



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo

LIGIA LISBÔA RODRIGUES

**ANÁLISE DO DESEMPENHO TERMOENERGÉTICO
DA ENVOLTÓRIA DE EDIFÍCIOS DE ESCRITÓRIOS
COM VENTILAÇÃO HÍBRIDA FRENTE ÀS
MUDANÇAS CLIMÁTICAS**

CAMPINAS
2020

LIGIA LISBÔA RODRIGUES

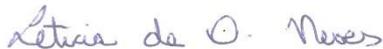
**ANÁLISE DO DESEMPENHO TERMOENERGÉTICO
DA ENVOLTÓRIA DE EDIFÍCIOS DE ESCRITÓRIOS
COM VENTILAÇÃO HÍBRIDA FRENTE ÀS
MUDANÇAS CLIMÁTICAS**

Dissertação de Mestrado apresentada à Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Unicamp, para obtenção do título de Mestra em Arquitetura, Tecnologia e Cidade, na área de Arquitetura, Tecnologia e Cidade.

Orientador(a): Prof(a). Dr(a). Letícia de Oliveira Neves

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO FINAL DA DISSERTAÇÃO DEFENDIDA PELA ALUNA LIGIA LISBÔA RODRIGUES E ORIENTADA PELA PROFA. DRA. LETICIA DE OLIVEIRA NEVES.

ASSINATURA DA ORIENTADORA



CAMPINAS

2020

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura
Rose Meire da Silva - CRB 8/5974

R618a Rodrigues, Ligia Lisbôa, 1989-
Análise do desempenho termoenergético da envoltória de edifícios de escritórios com ventilação híbrida frente às mudanças climáticas / Ligia Lisbôa Rodrigues. – Campinas, SP : [s.n.], 2020.

Orientador: Leticia de Oliveira Neves.
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo.

1. Mudanças climáticas. 2. Consumo energético. 3. Conforto térmico. 4. Ar condicionado. 5. Ventilação natural. I. Neves, Leticia de Oliveira, 1980-. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. III. Título.

Informações para Biblioteca Digital

Título em outro idioma: Thermal and energy performance of the envelope of mixed-mode office buildings under climate change

Palavras-chave em inglês:

Climate change

Energy consumption

Thermal comfort

Air-conditioning

Natural ventilation

Área de concentração: Arquitetura, Tecnologia e Cidade

Titulação: Mestra em Arquitetura, Tecnologia e Cidade

Banca examinadora:

Leticia de Oliveira Neves [Orientador]

Denise Helena Silva Duarte

Vanessa Gomes da silva

Data de defesa: 24-11-2020

Programa de Pós-Graduação: Arquitetura, Tecnologia e Cidade

Identificação e informações acadêmicas do(a) aluno(a)

- ORCID do autor: <https://orcid.org/0000-0002-0724-8274>

- Currículo Lattes do autor: <http://lattes.cnpq.br/7614780731334075>

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA E
URBANISMO

ANÁLISE DO DESEMPENHO TERMOENERGÉTICO DA
ENVOLTÓRIA DE EDIFÍCIOS DE ESCRITÓRIOS COM
VENTILAÇÃO HÍBRIDA FRENTE ÀS MUDANÇAS
CLIMÁTICAS

Ligia Lisbôa Rodrigues

Dissertação de Mestrado aprovada pela Banca Examinadora, constituída por:

Profa. Dra. Leticia de Oliveira Neves.

Presidente e Orientador(a)/ FEC / UNICAMP

Profa. Dra. Vanessa Gomes da Silva

FEC / UNICAMP

Profa. Dra. Denise Helena Silva Duarte

Universidade de São Paulo

A Ata da defesa com as respectivas assinaturas dos membros encontra-se no SIGA/Sistema de Fluxo de Dissertação/Tese e na Secretaria do Programa da Unidade.

Campinas, 24 de novembro de 2020

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Profa. Dra. Letícia Neves pela orientação, dedicação e ensinamentos durante o desenvolvimento desta pesquisa. Às Profas. Dras. Vanessa Gomes, Denise Duarte e Stelamaris Bertoli pelas considerações no exame de qualificação. A todos os professores e funcionários da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo que auxiliaram na minha formação.

Aos colegas da UNICAMP que tive a oportunidade de conhecer e com os quais compartilhei momentos de estudo e descontração, em especial à Fernanda pelo auxílio com o banco de dados e ao Felipe pelo auxílio com o *software* de simulação.

Aos queridos amigos por tornarem meus dias mais saborosos. Ao Bruno pelo enorme carinho e companheirismo.

À toda minha família pelo amor e pelo alicerce que representam, em especial ao meu núcleo familiar Nilo e Dora, Elisa, Cecília e Cida pelo apoio e incentivo em minha formação acadêmica. À Chantily por alegrar meus dias, saudades.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001 (88887.480089/2020-00).

RESUMO

Segundo o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), o aumento da temperatura global é consequência, principalmente, das emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) nos grandes centros urbanos. O ar-condicionado vem sendo cada vez mais utilizado a fim de manter condições confortáveis no ambiente interno e, com a elevação da temperatura global, a previsão é de que haja um aumento do uso deste sistema e das emissões de GEE. A ventilação natural é uma estratégia bioclimática recomendada para edifícios localizados em climas quentes, contribuindo com a redução do uso de sistemas mecânicos de condicionamento de ar. Esta pesquisa tem como principal objetivo investigar os impactos das mudanças climáticas no desempenho termoenergético de edifícios de escritórios que operam com ventilação híbrida. Para isso, um modelo de referência foi construído com base em um banco de dados composto por 50 edificações de escritórios com ventilação híbrida, localizadas na cidade de São Paulo. Três parâmetros relacionados ao projeto da envoltória foram analisados via simulação computacional: elementos de sombreamento, área efetiva de abertura das esquadrias para ventilação natural e fator solar do vidro. A análise foi realizada para duas orientações solares: Norte-Sul e Leste-Oeste. As simulações termoenergéticas foram realizadas nos programas EnergyPlus e jEPlus. Para isso, arquivos climáticos futuros foram gerados por meio da ferramenta Weather Shift para os anos de 2035, 2065 e 2090, levando em consideração os "Caminhos de Concentração Representativos" (Representative Concentration Pathway - RCP) 4.5 e 8.5. Uma avaliação comparativa do cenário atual (2020) com os cenários futuros foi realizada por meio das variáveis graus-hora de resfriamento, demanda térmica de resfriamento, horas de *setpoint* não atendido e consumo anual de energia. No cenário climático atual a economia de energia do modelo com melhor desempenho (ângulo vertical de sombreamento de 45 graus, área efetiva de abertura de 90%, fator solar do vidro de 0,9 e orientação solar Norte-Sul) foi de 26%, em relação ao edifício base, representativo da amostra de edifícios do banco de dados. A análise de cenários futuros mostrou uma redução na diferença de desempenho entre os modelos de melhor e pior desempenho, principalmente para o RCP 8.5 (cenário de altas emissões de GEE, representativo do *business as usual*), o que significa que o aquecimento global reduziu o benefício do uso de estratégias bioclimáticas na envoltória da edificação. No entanto, a contribuição na melhoria do desempenho termoenergético do modelo analisado trazida pela combinação das estratégias passivas como medida de adaptação às mudanças climáticas, em relação à utilização de estratégias individuais, foi suficiente para neutralizar o aumento do uso de energia para resfriamento devido aos efeitos do aquecimento global, evidenciando sua importância.

Palavras-chave: Mudanças climáticas; Desempenho térmico; Desempenho energético; Ventilação híbrida; Edifício de escritórios.

ABSTRACT

According to the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), global warming is mainly a consequence of greenhouse gas (GHG) emissions in large urban centers. Air-conditioning has been increasingly used to maintain comfortable conditions in the indoor environment and, as the global temperature rises, it is anticipated that there will be an increased use of air-conditioning systems and, consequently, higher levels of GHG emissions. Natural ventilation is a bioclimatic strategy that may contribute to reduce the use of mechanical conditioning in hot climates. This research aims to investigate the impacts of climate change on the thermal and energy performance of mixed-mode office buildings. A reference case was modeled based on a database composed by 50 mixed-mode office buildings located in the city of São Paulo, Brazil. Three envelope design parameters were analyzed via computer simulation: shading devices, window opening factor and solar heat gain coefficient (SHGC). The analysis was performed for two solar orientations: North-South and East-West. Thermal and energy performance simulations were performed in the EnergyPlus and jEPlus programs. To this end, future weather files were generated using the WeatherShift tool for the years 2035, 2065 and 2090, considering Representative Concentration Pathways (RCP) 4.5 and 8.5. A comparative assessment of the current scenario (2020) with future scenarios was performed through the variables cooling degree hours, cooling thermal loads, number of hours of setpoint not met and energy use intensity. For the current climate scenario, the energy savings of the best performance model (45 degree vertical shading angle, 90% window opening factor, 0.9 SHGC and North-South solar orientation) was of 26%, compared to the base case building, which represents the buildings sample in the database. The analysis of future scenarios showed a reduction in the difference in performance between the best and the worst models, mainly for RCP 8.5 (scenario of high GHG emissions, representative of the business as usual), what means that the global warming reduced the benefits of using bioclimatic strategies on the building envelope. However, the combination of passive strategies as an adaptation measure to climate change further contributed to enhance the model's thermal and energy performance, compared to the use of individual strategies, being able to neutralize the cooling energy increase due to global warming, emphasizing their importance.

Keywords: *Climate Change; Thermal performance; Energy performance; Mixed-mode ventilation; Office building.*

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Esquema de ventilação híbrida. Fonte: CBE, 2020	Erro! Indicador não definido.
Figura 2- Emissão de GEE dos quatro cenários RCP ao longo do século referente ao III Working Groups (WG). Adaptado de: IPCC, 2014.....	19
Figura 3 - Análise bibliométrica da revisão de literatura	24
Figura 4 - Fluxograma da metodologia.....	33
Figura 5 – Fotos de alguns edifícios presentes no banco de dados. FONTE: Pereira, 2019.....	34
Figura 6 Modelo base: geometria e dimensões do pavimento-tipo.....	35
Figura 7 - Modelo base: geometria e dimensões do edifício.....	35
Figura 8 - Variação da orientação solar da edificação: Norte-Sul e Leste-Oeste.....	38
Figura 9 - Variação do ângulo vertical de sombreamento (AVS) das aberturas.	38
Figura 10 - Variação da área efetiva de abertura das janelas.	38
Figura 11 – Representação 3D das variações dos elementos de sombreamento. ...	39
Figura 12 –Exemplos de dispositivos de proteção solar.....	39
Figura 13 - Diagrama de árvore dos parâmetros simulados.....	42
Figura 14 - Análise comparativa dos arquivos climáticos atual e futuros da cidade de São Paulo.	45
Figura 15 – Gráficos de dispersão de graus-hora de resfriamento (°Ch) e demanda térmica para resfriamento (kW/m ² .ano) para todos os casos simulados, apresentados por sala do pavimento tipo.	46
Figura 16 - Diagramas de caixa de graus-hora de resfriamento (°Ch) e demanda térmica para resfriamento (kW/m ² .ano) para as orientações Norte-Sul e Leste-Oeste.	47
Figura 17 - Diagramas de caixa de graus-hora de resfriamento (°Ch) e demanda térmica para resfriamento (kW/m ² .ano) para o ângulo vertical de sombreamento. ...	48
Figura 24 - Diagramas de caixa de graus-hora de resfriamento (°Ch) e demanda térmica para resfriamento (kW/m ² .ano) para a área efetiva de abertura da sala com melhor desempenho termoenergético.	54

Figura 25 - Diagramas de caixa de graus-hora de resfriamento ($^{\circ}\text{Ch}$) e demanda térmica para resfriamento ($\text{kW}/\text{m}^2.\text{ano}$) para a área efetiva de abertura da sala com pior desempenho termoenergético.	54
Figura 26 - Diagramas de caixa de graus-hora de resfriamento ($^{\circ}\text{Ch}$) e demanda térmica para resfriamento ($\text{kW}/\text{m}^2.\text{ano}$) para a área efetiva de abertura da sala com melhor desempenho termoenergético.	55
Figura 27 - Diagramas de caixa de graus-hora de resfriamento ($^{\circ}\text{Ch}$) e demanda térmica para resfriamento ($\text{kW}/\text{m}^2.\text{ano}$) para o fator solar do vidro da sala com pior desempenho termoenergético.	55
Figura 28 - Número de horas de setpoint não atendido (h) versus consumo energético de ar-condicionado ($\text{kWh}/\text{m}^2.\text{ano}$) da variação do ângulo vertical de sombreamento (AVS).	57
Figura 29 - Número de horas de setpoint não atendido (h) versus consumo energético de ar-condicionado ($\text{kWh}/\text{m}^2.\text{ano}$) da variação da área efetiva de abertura (AEA) . .	58
Figura 30 - Número de horas de setpoint não atendido (h) versus consumo energético de ar-condicionado ($\text{kWh}/\text{m}^2.\text{ano}$) da variação do fator solar do vidro.	60
Figura 31 – Consumo de energia com ar-condicionado ($\text{kWh}/\text{m}^2.\text{ano}$). Os valores em destaque correspondem às diferenças de consumo entre os modelos mais e menos eficiente e o modelo base.	62
Figura 32 - Consumo energético com ar-condicionado ($\text{kWh}/\text{m}^2.\text{ano}$) para os RCP 4.5 e 8.5.	62
Figura 33 - Consumo energético com ar-condicionado ($\text{kWh}/\text{m}^2.\text{ano}$) para os RCP 4.5 e 8.5. Os valores em destaque correspondem às diferenças de consumo entre os modelos 2035, 2060 e 2090 e o modelo base.	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Artigos selecionados no MSL	23
Tabela 2 -Parâmetros construtivos do modelo base (variáveis categóricas).	34
Tabela 3 -Parâmetros construtivos do modelo base (variáveis contínuas).	34
Tabela 4 - Parâmetros fixos do modelo base.	36
Tabela 5 - Parâmetros variáveis.....	37
Tabela 6 – Médias anuais de umidade relativa e temperaturas máximas, médias e mínimas para o cenário atual e projeções futuras.	44
Tabela 7 - Valor médio de graus-hora de resfriamento (°Ch) e demanda térmica para resfriamento (kW/m ² .ano) de todas as variáveis analisadas. Destaque em negrito para as variáveis correspondentes ao modelo base.....	51
Tabela 8 – Parâmetros dos modelos analisados.....	60

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AC	Ar-condicionado
ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers
AVAC	Aquecimento, ventilação e ar-condicionado
AVS	Ângulo Vertical de Sombreamento
CBE	Center for the Built Environment
DOE	Departamento de Energia dos Estados Unidos
EPW	Energyplus Weather File
GEE	Gases de Efeito Estufa
GTO	Índice de conforto proposto por Rijksgebouwendienst e comumente utilizado na Holanda
HVAC	Heating, Ventilating, and Air Conditioning
IMPE	Instituto Nacional de Pesquisas Especiais
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial
IPCC	Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC)
LabEEE	Laboratório de Eficiência Energética em Edificações
MSL	Mapeamento Sistemático da Literatura
NBR	Norma Brasileira
PAF	Percentual de área de abertura na fachada
PBMC	Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas
PROCEL	Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica
RCPs	Caminhos de Concentração Representativos
RTQ-C	Regulamento Técnico da Qualidade para Nível de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicos
TRY	Test Reference Year
WCDH	Índice de conforto: Weighted cooling degree-hours

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
1.1. Objetivos	15
1.2. Estrutura da dissertação	15
2. MUDANÇAS CLIMÁTICAS.....	17
2.1. Projeções de mudanças climáticas: modelos e arquivos climáticos	18
2.2. Desempenho termoenergético de edifícios frente às mudanças climáticas	22
3. MÉTODO.....	33
3.1. Definição do modelo base e dos parâmetros variáveis	33
3.2. Elaboração dos arquivos climáticos futuros.....	39
3.3. Análises paramétricas	41
3.4. Análise de resultados	42
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	44
4.1. Análise paramétrica do pavimento-tipo no cenário atual	45
4.2. Análise paramétrica do edifício nos cenários atual e futuro	55
5. CONCLUSÕES	64
REFERÊNCIAS	66

1. INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas ocorridas no planeta nas últimas décadas têm provocado um aumento da temperatura terrestre, fenômeno conhecido como aquecimento global. Segundo o último relatório (*Special Report*) do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (*Intergovernmental Panel on Climate Change* - IPCC), a temperatura média da superfície global já aumentou cerca de 1 °C (1850-1900 até 2017) e, segundo projeções, provavelmente excederá 1,5 °C até o final do século (2081-2100), o que pode ocasionar uma série de desastres naturais (IPCC, 2014). As emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) chegaram a 49,4 GtCO₂eq em todo o mundo em 2016, sendo que o consumo energético foi responsável por 73% destas emissões. Os edifícios representaram 19,5% do total das emissões em 2016, sendo 6,6% do setor comercial e 11,9% do setor residencial, incluindo tanto as emissões diretas da queima de combustíveis fósseis quanto as emissões indiretas, como o uso de eletricidade (MENGPIN; JOHANNES, 2020). Ainda segundo o IPCC (2014), o aquecimento global deve provocar um aumento no uso de ar-condicionado, em especial na América do Sul, aumentando ainda mais a demanda energética de edifícios.

No atual cenário de mudanças climáticas e aquecimento global, a redução do consumo energético é uma premissa essencial para o projeto de edifícios (HOLMES; HACKER, 2007). De acordo com a avaliação do IPCC *Special Report* (IPCC, 2018), faz-se necessário não medir esforços para limitar o aquecimento global a 1,5 °C em relação aos níveis pré-industriais, uma vez que seus efeitos já podem ser percebidos, mesmo antes de se atingir esse limite. Para atingir tal meta, serão necessários investimentos significativos não apenas para emissão zero de carbono, mas também para o sequestro de carbono da atmosfera.

Os edifícios de escritórios têm alto consumo energético devido ao uso intenso de computadores, centrais de processamento de dados e sistemas de ar-condicionado que, em muitos casos, são os principais consumidores de energia (CBCS, 2015). Esta tipologia de edificação conta com uma grande quantidade de usuários, equipamentos e sistemas de iluminação que contribuem com o

sobreaquecimento dos ambientes. Em vista disso, o uso de sistemas artificiais de condicionamento pode ser imprescindível para garantir o conforto e a boa produtividade dos usuários (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014) sendo, portanto, a principal estratégia de resfriamento encontrada nesta tipologia (CÂNDIDO et al., 2010). Por se tratar de um grande consumidor de energia, o setor de ar-condicionado desempenha um importante papel para os países alcançarem metas de mitigação e adaptação às mudanças climáticas (IEA, 2013).

A envoltória tem a função de controlar a transferência de calor entre o interior e o exterior de uma edificação. Um projeto de envoltória adequado ao clima local é crucial para a redução das emissões de CO₂ frente ao aquecimento global, visto que ela é responsável por uma parte significativa da carga de aquecimento e resfriamento de um edifício. Uma envoltória eficiente pode reduzir as cargas de aquecimento e resfriamento em até 40% (IEA, 2013). Diante de tal panorama, a arquitetura bioclimática pode desenvolver um importante papel ao tirar partido dos recursos naturais para reduzir o consumo de energia de edificações e garantir conforto aos usuários. O sombreamento e a ventilação natural, por exemplo, são estratégias de arquitetura bioclimática direcionadas a regiões de clima quente que têm o intuito de reduzir a carga térmica dos ambientes internos, sendo indicada para grande parte do território brasileiro (ABNT, 2005). O uso de tais estratégias integradas a sistemas artificiais de climatização pode garantir maior eficiência energética às edificações sem comprometer o conforto térmico de seus ocupantes (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014).

A ventilação híbrida, também chamada de modo misto de operação, consiste na alternância entre os sistemas de ventilação natural e condicionamento artificial, sendo o condicionamento artificial acionado quando a ventilação natural não é suficiente ou vantajosa (BRAGER; BAKER, 2009), como ilustrada na Figura 1. A utilização da ventilação híbrida como estratégia bioclimática tem o potencial de garantir o conforto térmico dos usuários e minimizar os gastos energéticos com ar condicionado (BRAGER; BAKER, 2009). Segundo a Eletrobrás (2008), 76,6% dos edifícios comerciais de São Paulo possuem sistemas individuais de ar-condicionado, tipo janela e/ou *Split*, o que é um indicativo do uso da ventilação híbrida. Os edifícios que trabalham com ventilação híbrida, por possuírem potencial de redução do consumo

energético em comparação aos edifícios artificialmente condicionados, caracterizam-se como uma importante estratégia de eficiência energética e uma adaptação climática frente ao aquecimento global (SÁNCHEZ-GARCÍA et al., 2019).

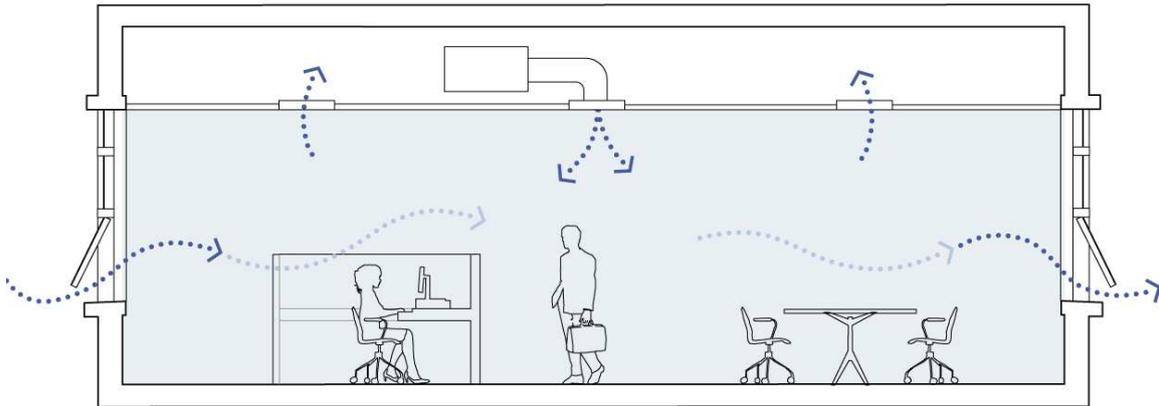


Figura 1 – Esquema de ventilação híbrida. Fonte: CBE, 2020

Diante desta primeira contextualização, a presente pesquisa avalia o desempenho termoenergético da envoltória de edifícios de escritórios com ventilação híbrida, no cenário climático atual e frente às mudanças climáticas.

1.1. Objetivos

Esta pesquisa teve como principal objetivo investigar os impactos das mudanças climáticas no desempenho termoenergético da envoltória de edifícios de escritórios que operam com ventilação híbrida. São objetivos específicos:

- Determinar cenários ótimos de parâmetros da envoltória, para o contexto atual e para cenários futuros, tendo em vista o desempenho termoenergético de edifícios de escritórios frente às mudanças climáticas.
- Comparar os resultados de desempenho energético dos parâmetros da envoltória considerando os Caminhos de Concentração Representativos (*Representative Concentration Pathways - RCPs*) 4.5 e 8.5. Os RCPs consistem em possíveis cenários de emissão de GEE causados pelo homem para o século XXI, criados a partir de premissas estabelecidas no relatório de avaliação de mudanças climáticas do IPCC (2014).

1.2. Estrutura da dissertação

A presente dissertação de mestrado organiza-se em cinco capítulos. O primeiro introduz o tema e objetivos da pesquisa e justifica sua relevância. O segundo capítulo

traz um mapeamento sistemático da literatura nacional e internacional. O método de trabalho e suas etapas são descritos no terceiro capítulo. No quarto capítulo são apresentados os principais resultados e a discussão. O quinto e último capítulo apresenta as considerações finais, as principais limitações do trabalho e algumas sugestões para trabalhos futuros. Por último, são apresentadas as referências.

2. MUDANÇAS CLIMÁTICAS

As alterações climáticas vêm se intensificando com o passar dos anos, causando um aumento na temperatura do ar próximo à superfície terrestre, um aumento no nível do mar, ilhas de calor, inundações, escassez de água e alimentos, dentre outros eventos extremos (IPCC, 2013). Extremos climáticos recentes, como secas, invernos intensos, ondas de calor e furacões têm sido atribuídos ao aquecimento global. Estes fenômenos têm impactado gravemente os ecossistemas e a população, com grandes perdas de vidas humanas e prejuízos à economia, à agricultura e à saúde (MARENGO, 2006). Segundo o IPCC (2013), atualmente o maior problema ambiental mundial é a mudança climática. O aumento da temperatura global, que vem se acelerando desde meados do século XX, é consequência, principalmente, das emissões antropogênicas de Gases de Efeito Estufa (GEE). O quinto relatório de avaliação (*Assessment Report - AR5*) do IPCC traz projeções para diferentes cenários de emissões prevendo, caso os níveis atuais de poluição e degradação ambiental sejam mantidos, um aumento de 2,6 °C a 4,8 °C na temperatura média global e um aumento de 0,45 m a 0,82 m do nível do mar para o final do século XXI (IPCC, 2013).

Baseando-se em evidências históricas do clima do planeta e em observações dos registros de mudanças climáticas recentes, a comunidade de pesquisa científica internacional aponta que o impacto antropogênico no clima global aumenta os riscos para as cidades (ROSENZWEIG et al., 2015). O aquecimento global tende a ser mais intenso nas grandes cidades devido ao efeito de urbanização (MARENGO, 2006). Os principais fatores que interferem nas emissões antropogênicas são o crescimento populacional e econômico, estilo de vida e comportamento, uso de energia e uso da terra, tecnologia e política (IPCC, 2014). Os centros urbanos são responsáveis por 40% das emissões de gases de efeito estufa e por 70% do consumo energético mundial, visto que mais da metade da população mundial está concentrada nestes centros (ROSENZWEIG et al., 2015).

Segundo o Relatório Especial do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas (PBMC, 2016) o Brasil sofrerá sérias mudanças no clima, ainda incertas, que afetarão os ecossistemas aquáticos e terrestres em cada região do país. Tais eventos climáticos podem afetar as cidades em questões relacionadas à indisponibilidade

hídrica e, conseqüentemente, à falta de energia elétrica, agravada pelo aumento do consumo de energia. Hoje, no Brasil, o setor de energia apresenta um dos maiores potenciais para redução das emissões de Gases de Efeito Estufa (RIBEIRO; SANTOS, 2016). A partir deste cenário, o PBMC recomenda alternativas de adaptação para a infraestrutura urbana, dentre as quais cita construções ecoeficientes com ventilação passiva (RIBEIRO; SANTOS, 2016).

2.1. Projeções de mudanças climáticas: modelos e arquivos climáticos

Segundo Herrera et al. (2017) o primeiro passo para a projeção climática é definir cenários futuros. O IPCC publicou cinco relatórios de avaliação de mudanças climáticas (*Assessment Reports - AR*), AR1 (1990), AR2 (1995), AR3 (2001), AR4 (2007) e AR5 (2014), e em 2022 será publicado o AR6 (IPCC, 2020). O AR 5 propõe quatro Caminhos de Concentração Representativos (*Representative Concentration Pathways - RCPs*), ou seja, quatro possíveis cenários de emissão de GEE causados pelo homem para o século XXI, criados a partir da atualização dos cenários de emissão do último relatório, incluindo-se as políticas climáticas (IPCC, 2014). Os quatro RCPs, ilustrados na Figura 2, constituem: um cenário rigoroso de mitigação que visa manter o aquecimento global abaixo de 2 °C (RCP 2.6), dois cenários intermediários (RCP 4.5 e RCP 6.0) e um cenário com altas emissões de GEE (RCP 8.5). Os cenários RCP 6.0 e RCP 8.5 representam a inexistência de esforços para restringir as emissões, ou seja, são representativos do *business as usual*. Os RCPs foram criados a partir da atualização dos cenários de emissão do penúltimo relatório, incluindo-se desta vez as políticas climáticas (IPCC, 2014). Em termos comparativos, o RCP 8.5 corresponde ao cenário de emissão anterior A2 / A1FI, o RCP 6.0 ao B2 e o RCP 4.5 ao cenário B1. Para o RCP 2.6 não há cenário anterior equivalente (IPCC, 2014).

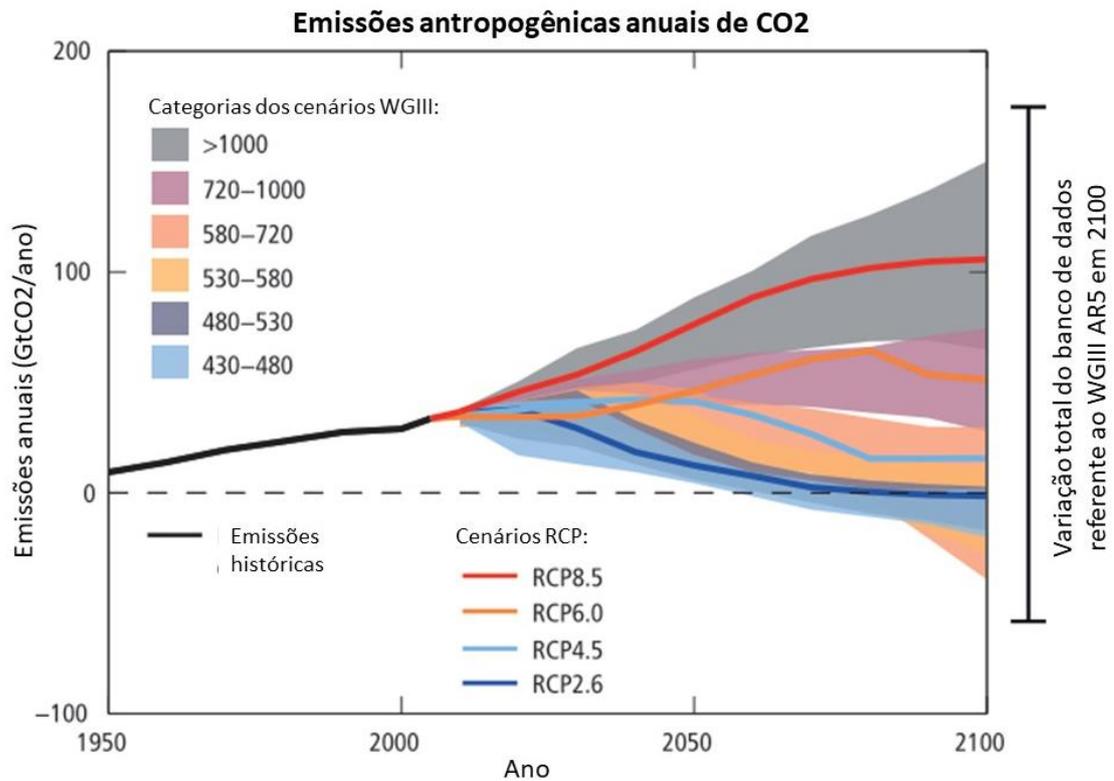


Figura 1- Emissão de GEE dos quatro cenários RCP ao longo do século referente ao III Working Groups (WG). Adaptado de: IPCC, 2014

Os Modelos Climáticos Globais (*Global Climate Models* - GCMs) e os Modelos Climáticos Regionais (*Regional Climate Models* - RCMs) são utilizados para a compreensão do comportamento climático e para prever possíveis mudanças climáticas futuras. Estes modelos utilizam como base os cenários de emissão de GEE estabelecidos pelo IPCC. Os GCMs abordam características climáticas de grande escala, como a circulação atmosférica e do oceano, e padrões subcontinentais como temperatura e precipitação (RUMMUKAINEN, 2010). Os RCMs são, resumidamente, modelos numéricos de previsão climática que fazem projeções de processos atmosféricos e da superfície terrestre de uma região limitada (AMS, 2020). Os RCMs permitem projeções mais detalhadas das condições climáticas regionais, que constituem informação importante para os estudos sobre os impactos das mudanças climáticas (RUMMUKAINEN, 2010). Os dados climáticos gerados com RCMs (dados em grade) são mais homogêneos no espaço, dificultando a avaliação de extremos climáticos (RUMMUKAINEN, 2010). Embora os RCMs, se comparados aos GCMs, sejam executados em resolução relativamente alta, também possuem escala continental, ficando aquém da escala e natureza dos dados coletados em estações

meteorológicas urbanas. A interação dinâmica entre a edificação e o clima é extremamente complexa, daí a importância dos arquivos climáticos urbanos no estudo da escala do edifício.

A fim de estudar o impacto do aquecimento global no ambiente construído, a utilização de técnicas de simulação a partir de dados de previsão do tempo faz-se necessária (GUAN, YANG e BELL; 2005). Os modelos climáticos, no entanto, possuem baixa resolução para a utilização em ferramentas de simulações, que requerem arquivos climáticos em formato horário. Para a geração de arquivos climáticos futuros com resolução temporal precisa, é necessário o uso de técnicas de redução de escala através de ferramentas de geração de dados ou de técnicas estatísticas (YASSAGHI; HOQUE, 2019). Em vista disso, apresentam-se aqui algumas das técnicas de geração de dados mais citadas na literatura sobre uso de simulações termoenergéticas para análise de mudanças climáticas.

Morphing é uma técnica estatística desenvolvida por Belcher, Hacker e Powell, (2005) para criação de dados climáticos futuros. O método combina dados climáticos observados em campo com resultados de modelos climáticos. O procedimento produz séries temporais meteorológicas que encapsulam as condições climáticas médias de cenários climáticos futuros, preservando sequências meteorológicas realistas. Nesse sentido, o método 'reduz a escala' das previsões do modelo climático de resolução grosseira para resoluções espaciais e temporais necessárias para a construção de bancos de dados climáticos para simulações térmicas de edifícios (HERRERA et al., 2017).

O CCWorldWeatherGen, gerador de arquivos climáticos para estudos de mudanças climáticas, é uma ferramenta proposta por Jentsch et al. (2013) que utiliza dados do terceiro Relatório do IPCC (AR3) e do conjunto experimental HadCM3 (*Hadley Centre Coupled Model*, versão 3), considerando o cenário A2 de emissões. A ferramenta permite a geração de arquivos climáticos para uso em programas de simulação de desempenho. Apresenta-se em uma planilha de dados do Microsoft Excel, onde é possível transformar os arquivos climáticos existentes em arquivos do tipo *Typical Meteorological Year* (TMY2) no formato *EnergyPlus Weather File* (EPW) para os anos 2020 (média do período de 2011 a 2040), 2050 (média do período de 2041 a 2070) e 2080 (média do período de 2071 e 2100). A geração de dados

climáticos dessa ferramenta baseia-se na metodologia Morphing para transformação dos dados climáticos (SINGAPORE; BRUNEI, 2013).

Meteonorm é um *software* que gera arquivos climáticos a partir da média dos 18 modelos do quarto relatório do IPCC (AR4), considerando três cenários de emissão: B1 (baixa), A1B (média) e A2 (alta). O *software* utiliza-se de um banco de dados climáticos dos períodos de 1981-1990 e 1991-2010 e produz dados de saída em formato EPW para os períodos futuros 2011-2030, 2046-2065, 2080-2099 (REMUND et al., 2018).

A ferramenta WeatherShift, desenvolvida em parceria entre as empresas Arup e Argos Analytic, gera dados climáticos futuros considerando os cenários do quinto relatório do IPCC (AR5): RCP 4.5 e RCP 8.5, com diferentes percentuais de aquecimento global para cada cenário, que variam entre 10% e 95%. Os percentuais derivam de um amplo conjunto de projeções climáticas devido à incerteza em relação às condições climáticas futuras, sendo que o percentil 50% representa o ponto intermediário de aquecimento deste conjunto. Produz arquivos climáticos no formato EPW considerando as mudanças climáticas de três períodos futuros: 2035 (2026-2045), 2065 (2056-2075) e 2090 (2080-2099) (WEATHERSHIFT, 2020).

A AWE-GEN (AdvancedWEather GENERator) é uma ferramenta de geração de dados climáticos horários capaz de reproduzir características hidroclimáticas como pressão de vapor, velocidade do vento e temperatura do ar, assim como as estatísticas dessas variáveis. Considera as mudanças climáticas por meio de um processo baseado em *downscaling* estocástico. Foi criada em 2007 pela Universidade de Michigan e pode gerar dados para dez localidades nos EUA e uma na Itália. A ferramenta é baseada no *software* MATLAB (AWE-GEN, 2020).

A Urban Weather Gen (UWG) é uma ferramenta de simulação desenvolvida no MATLAB que estima a temperatura e umidade do ar do meio urbano em periodicidade horária, por meio de dados de estações meteorológicas rurais. Os dados de entrada consistem em um arquivo em formato EPW e em um arquivo de entrada no formato *.xml ou .xlsm, que descreve o *canyon* urbano. Os dados de saída, também em formato EPW, capturam o efeito urbano de ilhas de calor (URBAN WEATHER GENERATOR, 2020)

A ferramenta *United Kingdom Climate Projections Weather Generator* (UKCP09 WG), atualização da versão UKCP02 WG, desenvolvida pelas Universidades de Newcastle e East Anglia, fornece dados diários sintéticos de temperatura, umidade relativa, precipitação, pressão de vapor, potencial de evapotranspiração e radiação solar para várias localidades do Reino Unido. Sete períodos de 30 anos futuros (2020, 2030, 2040, 2050, 2060, 2070 e 2080) para três cenários de emissão de GEE (IPCC - AR4) são fornecidos, baseados nas projeções do terceiro relatório Científico de Mudanças Climáticas do Reino Unido de 2009 (WILBY; WOOD, 2009).

2.2. Desempenho termoenergético de edifícios frente às mudanças climáticas

Uma atualização da literatura especializada sobre o tema em questão foi realizada por meio de um Mapeamento Sistemático da Literatura (MSL), visando apreender o estado da arte, reconhecer os principais autores e identificar as lacunas de conhecimento que comprovem o ineditismo da pesquisa. Primeiramente, foi feita uma busca nas bases científicas internacionais Scopus, Science Direct e Web of Science, de grande reconhecimento e abrangência na área de estudo. Dois termos de busca foram utilizados: "*climate change*" AND ("*mixed mode*" OR "*hybrid ventilation*") e "*climate change*" AND "*future*" AND "*building envelope*".

O Mapeamento Sistemático da Literatura estendeu-se também a outras bibliografias pertinentes, resultantes de amostragem por "bola de neve", composta por artigos, dissertações, teses, livros e manuais que contribuíram para a melhor apreensão de conceitos fundamentais envolvidos na pesquisa. Esta etapa foi de especial importância para a localização de trabalhos brasileiros, que não apareceram nas bases de dados internacionais. Realizou-se então uma triagem dos trabalhos encontrados, excluindo as duplicidades, os trabalhos em idiomas distintos ao português e inglês, os trabalhos não disponíveis na íntegra e aqueles que fugiam do tema. Foram considerados apenas os trabalhos publicados após 2014, ano do lançamento do último relatório de mudanças climáticas do IPCC (AR5). Apesar disso, a ferramenta de geração de dados futuros utilizada na maioria dos trabalhos foi a CCWorldWeatherGen, que está desatualizada em relação às últimas projeções climáticas. Os trabalhos selecionados pelo MSL são apresentados e classificados nas Tabelas 1 e Figura 3.

Tabela 1- Artigos selecionados no MSL

Referência	País
LIU et al., 2020	Hong Kong
ZUNE; RODRIGUES; GILLOTT, 2020	Myanmar
ELSHARKAWY; ZAHIRI, 2020	Inglaterra
MOHAMMED et al., 2019	Bélgica, Noruega, Itália, Espanha, Dinamarca e República de Malta
SÁNCHEZ-GARCÍA et al., 2019	Espanha
ALVES, 2019	Brasil
ARSAN; YÖNEY, 2019	Turquia
VASATURO et al., 2018	Holanda
HWANG et al., 2018	Taiwan
PAJEK; KOŠIR, 2018	Eslovênia
TRIANA; LAMBERTS; SASSI, 2018	Brasil
DAABOUL; GHALI; GHADDAR, 2018	Líbano
SAJJADIAN, 2017	Inglaterra
TRIANA; LAMBERTS; SASSI, 2017	Brasil
WANG; LIU; BROWN, 2017	EUA
GASSAR; YUN, 2017	Hong Kong, Japão e Coreia do Sul
NIK et al., 2016	Suécia
TRIANA, 2016	Brasil
FARROU; KOLOKOTRONI; SANTAMOURIS, 2016	Grécia
BERGER et al., 2016	Áustria
HUANG; HWANG, 2016	Taiwan
MOAZAMI et al., 2016	Itália
ALVES; DUARTE; GONÇALVES, 2015a	Brasil
ALVES; DUARTE; GONÇALVES, 2015b	Brasil
ALVES; DUARTE; GONÇALVES, 2016	Brasil
NIK; MATA; KALAGASIDIS, 2015	Suécia
KARIMPOUR et al., 2015	Austrália
CASAGRANDE; ALVAREZ, 2014	Brasil
FAHMY; MAHDY; NIKOLOPOULOU, 2014	Egito
ROETZEL; TSANGRASSOULIS; DIETRICH, 2014	Grécia
ALVES et al., 2014	Brasil

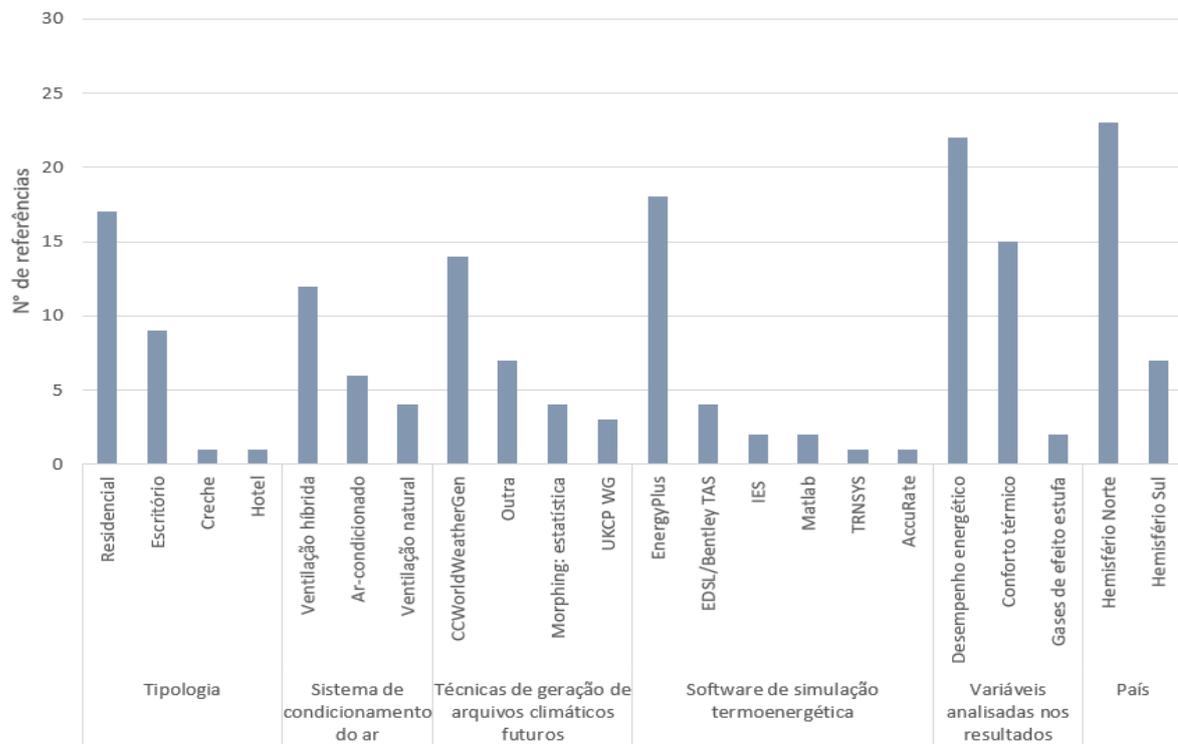


Figura 2 - Análise bibliométrica da revisão de literatura

Os efeitos adversos das mudanças climáticas nos edifícios, como o aumento da necessidade de climatização artificial, podem ser mitigados através da adoção de estratégias passivas de climatização, a fim de garantir melhores condições de conforto térmico e maior desempenho energético para as condições climáticas atuais futuras (NIK; MATA; KALAGASIDIS, 2015; LIU et al., 2020). Dentre as estratégias passivas existentes destaca-se aqui as relacionadas à envoltória do edifício (NIK et al., 2016). Segundo Sajjadian (2017), o desempenho da envoltória de edifícios é um dos principais determinantes do seu consumo energético e conforto térmico, causando impactos significativos decorrentes das mudanças climáticas (ELSHARKAWY; ZAHIRI, 2020). Apesar disso, a maior parte das análises sobre o desempenho termoenergético da envoltória de edifícios desconsideram as mudanças climáticas (KARIMPOUR et al., 2015). No entanto, com a crescente consciência de proteção ao meio ambiente, sua importância vem aumentando paulatinamente (HWANG et al., 2018). Torna-se importante, portanto, que a mitigação dos efeitos das mudanças climáticas seja considerada no projeto arquitetônico da envoltória, tendo em vista a melhoria da eficiência energética dos edifícios (WANG; LIU; BROWN, 2017; HWANG et al., 2018).

A maioria dos estudos encontrados no MSL com enfoque na análise da influência de parâmetros da envoltória no desempenho termoenergético de edifícios perante as mudanças climáticas trata de edifícios habitacionais. Nove trabalhos analisam a tipologia de edifícios de escritório, conforme destacado a seguir.

Hwang et al. (2018) discutiram as limitações do regulamento de desempenho energético para o projeto de envoltória de Taiwan, cuja última atualização foi realizada em 2013. Os autores propuseram um novo índice para melhor atender às mudanças climáticas. Para isso, simulações termoenergéticas foram realizadas para cenários climáticos atuais (2005-2019) e futuros (2020-2034). Seis parâmetros da envoltória de um edifício de escritórios foram avaliados: orientação solar, porcentagem de abertura de fachada (PAF), transmitância térmica das paredes e aberturas externas, fator solar dos vidros e profundidade do elemento de sombreamento. Segundo os autores, tais parâmetros representam as principais estratégias para evitar o sobreaquecimento em regiões predominantemente quentes e as variáveis de cada parâmetro foram uniformemente distribuídas dentro de um intervalo de valores representativo de todas as práticas arquitetônicas locais. Uma análise de sensibilidade global foi aplicada por meio do coeficiente de regressão padronizado, permitindo identificar que os parâmetros da envoltória relacionados à radiação solar apresentaram maior influência na redução da carga de resfriamento sensível anual da edificação em todos os cenários. Os parâmetros relacionados à transmitância térmica apresentaram aumento gradual de influência na redução da carga de resfriamento sensível, diretamente proporcional à intensificação do aquecimento global.

Gassar e Yun (2017) investigaram o potencial de economia energética trazido pela utilização de Materiais de Mudança de Fase (*Phase Change Material* - PCM) na envoltória de um edifício de escritório, para três cidades asiáticas com diferentes climas (Seul, Coreia do Sul; Tóquio, Japão e Hong Kong), considerando cenários climáticos atual (2017) e futuros (2020, 2050 e 2080). Três tipos de PCM com diferentes temperaturas de mudança de fase foram analisados e comparados com a envoltória sem PCM: RUBITHERMPCM, DuPontEnergyPCM e BioPCM. Os resultados mostraram que a utilização de PCM na envoltória aumentou o desempenho energético da edificação tanto para aquecimento quanto para resfriamento nas três cidades, apresentando uma economia energética de 4,48% a 8,21% em Seul, 3,81%

a 9,69% em Tóquio e 1,94% a 5,15% em Hong Kong, para todos os cenários analisados, sendo que as mudanças climáticas não afetaram significativamente esta economia. O BioPCM e o RUBITHERMPCM foram os materiais que apresentaram melhor desempenho termoenergético.

Berger et al. (2016) avaliaram o potencial de redução da demanda energética pela aplicação de isolamento térmico na envoltória e redução das cargas internas (equipamentos e iluminação), perante cenários climáticos atual e futuro (2050). Para tal análise, utilizaram-se quatro edifícios de escritório históricos existentes em Viena, Áustria, construídos em diferentes períodos. Três espessuras de isolamento térmico (5, 10 e 15 cm) e quatro níveis de eficiência de cargas internas foram analisados. As cargas internas mostraram-se mais influentes na demanda térmica de resfriamento. O aumento do isolamento térmico resultou em um pequeno aumento na demanda térmica de resfriamento no verão, por diminuir o resfriamento noturno. No entanto, este efeito poderia ser facilmente resolvido com estratégias de ventilação. No inverno, o aumento do isolamento térmico acarretou a diminuição na demanda térmica de aquecimento. A economia energética obtida no inverno em função do aumento no isolamento térmico superou as restrições do verão, mesmo em cenários futuros de aquecimento global.

Apesar dos diferentes climas investigados, todos os trabalhos de tipologia de edifícios de escritórios apontaram para a importância da redução dos ganhos internos de calor através de estratégias relacionadas à envoltória, que refletem diretamente em um menor aumento do consumo energético do edifício decorrente do aquecimento. Adicionalmente, Berger et al. (2016) apontaram também para a importância da utilização da ventilação natural como forma de auxiliar na redução dos ganhos de calor. Segundo Sánchez-García et al. (2019), o uso da ventilação natural aliada ao sistema de ar-condicionado caracteriza-se como uma adaptação climática frente ao aquecimento global, devido ao seu potencial de redução no consumo de energia dos edifícios. Nessa temática, vale ressaltar os trabalhos de Sánchez-García et al. (2019), Mohammed et al. (2019), Daaboul, Ghali e Ghaddar (2018) e Wang, Liu e Brown (2017), que investigaram o potencial da utilização da ventilação híbrida em edifícios de escritórios como forma de mitigação dos efeitos das mudanças climáticas, em diferentes contextos climáticos. Ressalta-se que, apesar de tais trabalhos

comprovarem a eficiência da ventilação híbrida, em termos de consumo de energia, mesmo em cenários futuros, nenhum deles explora como tornar os edifícios analisados ainda mais eficientes, por meio de um projeto adequado de envoltória, sendo este um importante diferencial da presente pesquisa.

Sánchez-García et al. (2019) avaliaram o potencial de uso da ventilação híbrida no desempenho termoenergético de salas de escritório de Sevilha, Espanha, tanto para o cenário atual (2019) quanto para cenários futuros (2020, 2050 e 2080). Os autores realizaram análises termoenergéticas seguindo os índices do conforto adaptativo, chegando à conclusão de que as mudanças climáticas afetariam o uso da ventilação natural no sistema híbrido. Com o passar dos anos, a demanda energética para resfriamento aumentaria gradativamente, passando a ser necessária em mais dias do ano e, conseqüentemente, o uso da ventilação natural diminuiria. A diferença foi de aproximadamente 31 Wh/m² entre 2019 e 2080. A demanda para aquecimento diminuiu em média 62 Wh/m². A média de trocas de ar por hora diminuiu 90 h neste período.

Mohammed et al. (2019) investigaram o potencial uso de sistemas integrados à fachada na otimização da ventilação natural e melhoria do desempenho térmico de edifícios de escritório localizados em seis climas europeus (Oslo, Copenhague, Bruxelas, Milão, Madri e Valeta), considerando-se as condições climáticas passadas (histórico climático), presentes (2020) e futuras (2050). O potencial climático de ventilação natural e o número de horas anuais que a ventilação natural poderia ser utilizada foram analisados para seis estratégias tecnológicas de tratamento de ar na fachada: pré-aquecimento, pré-resfriamento, umidificação, desumidificação, recuperação de calor e disponibilidade solar. Os resultados mostraram que, para o cenário de 2020, o potencial do uso de ventilação natural aumentou 30% a 50% com o pré-aquecimento de ar. No entanto, em 2050 este potencial diminuiu 2% a 3% (exceto Bruxelas). O uso da umidificação do ar aliada ao pré-aquecimento não apresentou resultados significativos. O pré-resfriamento do ar apresentou melhores resultados em cenários futuros e para menores latitudes, principalmente quando aliado à desumidificação. O sistema de recuperação de calor foi a estratégia que apresentou maior potencial de aumento no uso da ventilação natural: 40-90% em todos os climas durante o inverno. O tratamento de ar nas fachadas (efeito combinado

entre alteração da temperatura e umidade) aliado à ventilação híbrida mostraram-se soluções para o melhor aproveitamento da ventilação natural na edificação, para todas as cidades analisadas.

Daaboul, Ghali e Ghaddar (2018) avaliaram o uso da ventilação híbrida em um edifício de escritórios localizado em Beirute, Líbano, a fim de comparar seu gasto energético com o de um edifício artificialmente condicionado, para o cenário atual e para projeções climáticas futuras (2050). As análises consideraram os dados de consumo energético de ar-condicionado e temperaturas interna e externa. O edifício com ventilação híbrida apresentou uma significativa redução no consumo energético, de 31% no cenário atual e 21% no cenário futuro, comparado ao sistema de ar-condicionado operando durante todo o período de ocupação.

Wang, Liu e Brown (2017) investigaram os impactos das mudanças climáticas no consumo energético de um escritório com ventilação híbrida para cinco cidades dos Estados Unidos: Miami, Flórida; Phoenix, Arizona; Los Angeles, Califórnia; Washington DC; e Akron, Colorado. As seguintes medidas de mitigação foram analisadas para os anos de 2020, 2050 e 2080: *setpoint* da temperatura interna, horas de operação do sistema de ar-condicionado e vazão de ar mínima das caixas de volume de ar variável (VAV) do sistema de ar-condicionado, além de uma combinação das três medidas anteriores com a estratégia de ventilação híbrida. A análise de resultados pautou-se sobre as médias diária e anual da temperatura de bulbo seco e a variação anual do consumo de energia da edificação. Dentre as medidas de mitigação propostas, a ventilação híbrida foi considerada mais eficaz para compensar as mudanças climáticas.

Os estudos acima apresentados mostraram que, futuramente, o uso de estratégias de prevenção de superaquecimento (sombreamento e ventilação) terá impacto significativo, mas que as soluções arquitetônicas adotadas atualmente em edifícios bioclimáticos se tornarão menos eficientes. Embora nenhuma estratégia individual neutralizou o aumento do consumo energético com resfriamento, a combinação de estratégias passivas pôde minimizar seus efeitos. Concluiu-se, nestes estudos, que o uso da ventilação híbrida apresentou melhorias no desempenho termoenergético dos edifícios em cenários futuros, apesar da redução do aproveitamento da ventilação natural advinda das mudanças climáticas.

Constatou-se que a maioria dos trabalhos foram desenvolvidos para o hemisfério Norte, sendo poucos trabalhos encontrados para o hemisfério Sul e, em especial, para o Brasil. Destes, Triana, Lamberts e Sassi (2016, 2017, 2018), Alves et al. (2014), Alves, Duarte e Gonçalves (2015a, 2015b) e Alves (2019) pesquisaram os efeitos das mudanças climáticas sobre edifícios residenciais, com enfoque em aspectos da envoltória e da estratégia de ventilação natural, conforme detalhado a seguir.

Alves et al. (2014) investigaram o desempenho e conforto térmico de edifícios residenciais nos cenários presente e futuro levando em consideração a projeção das mudanças climáticas (IPCC AR5) e a vulnerabilidade dos idosos às questões ambientais. Duas unidades residenciais foram monitoradas, simuladas e avaliadas considerando as variáveis horas de conforto e desconforto e graus-hora de aquecimento e resfriamento segundo o modelo adaptativo da ASHRAE 55-2013. Verificou-se uma tendência de aumento de graus-hora de desconforto por calor, o que levaria os usuários a uma melhor adaptação às novas condições climáticas. Os autores concluíram que o aumento da inércia térmica e a ventilação natural mostraram-se importantes estratégias para a redução do desconforto perante o aquecimento global.

Alves, Duarte e Gonçalves (2015a) contextualizaram os efeitos das mudanças climáticas sobre os edifícios e as cidades e exploraram a exposição destes às alterações climáticas já verificadas e previstas para a cidade de São Paulo-SP. A contextualização apresentada no trabalho indicou que as mudanças climáticas poderiam ocasionar alterações no desempenho térmico dos edifícios construídos nos padrões atuais e/ou provocarem um aumento no consumo de energia, especialmente com resfriamento ativo. Em continuidade ao referido trabalho, Alves, Duarte e Gonçalves (2015b, 2016) avaliaram o desempenho e conforto térmico de edifícios residenciais naturalmente ventilados localizados na cidade de São Paulo, tendo em vista a maior vulnerabilidade da população idosa perante as mudanças climáticas previstas e durante a onda de calor ocorrida em janeiro e fevereiro de 2014. Os cenários presente, futuro próximo, futuro intermediário e futuro distante foram analisados a partir dos dados de horas de conforto e desconforto e de graus-hora de aquecimento e resfriamento. De maneira geral, houve uma redução na porcentagem

das horas de conforto com o passar dos anos, em todos os casos analisados, aumentando a insatisfação por frio e por calor, segundo os índices de conforto adaptativo. Os autores notaram que aumentar a ventilação e reduzir a carga térmica interna seriam fatores que poderiam contribuir positivamente para um melhor desempenho nos cenários de mudanças climáticas.

Alves (2019) analisou o desempenho térmico de edifícios residenciais multifamiliares em São Paulo-SP, construídos entre 2005 e 2014, considerando o efeito da ilha de calor no contexto urbano e seu acoplamento a arquivos climáticos futuros. Os dados climáticos foram obtidos a partir de medições de temperatura do ar de estações meteorológicas em áreas densamente urbanizadas e suburbanas e os arquivos climáticos foram gerados pelo método desenvolvido por Crawley et al. (2008, apud ALVES, 2019). A autora quantificou, por meio de simulações computacionais e análises paramétricas, o efeito de elementos internos e externos aos edifícios sobre as condições de conforto térmico para o clima atual e futuro (cerca de 50 anos à frente), identificando as melhores estratégias de projeto e operação de uma unidade residencial considerada representativa da produção recente do mercado imobiliário de edifícios verticais multifamiliares. Concluiu-se que, para a tipologia analisada, alcançar o conforto ambiental em modo de operação naturalmente ventilado seria um desafio de maiores dimensões nos cenários de aquecimento global e urbano. A diminuição de massa térmica aliada ao aumento das superfícies envidraçadas não sombreadas e reduzidas possibilidades de ventilação nos ambientes foram os principais fatores que contribuíram para o aquecimento das edificações analisadas. A presença da varanda, por sua vez, foi positiva na busca do conforto térmico.

Triana, Lamberts e Sassi (2016, 2017, 2018) investigaram o desempenho termoenergético de projetos de habitação com ventilação híbrida localizados em São Paulo-SP e Salvador-BA, considerando as mudanças climáticas. Simulações computacionais foram realizadas para gerar dados de consumo energético e de graus-hora de resfriamento e aquecimento dos cenários atual e futuro. Os arquivos climáticos futuros de 2020 e 2050 foram gerados por meio da ferramenta CCWorldWeatherGenerator. Na publicação de 2017, os autores discutiram o uso de abordagens integradas no ciclo de vida, tendo como enfoque o desempenho termoenergético do edifício com ventilação natural e com ventilação híbrida frente às

potencialidades e aos desafios para implementação no cenário nacional. Os resultados mostraram um aumento significativo nos graus-hora de resfriamento nos cenários climáticos futuros (2020 e 2050), de aproximadamente 5.000 h em Salvador e 2.500 h em São Paulo. No trabalho de 2018, os autores avaliaram o impacto da introdução de medidas de eficiência energética na fase operacional e exploraram métodos de adaptação ao clima. O aumento da ventilação natural e o sombreamento das aberturas apresentaram melhorias em comparação com o caso base, para os três períodos climáticos analisados. A ventilação natural combinada com janelas grandes mostrou um melhor desempenho no indicador de graus-hora para os três períodos climáticos, mas especialmente para os cenários futuros.

Casagrande e Alvarez (2014) foi o único trabalho brasileiro encontrado que investigou os efeitos das mudanças climáticas em edificações comerciais. O estudo foi realizado em edificações condicionadas artificialmente localizadas em Vitória-ES. Arquivos climáticos no formato Test Reference Year (TRY) foram modificados por meio da ferramenta CCWorldWeatherGen, para a geração de dados climáticos futuros dos anos de 2020, 2050 e 2080. Os dados de saída analisados consistiram no consumo energético da edificação e na temperatura do ar interna. Como resultados, houve um aumento médio no consumo anual de energia de 10,7% para 2020, 17,3% para 2050 e 26,5% para 2080, em relação ao cenário atual, de 2014. A alteração da orientação solar da edificação causou maior impacto na redução do consumo energético do que a alteração no percentual de abertura na fachada ou a utilização de dispositivos de proteção solar.

No mapeamento da literatura aqui apresentado, identificou-se apenas dois artigos com temas similares à presente pesquisa - desempenho termoenergético de edifícios de escritórios com ventilação híbrida frente às mudanças climáticas - de Daaboul, Ghali e Ghaddar (2018) e de Wang, Liu e Brown (2017). Conclui-se, nestes dois estudos, que o uso da ventilação híbrida apresentou melhorias no desempenho termoenergético dos edifícios em cenários futuros, apesar da redução do aproveitamento da ventilação natural advinda das mudanças climáticas. Tais trabalhos, no entanto, analisam condições climáticas diferentes das encontradas no Brasil, o que justifica a demanda por estudos nacionais. Além disso, nenhum destes trabalhos explora como tornar a estratégia da ventilação híbrida mais eficiente por

meio de um projeto adequado de envoltória, sendo este um importante diferencial da presente pesquisa. Com relação às publicações nacionais, a maioria analisa tipologias residenciais. As pesquisas que analisam edifícios de escritórios adotam o sistema de ar-condicionado como estratégia de resfriamento, não havendo estudos nacionais que analisem os impactos das mudanças climáticas em edifícios de escritórios com ventilação híbrida. Tais edificações, no entanto, configuram grande parte do parque edificado do setor comercial de escritórios de baixo e médio padrões na cidade de São Paulo, que se utilizam de equipamentos unitários como o Split para condicionamento artificial (PEREIRA, 2019). Tais lacunas servem como justificativa para o desenvolvimento da presente pesquisa.

3. MÉTODO

O presente trabalho tem como objeto de estudo os efeitos das mudanças climáticas no desempenho termoenergético de edifícios de escritórios com sistema híbrido de condicionamento. Trata-se de uma pesquisa de caráter experimental, baseada em simulações computacionais. A metodologia está representada na Figura 4.

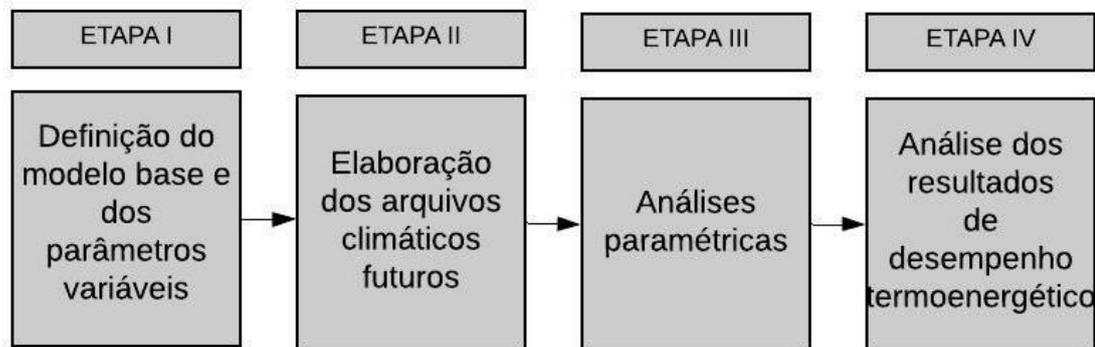


Figura 3 - Fluxograma da metodologia.

3.1. Definição do modelo base e dos parâmetros variáveis

Neves et al. (2017) desenvolveram um banco de dados contendo informações de 153 edifícios de escritórios que operam em modo híbrido localizados na cidade de São Paulo, construídos no período entre 1995 e 2015. Tal amostra corresponde a 10% do total de edificações dessa tipologia, presentes na cidade de São Paulo, o que foi considerado representativo para extração de características de projeto típicas. Os edifícios caracterizam-se por possuírem salas comerciais menores de 100 m² (saletas comerciais), com janelas manualmente operáveis e sistema de ar-condicionado individual do tipo Split ou janela. A Figura 5 apresenta fotos da fachada de alguns edifícios presentes no banco de dados. Pereira (2019) levantou informações detalhadas das características arquitetônicas da envoltória de 50 edifícios deste banco de dados, por meio de pesquisa de campo. Como principais características dos edifícios levantados na amostra do banco de dados, destacam-se: baixo percentual de abertura na fachada (valor máximo encontrado para uma sala comercial de 53%), edifícios de média altura (maior ocorrência de edifícios com 12 pavimentos) e com planta retangular (94% dos casos). A presente pesquisa baseou-se nas informações deste levantamento para construção de um modelo de referência, aqui chamado de modelo base.



Figura 4 – Fotos de alguns edifícios presentes no banco de dados. FONTE: Pereira, 2019.

A construção do modelo base pautou-se sobre os valores de maior ocorrência das variáveis categóricas (Tabela 2) e os valores médios das variáveis contínuas (Tabela 3) do levantamento de Pereira (2019).

Tabela 2 -Parâmetros construtivos do modelo base (variáveis categóricas).

Variáveis	Maior ocorrência
Orientação do eixo longitudinal	Norte-Sul
Formato da planta	Retangular
Elemento de proteção solar	Sem proteção solar
Tipo de esquadria	Máximo-ar
Tipo de ar-condicionado (AC)	Split
Cor da parede externa	Branco gelo ou cinza BR ($\alpha = 0,6$)
Cor da cobertura	Cinza ($\alpha = 0,6$)
Estratégia de ventilação natural	Cruzada em fachadas adjacentes
Tipo de vidro (transparência e coloração)	Transparente (FS = 0,6; U = 5,8 W/m ² .K)
Componente construtivo da parede	Bloco de concreto com argamassa dos dois lados (esp. = 0,28 m; U = 2,38 W/m ² .K; CT = 258,6 kJ/m ² .K)
Componente construtivo da laje	Concreto com argamassa em um lado (esp. = 0,175 m; U = 4,43 W/ m ² .K; CT = 410,00 kJ/m ² .K)
Legenda: α =absortância solar, U = transmitância térmica, esp. = espessura, CT = capacidade térmica	

Tabela 3 -Parâmetros construtivos do modelo base (variáveis contínuas).

Variáveis	Valor médio
Razão entre largura e comprimento do edifício (em planta)	0,5
Área da sala	39,2 m ²
Largura da sala	4,9 m
Profundidade da sala	8,0 m
Pé-direito do pavimento-tipo	2,5 m
Altura do peitoril da janela	0,8 m
Percentual de abertura envidraçada na fachada (PAF)	20%
Área efetiva de abertura da esquadria para ventilação natural	60%

Optou-se por utilizar a mesma volumetria da sala de escritório utilizada por Pereira (2019), a partir da qual criou-se o modelo base do pavimento-tipo (Figura 6) e do edifício (Figura 7), com altura total de 12 andares. A análise foi realizada para o andar médio (6º andar). O pavimento-tipo é composto por quatro salas interligadas por um corredor de circulação central. A volumetria do entorno construído não foi considerada, ou seja, o edifício encontra-se isolado.

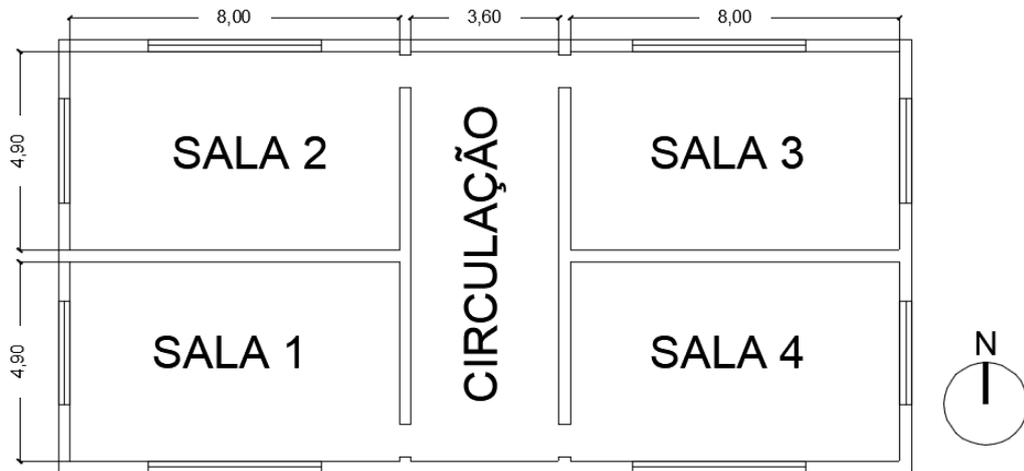


Figura 5 Modelo base: geometria e dimensões do pavimento-tipo

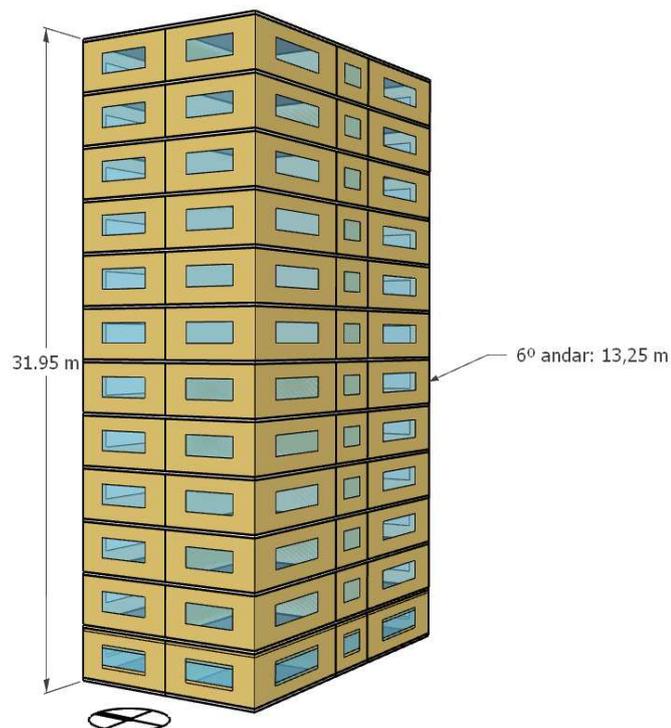


Figura 6 - Modelo base: geometria e dimensões do edifício

Os valores dos parâmetros fixos do modelo base (Tabela 4) foram estabelecidos com base nas seguintes referências: cargas internas (ocupação, iluminação artificial e equipamentos) obtidos na NBR 16401-2 (ABNT, 2008) e no manual *Input Output Reference* (ENERGYPLUS, 2018); dados do sistema de ar condicionado e de padrões de uso baseados nos Requisitos Técnicos da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos (RTQ-C) (INMETRO, 2013).

Tabela 4 - Parâmetros fixos do modelo base.

Parâmetros	Valores	Referência
Transmitância térmica da laje	4,43 W/m ² . K	ABNT (2005)
Período de ocupação	10 h/dia (dias da semana)	INMETRO (2018)
Atividade metabólica	65 W/m ²	ASHRAE (2017)
Carga térmica interna – ocupação	14 m ² /pessoa	ABNT (2008)
Carga térmica interna – iluminação artificial	9,7 W/m ²	Nível A PROCEL INMETRO (2018)
Carga térmica interna - equipamentos	10,7 W/m ²	ABNT (2008)
Coeficiente de <i>performance</i> (COP) do equipamento Split	3,24 W/W	Nível A PROCEL INMETRO (2018)

A ventilação natural foi modelada no EnergyPlus através do grupo *AirflowNetwork* utilizando-se o coeficiente de descarga de 0,6 e os coeficientes de pressão calculados automaticamente pelo próprio *software*. O modelo Airflow Network é capaz de simular os fluxos de ar de ventilação natural ou de sistemas mecânicos de distribuição de ar (ENERGYPLUS, 2018). O controle de abertura das janelas foi desenvolvido através de uma programação de controle binário (aberto ou fechado) por meio do grupo Energy Management System (EMS), seguindo as recomendações de conforto adaptativo da ASHRAE (2017) e considerando o limite de conforto de 80% dos ocupantes. Esta programação controla a abertura das janelas e o funcionamento do ar-condicionado da seguinte forma:

- Quando a zona está ocupada e a temperatura operativa está fora dos limites de conforto, as janelas são fechadas e o sistema de ar-condicionado é ligado;
- Quando a zona está ocupada e a temperatura operativa está dentro dos limites de conforto, as janelas são abertas e o sistema de ar-condicionado é desligado;

- Quando a zona está desocupada as janelas são fechadas e o sistema de ar-condicionado é desligado.

Três parâmetros de projeto da envoltória que exercem grande influência sobre o desempenho termoenergético de uma sala de escritórios que opera com ventilação híbrida foram previamente definidos em publicação correlata a esta pesquisa (NEVES; MELO; RODRIGUES, 2019). No artigo, dez parâmetros relacionados à envoltória de edificações de escritórios com ventilação híbrida foram selecionados pelas autoras, com base em sua influência na demanda energética da edificação, para aplicação de três técnicas de análise de sensibilidade, de forma a identificar variáveis chave de projeto. Os parâmetros foram: orientação solar, pé-direito, área efetiva de abertura das esquadrias para ventilação, elementos de proteção solar externos, transmitância térmica das paredes, capacidade térmica das paredes, absorvância solar das paredes, fator solar dos vidros, percentual de área envidraçada na fachada, persianas internas. A análise por regressão apontou três parâmetros de maior influência, identificados por meio de coeficientes de regressão padronizados: a área efetiva de abertura da janela para ventilação natural seguida do fator solar do vidro e dos elementos de proteção solar (elemento de sombreamento horizontais e verticais). Na presente pesquisa, tais parâmetros foram utilizados como variáveis independentes (preditoras) na análise paramétrica. A seleção dos parâmetros variáveis está representada na Tabela 5 e nas Figuras 8, 9, 10 e 11.

Tabela 5 - Parâmetros variáveis

Parâmetros	Intervalos de variação
Orientação solar do eixo longitudinal da edificação	Norte-Sul (modelo base) e Leste-Oeste
Elemento de sombreamento (Ângulo Vertical de Sombreamento - AVS)	0° (modelo base); 22,5°; 45°
Área efetiva de abertura das esquadrias para ventilação natural	30%; 60% (modelo base); 90%
Fator solar do vidro	0,3; 0,6 (modelo base); 0,9

AVS - Ângulo formado entre dois planos que contêm a base da abertura: o primeiro é o plano vertical na base da folha de vidro; o segundo plano é formado pela extremidade mais distante da proteção solar horizontal até a base da folha de vidro (INMETRO, 2013).

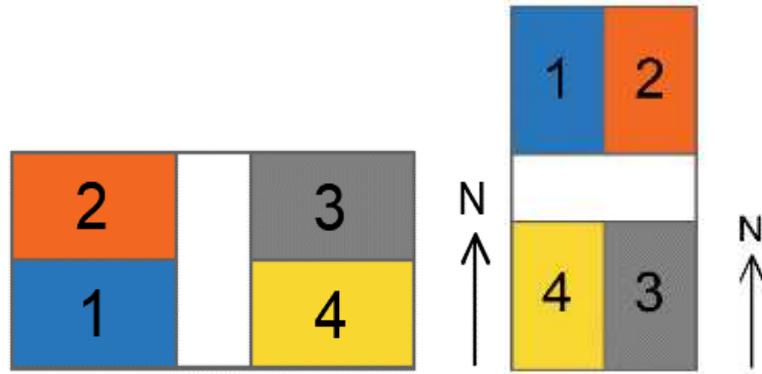


Figura 7 - Variação da orientação solar da edificação: Norte-Sul e Leste-Oeste.

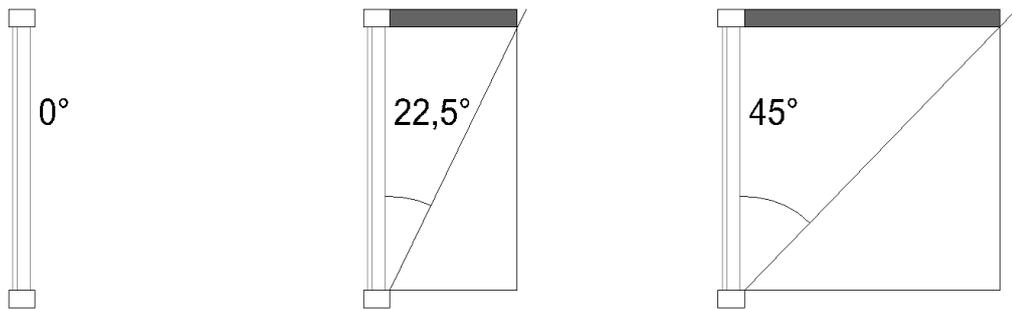


Figura 8 - Variação do ângulo vertical de sombreamento (AVS) das aberturas.

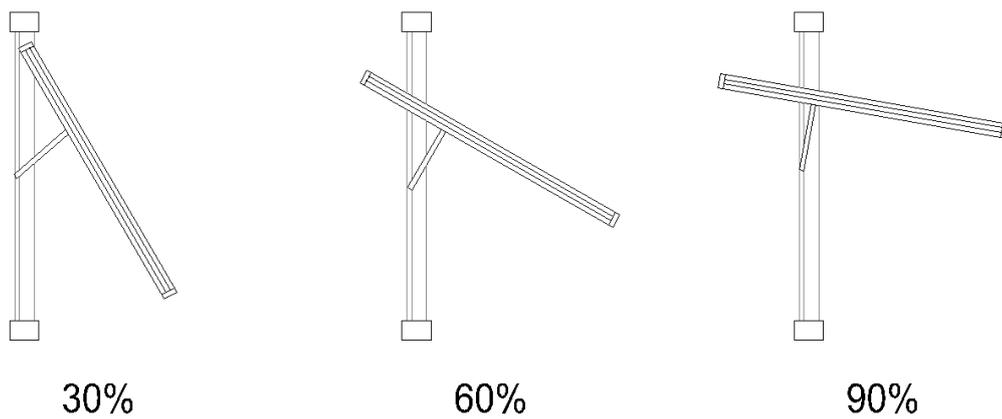


Figura 9 - Variação da área efetiva de abertura das janelas.

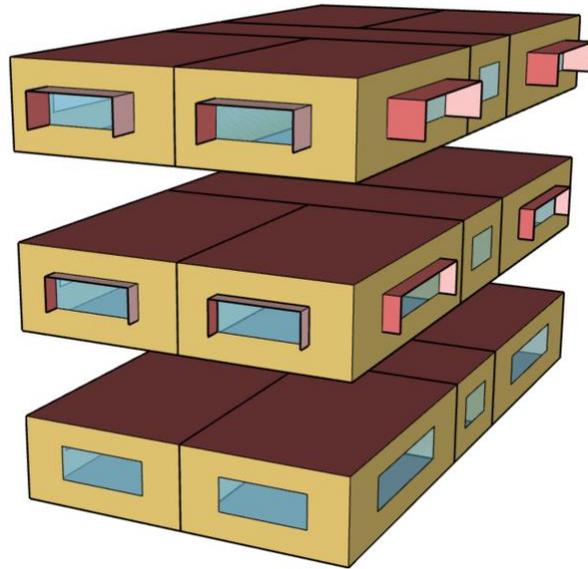


Figura 10 – Representação 3D das variações dos elementos de sombreamento.

Os elementos de sombreamento representados pela Figura 11 são meramente ilustrativos, pois foram simplificados a fim de serem utilizados nas simulações termoenergéticas. O projeto e material de construção dos dispositivos pode ser variado, a depender de cada caso. A Figura 12 apresenta dois exemplos de fachadas com diferentes dispositivos de proteção solar com AVS 45°, a título de exemplo.

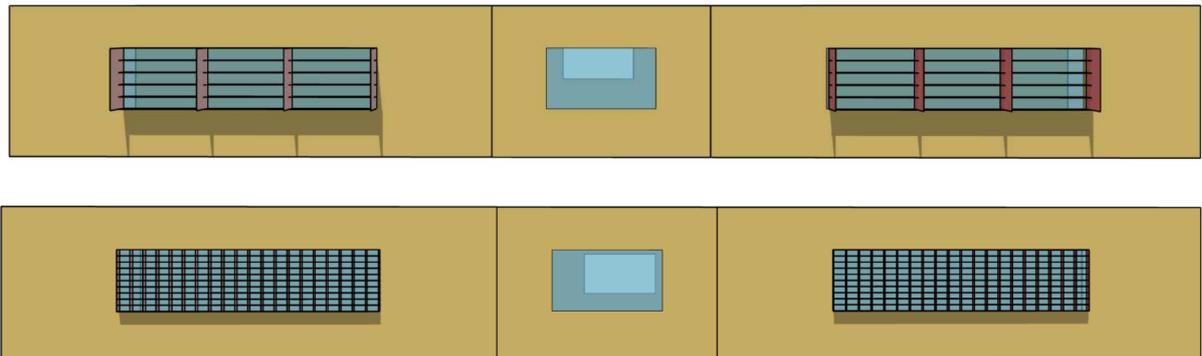


Figura 11 –Exemplos de dispositivos de proteção solar.

3.2. Elaboração dos arquivos climáticos futuros

A presente pesquisa adotou a ferramenta WeatherShift para a conversão de dados climáticos atuais da cidade de São Paulo em arquivos climáticos futuros, para uso nas simulações termoenergéticas. A escolha da ferramenta se deu pelo fato de estar atualizada em relação ao quinto relatório do IPCC (AR5) (IPCC, 2013).

Desenvolvida em parceria das empresas Arup e Argos Analytic, o WeatherShift produz arquivos climáticos no formato *EnergyPlus Weather file* (EPW) considerando as mudanças climáticas de três períodos futuros: 2035 (2026-2045), 2065 (2056-2075) e 2090 (2080-2099) (TROUP; FANNON, 2020).

Utilizou-se o arquivo climático IWECC (*International Weather for Energy Calculations*) em formato EPW (TROUP; FANNON, 2016) para configuração do cenário atual e como base para a criação dos arquivos climáticos futuros. O IWECC é o resultado do relatório *ASHRAE Research Project 1015-RP* (U.S. DEPARTMENT OF ENERGY'S BUILDING TECHNOLOGIES OFFICE, [s.d.]), que disponibiliza arquivos climáticos adequados para uso em programas de simulação de energia de edifícios para 227 localidades fora dos EUA e Canadá. Os arquivos são derivados de até 18 anos (1982-1999) de dados climáticos horários. Os dados do arquivo de São Paulo são provenientes da estação meteorológica Mirante de Santana.

Uma das principais fontes de incerteza da análise de cenários futuros de aquecimento global é que não há como estimar quais serão as futuras emissões de gases de efeito estufa (GEE). Para as análises propostas nesta pesquisa utilizou-se ambos os RCPs definidos no quinto relatório do IPCC (IPCC, 2013), RCP 4.5 e 8.5, uma vez que o WeatherShift recomenda obter estes dois conjunto de arquivos para edifícios com uma vida útil superior a 25 anos, pois a diferença entre ambas as projeções se torna cada vez maior ao longo do tempo (ASSESSMENT PATHWAYS, 2017). O WeatherShift permite também a escolha dos percentis de aquecimento global para cada período (10%, 25%, 50%, 75%, 90% e 95%). Os percentuais derivam de um amplo conjunto de projeções climáticas devido à incerteza em relação às condições climáticas futuras. No presente trabalho, utilizou-se o percentil 50% de aquecimento, que representa o ponto médio de aquecimento para esse conjunto. Dessa forma, os arquivos climáticos utilizados como cenários de mudanças climáticas correspondem a:

- cenário atual;
- futuro próximo – 2035 (2026-2045) RCP 4.5;
- futuro próximo – 2035 (2026-2045) RCP 8.5;
- futuro intermediário – 2065 (2056-2075) RCP 4.5;
- futuro intermediário – 2065 (2056-2075) RCP 8.5;

- futuro distante – 2090 (2080-2099) RCP 4.5;
- futuro distante – 2090 (2080-2099) RCP 8.5.

3.3. Análises paramétricas

A análise paramétrica é um método muito utilizado e necessário para explorar as diferentes opções de projeto e pode ser aplicada para todas as variáveis de projeto simultaneamente, garantindo a melhor solução global (ZHANG, 2009). As análises paramétricas foram realizadas por meio do programa EnergyPlus versão 8.9, uma ferramenta gratuita desenvolvida pelo Departamento de Energia Norte-americano (DOE) e validada pela ASHRAE Standard 140 (ASHRAE, 2007) e do *software* jEPlus v2.0, ferramenta gratuita desenvolvida com o objetivo de rodar análises paramétricas complexas com múltiplos parâmetros de projeto, tendo como base o motor de simulações do EnergyPlus (ZHANG, 2012). As geometrias do modelo de referência e cenários foram modeladas no *plugin* Euclid para SketchUp, com interface para o EnergyPlus. As simulações foram realizadas em uma base anual, para todos os cenários previamente definidos, a partir dos arquivos convertidos para climas representativos dos cenários atual, 2035, 2065 e 2090.

A Figura 13 apresenta um diagrama de árvore contendo os parâmetros simulados, totalizando 378 combinações.

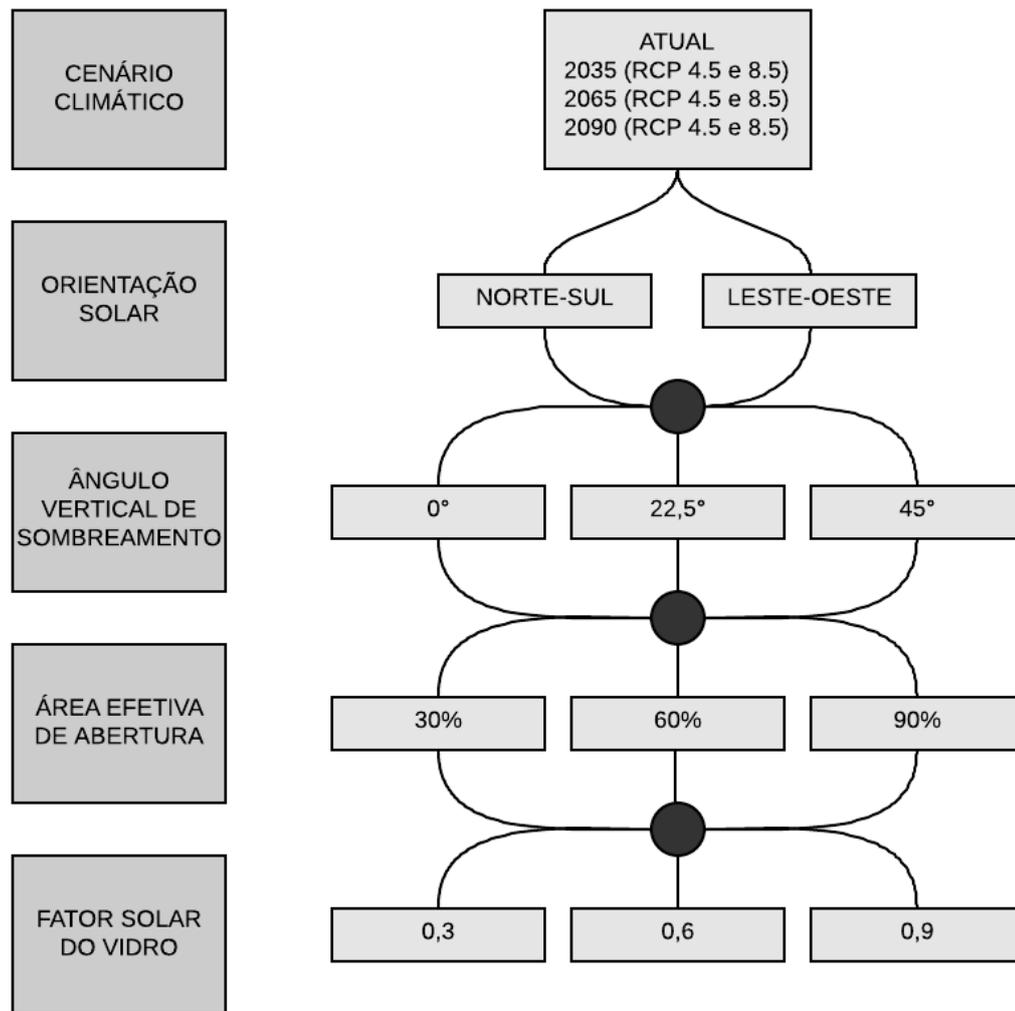


Figura 12 - Diagrama de árvore dos parâmetros simulados.

3.4. Análise de resultados

A análise dos resultados foi realizada em três etapas. Primeiramente, os arquivos climáticos futuros foram analisados e comparados com o cenário climático atual através de gráficos de linha de temperaturas média, máxima e mínima e umidade relativa média. Em seguida, os resultados das simulações computacionais foram analisados em termos de graus-hora de resfriamento (GHR - °Ch) e demanda térmica para resfriamento (kW/m².ano) das salas do pavimento-tipo para o cenário atual, por meio de gráficos de dispersão e diagramas de caixa. Os GHR foram calculados com base nos resultados horários de temperatura operativa do ambiente, considerando-se apenas o período de ocupação. Utilizou-se como base para o cálculo os limites superior e inferior de conforto térmico o modelo adaptativo da ASHRAE 55 (ASHRAE,

2017). As salas que apresentaram melhor e pior desempenho para cada parâmetro foram analisadas e comparadas entre si. Por último, todos os pavimentos-tipo do edifício foram analisados em conjunto, em um total de 12 andares, incluindo a área de circulação vertical. Discutiu-se a influência de cada variável independente nos resultados de número de horas de *setpoint* não atendido (h) e consumo energético para resfriamento (kWh/m².ano) para os cenários atual e futuros, por meio de gráficos de dispersão. Neste caso, utilizou-se o resultado de consumo e não de demanda térmica, de forma a considerar o equipamento de ar-condicionado como variável interferente na análise. Além disso, o consumo de energia com resfriamento (kWh/m².ano) foi analisado por meio de gráficos de barras, comparando o desempenho do modelo base, modelo mais eficiente e modelo menos eficiente para todos os cenários climáticos.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

São Paulo encontra-se na zona bioclimática 3 segundo a classificação das cidades brasileiras da NBR 15220-3 (ABNT, 2005). A carta bioclimática obtida pelo *software* Climate Consultant (2019) com base no modelo adaptativo da ASHRAE 55 (2017) e no horário de uso comercial (das 8 h às 18 h) mostra que a maior quantidade de horas de conforto durante o ano se dá através do uso da estratégia de ventilação natural (36,2%). Há uma grande necessidade da utilização de elementos de proteção solar para proporcionar conforto térmico nos meses mais quentes (31,9%). Observa-se também a necessidade de condicionamento mecânico em algumas horas do ano (5,7%). A ventilação híbrida apresenta-se, portanto, como uma estratégia de grande potencial para proporcionar conforto térmico na cidade de São Paulo.

Os arquivos climáticos das projeções climáticas futuras indicam que haverá um aumento significativo da temperatura do ar, com o passar dos anos, como pode ser observado na Tabela 6 e Figura 14. Segundo o cenário mais otimista, que representa a redução de GEE, RCP 4.5, até o fim do século a temperatura média anual deverá aumentar 1,94 °C. No cenário mais pessimista, que representa a realidade atual, RCP 8.5, a temperatura média anual deverá aumentar 3,66 °C. Caso as emissões de GEE continuem aumentando no ritmo atual, a temperatura média anual aumentará 2 °C em um futuro intermediário, ultrapassando as recomendações do IPCC. No cenário mais otimista, o aumento das médias anuais de temperatura até o fim do século para a cidade de São Paulo estaria dentro dos limites recomendados pelo IPCC (2018).

Tabela 6 – Médias anuais de umidade relativa e temperaturas máximas, médias e mínimas para o cenário atual e projeções futuras.

Médias anuais	ATUAL	2035		2065		2090	
		RCP4.5	RCP8.5	RCP4.5	RCP8.5	RCP4.5	RCP8.5
Temperatura média máxima (°C)	24,97	26,14	26,41	26,65	27,69	27,09	28,63
Temperatura média (°C)	19,90	21,01	21,23	21,63	22,52	21,84	23,56
Temperatura média mínima (°C)	16,43	17,49	17,68	18,18	18,98	18,24	20,11
Umidade relativa média (%)	77,26	76,39	76,33	76,49	76,17	75,91	76,36

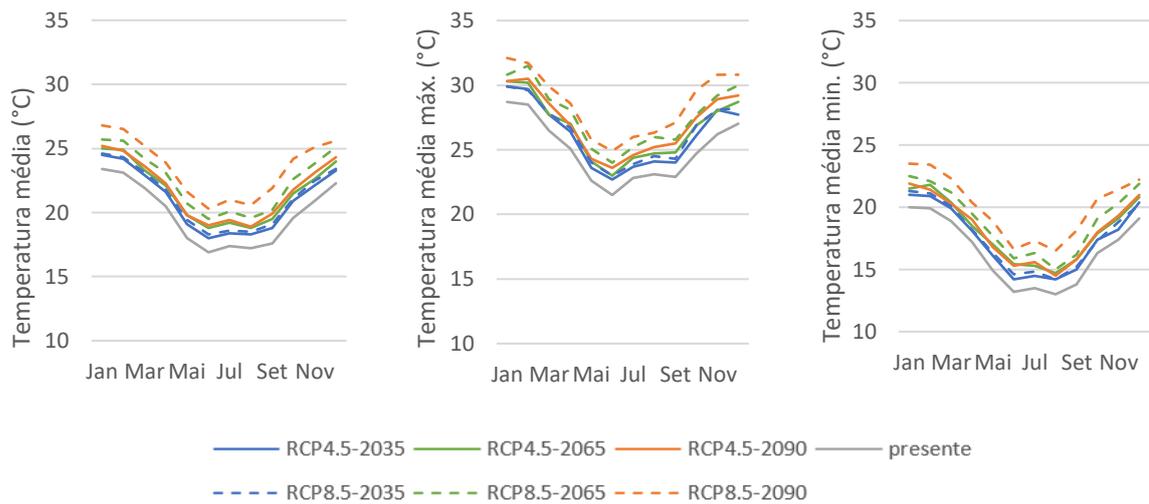


Figura 13 - Análise comparativa dos arquivos climáticos atual e futuros da cidade de São Paulo.

4.1. Análise paramétrica do pavimento-tipo no cenário atual

Este item discute as variações de parâmetros da envoltória para o cenário climático atual. A análise é apresentada por sala comercial de um pavimento tipo, localizado no 6° andar da edificação proposta.

A Figura 15 apresenta os gráficos de dispersão de Graus-hora de resfriamento (GHR) e de demanda térmica para resfriamento para todos os modelos simulados, separados por orientação solar (eixo longitudinal da edificação voltado para Norte-Sul e voltado para Leste-Oeste). A influência da localização da sala no pavimento tipo tem claro impacto no resultado de GHR mas não no resultado de demanda térmica para resfriamento. Pressupõe-se, com isso, que a interferência da radiação solar direta e refletida (temperatura radiante) exerça grande impacto no resultado comparativo entre cenários, já que a demanda térmica – variável calculada em função da temperatura do ar – não apresenta clara diferença entre salas de diferentes orientações solares.

Pode-se observar que as salas pertencentes à edificação com eixo longitudinal orientado a Norte-Sul apresentaram uma média de GHR 32% menor que as salas com orientação Leste-Oeste. As salas voltadas para a fachada Norte (salas 2 e 3 da orientação Norte-Sul e salas 1 e 2 da orientação Leste-Oeste) apresentaram em média 77% a mais de GHR, quando comparadas às salas voltadas para a fachada Sul. Os cenários com pior desempenho relativo à demanda térmica para resfriamento corresponderam aos modelos sem dispositivos de proteção solar (AVS 0°), área efetiva de abertura para ventilação (AEA) de 30% e fator solar do vidro (FS) de 0,9.

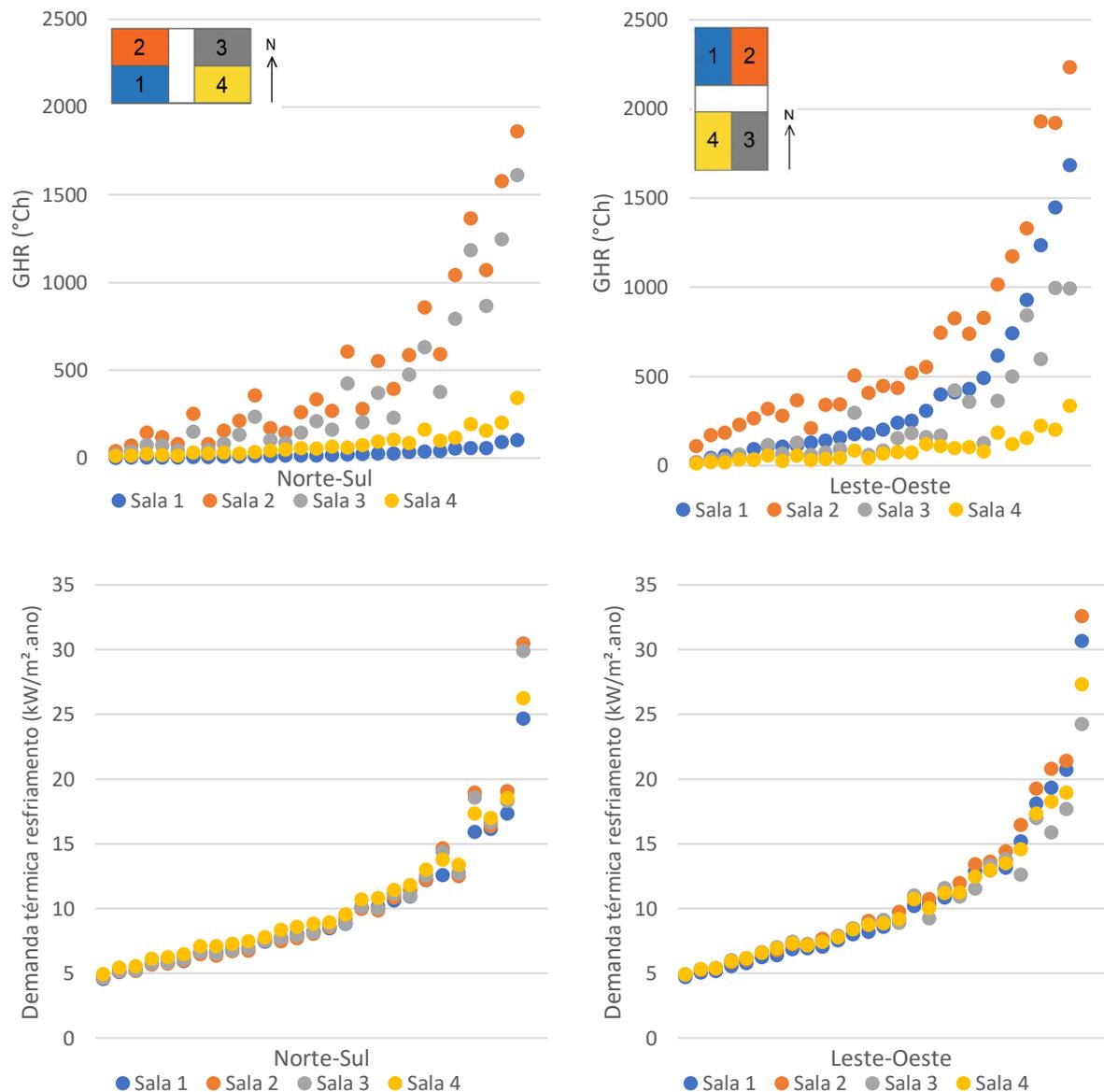


Figura 14 – Gráficos de dispersão de graus-hora de resfriamento (°Ch) e demanda térmica para resfriamento (kW/m².ano) para todos os casos simulados, apresentados por sala do pavimento tipo.

Do total de 216 casos simulados, apenas sete casos apresentaram GHR superior a 1.500 °Ch no ano (3,2 % da amostra). O pior caso correspondeu à sala 2 com orientação L-O, cujas características da envoltória compreendem: sem dispositivos de proteção solar, área efetiva de abertura (AEA) para ventilação de 30% e fator solar do vidro (FS) de 0,9. Este caso apresentou GHR de 2.232 °Ch, o que corresponde a 25% de tempo de ocupação do ambiente. Os demais casos com GHR acima de 1.500 °Ch estão igualmente divididos entre as orientações N-S e L-O. Todos os casos são salas voltadas para a fachada Norte da edificação, sem sombreamento nas aberturas e com fator solar do vidro de 0,9. A área efetiva de abertura destes

casos variou entre 30% e 60%, sendo predominantes os casos com 30%. O melhor caso (0,5 °Ch) correspondeu à sala 1 com orientação N-S, com ângulo vertical de sombreamento (AVS) do elemento de proteção solar de 45°, área efetiva de abertura de 90% e fator solar do vidro de 0,3. Os seis melhores casos corresponderam todos à sala 1 com orientação N-S e fator solar do vidro de 0,3, variando o AVS (45° e 22,5°) e a área efetiva de abertura (30%, 60% e 90%).

A Figura 16 apresenta a influência da orientação solar das fachadas da edificação (eixos longitudinais Norte-Sul ou Leste-Oeste) no desempenho termoenergético do pavimento tipo. A influência da orientação solar teve maior impacto no desempenho térmico das salas (GHR) do que na demanda energética. Com relação aos GHR, a orientação Norte-Sul mostrou-se 32% mais eficiente, em média. Os parâmetros variáveis da envoltória (AEA, FS e AVS) exerceram maior influência no resultado final para a orientação Leste-Oeste (diferenças de 356 °Ch e 6,1 kW/m².ano entre o primeiro e terceiro quartis) e menor impacto na orientação Norte-Sul (diferenças de 232 °Ch e 5,7 kW/m².ano entre o primeiro e terceiro quartis).

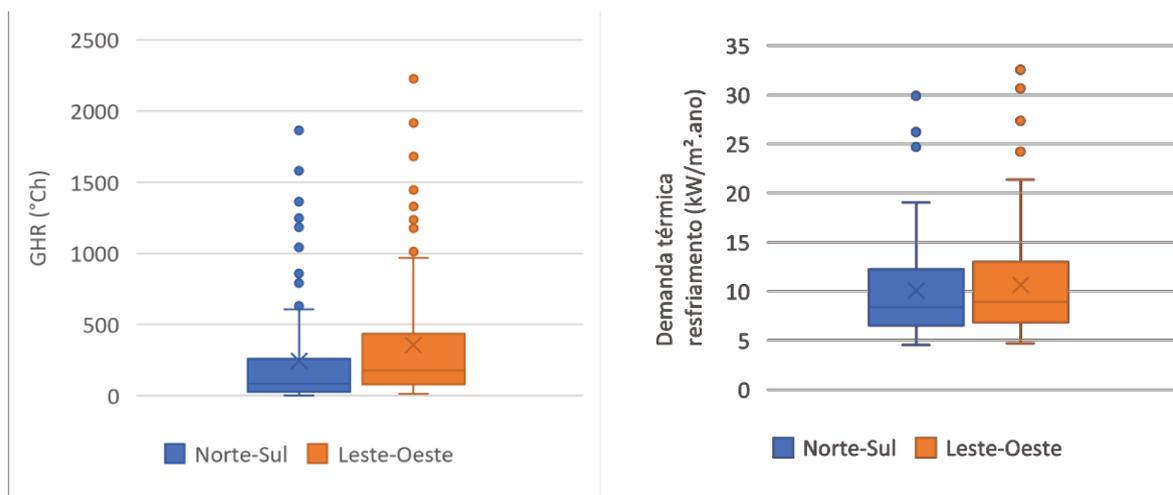


Figura 15 - Diagramas de caixa de graus-hora de resfriamento (°Ch) e demanda térmica para resfriamento (kW/m².ano) para as orientações Norte-Sul e Leste-Oeste.

A Figura 17 apresenta a influência da variação no ângulo vertical de sombreamento sobre o desempenho térmico (GHR) e energético (demanda térmica de resfriamento) de cada sala comercial. A variação dos parâmetros área efetiva de abertura para ventilação, fator solar do vidro e orientação solar do pavimento tipo tiveram maior impacto no resultado para os casos sem elemento de proteção solar (AVS = 0°), resultando em uma diferença de 878 °Ch e 9,4 kW/m².ano entre o primeiro

e terceiro quartis da amostra. Este impacto tornou-se menos relevante pela adição de elemento e sombreamento, sendo que a diferença entre o AVS de 22,5° e 45° não foi significativa (diferenças de 308 °Ch e 4,6 kW/m².ano entre o primeiro e terceiro quartis, no caso do AVS de 22,5°, e de 134 °Ch e 2,3 kW/m².ano para o AVS de 45°).

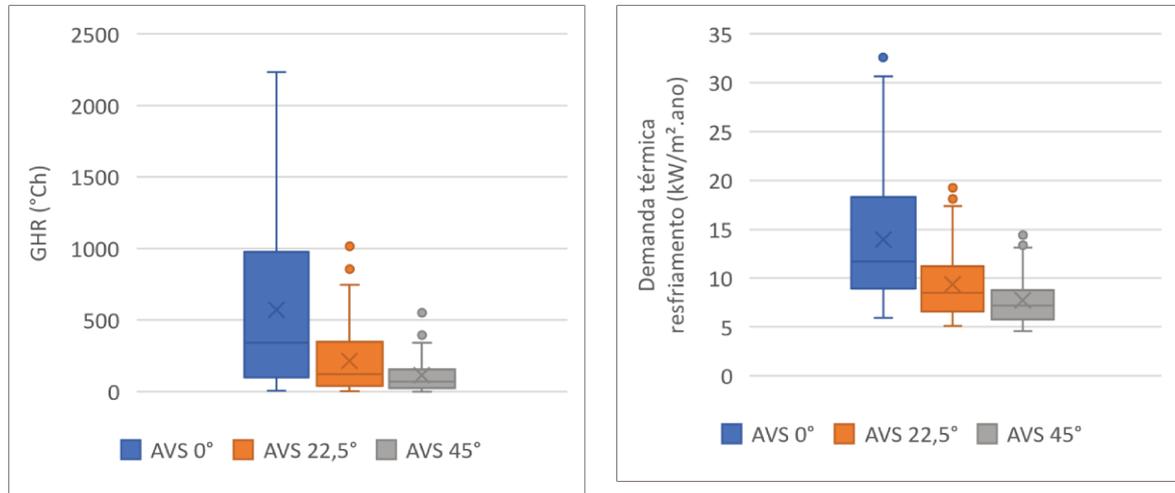


Figura 16 - Diagramas de caixa de graus-hora de resfriamento (°Ch) e demanda térmica para resfriamento (kW/m².ano) para o ângulo vertical de sombreamento.

A Figura 18 apresenta a influência da área efetiva de abertura das esquadrias sobre o desempenho térmico (GHR) e energético (demanda térmica de resfriamento) de cada sala comercial. A variação dos parâmetros ângulo vertical de sombreamento, fator solar e orientação solar do pavimento tipo tiveram maior influência nos casos com área efetiva de abertura de 30%, principalmente no resultado de desempenho energético (diferenças de 478 °Ch e 7,2 kW/m².ano entre o primeiro e terceiro quartis). Este impacto diminuiu com o aumento da área efetiva de abertura, sendo a diferença entre o primeiro e terceiro quartis de 300 °Ch e 4,6 kW/m².ano para a AEA de 60% e de 177 °Ch e 3,1 kW/m².ano para a AEA de 90%. Nota-se que uma maior abertura das esquadrias resultou em melhor desempenho termoenergético, pois permitiu melhor aproveitamento da ventilação natural e, conseqüentemente, menor uso do sistema de ar-condicionado, mostrando que as temperaturas externas são favoráveis à ventilação natural, em parcela significativa do ano.

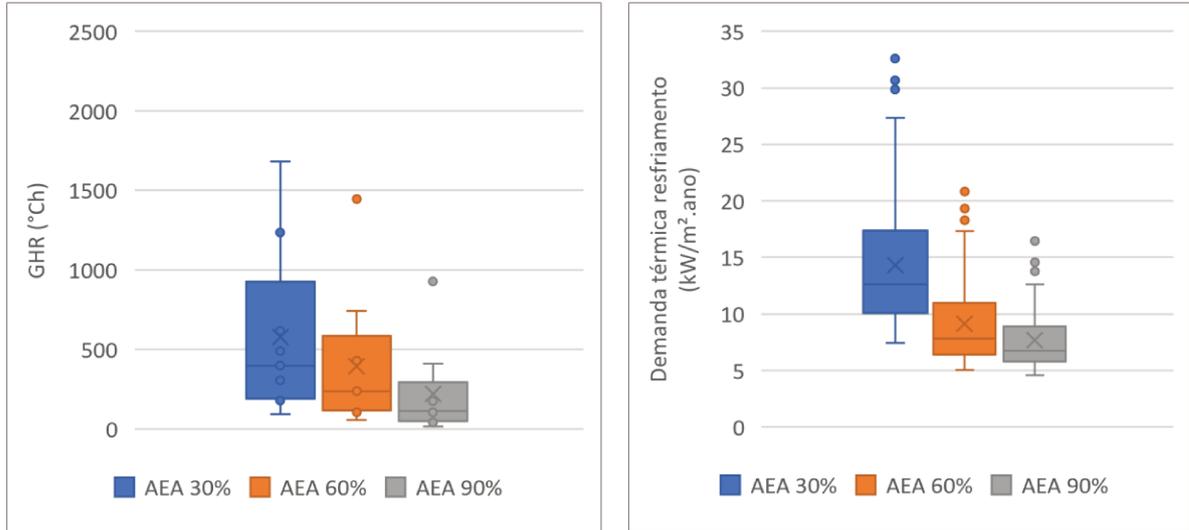


Figura 18 – Diagramas de caixa de graus-hora de resfriamento (°Ch) e demanda térmica para resfriamento (kW/m².ano) para a área efetiva de abertura das esquadrias.

A Figura 19 apresenta a influência do fator solar do vidro sobre o desempenho térmico (GHR) e energético (demanda térmica de resfriamento) de cada sala comercial. A variação dos parâmetros área efetiva de abertura, ângulo vertical de sombreamento e orientação solar do pavimento tipo exerceram maior influência para os casos com fator solar de 0,9 (diferenças de 607 °Ch e 8,2 kW/m².ano entre o primeiro e terceiro quartis). Este impacto diminuiu com a redução do fator solar para 0,6 (diferenças de 362 °Ch e 5,2 kW/m².ano entre o primeiro e terceiro quartis) e para 0,3 (diferenças de 123 °Ch e 2,5° kW/m².ano entre o primeiro e terceiro quartis). O vidro de menor fator solar apresentou o melhor desempenho termoenergético e menores índices de desconforto térmico (GHR).

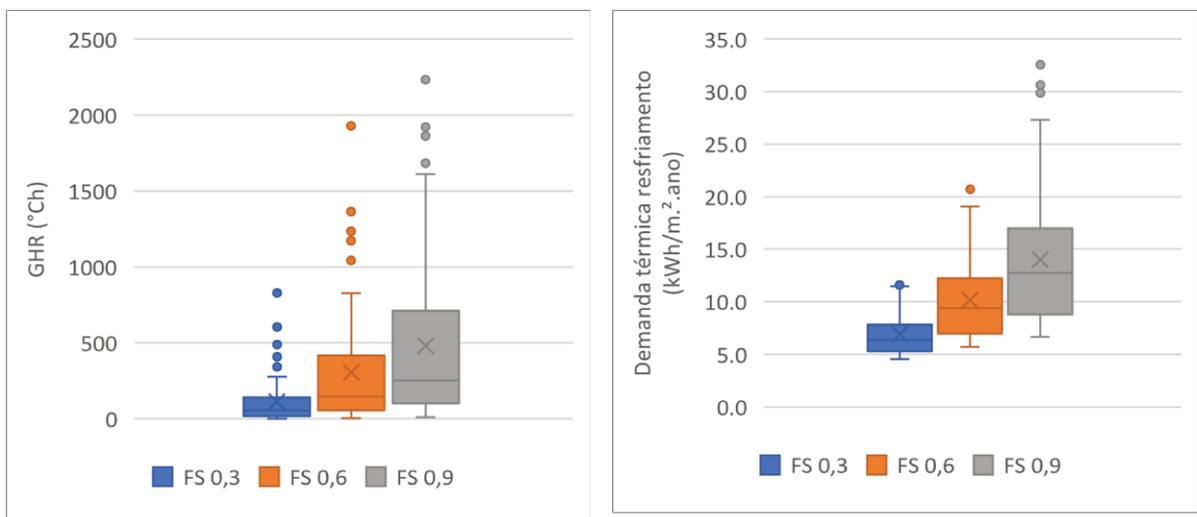


Figura 19 - Diagramas de caixa de graus-hora de resfriamento (°Ch) e demanda térmica para resfriamento (kW/m².ano) para o fator solar do vidro.

Para os intervalos de variação propostos na presente análise, a variável de maior impacto no resultado de Graus-hora de resfriamento foi o elemento de proteção solar (AVS), seguida da área efetiva de abertura nas esquadrias, fator solar do vidro e, em último lugar, orientação solar da edificação. No caso da demanda térmica de resfriamento, o elemento de proteção solar também foi a variável de maior impacto, seguida do fator solar do vidro, área efetiva de abertura para ventilação e, também por último, a orientação solar da edificação. Apesar da orientação solar da edificação ter resultado no menor impacto, dentre as variáveis analisadas, depreende-se, da Figura 16, que a orientação solar da sala no pavimento pode exercer uma diferença significativa no seu desempenho térmico, tendo em vista a incidência direta de radiação solar. A sala 4, por exemplo, não apresentou nenhum valor de GHR acima de 500 °Ch, para as duas orientações solares analisadas.

A Tabela 7 apresenta os valores médios obtidos nos gráficos de caixa das Figuras 22 a 27, com destaque para os valores utilizados no modelo base, que representa os valores médios encontrados no banco de dados de Pereira (2019). O acréscimo da proteção solar com AVS 22,5° reduziu a demanda térmica em 33% e os GHR em 62%, em relação ao modelo base, sem proteção solar. A proteção solar com AVS 45° reduziu a demanda térmica em 45% e os GHR em 80%, também em relação ao modelo base. Apesar do elemento de sombreamento maior apresentar um melhor desempenho termoenergético, proporcionalmente o elemento de sombreamento menor foi o que apresentou maior impacto, quando comparado à inexistência de sombreamento. A redução da área efetiva de abertura para ventilação de 60% (modelo base) para 30% aumentou em 42% o número de GHR e em 57% a demanda térmica, já o aumento de 60% para 90% reduziu em 33% o número de GHR e em 15% a demanda térmica. A redução do fator solar do vidro de 0,6 para 0,3 ocasionou uma redução de 63 % no número de GHR e de 32% na demanda térmica para resfriamento, enquanto o aumento de 0,6 para 0,9 ocasionou um aumento de 58% no número de GHR e de 37% na demanda térmica para resfriamento.

Tabela 7 - Valor médio de graus-hora de resfriamento (°Ch) e demanda térmica para resfriamento (kW/m².ano) de todas as variáveis analisadas. Destaque em negrito para as variáveis correspondentes ao modelo base.

Variável		GHR (°Ch)	Demanda térmica resfriamento (kW/m ²)
Orientação solar	N-S	243	10,1
	L-O	357	10,7
	0°	572	14
AVS	22,5°	216	9,4
	45°	114	7,7
AEA	30%	415	14,3
	60%	293	9,1
	90%	194	7,7
FS	0,3	114	6,9
	0,6	306	10,2
	0,9	482	14

A sala 1 N-S apresentou o melhor desempenho termoenergético em todos os casos analisados e a sala 2 L-O apresentou o pior desempenho, também para todos os casos. Em vista disso, estas salas foram escolhidas para uma análise adicional, apresentada nas Figuras 20 a 27.

As Figuras 20 e 21 apresentam os gráficos da resposta térmica das salas de melhor e pior desempenho para a primeira semana de junho, mês do solstício de inverno, e para a primeira semana de dezembro, mês do solstício de verão, para o cenário atual. No inverno, nota-se que as temperaturas internas se mantêm mais altas que a externa na maior parte da semana, sendo a sala de pior desempenho em média 1°C mais quente que a sala de melhor desempenho. O atraso térmico das salas é pequeno e a amplitude térmica é maior nas horas em que as salas estão desocupadas e que a temperatura externa está mais baixa. Ambas as salas apresentam de umidade relativa interna mais baixa que a externa, devido à baixa ocupação dos ambientes. No verão, as temperaturas externas ultrapassam as internas durante grande parte do período de ocupação e a amplitude térmica aumenta ainda mais nos períodos mais frios e diminui nos períodos mais quentes do dia, quando comparadas ao mês de junho. Em ambos os períodos, a sala de melhor desempenho apresentou baixa amplitude térmica e permaneceu dentro da faixa do conforto adaptativo na maior parte do tempo. Já o pior caso apresentou maior amplitude térmica e na semana mais quente permaneceu fora da faixa do conforto adaptativo na maior parte do tempo de ocupação.

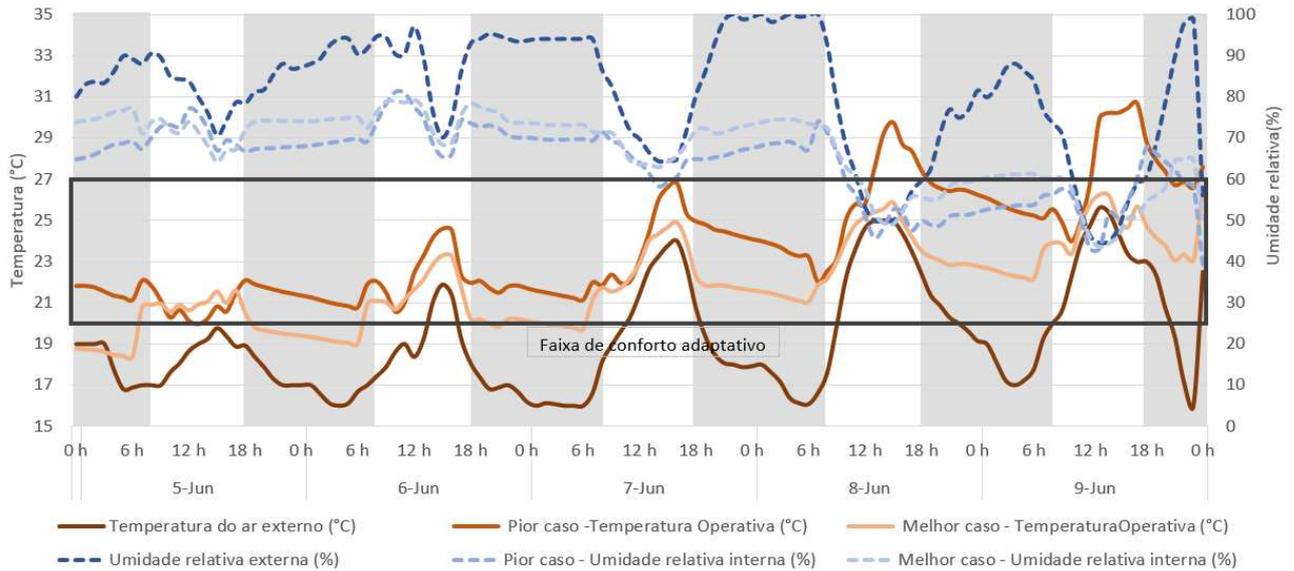


Figura 20 - gráfico da resposta térmica do melhor caso e pior caso na primeira semana de junho.

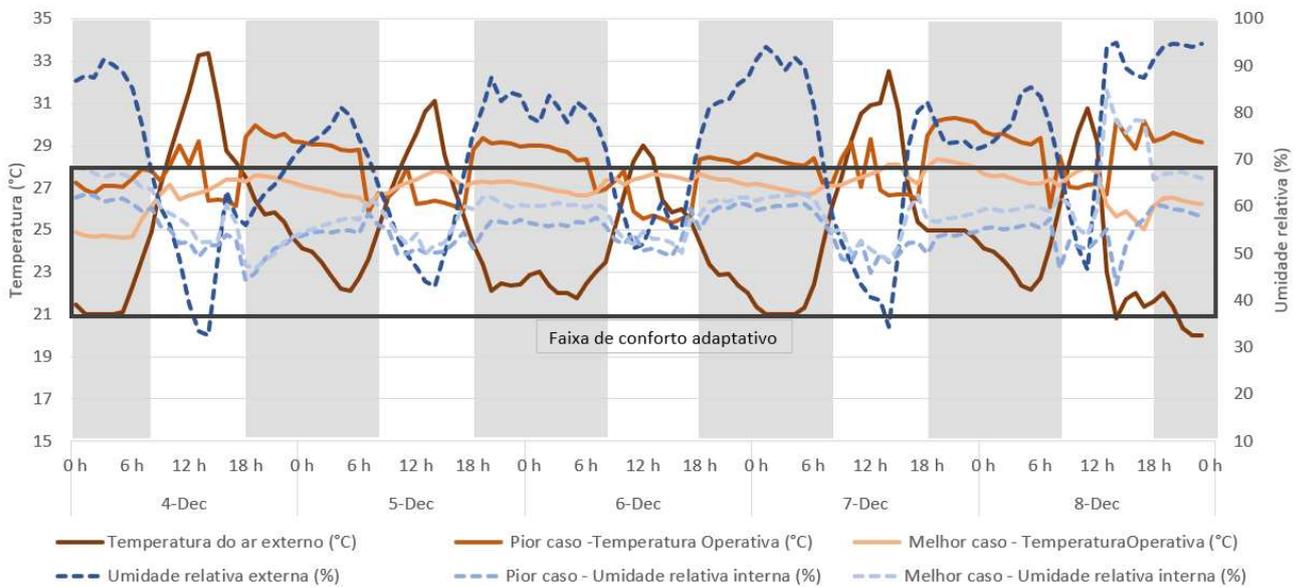


Figura 21 - gráfico da resposta térmica do melhor caso e pior caso na primeira semana de dezembro.

As Figuras 22 e 23 mostram os diagramas de caixa do ângulo vertical de sombreamento para os modelos de melhor e pior desempenho. Observa-se uma maior diferença para os resultados de GHR, sendo os resultados de demanda térmica parecidos entre ambas as salas, conforme já observado nas Figuras 20 e 21.

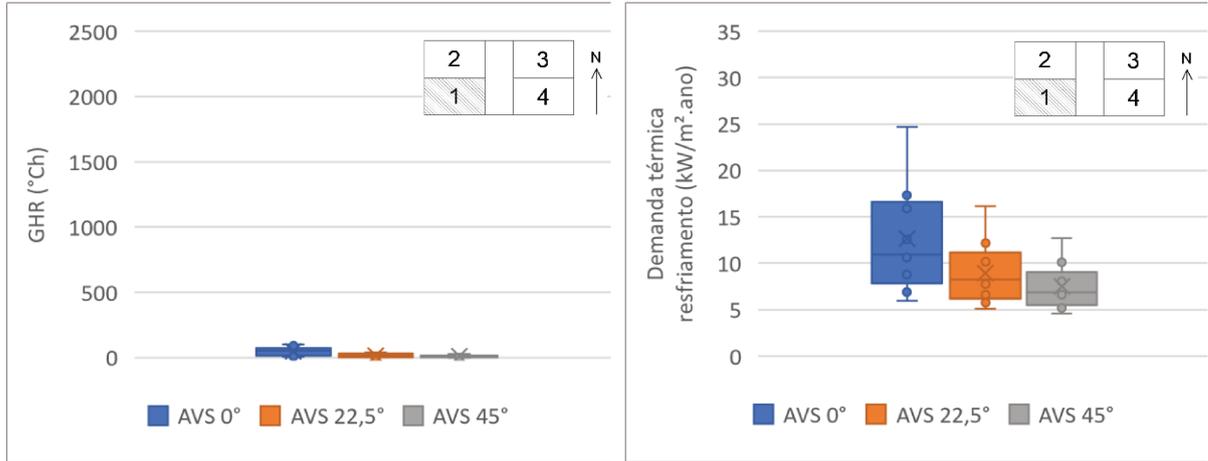


Figura 22 - Diagramas de caixa de graus-hora de resfriamento (°Ch) e demanda térmica para resfriamento (kW/m².ano) para o ângulo vertical de sombreamento da sala com melhor desempenho termoenergético.

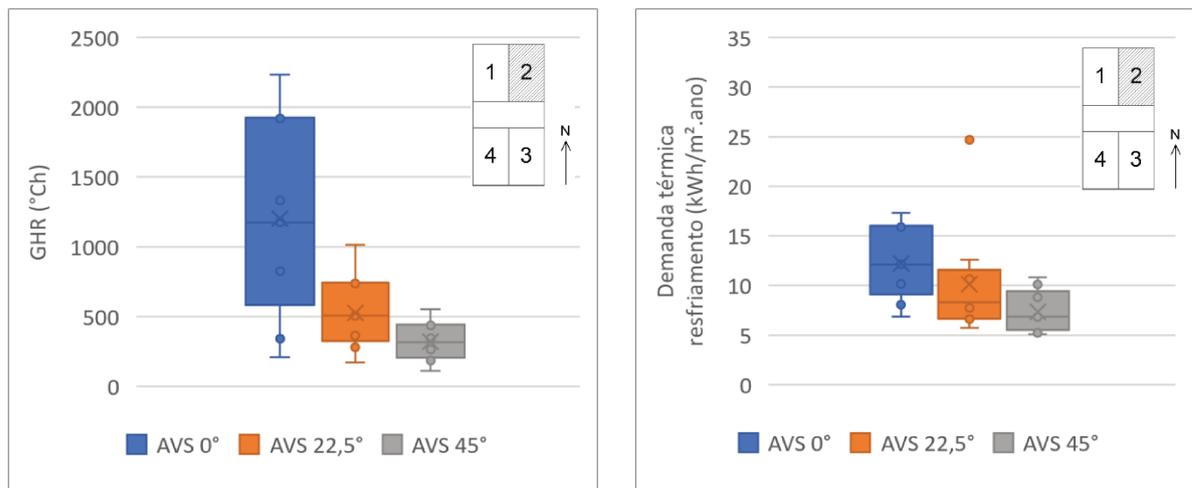


Figura 23 - Diagramas de caixa de graus-hora de resfriamento (°Ch) e demanda térmica para resfriamento (kWh/m².ano) para o ângulo vertical de sombreamento da sala com pior desempenho termoenergético.

As Figuras 24 e 25 mostram os diagramas de caixa da área efetiva de abertura para ventilação, considerando apenas as salas com maior e menor resultados de GHR e demanda térmica para resfriamento. Novamente, a diferença de GHR entre ambas as salas é mais significativa, no entanto já se nota uma maior diferença entre a demanda térmica das duas salas, em especial nos valores do terceiro quartil, que são mais altos para o caso de pior desempenho (sala 2).

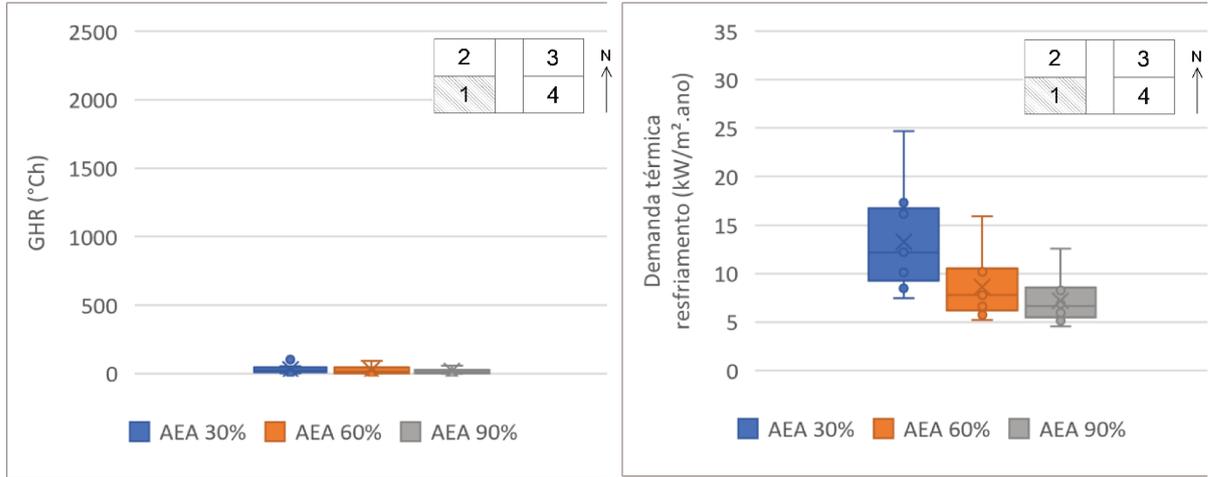


Figura 17 - Diagramas de caixa de graus-hora de resfriamento (°Ch) e demanda térmica para resfriamento (kW/m².ano) para a área efetiva de abertura da sala com melhor desempenho termoenergético.

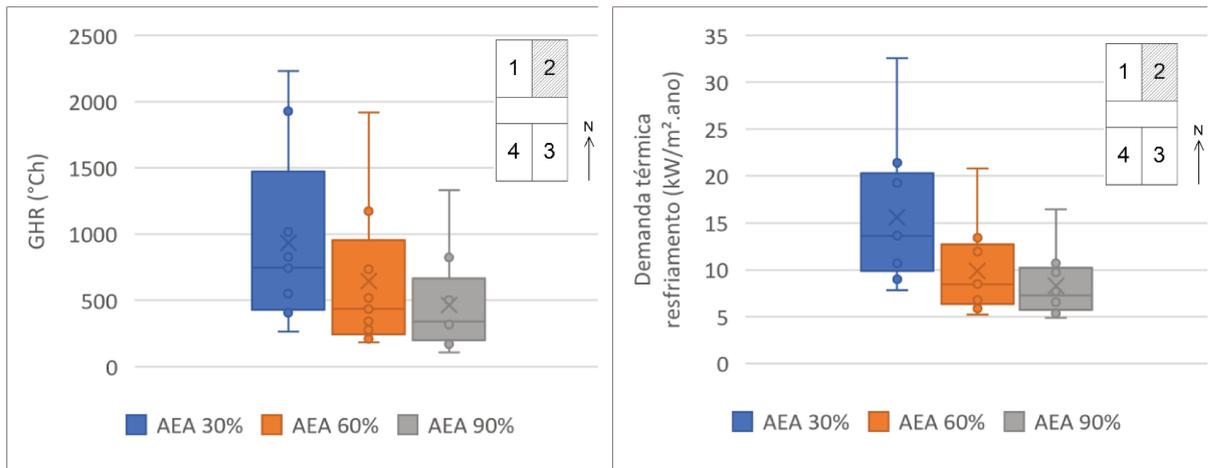


Figura 18 - Diagramas de caixa de graus-hora de resfriamento (°Ch) e demanda térmica para resfriamento (kW/m².ano) para a área efetiva de abertura da sala com pior desempenho termoenergético.

As Figuras 26 e 27 mostram os diagramas de caixa do fator solar do vidro, considerando apenas as salas com maior e menor resultados de GHR e demanda térmica para resfriamento. Novamente, a diferença entre ambas as salas é mais significativa para a variável GHR, mas a demanda térmica apresenta diferença em especial nos limites superiores (terceiro quartil).

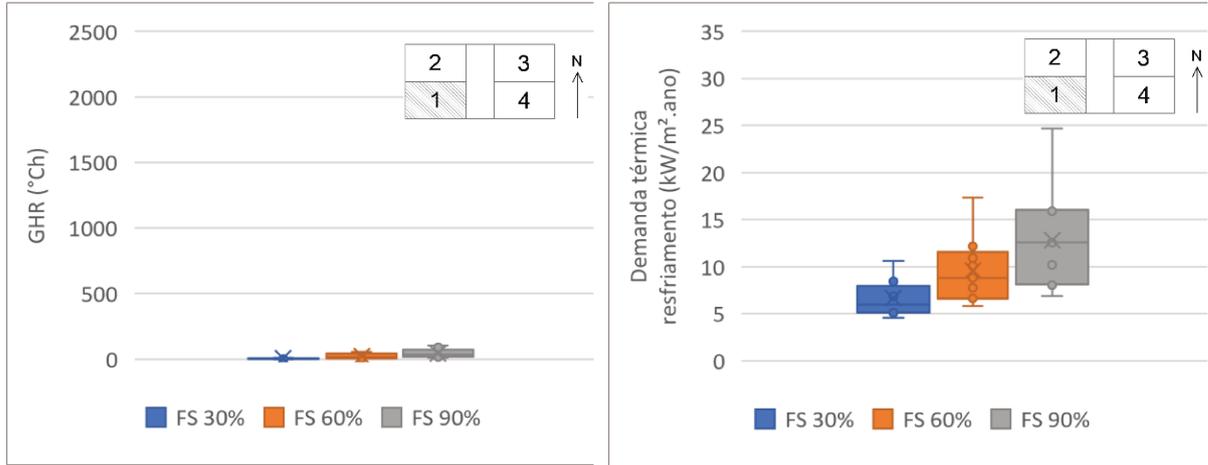


Figura 19 - Diagramas de caixa de graus-hora de resfriamento (°Ch) e demanda térmica para resfriamento (kW/m².ano) para a área efetiva de abertura da sala com melhor desempenho termoenergético.

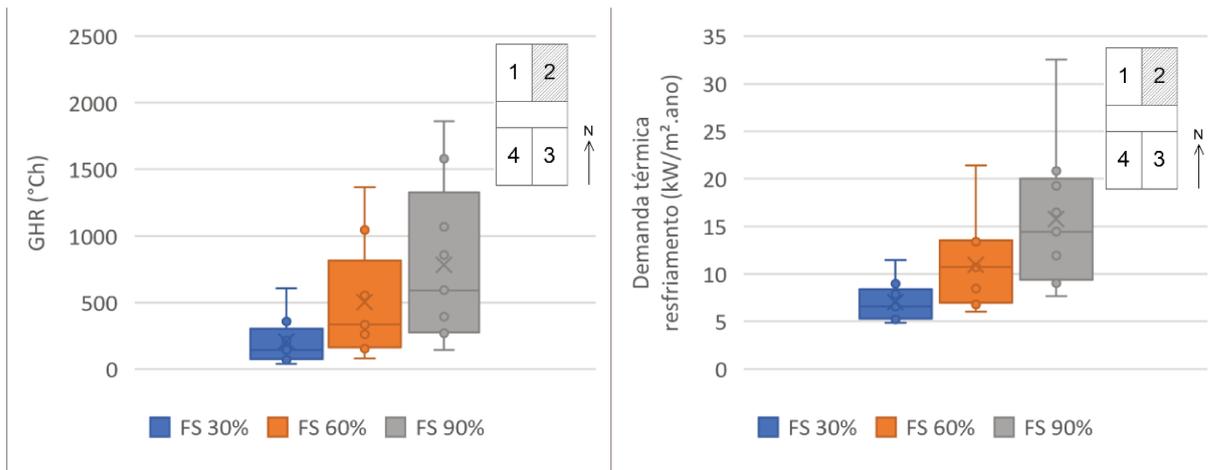


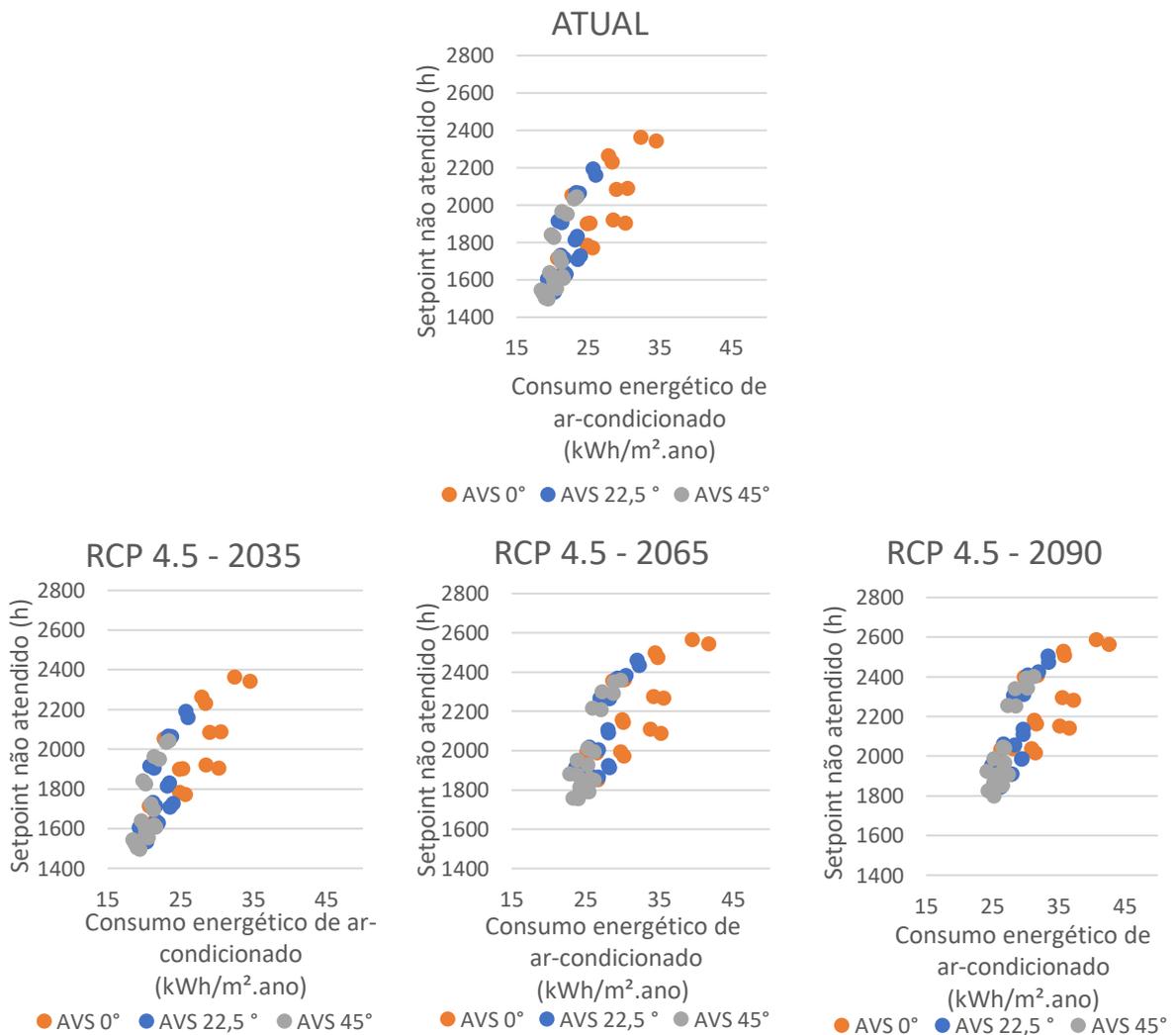
Figura 207 - Diagramas de caixa de graus-hora de resfriamento (°Ch) e demanda térmica para resfriamento (kW/m².ano) para o fator solar do vidro da sala com pior desempenho termoenergético.

4.2. Análise paramétrica do edifício nos cenários atual e futuro

Este item discute o impacto da variação de parâmetros da envoltória para os cenários climáticos atual e futuro, considerando-se todos os pavimentos-tipo do edifício analisado, em um total de 12 andares, incluindo a área de circulação vertical. Exclui-se, dessa análise, eventuais pavimentos técnicos, subsolos e equipamentos externos (bombas e elevadores). O consumo de energia com iluminação e equipamentos corresponde a uma parcela fixa de 28 kWh/m².ano e 25 kWh/m².ano, respectivamente, e não estão representados nos gráficos.

A Figura 28 apresenta o número de horas de *setpoint* não atendido versus o consumo energético de ar-condicionado para a variável ângulo vertical de sombreamento (AVS), considerando os cenários atual e futuros (RCPs 4.5 e 8.5).

Depreende-se que há uma clara modificação no consumo de energia da edificação em função do uso de elementos de sombreamento, independentemente das variáveis área efetiva de abertura para ventilação e fator solar do vidro, em especial ao comparar-se os casos sem sombreamento (AVS=0°) e com sombreamento (AVS=22,5°/45°). O uso do elemento de sombreamento (independentemente do tamanho) mostrou-se benéfico em todos os cenários. A diferença no AVS de 22,5° para 45° não se mostrou significativa, visto que os valores dos modelos simulados ocupam a mesma região de pontos no gráfico. Já os valores dos modelos sem sombreamento são marcadamente mais altos, em termos de consumo de energia.



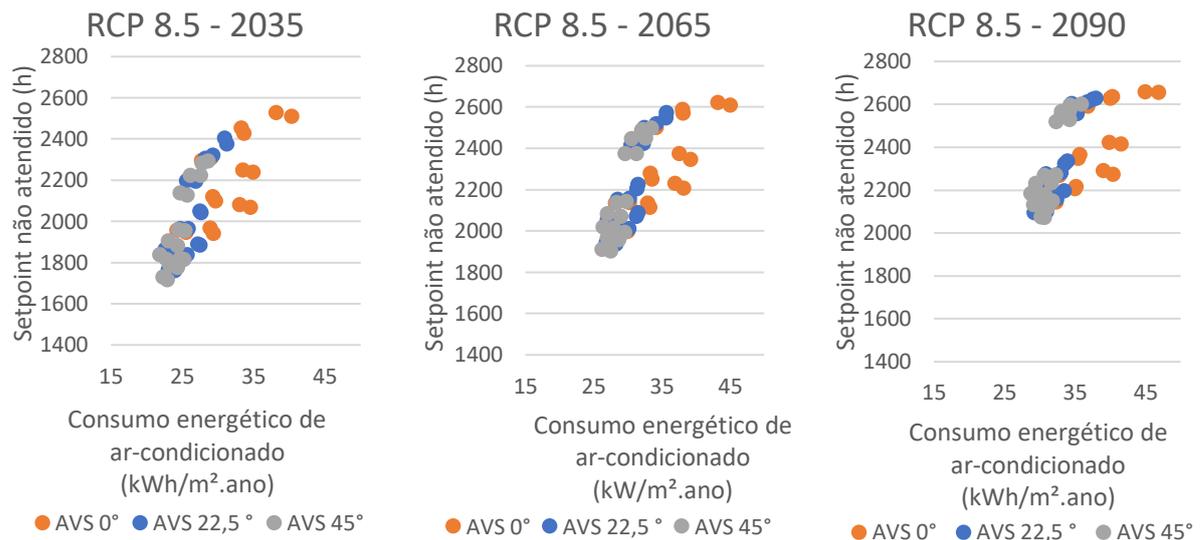


Figura 21 - Número de horas de *setpoint* não atendido (h) versus consumo energético de ar-condicionado (kWh/m².ano) da variação do ângulo vertical de sombreamento (AVS).

A Figura 29 apresenta o número de horas de *setpoint* não atendido versus o consumo energético de ar-condicionado da área efetiva de abertura para ventilação para os cenários atual e futuros (RCPs 4.5 e 8.5). O número de horas de *setpoint* não atendido mostra uma clara modificação em função da área efetiva de abertura para ventilação, independentemente das demais variáveis, mas não se mostra tão determinante no resultado de consumo de energia. A curva formada por cada valor da variável (30%, 60% e 90%) muda ao longo do tempo, ou seja, a diferença de *setpoint* não atendido entre o pior e melhor modelo de um conjunto de dados com mesmo valor de AEA é menor em 2090 do que no cenário atual. Este resultado mostra que o aumento da temperatura global torna mais difícil a obtenção de um bom desempenho térmico da edificação com o uso da ventilação natural, já que as temperaturas externas se elevam.

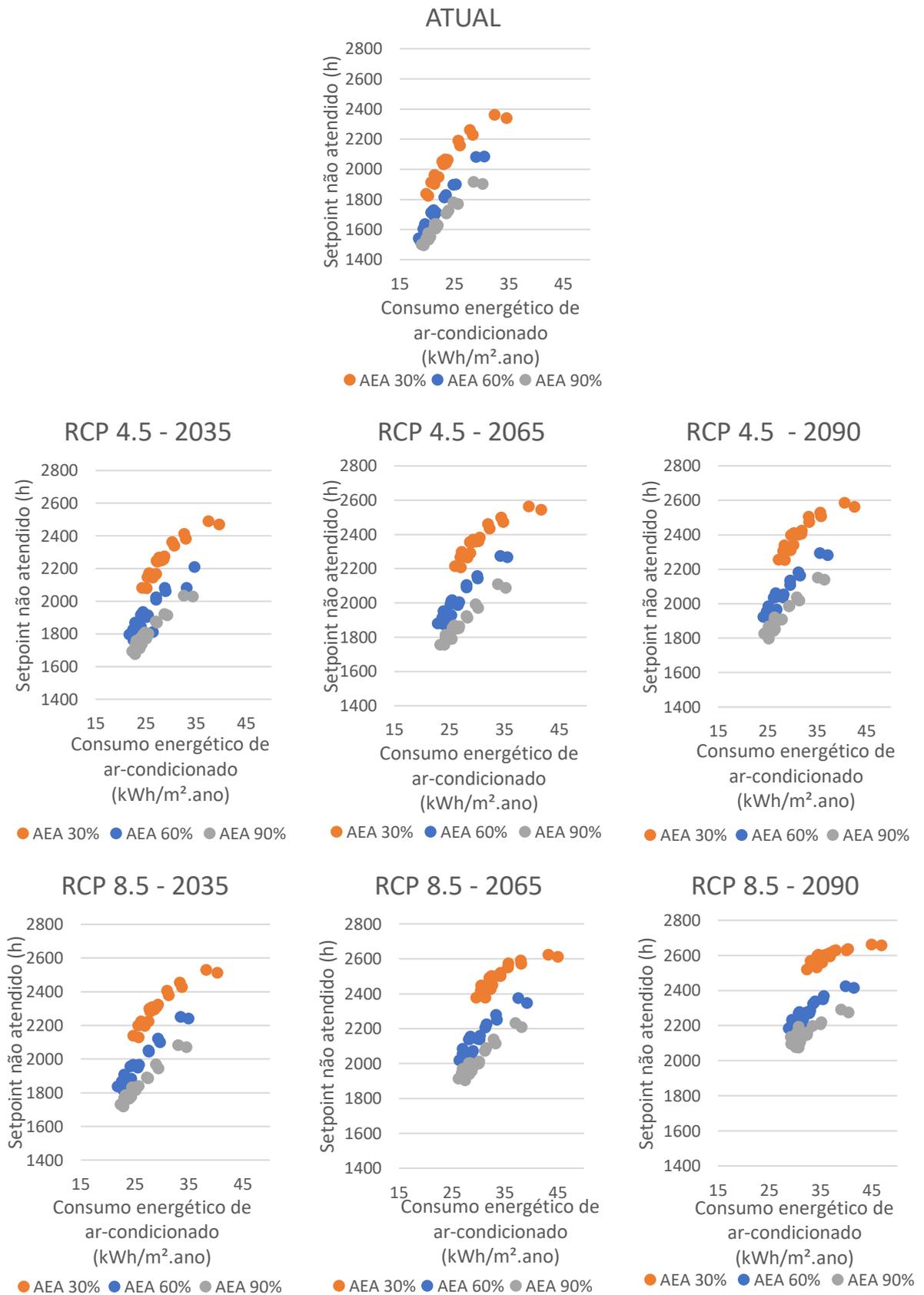
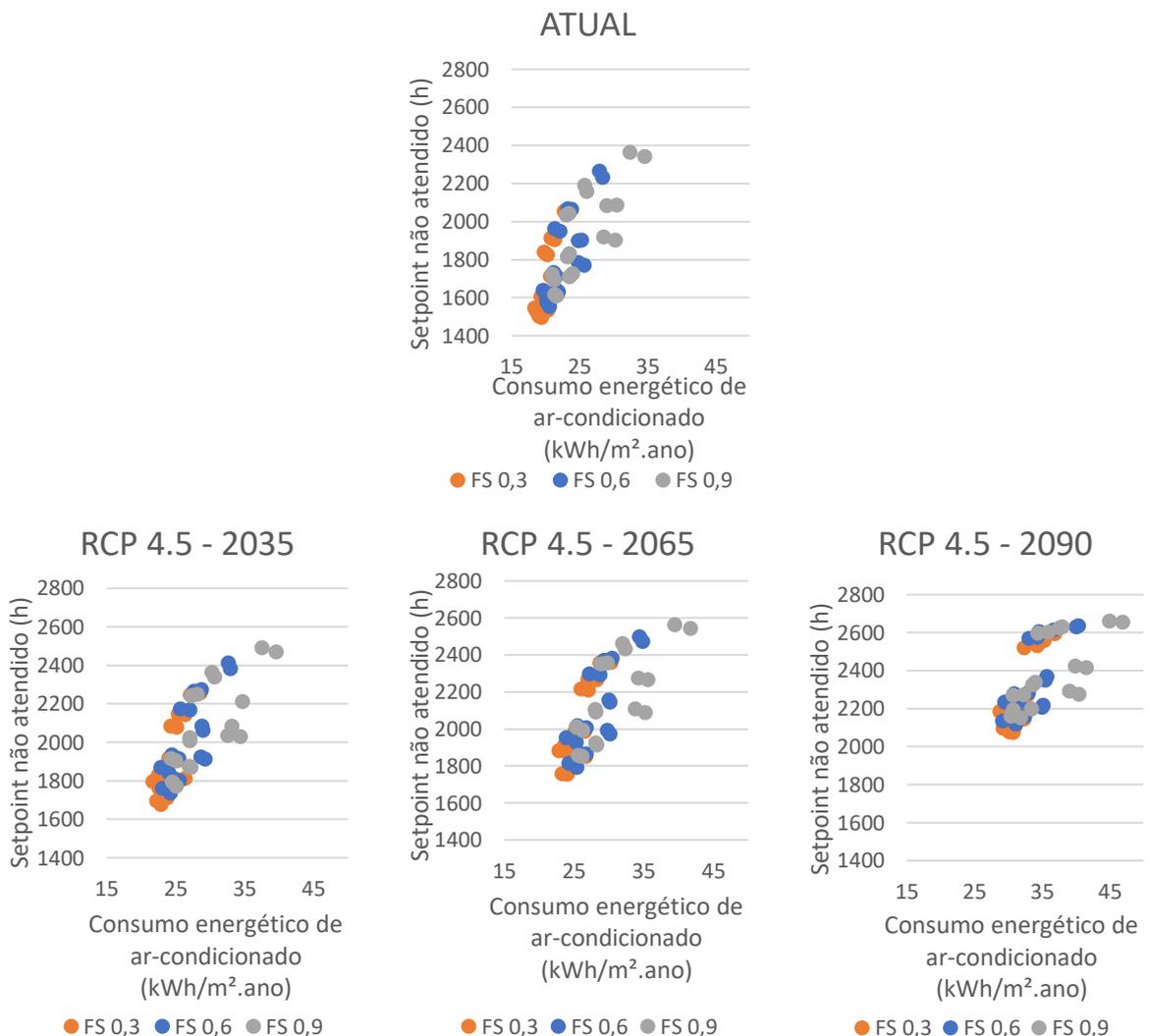


Figura 22 - Número de horas de *setpoint* não atendido (h) versus consumo energético de ar-condicionado (kWh/m².ano) da variação da área efetiva de abertura (AEA) .

A Figura 30 apresenta o número de horas de *setpoint* não atendido versus o consumo energético de ar-condicionado do fator solar do vidro para os cenários atual e futuros (RCPs 4.5 e 8.5). Ao contrário das demais variáveis, o valor do fator solar do vidro não mostrou uma interferência direta nos resultados de horas de *setpoint* não atendido (desempenho térmico) ou de consumo energético de ar-condicionado (eficiência energética), variando ambos os resultados em função dos valores dados aos demais parâmetros variáveis. Nota-se, no entanto, que em relação ao consumo de energia a diferença entre os vidros com fator solar 0,3 e 0,6 é menos significativa do que o vidro com fator solar de 0,9.



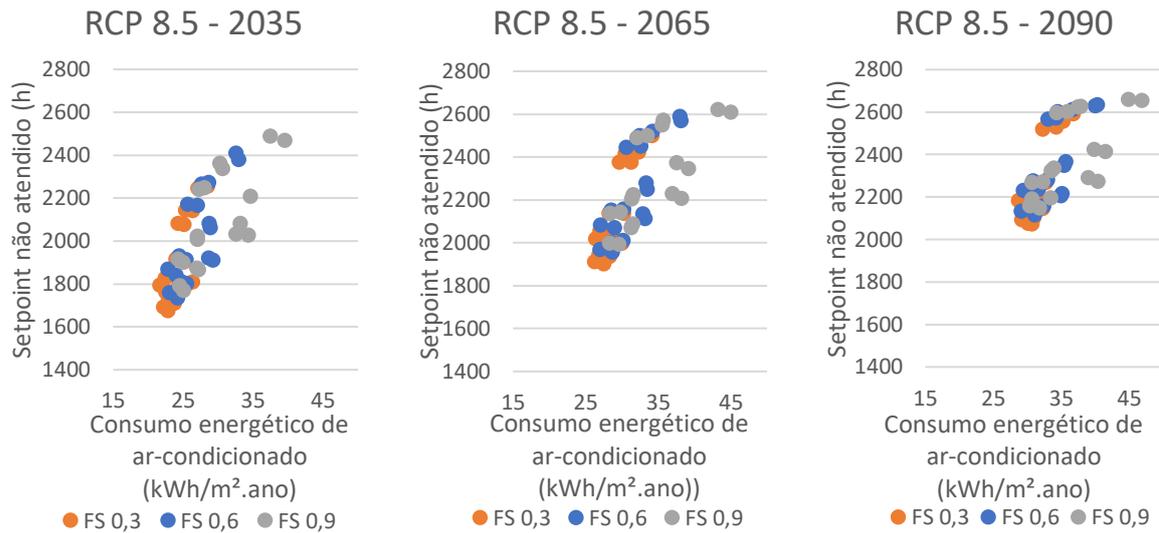


Figura 23 - Número de horas de setpoint não atendido (h) versus consumo energético de ar-condicionado (kWh/m².ano) da variação do fator solar do vidro.

As Figuras 31, 32 e 33 apresentam uma comparação entre os modelos de maior e menor eficiência energética (consumo anual de energia com ar-condicionado) com o modelo base, conforme apresentado na Tabela 8.

Tabela 8 – Parâmetros dos modelos analisados.

Modelo	Orientação solar da edificação	Ângulo vertical de sombreamento	Área de abertura efetiva para ventilação	Fator solar do vidro
mais eficiente	L-O	45°	60%	0,3
base	N-S	0°	60%	0,6
menos eficiente	L-O	0°	30%	0,9

Considerou-se, para elaboração dos gráficos, o consumo anual de energia do sistema de ar-condicionado para os cenários atual e futuros, de acordo com os RCPs 4.5 (cenário intermediário de emissão de GEE) e 8.5 (cenário com altas emissões de GEE, representativo do *business as usual*) (IPCC, 2014). Os resultados indicaram um aumento no consumo energético de ar-condicionado para resfriamento e uma diminuição no consumo de aquecimento para os três modelos ao longo dos anos, o que reflete o aumento da temperatura global.

Para o RCP 4.5 (Figura 31), o modelo base no cenário atual tem um consumo de energia com ar-condicionado pouco maior (2%) do que o modelo mais eficiente no cenário 2090. No entanto, a proporção entre consumo com aquecimento e

resfriamento é diferente para ambos os modelos, sendo que o modelo mais eficiente no cenário 2090 consome mais com resfriamento. Tal relação pode ser observada, para o RCP 8.5 (Figura 31), entre o modelo base no cenário 2035 e o modelo mais eficiente no cenário 2090, com uma diferença de consumo de energia de 0,1% entre os modelos. Esta comparação mostra a importância na seleção de estratégias de eficiência energética para a envoltória pois, em um futuro distante (2090), os edifícios com melhor desempenho energético continuam consumindo menos energia que os demais modelos no cenário atual (2020)/ futuro próximo (2035), mesmo considerando o aumento do consumo de energia em função do aquecimento global. Uma comparação entre os cenários RCP 4.5 e 8.5 levam a diferenças de até quase 10% no consumo de energia entre os modelos de pior desempenho, o que também corrobora para a importância no uso de estratégias de redução no consumo de energia em edificações, o que pode contribuir para a redução nas emissões de GEE.

Na Figura 32 nota-se que, para o futuro próximo (2035), o cenário menos eficiente é o que apresenta a maior diferença de desempenho entre os RCPs 4.5 e 8.5. Para o futuro distante (2090), essa situação se inverte, sendo a maior diferença de desempenho presente no cenário mais eficiente. Nesse mesmo sentido nota-se, na Figura 33, que o modelo mais eficiente tem um aumento de consumo ao longo do tempo maior, se comparado ao modelo menos eficiente. Isso ocorre tanto para o RCP 4.5 quanto para o 8.5. Isso mostra que o aquecimento global torna mais difícil a obtenção de um bom desempenho termoenergético em edificações com o uso de ventilação natural. Nota-se também que mesmo em 2090 o modelo mais eficiente ainda obteve melhor desempenho do que o modelo menos eficiente no cenário atual. Isso mostra que a combinação das estratégias passivas como medida de adaptação às mudanças climáticas poderia neutralizar o aumento no uso de energia para resfriamento devido aos efeitos do aquecimento global.

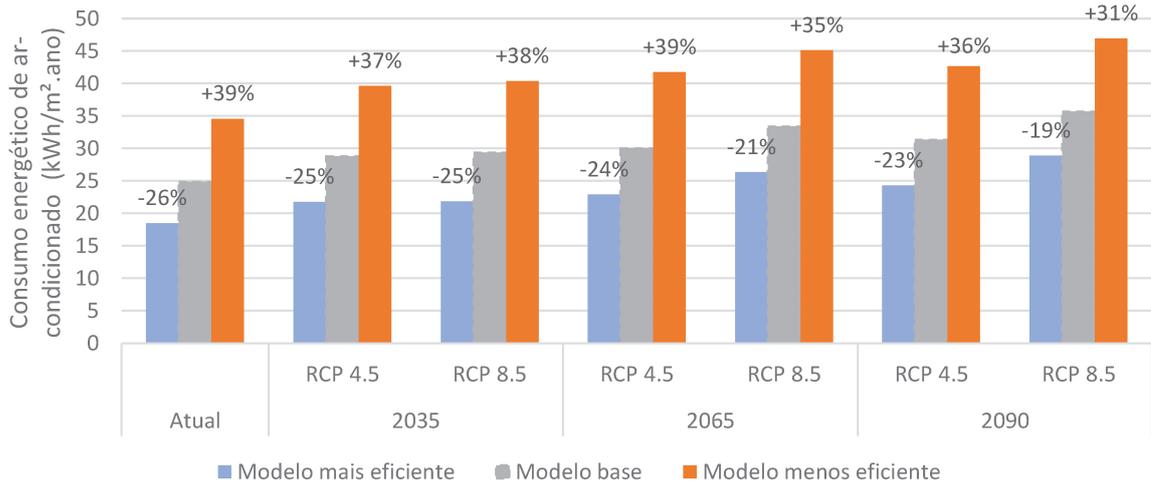


Figura 241 – Consumo de energia com ar-condicionado (kWh/m².ano). Os valores em destaque correspondem às diferenças de consumo entre os modelos mais e menos eficiente e o modelo base.

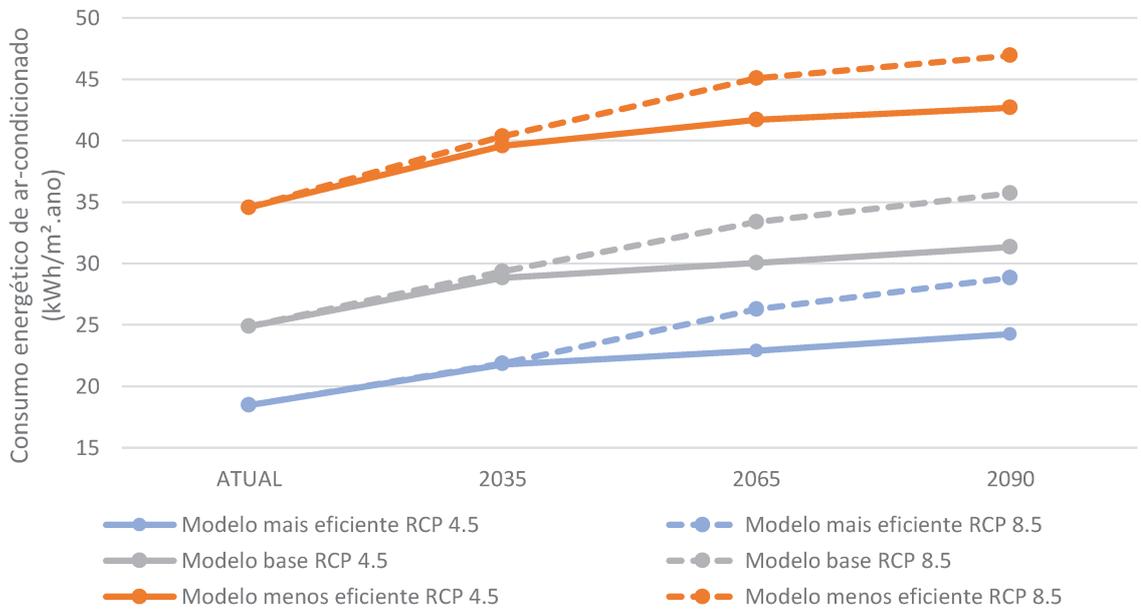


Figura 252 - Consumo energético com ar-condicionado (kWh/m².ano) para os RCP 4.5 e 8.5.

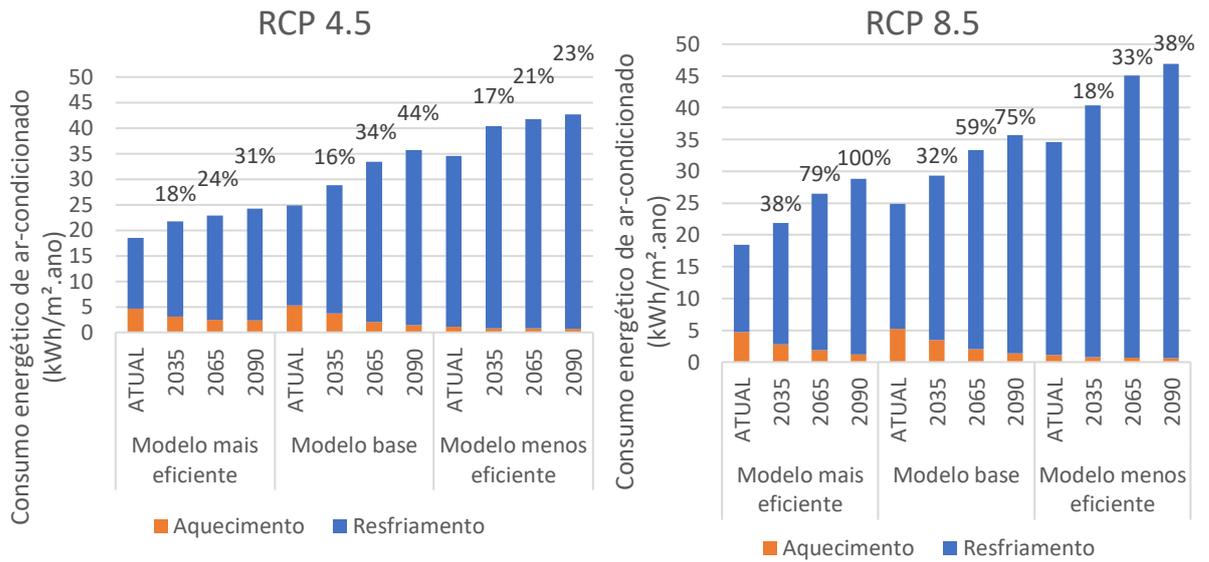


Figura 263 - Consumo energético com ar-condicionado (kWh/m².ano) para os RCP 4.5 e 8.5. Os valores em destaque correspondem às diferenças de consumo entre os modelos 2035, 2060 e 2090 e o modelo base.

5. CONCLUSÕES

Esta pesquisa teve como principal objetivo investigar os impactos das mudanças climáticas no desempenho termoenergético de três variáveis relacionadas ao projeto da envoltória de um edifício de escritórios com ventilação híbrida, considerando-se dois eixos de orientação solar da edificação, Norte-Sul e Leste-Oeste. Os principais resultados obtidos foram:

- ✓ Na análise do pavimento tipo no cenário atual, a variável de maior impacto no desempenho térmico e na demanda energética foram os elementos de proteção solar externos (ângulo vertical de sombreamento - AVS). A área efetiva de abertura para ventilação (AEA) ficou em segundo lugar, no caso de desempenho térmico, e o fator solar do vidro (FS), no caso de demanda energética. A orientação solar foi a variável de menor impacto em ambos os casos. No caso da demanda energética, o AVS também foi a variável de maior impacto, seguida do FS, AEA e, também por último, a orientação solar da edificação.
- ✓ No cenário climático atual a economia de energia do modelo com melhor desempenho em relação ao modelo base foi de 26%, para uma sala comercial do pavimento tipo.
- ✓ Na análise do edifício, os resultados indicaram um aumento no consumo energético de ar-condicionado para resfriamento e uma diminuição no consumo de aquecimento ao longo dos anos, para os modelos mais eficiente, caso base e menos eficiente, o que reflete o aumento da temperatura global. As análises de desempenho termoenergético com base nas projeções climáticas futuras mostrou uma redução na diferença de desempenho do modelo mais eficiente em relação ao modelo menos eficiente. A redução na diferença de desempenho ocorreu principalmente para o cenário de altas emissões de GEE (RCP 8.5), representativo do *business as usual*, o que mostra menor viabilidade de uso futuro de estratégias passivas como a ventilação natural, decorrente do aquecimento global.
- ✓ O modelo mais eficiente obteve melhor desempenho termoenergético do que o modelo menos eficiente, mesmo se compararmos os resultados do primeiro no

cenário futuro com os resultados do segundo no cenário atual, o que mostra que a combinação das estratégias passivas como medida de adaptação às mudanças climáticas poderia neutralizar o aumento no uso de energia para resfriamento devido aos efeitos do aquecimento global.

O projeto representativo de sala de escritório (modelo base) utilizado nesta pesquisa, definido com base nos resultados de um banco de dados de edifícios de escritórios reais localizados na cidade de São Paulo (PEREIRA, 2019), mostrou ter um desempenho termoenergético insatisfatório para o clima atual e, em especial, para cenários futuros, em especial no que tange a falta de elementos de proteção solar nas aberturas. Os projetos atuais não levam em consideração as mudanças climáticas, sendo preciso haver uma mudança na forma como os projetos são concebidos.

Tendo em vista as limitações do presente trabalho, sugere-se, como trabalhos futuros, realizar as análises aqui propostas considerando, também, a influência das ilhas de calor nos centros urbanos; considerar a influência do entorno construído nas análises; considerar outros parâmetros de entrada nas análises, relacionados não somente à envoltória, mas também a equipamentos e iluminação artificial.

REFERÊNCIAS

- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 15220-3**: Desempenho térmico de edificações Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social. Rio de Janeiro, 2005.
- _____. **NBR 16401**: Instalações de ar-condicionado - Sistemas centrais e unitários. Rio de Janeiro, 2008.
- ALVES, C. A. **A produção recente de edifícios residenciais em São Paulo**: desempenho e conforto térmico no contexto urbano e climático em transição. 2019. 247 f. Tese (Doutorado). Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- ALVES, C. A. et al. Thermal Comfort in Residential Buildings for the Elderly under Climate Changes Context. In: 30th INTERNATIONAL PLEA CONFERENCE. **Anais...CEPT University, Ahmedabad, 2014**. Disponível em: <http://www.plea2014.in/wp-content/uploads/2014/12/Paper_4C_2411_PR.pdf>. Acesso em: 20 mar. 2019
- ALVES, C. A.; DUARTE, D. H. S.; GONÇALVES, F. L. T. Resiliência das edificações às mudanças climáticas na região metropolitana de São Paulo . parte 2: estudo de caso - desempenho térmico de edifícios residenciais de idosos. In: XIII Encontro Nacional e IX Encontro Latino-americano de Conforto no Ambiente Construído, 2015, João Pessoa. **Anais...2015^a**. Disponível em: <<http://www.infohab.org.br/encac/files/2015/topico4artigo11.pdf>>. Acesso em: 23 mar. 2019
- _____. Resiliência Das Edificações Às Mudanças Climáticas Na Região Metropolitana De São Paulo. PARTE 1: REVISÃO CRÍTICA E CONTEXTUALIZAÇÃO. XIII Encontro Nacional e IX Encontro Latino-americano de Conforto no Ambiente Construído, 2015, João Pessoa. **Anais...2015b**. Disponível em: <<http://www.infohab.org.br/encac/files/2015/topico4artigo10.pdf>>. Acesso em: 23 mar. 2019
- _____. Residential buildings' thermal performance and comfort for the elderly under climate changes context in the city of São Paulo, Brazil. **Energy and Buildings**, v. 114, p. 62-71, 2016.
- ARSAN, Z. D.; YÖNEY, E. G. Impact of thermal mass for future energy consumption: Case study in adobe House. **International Journal of Global Warming**, v. 19, n. 1–2, p. 220–232, 2019.
- ASHRAE - AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR CONDITIONING ENGINEERS. **ANSI/ASHRAE 55-2017**. Thermal environmental conditions for human occupancy. Atlanta, 2017.
- _____. ANSI/ASHRAE 2007. Standard 140-2007. Standard Method of Test for the Evaluation of Building Energy Analysis Computer Programs. Atlanta, 2007.
- ARGOS ANALYTICS, LLC. **Guidelines for Specifying Weathershift Future Weather Files Argos Analytics**. February 2017, p. 3–4, 2017. Disponível em: <https://www.iesve.com/support/weatherfiles/weathershift>

BELCHER, S. E.; HACKER, J. N.; POWELL, D. S. Constructing design weather data for future climates. **Building Services Engineering Research and Technology**, v. 26, n. 1, p. 49–61, 26 fev. 2005.

BERGER, T. et al. Impacts of external insulation and reduced internal heat loads upon energy demand of offices in the context of climate change in Vienna, Austria. **Journal of Building Engineering**, v. 5, p. 86–95, 1 mar. 2016.

BRAGER, G.; BAKER, L. Occupant satisfaction in mixed-mode buildings. **Building Research and Information**, v. 37, n. 4, p. 369–380, ago. 2009.

CÂNDIDO, C. et al. Air movement acceptability limits and thermal comfort in Brazil's hot humid climate zone. **Building and Environment**, v. 45, n. 1, p. 222–229, 1 jan. 2010.

CASAGRANDE, B. G.; ALVAREZ, C. E. DE. Preparação de arquivos climáticos futuros para avaliação dos impactos das mudanças climáticas no desempenho termoenergético de edificações. **Ambiente Construído**, v. 13, n. 4, p. 173–187, dez. 2014.

CBCS. **Benchmarking de eficiência energética em escritórios corporativos**. São Paulo: [s.n.]. Disponível em: <<http://www.cbcs.org.br/website/benchmarking-energia/show.asp?ppgCode=AE558B93-7D49-85E1-112D-BD7BA012F7B9>>. Acesso em: 26 set. 2019.

CBE - CENTER FOR THE BUILT ENVIRONMENT. **About mixed-mode**. Disponível em: <<https://cbe.berkeley.edu/mixedmode/aboutmm.html>>. Acesso em: 20 abr. 2020.

CRAWLEY, D. B. et al. Contrasting the capabilities of building energy performance simulation programs. **Building and Environment**, v. 43, p. 661–673, 2008.

DAABOUL, J.; GHALI, K.; GHADDAR, N. Mixed-mode ventilation and air conditioning as alternative for energy savings: a case study in Beirut current and future climate. **Energy Efficiency**, v. 11, n. 1, p. 13–30, 20 jan. 2018.

ELETROBRAS. Pesquisa de posse de equipamentos e hábitos de uso - Ano Base 2005. **Classe Industrial alta tensão**. Rio de Janeiro, 2008. Disponível em: <<http://www.procel.gov.br/main.asp?View=%7B5A08CAF0-06D1-4FFE-B335-95D83F8DFB98%7D&Team=¶ms=itemID=%7B9B879391-1D29-4834-8554-34E61FBD1AA9%7D;&UIPartUID=%7B05734935-6950-4E3F-A182-629352E9EB18%7D>>.

ELSHARKAWY, H.; ZAHIRI, S. The significance of occupancy profiles in determining post retrofit indoor thermal comfort, overheating risk and building energy performance. **Building and Environment**, v. 172, 1 abr. 2020.

ENERGYPLUS. **Input Output Reference**. Estados Unidos: U.S. Department of Energy, 2018.

ETH Zurich. **Model**: advanced weather generator (AWE-GEN). Disponível em: <<https://hyd.ifu.ethz.ch/research-data-models/awe-gen.html>>. Acesso em: 10 dez. 2019.

FAHMY, M.; MAHDY, M. M.; NIKOLOPOULOU, M. Prediction of future energy consumption reduction using GRC envelope optimization for residential buildings in

Egypt. **Energy and Buildings**, v. 70, p. 186–193, fev. 2014.

FARROU, I.; KOLOKOTRONI, M.; SANTAMOURIS, M. Building envelope design for climate change mitigation: a case study of hotels in Greece. **International Journal of Sustainable Energy**, v. 35, n. 10, p. 944–967, 25 nov. 2016.

GASSAR, A. A. A.; YUN, G. Y. Energy saving potential of PCMs in buildings under future climate conditions. **Applied Sciences (Switzerland)**, v. 7, n. 12, 25 nov. 2017.

GUAN, L.; YANG, J.; BELL, J. M. A method of preparing future hourly weather data for the study of global warming impact on the built environment. (A. C. Sidwell, Ed.)Technology. **Anais...**Brisbane: Queensland University of Technology Australia, 2005

HERRERA, M. et al. A review of current and future weather data for building simulationBuilding Services Engineering Research and Technology. **SAGE Publications Ltd**, , 1 set. 2017.

HOLMES, M. J.; HACKER, J. N. Climate change, thermal comfort and energy: Meeting the design challenges of the 21st century. **Energy and Buildings**, v. 39, n. 7, p. 802–814, jul. 2007.

HUANG, K. T.; HWANG, R. L. Future trends of residential building cooling energy and passive adaptation measures to counteract climate change: The case of Taiwan. **Applied Energy**, v. 184, p. 1230–1240, dez. 2016.

HWANG, R. L. et al. Simplification and adjustment of the energy consumption indices of office building envelopes in response to climate change. **Applied Energy**, v. 230, p. 460–470, 15 nov. 2018.

IEA. **Transition to Sustainable Buildings: Strategies and Opportunities to 2050**. Energy Agency, 2013. Disponível em: <<https://www.iea.org/topics/energy-technology-perspectives>>. Acesso em: 24 ago. 2020.

INMETRO. **Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas**. INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL-INMETRO, , 2013. Disponível em: <http://docs.wixstatic.com/ugd/5d557a_5c69f2b65b08481ebe2c80db6dbace63.pdf>

_____. **Regulamento Técnico da Qualidade para a Classe de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos**. INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA-INMETRO, , 2018. Disponível em: <www.inmetro.gov.br,>. Acesso em: 20 dez. 2018

IPCC - INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate Change 2013: The Physical Science Basis**. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. NY, 2013. Disponível em: <<https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/>>.

_____. **IPCC, 2014: Climate Change 2014: Synthesis Report**. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva, 2014.

_____. **IPCC SPECIAL REPORT: Global Warming of 1.5 °C**. 2018. Disponível em:

<<https://www.ipcc.ch/sr15/>>.

_____. **IPCC**. Disponível em: <<https://www.ipcc.ch/>>. Acesso em: 28 set. 2020.

JENTSCH, M. F. et al. Transforming existing weather data for worldwide locations to enable energy and building performance simulation under future climates.

Renewable Energy, v. 55, p. 514–524, 1 jul. 2013.

KARIMPOUR, M. et al. Impact of climate change on the design of energy efficient residential building envelopes. **Energy and Buildings**, v. 87, p. 142–154, 1 jan. 2015.

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. **Eficiencia Energética na Arquitectura**. 3ª ed. ed. Rio de Janeiro: ELETROBRÁS/PROCEL, 2014. 366 p.

LIU, S. et al. Development and application of future design weather data for evaluating the building thermal-energy performance in subtropical Hong Kong.

Energy and Buildings, v. 209, p. 109696, 15 fev. 2020.

MARENGO, J. A. **Mudanças Climáticas Globais e seus Efeitos sobre a Biodiversidade**: Caracterização do Clima Atual e Definição das Alterações Climáticas para o Território Brasileiro ao Longo do Século XXI. 26. ed. Brasília: MMA, 2006. 212 p.

MENGPIN, G.; JOHANNES, F. **4 Charts Explain Greenhouse Gas Emissions by Countries and Sectors**. Disponível em:

<<https://www.wri.org/blog/2020/02/greenhouse-gas-emissions-by-country-sector>>. Acesso em: 5 out. 2020.

MOAZAMI, A. et al. Energy Retrofit of a Day Care Center for Current and Future Weather Scenarios. *Procedia Engineering*. **Anais...2016** Disponível em:

<<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1877705816301783>>. Acesso em: 17 jun. 2019

MOHAMMED, N. A. et al. A methodological approach to assess the climatic potential of natural ventilation through façades. **Journal of Facade Design and Engineering**, v. 7, n. 2, p. 65–91, 21 dez. 2019.

NEVES, L. et al. Envelope design of mixed-mode office buildings: theory versus practice. PLEA CONFERENCE. Edimburgo: NCEUB. **Anais...Edimburgo: PLEA CONFERENCE**. Edimburgo: NCEUB, 2017, 2017 Disponível em:

<http://nceub.org.uk/PLEA2017/proceedings/PLEA2017_proceedings_volume_II.pdf>. Acesso em: 29 set. 2019

NIK, V. M. et al. Effective and robust energy retrofitting measures for future climatic conditions - Reduced heating demand of Swedish households. **Energy and Buildings**, v. 121, p. 176–187, 1 jun. 2016.

NIK, V. M.; MATA, E.; KALAGASIDIS, A. S. Assessing the efficiency and robustness of the retrofitted building envelope against climate change. *Energy Procedia*.

Anais...Elsevier Ltd, 1 nov. 2015

PAJEK, L.; KOŠIR, M. Implications of present and upcoming changes in bioclimatic potential for energy performance of residential buildings. **Building and Environment**, v. 127, p. 157–172, 1 jan. 2018.

PEREIRA, F. **Influência da estratégia de ventilação natural no desempenho termoenergético de edifícios de escritórios de modo misto**. 2019. 138 f. Dissertação (Mestrado). Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

REMUND, J. et al. **Meteonorm 7.3**. Bern: Meteotest, 2018.

RIBEIRO, S. K.; SANTOS, A.. Relatório Especial do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas (**PBMC**). Rio de Janeiro, 2016. Disponível em: <<http://www.pbmc.coppe.ufrj.br/pt/publicacoes/relatorios-especiais-pbmc/item/relatorio-especial-mudancas-climaticas-e-cidades>>. Acesso em: 28 maio. 2019.

ROETZEL, A.; TSANGRASSOULIS, A.; DIETRICH, U. Impact of building design and occupancy on office comfort and energy performance in different climates. **Building and Environment**, v. 71, p. 165–175, jan. 2014.

ROSENZWEIG, C. et al. **ARC3.2** Summary for City Leaders. Urban Climate Change Research Network. New York, 2015.

RUMMUKAINEN, M. State-of-the-art with regional climate models. **John Wiley & Sons, Ltd**, v. 1, 2010.

SAJJADIAN, S. M. Performance evaluation of well-insulated versions of contemporary wall systems-a case study of London for a warmer climate. **Buildings**, v. 7, n. 1, p. 1–16, 2017.

SINGAPORE; BRUNEI. **CCWorldWeatherGen manual**. Southampton, 2013.

TRIANA, M. A. **Abordagem integrada no ciclo de vida de habitação de interesse social considerando mudanças climáticas**. 2016. Tese (Doutorado). 473 f. Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina, 2016.

TRIANA, M. A.; LAMBERTS, R.; SASSI, P. Desempenho de habitações de interesse social frente às mudanças climáticas. 2016. ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 16. **Anais...**Proto Alegre: ANTAC., 2016. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/317881278_DESEMPENHO_DE_HABITACOES_DE_INTERESSE_SOCIAL_FRENTE_AS_MUDANCAS_CLIMATICAS>. Acesso em: 8 abr. 2020

_____. Desafios e potencialidades de abordagens integradas no ciclo de vida para projeto de edificações com foco no desempenho. In: ENCONTRO NACIONAL E LATINO-AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO. 2017. Balneário Camboriú. **Anais...**2017. Disponível em: <<http://www.infohab.org.br/encac/files/2017/topico5artigo43.pdf>>. Acesso em: 23 mar. 2019

_____. Should we consider climate change for Brazilian social housing? Assessment of energy efficiency adaptation measures. **Energy and Buildings**, v. 158, p. 1379–1392, 1 jan. 2018.

TROUP, L.; FANNON, D. Morphing Climate Data to Simulate Building Energy

Consumption. **ASHRAE and IBPSA-USA SimBuild 2016 Building Performance Modeling Conference**, p. 439–446, 2016.

_____. **WeatherShift tool**. Disponível em: <<http://www.weather-shift.com/>>. Acesso em: 8 jul. 2020.

U.S. DEPARTMENT OF ENERGY'S BUILDING TECHNOLOGIES OFFICE. **EnergyPlus: Weather Data Sources**, [s.d.]. Disponível em: <<https://energyplus.net/weather/sources>>. Acesso em: 8 jul. 2020

Urban Weather Generator. Disponível em: <<https://urbanmicroclimate.scripts.mit.edu/uwg.php>>. Acesso em: 10 dez. 2019.

VASATURO, R. et al. Impact of passive climate adaptation measures and building orientation on the energy demand of a detached lightweight semi-portable building. **Building Simulation**, v. 11, n. 6, p. 1163–1177, 1 dez. 2018.

WANG, L.; LIU, X.; BROWN, H. Prediction of the impacts of climate change on energy consumption for a medium-size office building with two climate models. **Energy and Buildings**, v. 157, p. 218–226, dez. 2017.

WeatherShift. Disponível em: <<http://www.weather-shift.com/>>. Acesso em: 10 dez. 2019.

WILBY, R.; WOOD, R. A. **UK Climate Projections Science Report: Climate change projections**. 2009. Met Office Hadley Centre, Exeter Disponível em: <<http://ukclimateprojections.defra.gov.uk>>. Acesso em: 3 set. 2020.

ZHANG, Y. "Parallel" energyplus and the development of a parametric analysis tool. **IBPSA 2009 - International Building Performance Simulation Association 2009**, p. 1382–1388, 2009.

_____. **User's Manual jEPlus v2.0**. Disponível em: <http://www.jeplus.org/wiki/doku.php?id=docs:manual_2_0>. Acesso em: 30 jan. 2020.

ZUNE, M.; RODRIGUES, L.; GILLOTT, M. The Vulnerability of Homes to Overheating in Myanmar Today and in the Future: A Heat Index Analysis of Measured and Simulated Data. **Energy and Buildings**, p. 110201, jun. 2020.