACHs) aumentam consideravelmente () e os valores do percentual de IAQ seguem a tendência. Ressalta-se que os valores referentes ao IAQ neste Cenário são uma perspectiva probabilística da simulação computacional, por incluir diversas variáveis que podem influenciar este fluxo de ar interno.

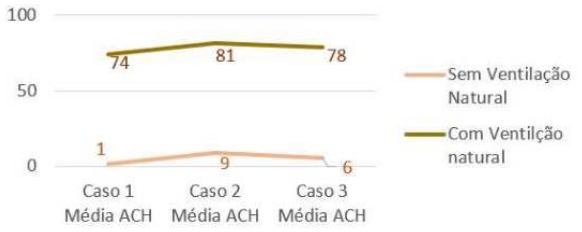


Figura 3 – Média de trocas de ar por hora.

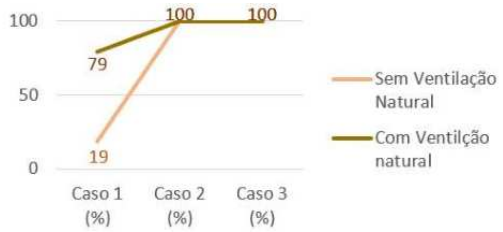


Figura 4 – Percentuais de IAQ.

A partir das 4.745 horas ocupadas, Florianópolis permite a abertura das janelas em 3.397 horas. O clima apresenta temperaturas próximas às métricas de conforto adaptativo na maior parte do ano e assim implica em mais horas com a adoção de abertura das janelas para ventilação, impactando em mais horas com as janelas permitindo a troca de ar natural.

Os resultados da simulação seguem essa tendência em cenários posteriores, em que as médias de trocas de ar por hora apresentam valores diferentes entre os cenários, nos quais aqueles com uso de VN possuem maior número de renovações.

Ao comparar os Casos 1 e 2, a tendência de aumento com ACHs não se reflete nos percentuais de IAQ. Como exemplo, a média de ACH equivalente a 74 no Caso 1 com VN, não apresenta constância, enquanto no Caso 2 sem o uso de NV, apenas com média de 9 ACHs, atingem a demanda dos percentuais de IAQ.

Avaliando a evolução dos Casos, as médias de ACHs em todos os cenários sofrem variações, atingindo seus maiores valores no Caso 2 até reduzirem com o controle por demanda de ocupação (Caso 3). Nos cenários com e sem VN, os ACHs apresentam um aumento médio do Caso 1 para o Caso 2 de 8 ACHs e uma redução na média do Caso 2 para o último Caso equivalente a 3 trocas de ar por hora.

Com base nos cenários com inserção de ventilação mínima, nos Casos 2 e 3, os dados alcançam os dois critérios: a calculadora COVID (REHVA, 2022) quanto a concentração de 800 ppm de CO_2. Os cenários com DCV, Caso 3, não alteraram os resultados nem impediram o cumprimento dos critérios de Qualidade interna do ar (Figura 37). Isso se justifica pela manutenção da taxa mínima de ventilação inserida como entrada, com a diferença de que a inserção é controlada pelo número de ocupantes a cada hora. A função do último cenário seria apenas controlar a Taxa Mínima de acordo com o número equivalente de ocupação da sala.

4.2 Consumo de energia

O consumo total de energia é a soma do consumo ideal para resfriamento e aquecimento (Figura 5). Há uma redução no consumo de energia para condicionamento em números totais quando a VN é usada. Os cenários com o VN, mais especificamente com a utilização do Modo Misto (Casos 2 e 3) surgem como uma alternativa mais eficiente que proporciona um maior número de renovações de ar por hora.



Figura 5 – Cargas ideais para condicionamento térmico.

Dentre todos os cenários, é possível perceber que entre aqueles sem a VN o menor consumo acontece no Caso 1; O caso 2 surge como o cenário com maior consumo total de energia; e uma redução desse consumo no Caso 3. Nos cenários com VN acontece o maior consumo no Caso 1, reduzindo no Caso 2, e apresentando o menor no Caso 3. A caracterização do consumo de energia segundo as cargas para aquecimento (Figura 6) e refrigeração (Figura 7) indicam maiores consumos para refrigeração nos Cenários sem NV, situação inversa nos cenários com VN, com maior consumo de aquecimento.



Figura 6 – Cargas para aquecimento.



Figura 7 – Cargas para resfriamento.

Comparando os casos sem VN, é possível perceber que entre os Casos 1 e 2 há um aumento no consumo para resfriamento e aquecimento. Entre os Casos 2 e 3 há um aumento no consumo de refrigeração mas apresentou uma redução no consumo de aquecimento.

Ao evoluir os cenários com VN, do Caso 1 para o 2, há redução do consumo para refrigeração e aumento para aquecimento. Há um aumento no consumo de refrigeração entre os Casos 2 e 3, enquanto há uma redução no consumo de aquecimento. Os resultados de cada cenário são apresentados na Tabela 3 indica que o melhor resultado foi o Modo Misto no Caso 3.

Tabela 3 – Resultados de cada cenário.

Caso 1	Cenário sem VN		Cenário com VN
Caso 2	Cenário sem VN/Com VM		Cenário com VN/Com VM
Caso 3	*Cenário sem VN/Com VM DCV		Cenário com VN/Com VM DCV
Legenda	No compliance IAQ	Compliance IAQ	Compliance IAQ and less Ideal Loads

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

4.3 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os cenários seguiram o previsto, o Caso 1 não atende aos critérios do IAQ e possui o menor consumo; O caso 2 atende aos critérios do IAQ e apresenta aumento no consumo total de energia; e o Caso 3, buscando uma estratégia para reduzir o consumo de energia, mantém o atendimento aos critérios do IAQ, enquanto há redução no consumo total.

Com base nos resultados a inserção da taxa mínima multiplicada pelo total de ocupantes durante todo o período de ocupação demonstrou a importância dessa estratégia não só para a redução da probabilidade de infecção por doenças relacionadas ao IAQ, mas também para melhorar o condicionamento térmico no período quente, por retirar calor do ambiente. Assim, a estratégia DCV por ocupação com a estrutura de simulação apresentada, representa uma estratégia eficaz para redução do consumo de energia, o que está de acordo com os resultados encontrados em pesquisas que adotam DCV (BELMONTE; BARBOSA; ALMEIDA, 2019; CHENARI et al., 2017; O 'NEILL et al., 2020).

O Modo Misto demonstra a capacidade de economizar no consumo de energia adotando a lógica de abrir as janelas e acionar as cargas ideais de acordo com o conforto adaptativo da ASHRAE (2017). Este resultado concorda com trabalhos (AL-RASHIDI; LOVEDAY; AL-MUTAWA, 2012; DUARTE; GOMES; RODRIGUES, 2017; OLIVEIRA; RUPP; GHISI, 2021) que utilizaram este sistema.

A VN indica um aumento das médias de ACHs em todos os cenários, mas esse aumento no fluxo de ar não indica melhor desempenho em relação ao IAQ. A taxa constante estabelecida nos casos 2 e 3 mostram o impacto positivo que a VM pode ter, porém, cenários com ventilação híbrida com altas taxas médias de ACHs devem ser analisados com maior cautela, pois esse fluxo é mais intenso em determinados horários e gera o possibilidade de contaminação cruzada.

Em cenários sem VN, o setpoint do ar condicionado é de 24ºC, no qual o sistema tentará atingir este valor sempre que a sala estiver ocupada. Porém, com a inserção de ar externo nos casos 2 e 3, este ar externo apresenta temperaturas equivalentes às temperaturas externas, proporcionando uma situação em que há um aumento do consumo tanto para aquecimento quanto para resfriamento para manter o setpoint em 24ºC. Essa lógica não se mantém no Modo Misto (Casos 2 e 3 com uso de VN) pois o setpoint é maior, conforme o conforto adaptativo, e assim, o ambiente interno tende a ter temperaturas mais próximas da temperatura do ar externo, portanto, a entrada dessa taxa constante de fluxo de ar externo tende a retirar o calor do ambiente, favorecendo o resfriamento (diminuindo seu consumo) em períodos de temperaturas mais altas e prejudicando o aquecimento em períodos de temperaturas mais baixas.

A partir dos resultados dos cenários sem VN, é possível indicar que a renovação constante com taxa de 9 ACHs, na configuração do quarto e padrão de ocupação apresentado, é suficiente para atender 100% aos critérios de IAQ do IAQ, mantendo bons padrões de IAQ. O número de horas passadas no ambiente foi de 6 horas usadas em calculadora, como uma projeção de avaliação horária, pois considerar a análise como hora a hora invalidaria a lógica da calculadora e a forma como o vírus pode se espalhar, se acumular e se depositar nas superfícies.

5. CONCLUSÃO

No atual contexto pós-pandêmico, a pesquisa apresentou resultados positivos para taxas de ar inseridas no modelo simulado equivalentes a 10 l/s para cada pessoa presente no ambiente, proporcionando a manutenção de níveis aceitáveis de IAQ, para os poluentes analisados, durante todo o período de ocupação no padrão das escolas do FNDE no contexto de Florianópolis.

O cenário sem VN e sem a ventilação mecânica não atinge os critérios de IAQ em todo o período de ocupação. Quando há a inserção da ventilação mecânica há o atendimento a esses critérios e ocorre um aumento

do consumo para condicionamento térmico. O consumo total somente reduz ao adotar a estratégia de ventilação controlada por demanda de ocupação.

O cenário com VN e sem a inserção da VM não atendem aos critérios de IAQ 100% do tempo de ocupação. Ao adotar a ventilação mecânica é possível perceber tanto o atendimento aos critérios de IAQ quanto a redução do consumo total. A estratégia de DCV mantém o atendimento do IAQ e corrobora com uma redução ainda maior do consumo total.

O modo misto (ventilação híbrida) demonstrou resposta positiva quando comparado as simulações 100% condicionadas, reduzindo o consumo energético e aumentando o número de renovações de ar. O funcionamento das janelas e adaptação ao clima inserido é essencial para a avaliação do IAQ neste modelo analisado do padrão escolar do FNDE. A inserção da taxa mínima demonstrou a importância dessa estratégia não só para reduzir a probabilidade de infecção por doenças relacionadas ao IAQ, mas também para o condicionamento térmico, reduzindo o consumo para resfriamento e aumentando para aquecimento. O melhor desempenho foi alcançado com a ventilação natural, adotando o Modo Misto e uso do DCV.

As escolas com o uso de ar condicionado 100% do tempo ou que utilizam VN sem dispositivo que possa inserir taxas constantes de ar iguais a 10 L/s para cada pessoa estão mais suscetíveis a não manter níveis aceitáveis de IAQ. De acordo com o número de alunos, sem considerar o padrão de ocupação por hora, é possível indicar que uma inserção de ar constante que proporcione 9 renovações de ar por hora pode atingir níveis aceitáveis de IAQ.

Por fim, a pesquisa demonstra que estratégias de ventilação controlada são eficazes para manter níveis aceitáveis de IAQ em salas de aula, e que o uso de ar condicionado sem dispositivos para inserção de ar constante pode levar a níveis insatisfatórios de IAQ. O modo misto e o uso de DCV são as estratégias mais eficientes, resultando em menor consumo de energia e melhor IAQ, portanto, apresentando caminhos para projetos de salas de aula mais confortáveis, eficientes e saudáveis.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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, Khaled; LOVEDAY, Dennis; AL-MUTAWA, Nawaf. Impact of ventilation modes on carbon dioxide concentration levels in Kuwait classrooms. *Energy and Buildings*, v. 47, p. 540–549, 2012. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.12.030>.

ARAÚJO, Mayna Lais Tenório 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 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. Disponível em: <http://www.techstreet.com/ashrae/products/1865968>.

BELMONTE, J. F.; BARBOSA, R.; ALMEIDA, Manuela G. CO 2 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. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.01.008>.

CHENARI, Behrang e colab. 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.

DORNELLES, Kelen Almeida. *Biblioteca de absortância de telhas: base de dados para análise de desempenho termoenergético de edifícios*. 2021.

DUARTE, Rogério; GOMES, Maria da Glória; RODRIGUES, António Moret. 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, Letícia Gabriela e colab. Manual de Simulação Computacional de Edifícios com o Uso do Objeto Ground Domain no Programa EnergyPlus - Versão 9.0.1. 2019.

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

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

GONZALES, Tomaz Silva e colab. Dissertação de Mestrado Integração de Estratégias Passivas de Climatização em Escolas no Contexto Climático de Brasília (DF). 2021.

INMETRO. Instrução Normativa Inmetro para a Classificação de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas. p. 139, 2021. Disponível em: <http://www.inmetro.gov.br/legislacao/rtac/pdf/RTAC002707.pdf>.

LAMBERTS, Roberto; DUTRA, Luciano; PEREIRA, Fernando Oscar Ruttkay. *Eficiência Energética na Arquitetura*. 3. ed. Rio de Janeiro, 2014.

LOPES, Adriano Felipe Oliveira. Da Simulação ao Projeto : avaliação de conforto térmico em ambiente escolar padronizado. p. 130, 2020. Disponível em: <https://repositorio.unb.br/handle/10482/38711>.

MENTEŞE, Sibel e colab. 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.

MUJAN, Igor e colab. Influence of indoor environmental quality on human health and productivity - A review. *Journal of Cleaner Production*, v. 217, p. 646–657, 2019.

NICAS, Mark; NAZAROFF, William W.; HUBBARD, Alan. 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, Catherine 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, Zheng D. e colab. 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. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/23744731.2019.1620575>.

OLIVEIRA, Candi Citadini De; RUPP, Ricardo Forgiarini; GHISI, Enedir. 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. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.110982>.

OMRANI, Sara e colab. Ceiling fans as ventilation assisting devices in buildings: A critical review. *Building and Environment*, v. 201, n. February, p. 108010, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108010>.

PENG, Zhen; DENG, Wu; TENORIO, Rosangela. 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.

PUNGERCAR, Vesna e colab. 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. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.110951>.

REHVA. COVID-19 Ventilation Calculator documentation. 2022.

REHVA. REHVA COVID-19 guidance document. 2021.

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