

## **Evaluation of Evaporative Cooling and Mechanical/Natural Ventilation strategies for the design of air conditioning systems for classrooms, considering different climate change scenarios for Viçosa (MG)**

### **Avaliação das estratégias de Resfriamento Evaporativo e de Ventilação Mecânica/Natural para o projeto de sistemas de condicionamento de ar para salas de aula, considerando diferentes cenários de mudanças climáticas para Viçosa (MG)**

Article Info:

Article history: Received 2024-04-07/ Accepted 2024-07-07/ Available online 2024-07-07

doi: 10.18540/jcecv110iss7pp19010



**Anderson Ferreira Barros**

ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-2528-0320>

Universidade Federal de Viçosa, Brasil

E-mail: [anderson.ferreira@ufv.br](mailto:anderson.ferreira@ufv.br)

**Álvaro Messias Bigonha Tibiriçá**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3300-1988>

Universidade Federal de Viçosa, Brasil

E-mail: [alvaro.tibirica@ufv.br](mailto:alvaro.tibirica@ufv.br)

**Júlio César Costa Campos**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9488-8164>

Universidade Federal de Viçosa, Brasil

E-mail: [julio.campos@ufv.br](mailto:julio.campos@ufv.br)

**Henrique Márcio Pereira Rosa**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1437-2265>

Universidade Federal de Viçosa, Brasil

E-mail: [henrique.rosa@ufv.br](mailto:henrique.rosa@ufv.br)

#### **Resumo**

O projeto de sistemas de ar condicionado e ventilação visa obter conforto térmico e Qualidade do Ar Interior (QAI) com eficiência energética. O conforto térmico influencia diretamente na concentração e na produtividade das pessoas em ambientes internos. Em escolas e universidades, onde as salas de aula são densamente ocupadas, esse fator se torna crucial para o desempenho das atividades acadêmicas. Nesses locais, é essencial manter as temperaturas e umidades internas em faixas que propiciem o conforto térmico e promover a renovação de ar visando garantir a QAI. Considerando os cenários de mudanças climáticas e o aquecimento global, com a tendência de aumento das temperaturas médias e a necessidade crescente de economia de energia, promover o conforto térmico nesses ambientes se torna mais desafiador. Neste contexto, este trabalho analisou como técnicas de Resfriamento Evaporativo (RE) e de Ventilação Mecânica/Natural (VMN) poderiam ser utilizadas como estratégias para a promoção de conforto térmico em uma sala de aula na cidade de Viçosa (MG). A partir do levantamento da carga térmica horária da sala, analisaram-se as capacidades de sistemas de RE e de VMN em manter a temperatura do ambiente entre 22 e 35 °C para duas faixas de umidade relativa: entre 40% e 60% e entre 40% e 80%. A análise de dados foi realizada para nove cenários climáticos: um atual, quatro para 2050 e quatro para 2080. Todos os cenários futuros consideraram o aquecimento global em diferentes

níveis. Os resultados mostraram que o RE, a partir de diversos modelos de cenários climáticos, tanto para o presente quanto para o futuro, foi capaz de manter a temperatura interna da sala abaixo de 27 °C no cenário climático atual e abaixo de 31 °C no cenário climático mais pessimista para 2050, sempre mantendo a umidade relativa interna abaixo de 80%. Esses resultados indicam o RE como uma alternativa para salas de aula em Viçosa (MG) de baixo impacto ambiental e com eficácia superior aos sistemas de VMN habitualmente encontrados nesses ambientes.

**Palavras-chave:** Projeto de Sistemas de Ar Condicionado e Ventilação. Resfriamento Evaporativo. Ventilação Mecânica/Natural. Mudanças Climáticas. Análise de Dados.

### Abstract

The design of air conditioning and ventilation systems aims to achieve thermal comfort and Indoor Air Quality (IAQ) with energy efficiency. Thermal comfort directly influences the concentration and productivity of people in indoor environments. In schools and universities, where classrooms are densely occupied, this factor becomes crucial for the performance of academic activities. In these places, it is essential to maintain internal temperatures and humidity levels within ranges that promote thermal comfort and to ensure air renewal to guarantee IAQ. Considering climate change scenarios and global warming, with the trend of increasing average temperatures and the growing need for energy savings, promoting thermal comfort in these environments becomes more challenging. In this context, this study analyzed how Evaporative Cooling (EC) and Mechanical/Natural Ventilation (MNV) techniques could be used as strategies to promote thermal comfort in a classroom in the city of Viçosa (MG). Based on the hourly thermal load survey of the room, the capacities of EC and MNV systems were analyzed to maintain the ambient temperature between 22 and 35 °C for two relative humidity ranges: between 40% and 60% and between 40% and 80%. The data analysis was carried out for nine climate scenarios: one current, four for 2050, and four for 2080. All future scenarios considered global warming at different levels. The results showed that EC, based on various climate scenario models, both present and future, was able to maintain the internal room temperature below 27 °C in the current climate scenario and below 31 °C in the most pessimistic climate scenario for 2050, always keeping the internal relative humidity below 80%. These results indicate that EC is an alternative for classrooms in Viçosa (MG) with low environmental impact and superior efficiency compared to the MNV systems commonly found in these environments.

**Keywords:** Air Conditioning and Ventilation Systems Design. Evaporative Cooling. Mechanical/Natural Ventilation. Climate Change. Data Analysis.

## 1. Introdução

O projeto de sistemas de ar condicionado para recintos com atividades humanas visa promover o conforto térmico e a Qualidade do Ar Interior (QAI) com eficiência energética (ABNT, 2008a, 2008b, 2008c). Ambientes internos que oferecem conforto térmico e QAI adequada aumentam a produtividade dos trabalhadores e reduzem os casos de infecções respiratórias entre seus usuários. O desconforto térmico é a insatisfação mais comum dentro de um edifício (THAPA *et al.*, 2023). A má qualidade do ar também é fator de insatisfação, relacionada à perda de produtividade observada em diferentes tipos de escritórios (KOSONEN e TAN, 2004a). Melhorias no conforto térmico e na QAI podem gerar maiores ganhos financeiros para empresas com condições de trabalho mais adequadas (KOSONEN e TAN, 2004b). Esse contexto é especialmente relevante para salas de aula, que possuem alta densidade ocupacional e atividades intelectuais afetadas pelo desconforto térmico e pela baixa qualidade do ar. Em escolas brasileiras, entre 10 fatores relacionados à infraestrutura da sala de aula, os dois indicados com menor nível de adequação (<35%) pelos professores foram a temperatura e a ventilação natural (INEP, 2019).

As pessoas passam mais de 90% do tempo em ambientes fechados, o que torna a preocupação com o conforto térmico e a Qualidade do Ar Interior (QAI) cada vez mais importante para projetistas de sistemas de ar condicionado e ventilação. Locais de uso público, como salas de aula, escritórios, teatros, entre outros, necessitarão cada vez mais de soluções que promovam conforto térmico e qualidade do ar. Essa crescente demanda por soluções de resfriamento tende a aumentar o consumo de energia das edificações (WANG *et al.*, 2023). Soma-se a isso o impacto do crescimento populacional e das mudanças climáticas globais nas necessidades energéticas futuras. Estima-se que o consumo mundial de energia possa crescer 50% entre 2005 e 2030.

O aquecimento global e as mudanças climáticas previstas pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) podem deteriorar o clima no interior dos edifícios. Prevê-se um aumento significativo na energia de resfriamento necessária para os climas futuros de 2050 e 2080, comparado com o presente (THAPA *et al.*, 2023). De acordo com o IPCC, a temperatura média global da superfície pode aumentar entre 0,3°C e 4,8°C até o final do século 21 em relação ao período de 1986-2005. A falta de mitigação do aquecimento global pode resultar em graves consequências, como fenômenos meteorológicos extremos, ondas de calor e um aumento nas mortes relacionadas a altas temperaturas (BAMDAD *et al.*, 2021). Os cenários climáticos do IPCC descrevem as futuras mudanças climáticas com base em fatores antropogênicos e diferentes situações de desenvolvimento socioeconômico. Essas projeções permitem avaliar possíveis mudanças no sistema climático, os impactos na sociedade e nos ecossistemas, e a eficácia das opções de resposta, como adaptação e mitigação (O'NEILL *et al.*, 2016).

As projeções de clima futuro são baseadas em cinco abordagens para os “caminhos de desenvolvimento da sociedade” que servem de base aos chamados “Caminhos Socioeconômicos Compartilhados – *Shared Socioeconomic Pathways (SSP)*” numerados de 1 a 5, do caminho mais otimista para o mais pessimista (O'NEILL *et al.*, 2016). O caminho 1 é de uma sociedade mais sustentável e “verde”, enquanto o caminho 5 desenha uma sociedade baseada em combustíveis fósseis e no intenso uso dos recursos naturais. A denominação de cada cenário compreende o caminho básico seguido de dois numerais, que indicam o forçamento radiante adicional alcançado até 2100, em W/m<sup>2</sup>, em relação a níveis médios pré-industriais (de 1850 a 1900). Dessa forma, chega-se às seguintes denominações: SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 e SSP5-8.5. A primeira, por exemplo, relaciona-se ao caminho mais otimista, no qual o forçamento radiante esperado é 2,6 W/m<sup>2</sup> para o ano de 2100. O forçamento radiante refere-se ao aumento do fluxo de calor proveniente da radiação solar que é absorvido e retido pela atmosfera, devido ao aumento da concentração de gases de efeito estufa e outros agentes (VAN VUUREN *et al.*, 2011). Os cenários SSP estão associados a diferentes níveis de intensificação do efeito estufa e aquecimento global (O'NEILL *et al.*, 2016). Cada cenário tende a impactar de forma diferente o consumo energético e o projeto de sistemas de ar condicionado e ventilação.

Em geral, sistemas de resfriamento baseados em compressão de vapor, como os condicionadores de ar convencionais, consomem muito mais energia do que os sistemas de resfriamento passivo. Em contraposição, soluções de resfriamento passivo, como Resfriamento Evaporativo (RE) e Ventilação Mecânica/Natural (VMN), apresentam um grande potencial de economia de energia no futuro. Panchabikesan *et al.* (2017) preveem que essas técnicas contribuirão para a maximização do uso de energias renováveis e para a redução da emissão de gases de efeito estufa. Sistemas de RE e VMN são geralmente mais simples e eficientes em termos energéticos do que os sistemas de compressão de vapor e podem substituí-los em locais com clima adequado (KAPILAN *et al.*, 2023). A ventilação mecânica e natural, seja pela ação dos ventos ou pelo efeito chaminé, também são estratégias de projeto para resfriamento passivo com baixo impacto ambiental. Sua eficácia depende das condições meteorológicas externas, que devem ser avaliadas em cada aplicação (XIE *et al.*, 2023), já que é o ar externo o agente promotor do resfriamento e da renovação de ar nos ambientes internos. A VMN combate a carga térmica insuflando ar externo diretamente no ambiente, já o RE promove resfriamento passivo do ar externo antes de insuflá-lo no ambiente. Enquanto a Ventilação Mecânica emprega ventiladores para movimentar o ar, a Ventilação Natural promove o fluxo de ar através dos ventos e/ou por efeito chaminé.

Neste contexto, torna-se crucial que o projeto de sistemas de ar condicionado considere cenários de aquecimento global e promova conforto térmico de maneira eficiente em termos energéticos, em climas cada vez mais quentes. O desenvolvimento desses sistemas começa com a análise do clima local, das características construtivas do ambiente a ser condicionado, do perfil de uso e de outros fatores. Numa segunda etapa, a partir dos dados obtidos anteriormente, determina-se a carga térmica de resfriamento ou aquecimento. Vale ressaltar que a estimativa da carga térmica, para uma dada temperatura de operação, é feita seguindo metodologias propostas por normas nacionais, como a NBR 16401-1 (ABNT, 2008a), ou guias de referência, como ASHRAE (2009, 2017) e Jones (2001). Elas baseiam-se em balanços de energia da edificação conjugados com processos de transferência de calor por condução, convecção e radiação, e de armazenamento de energia (inércia térmica). Para resfriamento, consideram-se condições de utilização e de insolação máximas. O cálculo da carga térmica pode ser feito para as horas do dia de projeto ou crítico no ano ou considerar todos os dias e horas do ano, dependendo da abordagem do projetista. Nesse último caso, é comum chamar essa abordagem de modelagem energética progressiva ("Forward Approach"), pois se computa o comportamento energético da edificação ao longo de cada hora do ano, considerando as condições climáticas, construtivas e de uso do edifício. Esse tipo de modelagem matemática geralmente é codificada em um programa de computador. Há alguns conhecidos, como EnergyPlus, ESP-r e TRNSYS, que implementam modelos com diferentes níveis de complexidade (ASHRAE, 2017). A partir da análise da carga térmica, inicia-se a concepção do sistema de condicionamento de ar que atenda aos requisitos do projeto, garantindo o conforto térmico e a QAI.

A terceira etapa do projeto envolve o dimensionamento do sistema de ar condicionado, incluindo os sistemas de controle. Nessa fase, podem ser modelados e simulados o funcionamento dos sistemas de resfriamento ou aquecimento para obter parâmetros de dimensionamento, como vazões e temperaturas de insuflamento, assim como parâmetros de desempenho, como consumo de energia e umidade interna do ambiente. Essa modelagem baseia-se em balanços de massa e de energia, e em equações empíricas dos processos de resfriamento usados. A partir desse tipo de simulação, pode-se determinar se um dado sistema de condicionamento de ar conseguirá operar nas condições estabelecidas na etapa anterior e quais serão suas condições de operação para cada hora do ano. Como os sistemas de resfriamento passivos são muito dependentes das condições climáticas locais, a análise a partir dos dados simulados é essencial para avaliar a possibilidade de uso desses sistemas e em quais condições eles conseguiriam operar. Com essas informações, inicia-se o processo de seleção e dimensionamento de equipamentos, dutos, tubulações, etc. Em etapas subsequentes, definem-se os custos de aquisição e operação, e posteriormente elaboram-se os projetos de execução (MITCHELL *et al.*, 2018; ABNT, 2008a).

Comumente, o projeto de sistemas de ar condicionado é voltado para dimensionamento de sistemas com ciclo de compressão a vapor. A abordagem para projetos com processos de resfriamento alternativos, cujos comportamentos são diretamente dependentes do clima externo, ainda é pouco explorada, principalmente para salas de aula. Nesse tipo de projeto, é preciso considerar o impacto das variações do clima no funcionamento do equipamento durante todas as horas de uso para avaliar se o processo de resfriamento será ou não capaz de manter o ambiente nas condições de temperatura e umidade desejadas.

Neste contexto, este trabalho analisa o desempenho do uso de Resfriamento Evaporativo (RE) e de Ventilação Mecânica/Natural (VMN) como métodos passivos e alternativos de condicionamento de ar para uma sala de aula em Viçosa (MG), considerando o clima atual e cenários futuros. Ambas as técnicas de resfriamento se destacam por renovar o ar interno, com baixo consumo de energia e impacto ambiental reduzido. A partir dos dados da simulação de carga térmica gerados pela biblioteca em Python HeatLoadCalc (TIBIRIÇÁ *et al.*, 2023), foram modelados e simulados processos de resfriamento evaporativo e por ventilação mecânica/natural utilizando código desenvolvido pelos autores na linguagem Python. Esses últimos baseiam-se em balanços de massa e processos psicrométricos para resfriamento evaporativo. O objetivo foi avaliar a viabilidade do uso de RE/VMN em projetos de sistemas de condicionamento de ar que garantam a QAI para

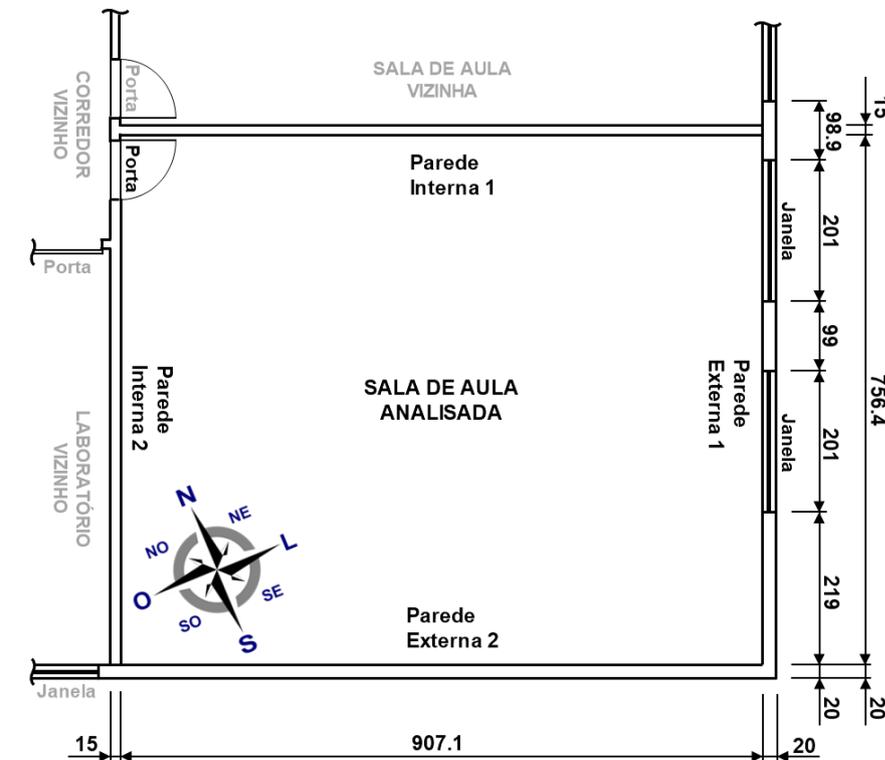
salas de aula em Viçosa (MG), bem como determinar os pontos de operação desses sistemas (vazão e temperatura de insuflamento) e a umidade relativa do ambiente.

## 2. Metodologia

Para avaliar o potencial de uso de Ventilação Mecânica/Natural (VMN) e de Resfriamento Evaporativo (RE) em salas de aula em Viçosa foi modelada uma sala de aula existente na Universidade Federal de Viçosa, com densidade habitual de estudantes. Em seguida, a partir de dados climáticos, atual e de cenários futuros, a carga térmica de resfriamento foi calculada usando a biblioteca *HeatLoadCalc* (TIBIRIÇÁ *et al.*, 2023) para diferentes temperaturas internas de operação. A partir dos dados de carga térmica obtidos, desenvolveu-se um código computacional em Python para: determinar as taxas mínima e máxima de insuflamento de ar; definir as faixas de vazões de insuflamento permitidas e as situações nas quais a temperatura de insuflamento é menor que a desejada para o ambiente; verificar a quantidade de horas nas quais a Ventilação Mecânica/Natural e o Resfriamento Evaporativo poderiam ser estratégias úteis para resfriamento. Por fim, foi analisado o comportamento de parâmetros característicos de projeto como as vazões e temperaturas de insuflamento, nas situações nas quais a VMN e o RE se aplicam.

### 2.1. A sala de aula e as fontes de carga térmica

A sala de aula modelada possui área de  $68,6 \text{ m}^2$  e foi estimada para 40 pessoas, resultando em uma densidade inferior a  $2 \text{ m}^2$  por indivíduo. Isso caracteriza uma alta densidade de ocupação e, conseqüentemente, alta geração de cargas térmicas sensível e latente internas. Sua geometria e localização foram baseadas numa sala real com duas paredes voltadas para o exterior, e duas internas, como mostrado na Figura 1. A altura do teto é de  $3,245 \text{ m}$ , e o volume interno total é de  $222,65 \text{ m}^3$ . Considerou-se que os ambientes internos vizinhos, com o auxílio de sistemas de resfriamento, mantêm suas temperaturas similares à da sala modelada.



**Figura 1 – Representação esquemática da sala de aula analisada. Cotas em cm. Fonte: Adaptada de PAOLUCCI, 2012.**

A Tabela 1, mostrada a seguir, lista os elementos construtivos que compõem a envoltória da sala de aula, com suas respectivas áreas e propriedades térmicas. As orientações são medidas em

relação ao Sul, com valores angulares negativos no sentido Leste, e positivos para o Oeste. O coeficiente global de transferência de calor dos elementos é representado por  $U$ , a absorvidade relacionada à cor da parte externa de elementos opacos é denotada por  $\alpha$ , e o fator solar para elementos transparentes é indicado por  $F_s$ .

Pessoas, computadores e iluminação foram os elementos geradores de carga térmica interna considerados. Os valores de carga sensível unitária e total, estimados para cada um desses fatores, estão listados na Tabela 2. Esses elementos geram carga térmica somente durante o horário de ocupação, das 7h00 às 19h00. As pessoas são as únicas fontes de carga latente interna, cada uma gerando 55 W (atividade de escritório moderada, ASHRAE, 2009). Com 40 pessoas, totaliza-se 2200 W.

**Tabela 1 – Descrição dos elementos construtivos da envoltória do ambiente. Fonte: Adaptada de INMETRO, 2013.**

| Elemento                                | Material                                       | U (W/(m <sup>2</sup> .K)) | $\alpha / F_s$ | Área (m <sup>2</sup> ) | Orientação |
|---|--|---------------------------|----------------|------------------------|------------|
| <i>Parede Externa 1 Leste Branca</i>    | Blocos cerâmicos e argamassa (espessura 20 cm) | 1,85                      | 0,2            | 3,30                   | -67,5°     |
| <i>Parede Externa 1 Leste Terracota</i> | Blocos cerâmicos e argamassa (espessura 20 cm) | 1,85                      | 0,684          | 13,13                  | -67,5°     |
| <i>Parede Externa 2 Sul Branca</i>      | Blocos cerâmicos e argamassa (espessura 20 cm) | 2,46                      | 0,2            | 29,44                  | 22,5°      |
| <i>Janelas Externas Leste</i>           | Vidro comum (espessura 0,4 cm)                 | 5,74                      | 0,86           | 8,12                   | -67,5°     |
| <i>Porta Interna</i>                    | Madeira (espessura 3 cm)                       | 2,10                      | 0,2            | 1,89                   | -          |
| <i>Parede Interna 1</i>                 | Blocos cerâmicos e argamassa (espessura 15 cm) | 2,46                      | 0,2            | 29,44                  | -          |
| <i>Parede Interna 2</i>                 | Blocos cerâmicos e argamassa (espessura 15 cm) | 2,46                      | 0,2            | 22,66                  | -          |
| <i>Teto Interno</i>                     | Laje maciça (espessura 10 cm)                  | 3,73                      | 0,2            | 68,60                  | -          |
| <i>Piso Interno</i>                     | Concreto maciço (espessura 10 cm)              | 4,40                      | 0,2            | 68,60                  | -          |

**Tabela 2 – Detalhamento da carga térmica sensível interna. Fonte: Adaptada de ASHRAE, 2009.**

| Elemento            | Carga Térmica Sensível Unitária | Quantidade          | Carga Térmica Sensível Total (W) |
|---------------------|---------------------------------|---------------------|----------------------------------|
| <b>Pessoas</b>      | 75 W/pessoa                     | 40 pessoas          | 3000 W                           |
| <b>Computadores</b> | 97 W/computador                 | 20 computadores     | 1940 W                           |
| <b>Iluminação</b>   | 12 W/m <sup>2</sup>             | 68,6 m <sup>2</sup> | 823,2 W                          |
| <b>TOTAL</b>        | ---                             | ---                 | <b>5772,2 W</b>                  |

## 2.2. Dados climáticos

Arquivos climáticos do tipo “EPW” (*EnergyPlus Weather File*) que incluem dados de temperatura, umidade relativa e pressão atmosférica para cada uma das 8760 horas do ano, foram utilizados tanto para estimar a carga térmica de resfriamento como a capacidade de aplicação da Ventilação Mecânica/Natural e do Resfriamento Evaporativo. Adicionalmente, a umidade absoluta e a temperatura de bulbo úmido foram calculadas para cada hora do ano. No total, foram utilizados nove arquivos climáticos: um correspondente ao ano de 2009 (cenário atual), quatro relacionados ao ano de 2050 e quatro ao ano de 2080 (cenários futuros).

Os dados climáticos atuais (2009) relacionam-se a valores medidos neste ano pela estação meteorológica do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) em Viçosa (MG) acessados em *Climate One Building* (2023). Os arquivos de cenários futuros foram gerados a partir da ferramenta de código aberto *Future Weather Generator* (versão 1.2.0) (RODRIGUES *et al.*, 2023), usando o modelo climático global EC-Earth3, a partir de arquivo TMY (*Typical Meteorological Year*) 1985-2014 para Viçosa (MG). Esse último foi construído, segundo a metodologia da ISO 15927-4 (2005), a partir de dados climáticos anuais do período de 1985 a 2014 para Viçosa (MG) disponíveis em *Climate Copernicus* (2023). Os cenários futuros de mudanças climáticas, incluem projeções da mais otimista a mais pessimista nomeadas como: SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 e SSP5-8.5.

A tabela 3 mostra as características climáticas gerais de cada cenário. Nessa tabela: T representa a temperatura; TBU, a temperatura de bulbo úmido; UR, a umidade relativa; e  $P_{atm}$ , a pressão atmosférica. Observa-se que, quanto mais pessimista o cenário, maior o aumento da temperatura média, o que culmina em um acréscimo de 5,3 °C no cenário SSP5-8.5 para 2080. Em contraste, a umidade relativa média decresce em 9,7% no mesmo cenário e ano.

**Tabela 3 – Dados médios do ar atmosférico de Viçosa (MG) considerando todas as horas por ano dos arquivos climáticos projetados para o futuro. Entre parênteses estão as diferenças com relação aos dados de 2009. Fonte: Autores.**

| Arquivo Climático | T (°C)      | TBU (°C)    | UR (%)      | $P_{atm}$ (Pa) |
|-------------------|-------------|-------------|-------------|----------------|
| 2009              | 20,0        | 17,3        | 80,1        | 93690          |
| SSP1-2.6 - 2050   | 22,5 (+2,5) | 18,9 (+1,6) | 73,9 (-6,2) | 93793 (+103)   |
| SSP2-4.5 - 2050   | 22,7 (+2,7) | 19,2 (+1,9) | 74,3 (-5,9) | 93782 (+92)    |
| SSP3-7.0 - 2050   | 22,9 (+2,9) | 19,3 (+2,0) | 73,9 (-6,2) | 93805 (+115)   |
| SSP5-8.5 - 2050   | 23,4 (+3,4) | 19,4 (+2,1) | 71,7 (-8,4) | 93796 (+106)   |
| SSP1-2.6 - 2080   | 22,2 (+2,2) | 19,1 (+1,8) | 76,9 (-3,2) | 93790 (+100)   |
| SSP2-4.5 - 2080   | 23,5 (+3,5) | 19,8 (+2,4) | 73,2 (-6,9) | 93798 (+108)   |
| SSP3-7.0 - 2080   | 24,0 (+4,0) | 20,4 (+3,1) | 74,6 (-5,6) | 93819 (+129)   |
| SSP5-8.5 - 2080   | 25,3 (+5,3) | 21,0 (+3,6) | 70,4 (-9,7) | 93851 (+161)   |

## 2.3. Levantamento da carga térmica

Com base nos dados climáticos atuais e em cenários futuros, estimou-se a carga térmica sensível de resfriamento utilizando-se a biblioteca *HeatLoadCalc* (TIBIRIÇÁ *et al.*, 2023). A simulação considerou temperaturas de operação variando de 22°C a 35°C, com intervalos de 1°C. Inicialmente, foram cadastradas as características geométricas, os materiais e a orientação geográfica da envoltória, além dos elementos geradores de carga interna, através de código em Python. Com essas informações, a biblioteca calculou a carga térmica de resfriamento para todas as horas do ano. A figura 2 mostra um trecho do código com inserção de parâmetros da sala e o “comando” para iniciar o cálculo da carga térmica. Este processo resultou em 14 conjuntos de dados de carga térmica para cada um dos 9 arquivos climáticos, totalizando 126 grupos de resultados, contendo as cargas térmicas sensível e latente para as 8760 horas do ano.

Os modelos utilizados na biblioteca *HeatLoadCalc* (TIBIRIÇÁ *et al.*, 2023) baseiam-se em balanços de energia conforme metodologia e equacionamento descritos em JONES (2001) e

ASHRAE (2017). Para a carga de resfriamento, foram computadas todas as cargas geradas internamente e pela radiação solar em condições de céu claro, conforme preconizado pela NBR 16401-1 (ABNT, 2008a). Considerou-se a inércia térmica de condução das paredes externas. A carga térmica sensível transferida através destes elementos é calculada a partir das diferenças de temperatura interna e externa, considerando a radiação incidente na superfície a cada momento. As parcelas de radiação solar, direta e difusa, são estimadas para cada hora do ano, com base na posição solar. As cargas radiantes foram modeladas sem atraso térmico, isto é, seu efeito foi contabilizado instantaneamente. Como as pessoas foram as únicas fontes de carga térmica latente e o número de pessoas foi constante, seu valor se manteve inalterado em 2200 W. Assim, apenas a Carga Térmica Sensível (CTS) varia de hora em hora, influenciada pelas condições climáticas externas.

```
def zoneModel(ti,rhi):
    # Exemplo de cadastro de cor para parede
    branco = HL.Color(alfa=0.2)
    # Exemplo de cadastro de materiais para parede
    parExt0 = HL.OpaqueMaterial(U=1.85)
    vidro5 = HL.TransparentMaterial(U=5.74,fs=0.86)
    ### INÍCIO: Modelagem Térmica do Ambiente
    # Exemplo de cadastro de Zonas Térmicas
    S1_110 = HL.ThermalZone(name='S1_110', ti=ti, rhi=rhi, area=53.07, Fp=7.5, Fa=0.9)
    S1_111 = HL.ThermalZone(name='S1_111', ti=ti, rhi=rhi, area=68.60, Fp=7.5, Fa=0.9)
    # Exemplo de Inserção de Elementos Geradores de Carga Térmica
    HL.InternalHeatLoadByValue(thermalZone=S1_111, N=20, name='S1_111_COMPUTADOR',
                               hLC=87.3, hLR=9.7, hLL=0, hourList=hourList)
    HL.InternalHeatLoadByValue(thermalZone=S1_111, N=40, name='S1_111_PESSOAS',
                               hLC=31.5, hLR=43.5, hLL=55, hourList=hourList)
    # Exemplo de Inserção de Paredes (Envoltória) no Ambiente
    HL.OuterElement(thermalZone=S1_111, material=vidro5, name='S1_111_L_50',
                   area=8.12, beta=90, gamma=-67.5)
    HL.InnerElement(material=parInt1, name='S1_110_Z_S1_111_10',
                   area=29.44, neighbor1=S1_110, neighbor2=S1_111)
    ### FIM: Modelagem Ambiente
    return S1_111
```

**Figura 2 – Trecho reduzido do código da função para modelagem térmica da sala em Python com parte do código de inserção de parâmetros para exemplificação. ‘HL’ representa funções da biblioteca *HeatLoadCalc*. Fonte: Autores.**

#### 2.4. Modelagem das técnicas de resfriamento

Neste trabalho, propôs-se o uso de técnicas de resfriamento passivo, a Ventilação Mecânica/Natural (VMN) e o Resfriamento Evaporativo (RE), para um ambiente do tipo sala de aula. Ambos os métodos são eficazes quando a temperatura do ar insuflado é inferior à temperatura ambiente desejada. No RE, a diminuição da temperatura do ar insuflado é conseguida pela evaporação de água líquida injetada no escoamento de ar. Esse processo ocorre praticamente sem variação da temperatura de bulbo úmido e pode ser modelado pelas equações 1 e 2. O resfriamento do ar será maior quanto maior for a efetividade do sistema e quanto menor for a temperatura de bulbo úmido do ar. Neste estudo, o valor de efetividade usado foi de 80%, comum em equipamentos comerciais de resfriamento evaporativo direto (ABDULLAH *et al.*, 2023; EL-DESSOUKY *et al.*, 2004).

$$T_s = T_e - \varepsilon(T_e - TBU_e) \quad (1)$$

$$TBU_s = TBU_e \quad (2)$$

onde,  $T_s$  e  $TBU_s$  são a temperatura e a temperatura de bulbo úmido do ar (na saída do RE),  $T_e$  e  $TBU_e$  são a temperatura e a temperatura de bulbo úmido do ar externo (na entrada do RE), e  $\varepsilon$  é a efetividade do sistema de RE.

Na VMN, supõe-se que o ar é insuflado com as mesmas condições psicrométricas do ar externo. Assim:

$$T_s = T_e \quad (3)$$

$$\omega_s = \omega_e \quad (4)$$

onde,  $T_s$  e  $\omega_s$  são a temperatura e a umidade absoluta do ar insuflado, e  $T_e$  e  $\omega_e$  são a temperatura e a umidade absoluta do ar externo.

### 2.5. Vazões mínima e máxima de insuflamento

A vazão mássica de ar ( $\dot{m}_a$ ) necessária para combater a carga térmica é proporcional à carga térmica de calor sensível ( $G_s$ ) e inversamente proporcional à diferença entre a temperatura desejada para o recinto ( $T_r$ ) e a temperatura de insuflamento ( $T_s$ ), Essa relação é descrita pela equação 5 (JONES, 2001). Observa-se que, quanto maior a temperatura de insuflamento, maior será a vazão de ar requerida.

$$\dot{m}_a = \frac{G_s}{c_{au}(T_r - T_s)} \quad (5)$$

onde,  $c_{au}$  é o calor específico do ar úmido.

Como a vazão mássica varia em função da temperatura de insuflamento, foram estabelecidos limites para seus valores. A vazão de insuflamento deve ser sempre maior que a necessária para renovação do ar. Assim, a vazão mínima de insuflamento pode ser estimada com base na vazão volumétrica mínima de renovação, conforme definida por norma técnica brasileira e dada pela equação 6, para garantir a qualidade do ar interior em ambientes condicionados (ABNT, 2008c).

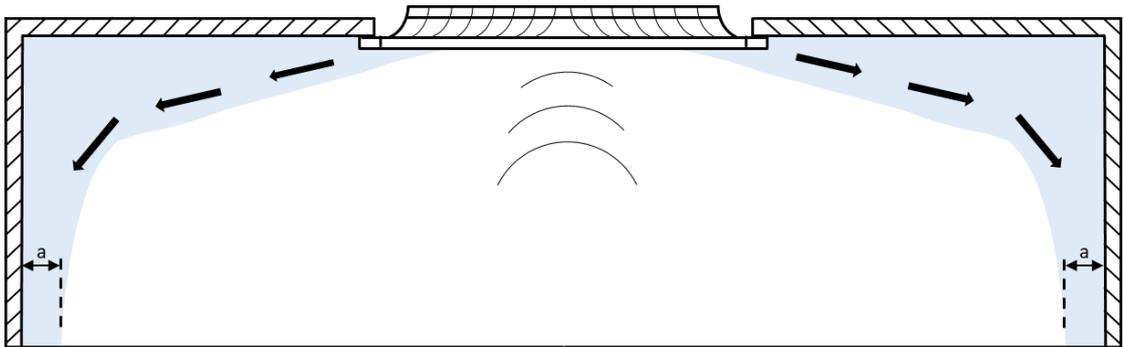
$$V_{min} = F_p \cdot P_z + F_a \cdot A_z \quad (6)$$

onde,  $V_{min}$  é a vazão volumétrica de ar mínima para renovação, em L/s;  $F_p$  é o fator de vazão por pessoa em L/(s.pessoa),  $P_z$  é o número máximo de pessoas na zona de ocupação;  $F_a$  é o fator de vazão por área útil ocupada, em L/(s.m<sup>2</sup>); e  $A_z$  é a área útil ocupada, em m<sup>2</sup>. Neste trabalho, adotou-se o nível 3, para estabelecimentos de ensino, com  $F_p$  igual a 7,5 L/(s.pessoa) e  $F_a$  igual a 0,9 L/(s.m<sup>2</sup>). Dessa forma, a vazão mínima a ser insuflada no ambiente deve ser de 361,74 L/s.

Quando a diferença entre a temperatura desejada e a temperatura de insuflamento é muito pequena, a vazão necessária pode se tornar extremamente grande. Para limitar a vazão máxima de insuflamento, estabeleceu-se que a velocidade média do ar no escoamento pelas paredes do ambiente, próximo ao piso, não ultrapasse 0,25 m/s, o que é considerado adequado para a zona de ocupação (ABNT, 2008b). A figura 3 ilustra um esquema de escoamento do ar a partir de um difusor localizado no centro do teto do ambiente. No modelo, o ar percorre o teto e as paredes antes de atingir o chão, difundindo-se posteriormente para a zona de ocupação. Considerando que a zona de ocupação está afastada a pelo menos 0,3 m de cada parede, pode-se definir a vazão máxima de insuflamento de ar como:

$$V_{max} = 1000 \cdot p \cdot a \cdot v_z \quad (7)$$

onde,  $V_{max}$  é a vazão volumétrica de ar máxima admissível, em L/s; ' $p$ ' é o perímetro interno do ambiente, em um plano horizontal, conforme a vista de planta da sala, mostrada na Figura 1, em m; ' $a$ ' é o afastamento mínimo entre a zona de ocupação e cada parede, em m; e  $v_z$  é a velocidade máxima admissível do ar na zona de ocupação, em m/s. Modela-se a área mínima de seção transversal para o escoamento de ar com base no afastamento e no perímetro, a fim de se estimar a vazão máxima. Assim, o limite máximo no insuflamento de ar no ambiente analisado foi calculado em 2495,25 L/s.



**Figura 3 – Representação da difusão interna de ar, idealizada para um difusor único posicionado no centro do teto do ambiente. O afastamento mínimo 'a' está ilustrado. O esquema simplificado é apresentado em vista frontal da sala de aula, com elementos fora de proporção entre si. Fonte: Adaptada de TROX DO BRASIL LTDA., 2013.**

## 2.6. Umidade do Ambiente

$$\omega_r = \omega_s + \frac{G_l}{\dot{m}_a h_{fg}} \quad (8)$$

onde,  $\omega_r$  é a umidade absoluta do ar interno no recinto; onde  $h_{fg}$  é a entalpia de vaporização da água;  $G_l$  é a carga térmica de calor latente.

## 2.7. Condições de aplicabilidade do RE e da VMN

Para a avaliação da viabilidade de uso do RE e da VMN considerou-se três condições. A primeira condição refere-se ao valor da vazão de insuflamento de ar. Para cada hora, a vazão deve estar dentro do intervalo entre o limite mínimo e o limite máximo estabelecidos. Caso contrário, não se considera adequada a aplicação da técnica de resfriamento em questão para aquela hora.

Outra condição é a restrição da umidade relativa do ambiente. Para cada hora, o valor deve estar dentro dos limites mínimo e máximo estabelecidos. Duas faixas de umidade relativa, entre 40% e 60% e entre 40% e 80%, foram utilizadas para a avaliação do uso da técnica de resfriamento. A primeira faixa, mais restritiva, é comumente empregada em sistemas de condicionamento de ar (ABNT, 2008 b). A segunda faixa permite umidades relativas internas um pouco mais elevadas.

A última condição para a utilização de uma técnica de resfriamento é o valor da temperatura do ar insuflado. Ela deve ser inferior à temperatura desejada para o ambiente. Caso contrário, o ar insuflado promoverá aquecimento ao invés de resfriamento.

Define-se, assim, a “aplicabilidade acumulada” de um método de resfriamento como a razão entre o número de horas de uso possível (em que a vazão de insuflamento está dentro do intervalo

estabelecido, a umidade relativa do ambiente se encontra em uma das duas faixas permitidas e a temperatura de insuflamento do ar é inferior à temperatura de projeto) e o total de horas analisadas. Para cada hora do ano, busca-se a menor temperatura de projeto que satisfaça as três condições mencionadas. Assim, a aplicabilidade acumulada será de 100% para uma dada temperatura de projeto somente se, em todas as horas avaliadas, as três condições forem satisfeitas para temperaturas de projeto iguais ou inferiores àquela em análise.

## 2.8. Simulações numéricas

A partir dos 126 conjuntos de dados de carga térmica, foram simuladas as condições de operação dos sistemas de RE/VMN para cada uma das temperaturas de operação e cada arquivo climático. Somente os dados diurnos, isto é, entre 7h e 18h (inclusive), foram considerados. Para cada conjunto de dados, utilizando os modelos descritos na seção anterior, calculou-se a aplicabilidade acumulada da VMN e do RE, além da vazão mássica, umidade relativa interna e temperatura de insuflamento do ar.

Toda a modelagem foi codificada na linguagem Python. As propriedades psicrométricas foram processadas usando a biblioteca CoolProp (BELL *et al.*, 2014). Os modelos implementados foram testados individualmente e verificados por meio de um teste de caixa preta, onde dados de entrada com respostas conhecidas foram utilizados para verificar possíveis diferenças na implementação do código. A figura 4 ilustra trechos reduzidos do código utilizado para simulação dos processos de RE/VMN. Nesses trechos mostram um exemplo das funções utilizadas, as linhas com funções similares. Ao final, obteve-se 126 conjuntos de dados com condições de operação dos sistemas de RE/VMN.

```

for epwFile in epwFiles: # epwFiles é a lista de arquivos climáticos
# AQUI INICIA O CÁLCULO PARA UMA CONDIÇÃO CLIMÁTICA (Passo 1)
### INÍCIO: Condições no estado externo do ar
vicosa = HL.sunCalculation(epwFile=epwFile, phi=phi, ro=ro) # Cálculo Radiação Solar
data['w'] = HAPropsSI('W','P',data['P'].to_numpy(),'RH',data['rh'].to_numpy()/100,
'T',data['tdb'].to_numpy()+273.15)

### FIM: Condições no estado externo do ar
### INÍCIO: Condições no estado de insuflamento do ar
# Resfriamento Evaporativo com 80% de efetividade
data['ts80'] = (data['tdb']-0.01*80*(data['tdb']-data['twb']))
data['ws80'] = (HAPropsSI('W','P',data['P'].to_numpy(),'Twb',data['twb'].to_numpy()+273.15,
'T',data['ts80'].to_numpy()+273.15))

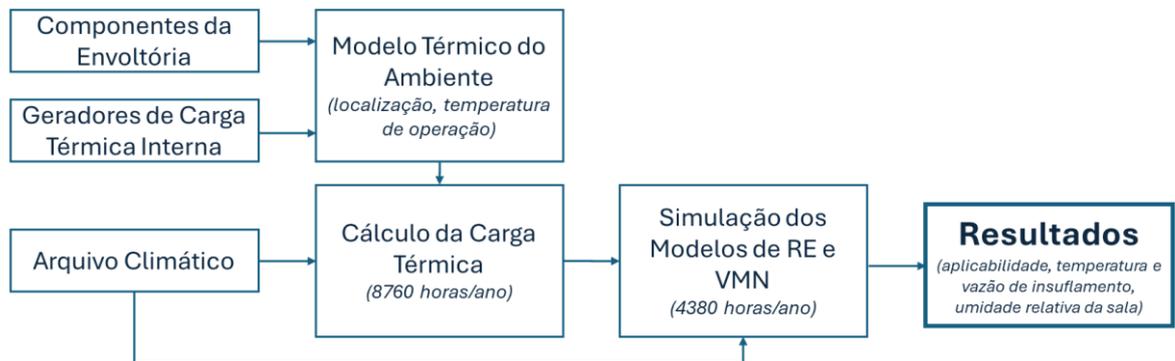
# Ventilação Mecânica e Natural
data['tsVMN'] = data['tdb']
data['wsVMN'] = data['w']
### FIM: Condições no estado de insuflamento do ar
### INÍCIO: Cálculo de Carga Térmica para cada temperatura interna de operação (Passo 2)
for ti in list(range(22,36)): # Temperatura de 22 a 35 oC
zona = zoneModel(ti,rhi)
zona.heatLoad(weatherData=vicosa, phi=-20.75, extRadiationCalc=True, thermalInertiaCalc=True)
### INÍCIO: Cálculo das Condições do Ambiente
data['wrsat'+str(ti)] = HAPropsSI('W','P',data['P'].to_numpy(),'T',ti+273.15,'RH',1)
### FIM: Cálculo das Condições do Ambiente

```

**Figura 4 – Trecho recortado do código em Python com cálculo da carga térmica para cada arquivo climático e temperatura de operação, e simulação dos processos de RE/VMN. ‘HL’ representa funções da biblioteca *HeatLoadCalc* e *HAPropsSI* é a função para cálculo das propriedades psicrométricas da biblioteca *CoolProp*. Fonte: Autores.**

A figura 5 ilustra esquematicamente as operações do código desenvolvido. As informações relacionadas aos componentes da envoltória (paredes, portas, janelas, piso e teto) e aos geradores de carga térmica interna (pessoas, computadores, iluminação) formam o modelo térmico do ambiente. O modelo térmico do ambiente (nesse caso, a sala de aula), junto com as informações de operação e os arquivos climáticos, geram os dados utilizados para o cálculo da carga térmica. Os resultados horários da carga térmica e os dados climáticos são informações de entrada dos modelos

de RE/VMN. A simulação dos modelos de RE/VMN gera os resultados finais, com os parâmetros característicos de cada técnica de resfriamento.



**Figura 5 – Esquema representativo resumindo as partes do estudo. Fonte: Autores.**

### 2.9. Análise de desempenho

A avaliação dos resultados baseou-se no índice de “aplicabilidade acumulada”, definido para organizar a análise. Esse índice depende dos dados horários de carga térmica e vazão de insuflamento necessária, obtidos para temperaturas de projeto de 22 °C a 35 °C, onde a vazão de insuflamento deve estar dentro dos respectivos limites mínimo e máximo, conforme discutido na Seção 2.6. Assim, para uma dada combinação de técnica de resfriamento e cenário climático, calcula-se a porcentagem de horas, por ano, em que a sala de aula permanecerá em uma temperatura de projeto igual ou inferior à fixada.

Assim, por exemplo, se a aplicabilidade acumulada for de 100% a 26 °C, é possível afirmar que, para aquela condição climática e técnica de resfriamento, em todas as horas de interesse do ano (de 7h às 19h em cada dia), a temperatura da sala poderá ser mantida igual ou inferior a 26 °C. Se a aplicabilidade acumulada for de 50% para 24 °C, pode-se dizer que, em 50% do tempo desejado, a temperatura da sala pode ser mantida menor ou igual a 24 °C.

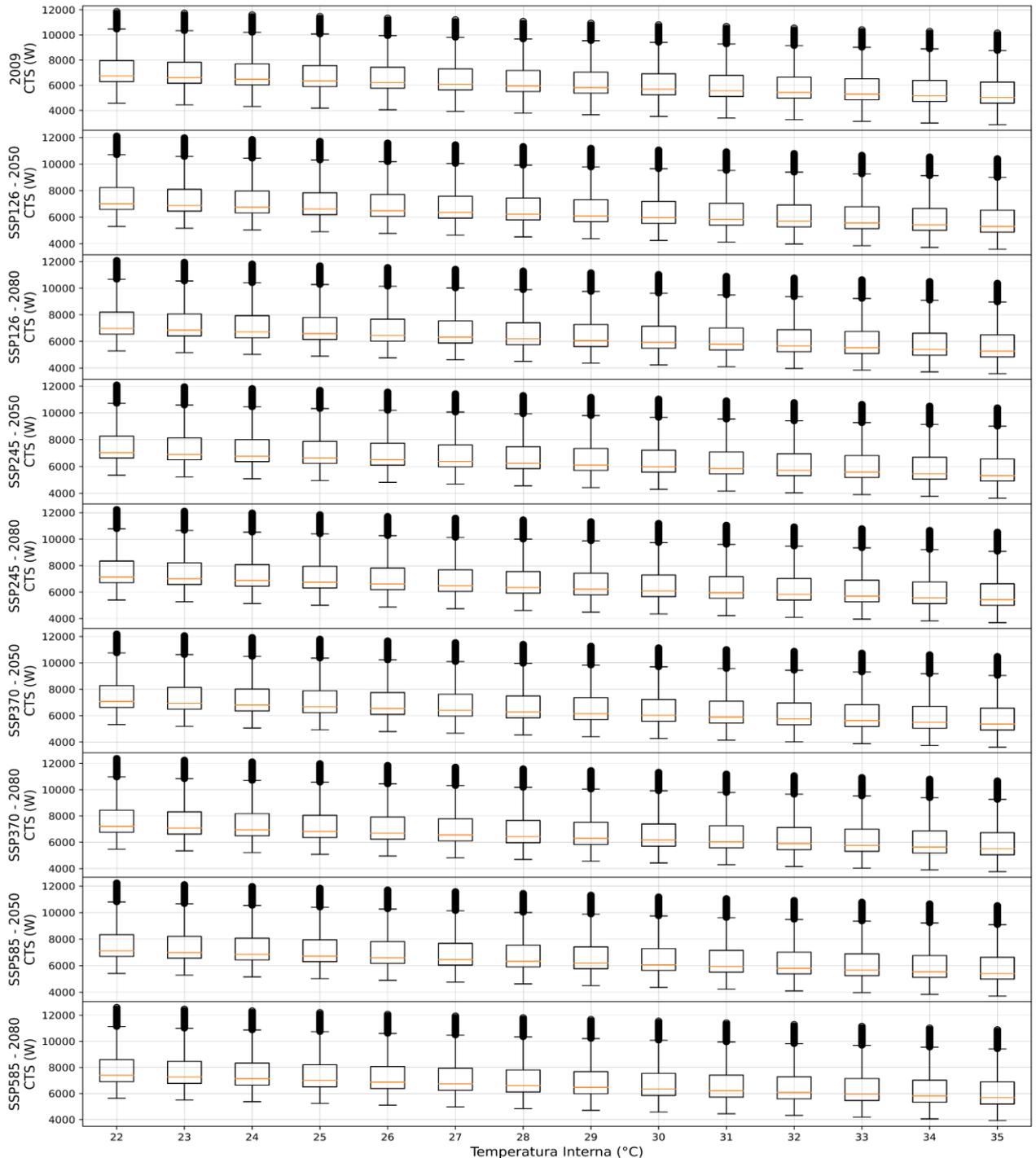
A aplicabilidade foi testada para umidades relativas da sala entre 40% e 60% e entre 40% e 80%, em todos os cenários climáticos, considerando as técnicas de Resfriamento Evaporativo e Ventilação Mecânica/Natural. A partir da aplicabilidade obtida em cada situação simulada, analisou-se as correspondentes variações de umidade relativa interna, vazão mássica e temperatura de insuflamento. Estes parâmetros permitiram detalhar o desempenho das táticas de resfriamento nas situações de “aplicação”.

## 3. Resultados e Discussão

A partir das simulações realizadas para Ventilação Mecânica/Natural (VMN) e Resfriamento Evaporativo (RE) nos nove cenários climáticos, obteve-se a carga térmica anual para temperaturas de operação de 22 °C a 35 °C e a aplicabilidade acumulada do sistema de resfriamento (RE/VMN) para cada cenário climático. Em seguida, analisou-se a umidade relativa interna da sala, a vazão e a temperatura de insuflamento para as condições de aplicabilidade acumulada computadas anteriormente. Por fim, são discutidas as relações entre essas variáveis.

### 3.1 Carga Térmica

A figura 6 mostra *boxplots* com as variações de Carga Térmica Sensível (CTS) durante o ano para cada um dos cenários climáticos. Para cada ano, há 14 *boxplots*, um para cada temperatura de operação simulada. Nota-se que, para temperaturas internas mais altas, os valores medianos de CTS diminuem, conforme esperado. E para cenários mais quentes também há um aumento geral da carga térmica.



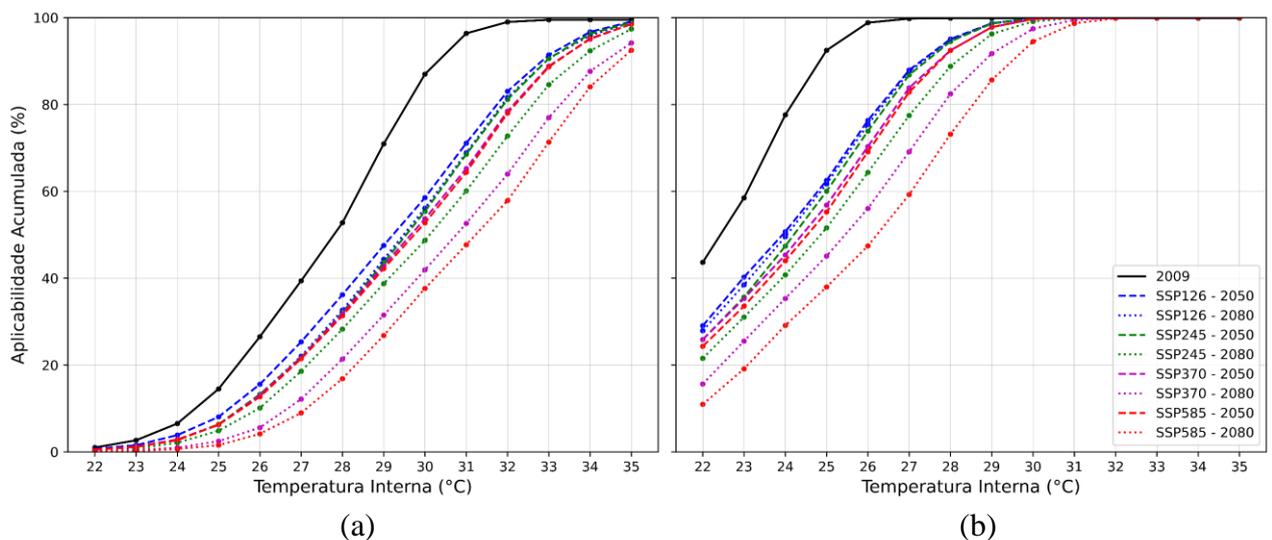
**Figura 6 - Boxplots que mostram a distribuição de valores de carga térmica sensível, nas horas de interesse, para cada cenário climático. Fonte: Autores.**

### 3.2 Aplicabilidade acumulada

A figura 7 mostra a aplicabilidade acumulada para o Resfriamento Evaporativo no cenário climático atual (2009) e nos oito cenários futuros. As situações à esquerda do gráfico (a) possuem a umidade relativa limitada à faixa entre 40% e 60%, enquanto as situações à direita (b) possuem a umidade relativa limitada entre 40% e 80%. O aumento do limite da umidade relativa deslocou todos os gráficos para esquerda, isto é, a aplicabilidade de horas aumentou para temperaturas internas menores. Por exemplo, no primeiro caso (a), para o cenário atual (2009), a aplicabilidade ultrapassou 80% das horas desejadas apenas a 30 °C, enquanto no segundo caso (b) o mesmo ocorreu a 25 °C. Ainda neste cenário (2009), a aplicabilidade acumulada atingiu praticamente 100% das horas a 31 °C no primeiro caso (a) e a 26 °C no segundo caso (b). Portanto, destaca-se que o RE foi

capaz de garantir que a temperatura interna da sala se mantivesse até 26 °C, com a umidade relativa interna entre 40% e 80%, durante quase todo o ano.

Para os cenários futuros, observou-se um comportamento similar ao do cenário de 2009, mas deslocado para a direita, isto é, as temperaturas ficaram maiores para a mesma aplicabilidade. Três dos quatro cenários relacionados a 2050 (SSP2-4.5, SSP3-7.0 e SSP5-8.5) foram capazes de operar com temperaturas internas inferiores às dos cenários do mesmo tipo relacionados a 2080. O cenário mais otimista, SSP1-2.6, teve desempenho similar em 2050 e em 2080. No cenário mais pessimista (SSP5-8.5), a temperatura interna ficou cerca de 2 °C maior em 2080 do que em 2050. Nos dois cenários intermediários (SSP2-4.5 e SSP3-7.0), a diferença de temperatura entre os anos de 2050 e 2080 foi em torno de 1 °C para a mesma aplicabilidade acumulada. Para os cenários futuros, temperaturas internas até 27 °C atingiram aplicabilidade acumulada de pelo menos 80% das horas para todos os cenários de 2050, para a faixa de umidade relativa interna entre 40 e 80%. O mesmo índice de aplicabilidade para os três cenários mais pessimistas de 2080 foi alcançado apenas para a temperatura de 29 °C.

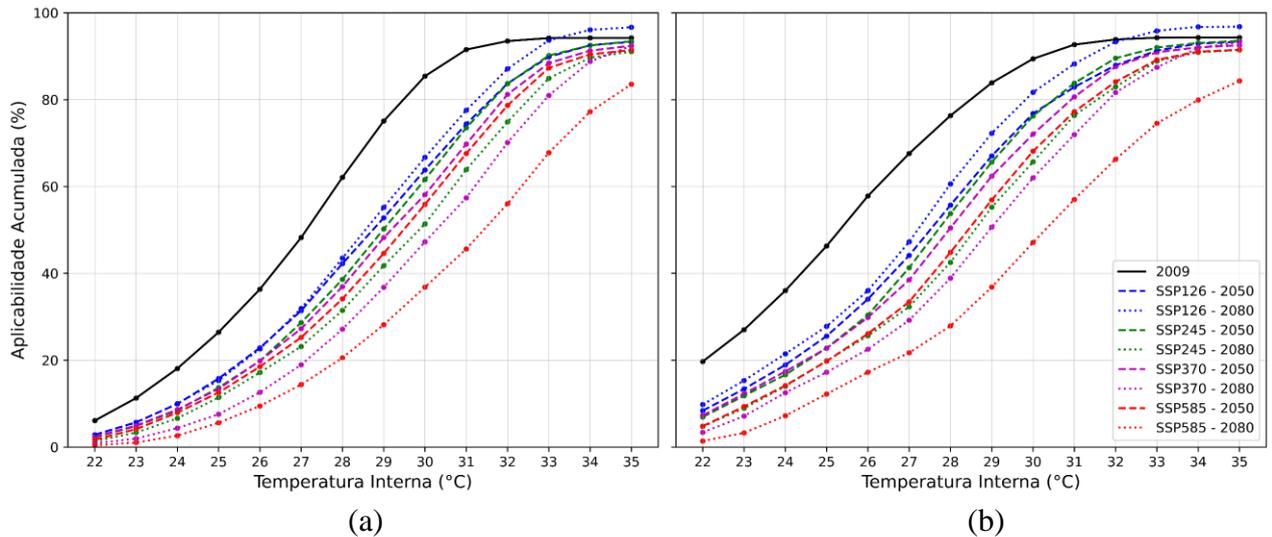


**Figura 7 – Aplicabilidade Acumulada de horas para o Resfriamento Evaporativo em função da Temperatura Interna, para umidade relativa resultante internamente entre: (a) 40% e 60%; (b) 40% e 80%. Fonte: Autores.**

A figura 8, similar à figura 7, mostra a aplicabilidade acumulada para a Ventilação Mecânica/Natural no cenário climático atual (2009) e nos oito cenários futuros. De modo geral, as temperaturas internas para todos os casos aumentaram quando comparadas com situações equivalentes usando o Resfriamento Evaporativo. Na maioria dos cenários, foi apenas a partir de temperaturas internas iguais ou superiores a 31 °C que se alcançou uma aplicabilidade acumulada de pelo menos 80% das horas analisadas. O resfriamento utilizando VMN elevou substancialmente a temperatura interna do ambiente. Houve apenas uma pequena melhora da aplicabilidade acumulada na situação em que a faixa de umidade relativa interna estava limitada entre 40% e 80% (b) em comparação com a situação com limites de umidade relativa sendo 40% e 60% (a). As diferenças entre os cenários climáticos foram similares às observadas para o RE.

A figura 9 apresenta a aplicabilidade acumulada do Resfriamento Evaporativo e da Ventilação Mecânica/Natural por ano: 2009 (a, b); 2050 (c, d); 2080 (e, f). Novamente, duas faixas de umidade relativa interna foram analisadas: de 40% a 60% (a, c, e); e de 40% a 80% (b, d, f). Com umidade máxima de 60%, os desempenhos do RE e da VMN foram similares nos três anos analisados, em todos os cenários climáticos. Nas situações nas quais se admite umidade relativa até 80%, o desempenho do RE foi significativamente superior ao da VMN. Esses resultados mostram que, apesar do RE diminuir a temperatura de insuflamento, ele contribui mais para o aumento da

umidade interna. Este aspecto reduz e torna sua aplicabilidade semelhante à da VMN, quando se limita a umidade interna a 60%.



**Figura 8 – Aplicabilidade Acumulada de horas para a Ventilação Mecânica/Natural em função da Temperatura Interna, para umidade relativa resultante internamente entre: (a) 40% e 60%; (b) 40% e 80%. Fonte: Autores.**

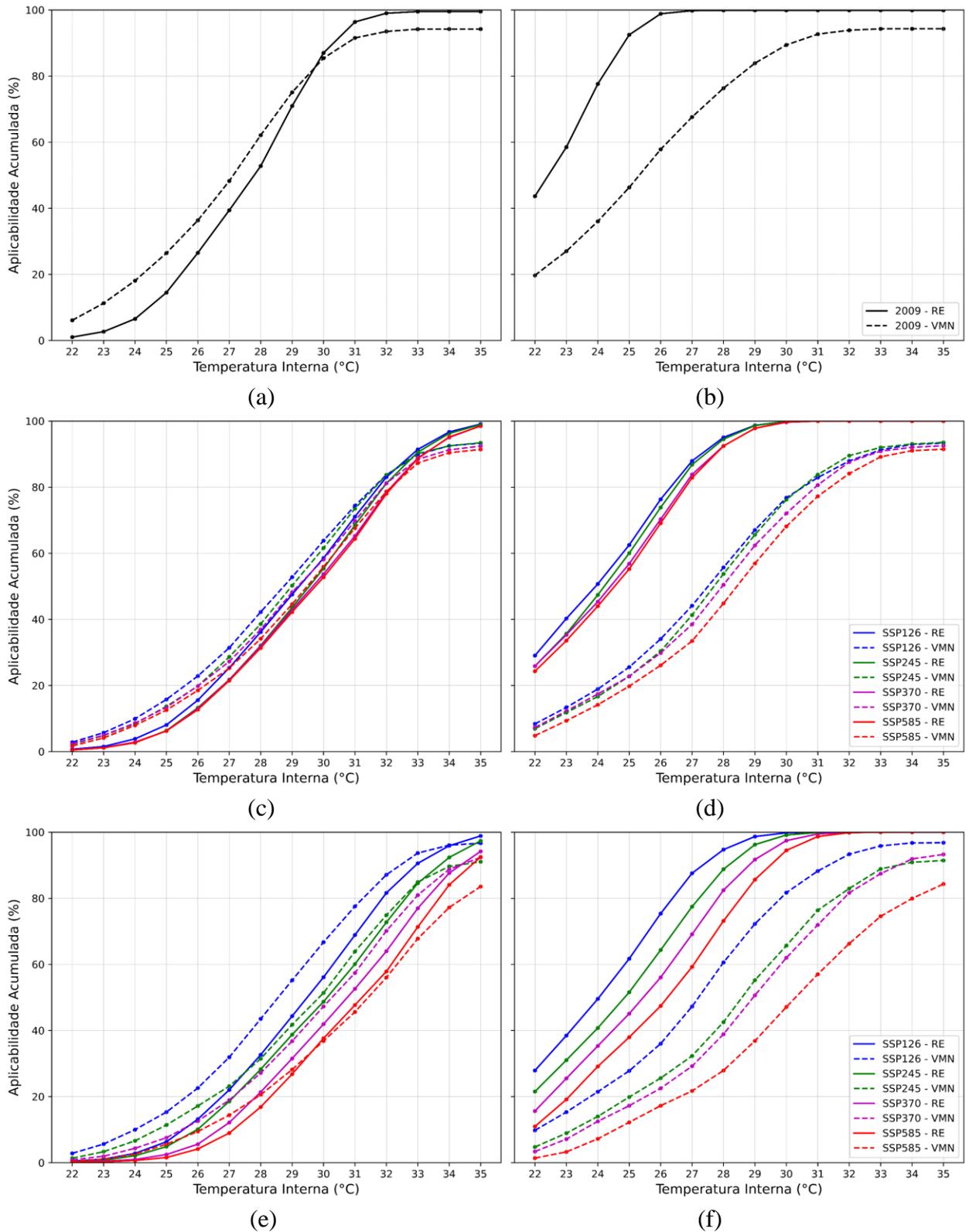
### 3.3. Umidade relativa interna

Semelhante à Figura 9, a Figura 10 ilustra a média de umidade interna resultante, para as situações de aplicabilidade analisadas anteriormente. Como era esperado, a umidade relativa interna foi sempre maior com o uso do Resfriamento Evaporativo em comparação com o uso da Ventilação Mecânica/Natural, independentemente do ano ou cenário climático. Em todas as situações com RE, a umidade interna média se aproximou do valor máximo permitido. Tendência similar foi observada para a VMN com o limite máximo de umidade interna de 60%. Contudo, mesmo quando o limite foi aumentado para 80%, a VMN ainda resultou em umidades internas em torno de 60%.

### 3.4. Vazão mássica de insuflamento

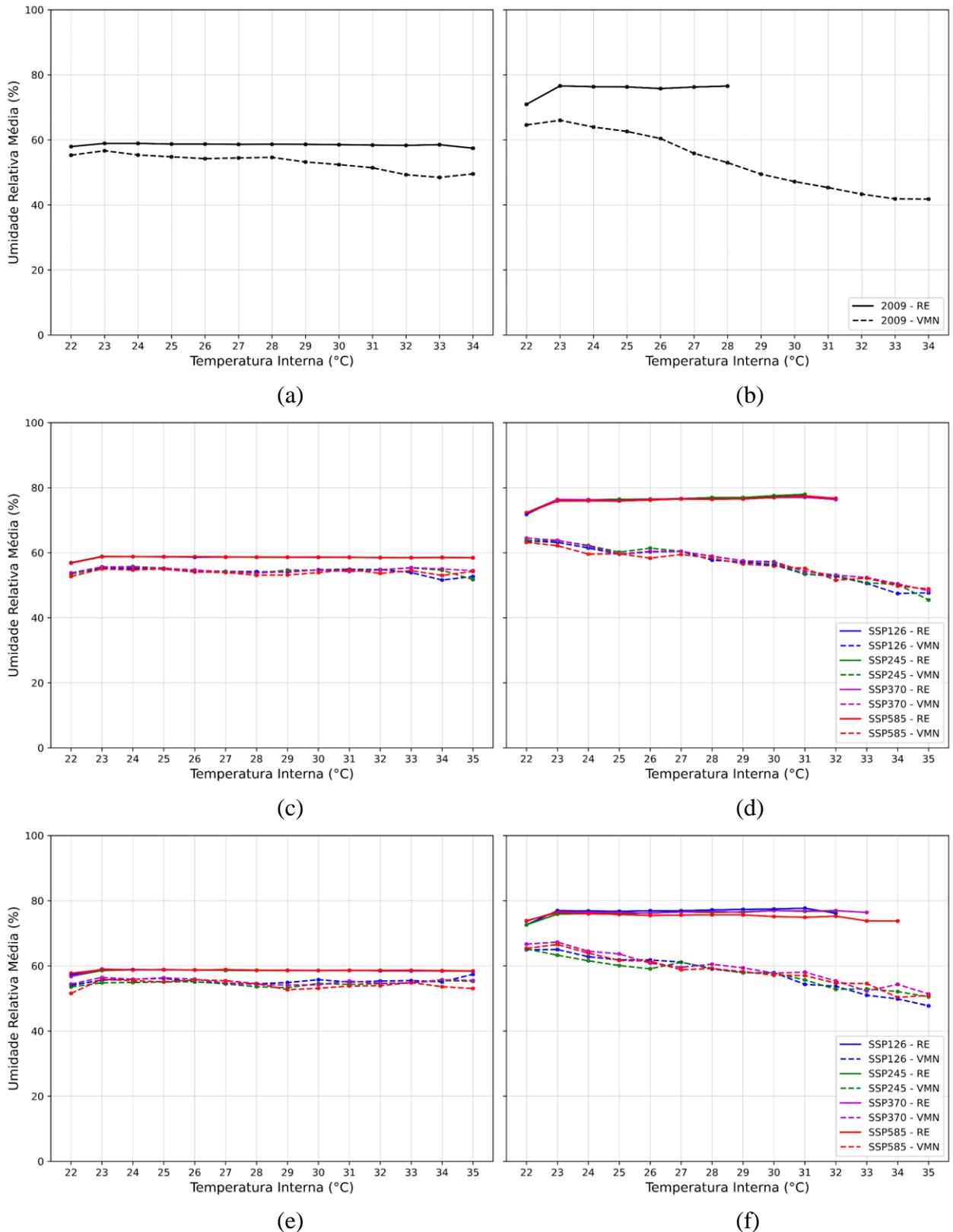
A figura 11 mostra as variações na vazão mássica média em função da temperatura interna de projeto fixada, para todos os cenários climáticos simulados, tanto para o Resfriamento Evaporativo como para a Ventilação Mecânica/Natural. A figura 11(a) apresenta os casos com umidade relativa interna entre 40% e 60%. Nesta faixa, as vazões mássicas do RE foram substancialmente menores que as da VMN. Observou-se um aumento nas vazões medianas para cenários mais pessimistas, e também com o passar dos anos. Além disso, a dispersão dos valores foi significativamente menor nos cenários com RE em comparação com a VMN, como indicado pelos *boxplots*.

A figura 11(b) é semelhante à figura 11(a), mas para umidade relativa interna entre 40% e 80%. Nesta faixa, o Resfriamento Evaporativo apresentou vazões de insuflamento medianas menores que as da Ventilação Mecânica/Natural, embora aumentaram substancialmente em relação à faixa de 40% a 60%. O aumento da aplicabilidade acumulada do RE com umidade entre 40% e 80% foi compensado pelo aumento na vazão de insuflamento. Para a VMN, as vazões de insuflamento foram similares nas duas faixas de umidade, e a variação dos cenários climáticos não influenciou significativamente o valor mediano das vazões.



**Figura 9 – Aplicabilidade acumulada para o Resfriamento Evaporativo e a Ventilação Mecânica/Natural nos cenários climáticos para os anos: (a, b) 2009; (c, d) 2050; (e, f) 2080. Restrição da umidade relativa interna entre: (a, c, e) 40% e 60%; (b, d, f) 40% e 80%.**

**Fonte: Autores.**



**Figura 10 – Umidade relativa interna média para o Resfriamento Evaporativo e a Ventilação Mecânica/Natural para os cenários climáticos nos anos: (a, b) 2009; (c, d) 2050; (e, f) 2080. Faixas de umidade relativa interna entre: (a, c, e) 40% e 60%; (b, d, f) 40% e 80%. Fonte: Autores.**

### 3.5. Temperatura de insuflamento

A figura 12 ilustra, por meio de *boxplots*, as variações na temperatura de insuflamento para todos os nove cenários climáticos simulados, tanto para o Resfriamento Evaporativo quanto para a Ventilação Mecânica/Natural, com umidade relativa interna nas faixas de: a) 40% a 60%; e b) 40% a 80%. No caso (a), a temperatura de insuflamento foi inferior a 23 °C para, pelo menos, 75% das horas de aplicabilidade do RE, na maioria dos cenários. Para a VMN, cerca de 75% das situações de insuflamento obtiveram temperatura abaixo de 27 °C, aproximadamente. No caso (b), a temperatura de insuflamento do RE é menor que 26°C para 75% das horas aplicáveis, em quase todos os cenários climáticos, e para a VMN, fica inferior a 29°C em 75% das situações possíveis. Assim, observa-se uma tendência de temperaturas de insuflamento mais altas no caso (b) em comparação com o caso (a).

Em todos os cenários climáticos, o RE consistentemente apresenta temperaturas de insuflamento inferiores às da VMN, destacando seu maior potencial de resfriamento ao enfrentar a carga térmica. Na comparação direta entre as duas técnicas, observa-se que, para umidade relativa entre 40% e 60%, o RE alcança uma temperatura mediana de cerca de 20°C, enquanto a VMN fica em torno de 24°C, resultando em uma diferença de aproximadamente 4°C. Já para a faixa entre 40% e 80%, a diferença entre as temperaturas de insuflamento das duas estratégias diminui para cerca de 2°C: o RE apresenta uma mediana de cerca de 23°C, enquanto a VMN se aproxima de 25°C.

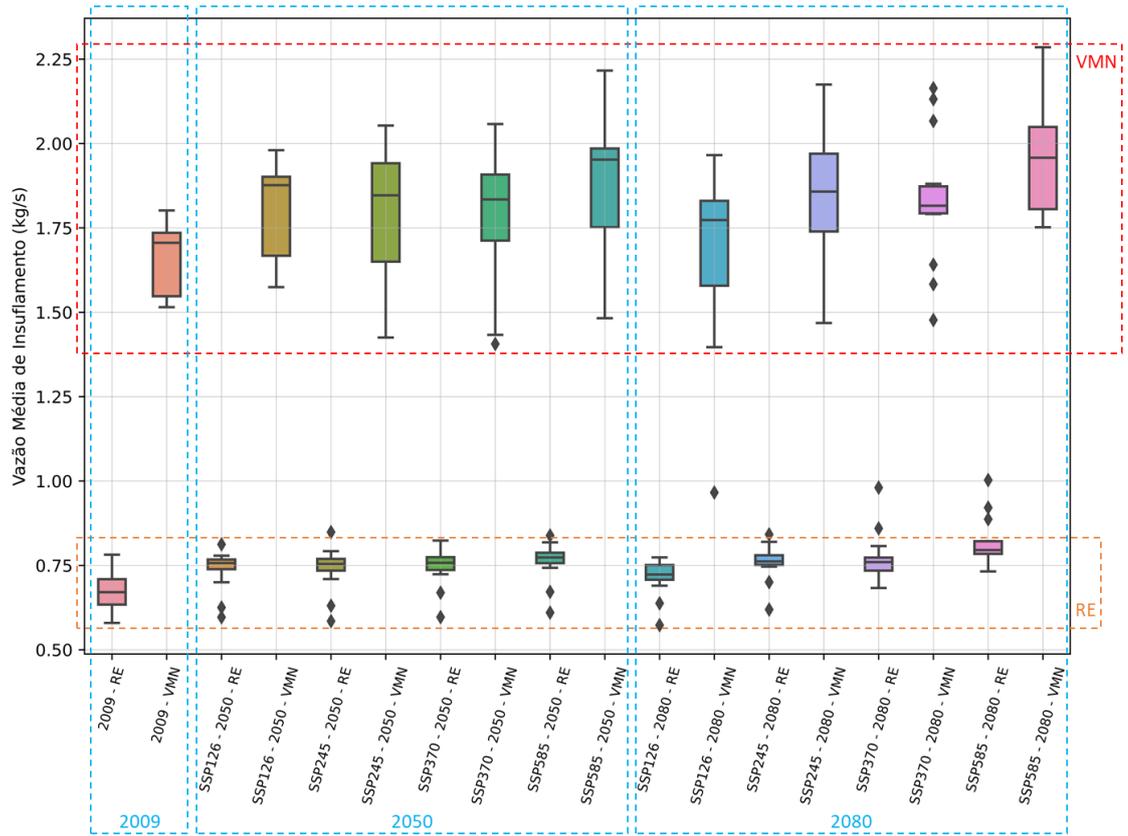
### 3.6. Discussão

Para a situação analisada, de uma sala de aula com densidade de 1,7 m<sup>2</sup>/pessoa, localizada em Viçosa (MG), com uso das 7h às 19h, o Resfriamento Evaporativo (direto e com efetividade de 80%) com umidade relativa interna limitada a 80%, foi capaz de manter a temperatura do ambiente abaixo de 27 °C no cenário climático atual (2009), abaixo de 30 °C em todos os cenários de 2050, e abaixo de 32 °C em todos os cenários de 2080. Restringir a umidade relativa interna a 60% aumentou a temperatura interna em cerca de 6 °C em todos os casos de uso do RE. Com esta limitação, o desempenho do RE é reduzido e fica muito próximo ao da VMN.

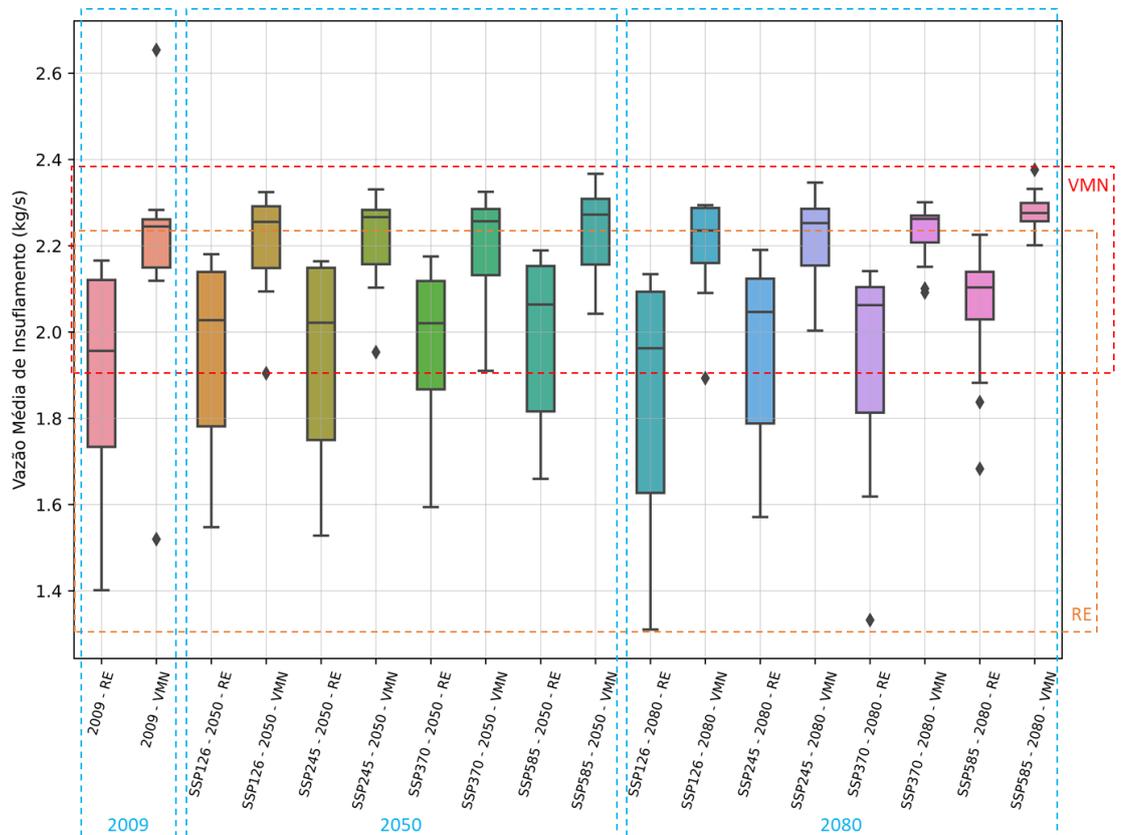
Nos cenários climáticos com uso do RE e umidade relativa interna limitada a 80%, a vazão de insuflamento variou entre 1,3 e 2,3 kg/s e a temperatura de insuflamento entre 17 e 31 °C, com as medianas entre 22 e 24 °C, para quase todos os cenários. Duas exceções foram: o cenário climático atual (2009) com medianas entre 20 e 22 °C, e o SSP5-8.5 (2080) com medianas entre 24 e 26 °C. Nos cenários com umidade até 60%, esses parâmetros de insuflamento foram substancialmente menores, com a vazão variando entre 0,5 e 1,0 kg/s e com a temperatura entre 12 e 26 °C, com medianas em torno de 20 °C.

O padrão observado na aplicabilidade da VMN foi similar para limites superiores de umidade iguais a 60% e a 80%. Porém, há pequeno aumento da aplicabilidade em temperaturas de projeto menores, com a umidade relativa restrita a 80%. As vazões e temperaturas de insuflamento não variaram significativamente de modo que impactasse o tamanho necessário do sistema de distribuição de ar, considerando as duas situações de restrição na umidade e todos os cenários climáticos. Em todas as circunstâncias simuladas, a temperatura da sala foi superior a 28 °C em no mínimo 40% do tempo, e acima de 30 °C em pelo menos 20% do tempo.

Para a faixa de umidade relativa entre 40% e 80%, o RE mostrou-se capaz de condicionar o ambiente em 27°C ou menos, durante todas as horas de uso, no cenário climático atual (2009). Já a VMN manteve a sala em 30°C ou menos, em 90% do tempo, na mesma condição climática. Projetando o ano de 2050 para os quatro cenários, a temperatura interna, com 100% de atendimento para o RE, subiu para 30°C, enquanto que para a VMN manteve-se abaixo de 31 °C, em 80% das horas. Para o ano de 2080, com o RE, as temperaturas de 29 °C, 30 °C, 31 °C e 32 °C atenderam quase 100% do tempo para os cenários SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 e SSP5-8.5, respectivamente. Para o mesmo ano e sequência de cenários, a VMN manteve, em cerca de 80% do tempo, a temperatura abaixo ou igual a 30 °C, 32 °C, 32 °C e 34 °C, nessa ordem.

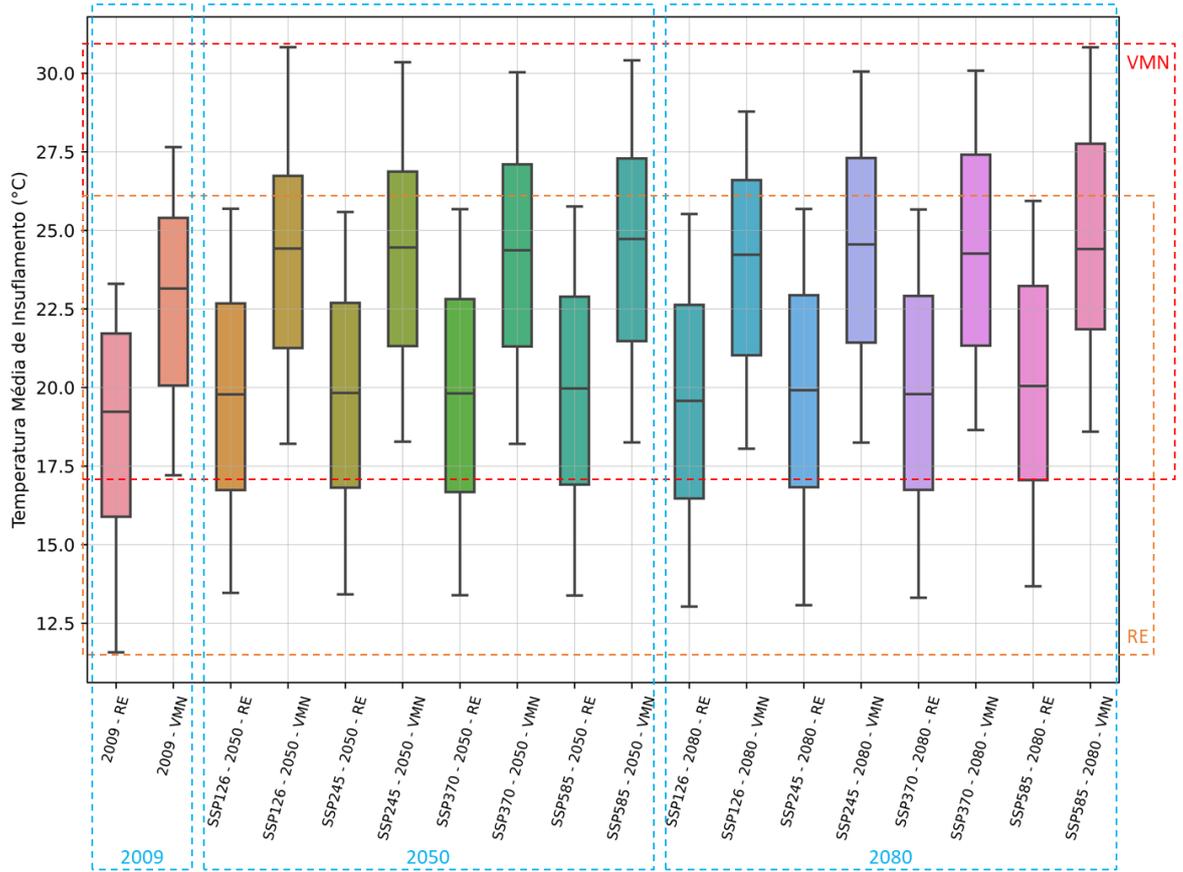


(a)

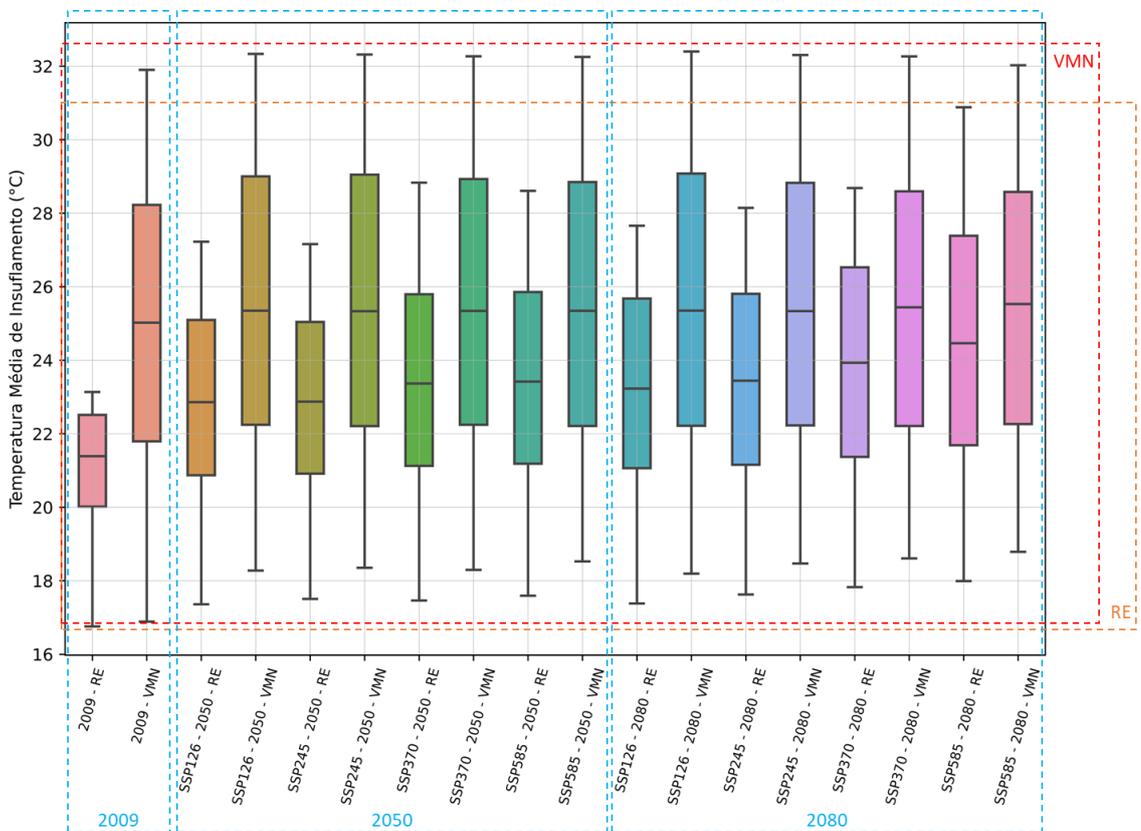


(b)

**Figura 11 – Boxplots que descrevem a variação da vazão de insuflamento em diferentes combinações, para o intervalo de restrição de UR interna entre: (a) 40% e 60%; (b) 40% e 80%. Fonte: Autores.**



(a)



(b)

Figura 12 – Boxplots que descrevem a distribuição da temperatura média de ar insuflado em diferentes combinações, para o intervalo de restrição de UR interna entre: (a) 40% e 60%; (b) 40% e 80%. Fonte: Autores.

#### 4. Conclusão

Este trabalho avaliou a utilização do Resfriamento Evaporativo (RE) e da Ventilação Mecânica/Natural (VMN) como estratégias de projeto de sistemas de condicionamento de ar para uma sala de aula com 40 pessoas em Viçosa (MG). Nove cenários climáticos foram analisados para duas faixas de umidade relativa interna. O RE, com umidade limitada ao intervalo entre 40% e 80%, apresentou a melhor aplicabilidade em todos os cenários climáticos. Esta técnica foi capaz de sempre manter a temperatura da sala até 27 °C no cenário atual (2009), abaixo de 30 °C nos cenários de 2050 e até 32 °C nos cenários de 2080.

O RE, em geral, resulta em menores vazões, temperaturas de insuflamento e temperaturas internas, além de gerar maiores umidades relativas no ambiente, em comparação com a VMN, nos nove cenários climáticos simulados. Menores vazões implicam em distribuição de ar com menores velocidades e menor gasto energético. Como as vazões de ar variam de acordo com a condição climática, os sistemas de insuflamento devem ser projetados com vazão de ar variável, controlada a partir das medidas de umidade e temperatura da sala.

Na realidade brasileira, ambientes tipo sala de aula comumente possuem ventilação inadequada, seja natural ou mecânica, o que também pode ser observado em salas de aula de Viçosa (MG). Os resultados mostram que o uso do RE pode promover conforto térmico e QAI para salas de aula em Viçosa (MG) tanto no cenário atual quanto em cenários futuros. Mesmo nos cenários mais pessimistas, o RE pode manter o ambiente em temperaturas inferiores a 28 °C em pelo menos 80% do tempo. O mesmo não ocorre com o uso da VMN, principalmente em cenários futuros. Assim, para Viçosa (MG), a utilização de sistemas de condicionamento de ar baseados em RE apresenta-se como uma opção de custo mais baixo e com impacto ambiental menor que os sistemas de condicionamento de ar convencionais, além de serem mais eficientes que os sistemas VMN, mais comumente encontrados neste tipo de ambiente.

Os resultados mostram que o uso de RE para salas de aula no clima de Viçosa (MG) é promissor. Vale ressaltar que as condições simuladas consideraram condições de projeto de máxima ocupação e radiação solar, conforme preconizam os métodos de projeto de sistemas de ar condicionado. Em condições de uso com ocupação menor e maior nebulosidade, o RE operará com temperaturas e umidade relativas menores, o que impactará positivamente na aplicabilidade do sistema.

Ressalta-se que a utilização do conceito de “aplicabilidade acumulada” como critério de avaliação permitiu ter uma visão global de como os sistemas de resfriamento operam ao longo das horas de projeto, inclusive permitindo refutar determinado método em caso de baixa aplicabilidade. As informações de vazões e temperaturas de insuflamento ao longo das horas de uso permitem o dimensionamento dos equipamentos e sistemas de controle necessários para o funcionamento do sistema nas condições de aplicabilidade possível. Essas variáveis analisadas permitiram avaliar tanto a possibilidade de uso do RE e da VMN quanto suas condições de operação.

Outros sistemas de resfriamento passivos, como os de Resfriamento Dessecante (RD) e de Resfriamento Radiante Noturno (RRN), também têm potencial de uso. Esses sistemas, embora também dependam do clima externo, tendem a operar com temperaturas de insuflamento menores que o RE. No entanto, são sistemas mais complexos construtivamente e ainda com baixa aplicação. Em trabalhos futuros, a abordagem de modelagem e simulação utilizada neste estudo pode também ser aplicada a outros locais e configurações de sala de aula para avaliação da aplicabilidade de sistemas alternativos de resfriamento como estratégia de condicionamento de ar, inclusive para sistemas de RD e de RRN.

## 5. Agradecimentos

Ao Laboratório de Tecnologias em Conforto Ambiental e Eficiência Energética - Latecae, do DAU/UFV por ceder os arquivos climáticos futuros de Viçosa (MG) criados no âmbito do projeto CNPq Processo 406426/2022-8 "Tecnologias para adaptação de edificações às mudanças no clima: eficiência energética, geração fotovoltaica e redução de emissões em escolas".

## 6. Referências

- Abdullah, S., Zubir, M. N. B. M., Muhamad, M. R. B., Newaz, K. M. S., Öztop, H. F., Alam, M. S., & Shaikh, K. (2023). Technological development of evaporative cooling systems and its integration with air dehumidification processes: A review. *Energy and Buildings*, v. 283, p. 1-28.
- Bell, I. H.; Wronski, J.; Quoilin, S.; Lemort, V. (2014) Pure and Pseudo-pure Fluid Thermophysical Property Evaluation and the Open-Source Thermophysical Property Library CoolProp. *Ind. Eng. Chem. Res.*, v. 53, i. 6, p. 2498–2508.
- ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). (2008 a). NBR 16401-1: Instalações de Ar Condicionado – Sistemas Centrais e unitários. Parte 1: Projetos das Instalações.
- ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). (2008 b). NBR 16401-2: Instalações de Ar Condicionado – Sistemas Centrais e unitários. Parte 2: Parâmetros de conforto térmico.
- ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). (2008 c). NBR 16401-3: Instalações de Ar Condicionado – Sistemas Centrais e unitários. Parte 3: Qualidade do ar interior.
- Alsaad, H.; Voelker, C. (2020). Performance evaluation of ductless personalized ventilation in comparison with desk fans using numerical simulations. *Indoor Air*, 30, 776-789. <https://doi.org/10.1111/ina.12672>
- ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers, Inc.). (2009). *ASHRAE Handbook Fundamentals*.
- ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers, Inc.). (2017). *ASHRAE Handbook Fundamentals*.
- Bamdad, K., Matour, S., Izadyar, N., & Omrani, S. (2021). Impact of climate change on energy saving potentials of natural ventilation and ceiling fans in mixed-mode buildings. *Building and Environment*, 209, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108662>
- Bhamare, D. K., Rathod, M. K., & Banerjee, J. (2019). Passive cooling techniques for building and their applicability in different climatic zones – The state of art. *Energy & Buildings*, 198, 467-490. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.06.023>
- Climate One Building. (2023). Disponível em: <<https://climate.onebuilding.org/>>. Acesso em: julho/2023.
- Climate Copernicus. Reanalysis: ERA5 single levels. (2023). Disponível em: <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-single-levels?tab=overview>. Acesso em: julho/2023.
- El-Dessouky, H., Ettouney, H., & Al-Zeefari, A. (2004). Performance analysis of two-stage evaporative coolers. *Chemical Engineering Journal*, 102, 255-266. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2004.01.036>
- Future Weather Generator. (2023). Disponível em: <https://adai.pt/future-weather-generator/>. Acesso em: julho/2023.
- INEP. (2019). Relatório de resultados do Saeb 2019: 5º e 9º anos do Ensino Fundamental e séries finais do Ensino Médio. Brasília: Inep, 2021.
- INMETRO. (2013). Catálogo de Propriedades Térmicas de Paredes, Coberturas e Vidros. Anexo da Portaria INMETRO N°50/2013.

- ISO 15927-4. (2005). Hygrothermal performance of buildings – Calculation and presentation of climatic data – Part 4: Hourly data for assessing the annual energy use for heating and cooling.
- JONES, W. P. (2001). Air Conditioning Engineering. Taylor & Francis.
- Kapilan, N., Isloor, A. M., Karinka, S. (2023). A comprehensive review on evaporative cooling systems. Results in Engineering, 18, 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101059>
- Kosonen, R., & Tan, F. (2004 a). The effect of perceived indoor air quality on productivity loss. Energy and Buildings, 36, 981-986. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2004.06.005>
- Kosonen, R., & Tan, F. (2004 b). Assessment of productivity loss in air-conditioned buildings using PMV index. Energy and Buildings, 36, 987-993. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2004.06.021>
- Mitchell, J. W. & Braun, J. E. (2018). Princípios de Aquecimento, Ventilação e Condicionamento de Ar em Edificações. LTC.
- O’neill, B. C., Tebaldi, C., van Vuuren, D. P., Eyring, V., Friedlingstein, P., Hurtt, G., Knutti, R., Kriegler, E., Lamarque, J.-F., Lowe, J., Meehl, G. A., Moss, R., Keywan Riahi, K., & Sanderson, B. M. (2016). The Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) for CMIP6. Geoscientific Model Development, 9, 3461-3482. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-3461-2016>
- Panchabikesan, K., Vellaisamy, K., & Ramalingam, V. (2017). Passive cooling potential in buildings under various climatic conditions in India. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 78, 1236-1252. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.030>
- Paolucci, F. C. (2012). Planta Arquitetônica do Projeto Executivo da edificação “Laboratórios de Engenharia (LABENGE)” localizada na Universidade Federal de Viçosa (UFV), no Campus de Viçosa (MG).
- Rodrigues, E., Fernandes, M. S., & Carvalho, D. (2023). Future weather generator for building performance research: An open-source morphing tool and an application. Building and Environment, 233, 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110104>
- Thapa, S., RIJAL, H. B., PASUT, W., SINGH, R., INDRAGANTI, M., BANSAL, A. K., PANDA, G. K. (2023). Simulation of thermal comfort and energy demand in buildings of sub-Himalayan eastern India - Impact of climate change at mid (2050) and distant (2080) future. Journal of Building Engineering, 68, 1-22. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.106068>
- Tibiricá, A. M. B., Bem, L. G. de, Campos, J. C. C., & Rosa, H. M. P. (2023). Certificado de Registro de Programa de Computador. Título: HeatLoadCalc. Linguagem: Python. Campo de aplicação: IN-03. Tipo de programa: DS-05. Algoritmo hash: SHA-512. Titular(es): Universidade Federal de Viçosa.
- Trox do Brasil Ltda. (2013). Difusor de Ar. Insuflamento e Retorno com plenum Série ADLR-SZR.
- Van Vuuren, D. P., Edmonds, J., Kainuma, M., Riahi, K., Thomson, A., Hibbard, K., Hurtt, G. C., Kram, T., Krey, V., Lamarque, J.-F., Masui, T., Meinshausen, M., Nakicenovic, N., Smith, S. J., & Rose, S. K. (2011). The representative concentration pathways: an overview. Climatic Change, 109, 5-31. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0148-z>
- Wang, K.-J., Lin, C. J., & Dagne, T. B. (2023). An adaptive indoor temperature control approach simultaneously improving thermal comfort and task performance. International Journal of Thermal Sciences, 193, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2023.108542>
- Xie, X., Luo, Z., Grimmond, S., & Sun, T. (2023). Impact of building density on natural ventilation potential and cooling energy saving across Chinese climate zones. Building and Environment, 244, 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110621>