

ELIANE HAYASHI SUZUKI

Processo de tomada de decisão para otimização em conforto térmico e eficiência energética integrando janelas inteligentes e ventilação híbrida nos climas subtropical e tropical

São Paulo
2022

ELIANE HAYASHI SUZUKI

Processo de tomada de decisão para otimização em conforto térmico e eficiência energética integrando janelas inteligentes e ventilação híbrida nos climas subtropical e tropical

Versão corrigida

Tese apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Doutora em Ciências.

Área de concentração: Engenharia Mecânica de Energia e Fluidos

Orientador: Prof. Dr. Racine Tadeu Araújo Prado

Coorientadora: Profa. Dra. Brenda Chaves Coelho Leite

São Paulo
2022

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 13 de julho de 2022

Assinatura do autor _____

Assinatura do orientador _____

Catálogo-na-publicação

Suzuki, Eliane Hayashi

Processo de tomada de decisão para otimização em conforto térmico e eficiência energética integrando janelas inteligentes e ventilação híbrida nos climas subtropical e tropical / E. H. Suzuki -- versão corr. -- São Paulo, 2022.
182 p.

Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
Departamento de Engenharia Mecânica.

1.Janela eletrocromica 2.Desempenho térmico 3.Conforto térmico
4.Ventilação híbrida 5.Simulação energética I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecânica II.t.

FOLHA DE APROVAÇÃO

SUZUKI, E. H. Processo de tomada de decisão para otimização em conforto térmico e eficiência energética integrando janelas inteligentes e ventilação híbrida nos climas subtropical e tropical, 2022. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2022.

Aprovada em: 18/05/2022

Banca examinadora

Prof. Dr. Brenda Chaves Coelho Leite

Instituição: Universidade de São Paulo (USP)

Julgamento: Aprovada

Prof. Dr. Alberto Hernandez Neto

Instituição: Universidade de São Paulo (USP)

Julgamento: Aprovada

Prof. Dr. Leonardo Marques Monteiro

Instituição: Universidade de São Paulo (USP)

Julgamento: Aprovada

Prof. Dr. Vanessa Gomes da Silva

Instituição: Universidade Estadual de Campinas (Unicamp)

Julgamento: Aprovada

Prof. Dr. Fernando Simon Westphal

Instituição: Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC)

Julgamento: Aprovada

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Racine T. A. Prado, pela confiança e por me incentivar sempre à busca pelo conhecimento desde o mestrado.

À Prof. Brenda C. C. Leite, pela paciência, pelo direcionamento da pesquisa e apoio técnico e emocional que foram fundamentais neste período do doutorado. Gratidão, professora!

Ao Prof. José Roberto Simões Moreira, por me integrar ao Laboratório de Sistemas Energéticos Alternativos e Renováveis (SISEA) do PME/Poli.

Aos professores Alberto Hernandez do PME/Poli e Leonardo Monteiro da AUT/FAU, pela participação no exame de qualificação, com contribuições importantes à pesquisa.

Aos professores Fernando A. Kurokawa (PCC/Poli) e Fabio C. Lofrano (PHA/Poli) pelo auxílio essencial na otimização multiobjetivo.

Aos colegas do SISEA, Adrienne, Beethoven, Julián, Andres, Wellorzzon, Lina, Larissa, Gustavo, Erick e Thyago, pela companhia, trocas de experiências acadêmica, participação em projetos, parcerias em artigos, decompressão com café colombiano, comemorações de aniversários e almoços no bandejão.

Aos colegas do PCC/Poli e do Construlnova, Aminu Bashir, Roberto Namur e Lucas Uchida pela companhia e parcerias nos artigos.

Ao meu marido, Rodrigo M. Kobayashi, pelo apoio e compreensão, principalmente neste período do doutorado. Aos meus pais, Massayuki e Suely, que investiram tanto em minha educação e deram suporte para minhas decisões.

O presente trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

RESUMO

A demanda por energia está aumentando em grandes proporções, sendo que no Brasil, 48% da energia produzida são consumidas em edifícios residenciais, comerciais e públicos. Com o intuito de reduzir os custos com energia elétrica e as emissões de CO₂, foram conduzidos no mundo diversos estudos de eficiência energética em edifícios, para reduzir tanto a demanda quanto o consumo de energia. Nesta pesquisa, o objetivo foi definir combinações otimizadas de parâmetros para o controle operacional de janelas em ambientes de escritório nas cidades de São Paulo, Curitiba e Recife considerando duas técnicas para eficiência energética: vidro eletrocromico e ventilação híbrida. Foram realizadas simulações paramétricas com três composições de vidros para janelas em edifícios comerciais: laminado incolor, insulado duplo com controle solar e eletrocromico. Desenvolveu-se um fluxo de trabalho para tomada de decisão em simulação de energia, definindo as regras para combinar cinco controles eletrocromicos com cinco controles de ventilação híbrida. Os resultados com a janela eletrocromica indicaram uma economia de até 8,6% em Curitiba, 7,5% em Recife e 6,1% em São Paulo em relação ao vidro laminado. Analisaram-se os dados de saída a partir da fronteira de Pareto para estabelecimento das soluções ótimas. Em São Paulo e Curitiba, os cenários ótimos combinaram o controle eletrocromico baseado em radiação solar incidente na fachada e de ventilação híbrida com *setpoints* mais baixos, entre 15°C e 23°C. Em Recife, o cenário ótimo combinou o controle eletrocromico baseado em temperatura do ar externo e ventilação híbrida com *setpoint* mais elevado, de 25°C. A janela eletrocromica se mostrou economicamente inviável nos climas quentes, sobretudo em latitudes maiores, e o fluxo para tomada de decisão se mostrou adequado para a combinação de técnicas de eficiência energética em janelas.

Palavras-chave: janela eletrocromica, desempenho térmico, conforto térmico, edifícios comerciais, ventilação híbrida, simulação energética.

ABSTRACT

The energy demand is increasing in large proportions, and in Brazil, residential, commercial, and public buildings consume 48% of the produced energy. Several studies on energy efficiency in buildings were conducted to reduce energy consumption, electricity costs, and CO₂ emissions. In this research, the objective was to define optimized parameter combinations for the operational control of windows in office environments in São Paulo, Curitiba, and Recife, Brazil, considering two techniques for energy efficiency: electrochromic glass and hybrid ventilation. Parametric simulations were performed with three glass compositions for windows in commercial buildings: clear laminated, solar control insulated glass unit, and electrochromic glass. A workflow for decision-making in energy simulation defined the rules to combine five electrochromic controls with five hybrid ventilation controls. The results with the electrochromic window indicated savings of up to 8.6% in Curitiba, 7.5% in Recife, and 6.1% in São Paulo in relation to laminated glass. The output data were analyzed from the Pareto frontier to establish the optimal solutions. In São Paulo and Curitiba, the optimal scenarios combined electrochromic control based on incident solar radiation on the facade and hybrid ventilation with lower setpoints, between 15°C and 23°C. In Recife, the optimal scenario combined electrochromic control based on outside air temperature and hybrid ventilation with a higher setpoint of 25°C. The electrochromic window proved to be economically unfeasible in hot climates, especially at higher latitudes, and the decision-making flow provided adequate combinations of energy efficiency techniques in windows.

Keywords: electrochromic window, thermal performance, thermal comfort, commercial buildings, hybrid ventilation, building energy simulations.

LISTA DE FIGURAS E GRÁFICOS

Figura 1 – Diagrama das estratégias de resfriamento de edifícios. Fonte: Adaptado de PRIETO et al., (2017).	26
Figura 2 – Esquema da unidade de vidro eletrocromico insulado da SageGlass. Fonte: Adaptado de SAGE (2016a)	39
Figura 3 – Esquema do filme eletrocromico fino sobre o vidro. Fonte: SAGE (2010)	39
Figura 4 – Fachada do Centro de P&D da Saint-Gobain com vidros eletrocromicos. Fonte: SAINT-GOBAIN, 2021.	47
Figura 5 – Operação de ventilação híbrida no modo alternado. Fonte: Center for the Built Environment (2013)	55
Figura 6 – Operação de ventilação híbrida no modo concomitante. Fonte: Center for the Built Environment (2013)	55
Figura 7 – Configuração de composição de janela no Window 7.7. Fonte: Elaborado pela autora, 2022.....	65
Figura 8 – Estrutura da otimização multiobjetivo. Fonte: Adaptado de Soares (2014).....	66
Figura 9 – Resumo das variáveis de entrada e do método. Fonte: Elaborado pela autora, 2022.....	70
Figura 10 – Médias climatológicas de São Paulo – série de dados de 30 anos. Fonte: Climatempo (2021)	71
Figura 11 – Classificação dos climas do Brasil, de acordo com os critérios de Köppen-Geiger. Fonte: Alvares et al. (2013)	72
Figura 12 – Densidade demográfica do Brasil, ano base de 2010. Fonte: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2012).....	72
Figura 13 – Modelo tridimensional da sala comercial, com visualizações geradas pelo (a) Rhinoceros e (b) Autodesk AutoCAD em dxf, com indicação de Norte. Fonte: Elaborado pela autora, 2022.....	74
Figura 14 – Planta baixa da sala comercial com indicação dos limites da zona térmica (linha tracejada). Fonte: Elaborado pela autora, 2022.	74
Figura 15 – Perfil das janelas estudadas (a) LAM1 (b) LAM2 (c) IGU1 (d) IGU2 (e) IGU EC1 (f) IGU EC2. Fonte: Adaptado de Window 7.7 (2022)	80
Figura 16 – Vistas lateral direita e frontal do modelo, mostrando a divisão das janelas oeste e norte, respectivamente. Fonte: Elaborado pela autora, 2022.	84
Figura 17 – Diagrama de temperatura interna do ar para o controle V1 de ventilação híbrida. Fonte: Elaborado pela autora, 2022.	89
Figura 18 – Planta baixa com indicação dos pontos de referência. Fonte: Elaborado pela autora, 2022.....	92
Figura 19 – Esquema do controle de ventilação V1 com a modulação da abertura. Fonte: Elaborado pela autora, 2022.	100
Figura 20 - Esquema do controle de ventilação V2 com a modulação da abertura. Fonte: Elaborado pela autora, 2022.	100
Figura 21 - Esquema do controle de ventilação V3 com a modulação da abertura. Fonte: Elaborado pela autora, 2022.	101

Figura 22 - Esquema do controle de ventilação V4 com a modulação da abertura. Fonte: Elaborado pela autora, 2022.....	101
Figura 23 - Esquema do controle de ventilação V5 com a modulação da abertura. Fonte: Elaborado pela autora, 2022.....	101
Figura 24 – Valores mínimos e máximos de temperatura do ar externa e amplitude térmica diária de São Paulo. Fonte: Elaborado pela autora, 2022.	106
Figura 25 – Distribuição de frequência da temperatura externa do ar às 8:00h, para São Paulo. Fonte: Elaborado pela autora, 2022.	107
Figura 26 – Resultados de temperaturas operativas para conforto adaptativo para o clima de São Paulo. Fonte: Elaborado pela autora, 2022.....	110
Figura 27 – Temperatura do ar externo e limites do conforto adaptativo para os dias de análise (D). Fonte: Elaborado pela autora, 2022.....	111
Figura 28 – Fluxograma das rotinas de (a) ventilação híbrida e (b) da mudança de estágio para a janela EC. Fonte: Elaborado pela autora, 2022.....	112
Figura 29 – Fluxograma da sub-rotina VH – parte 1. Fonte: Elaborado pela autora, 2022.	113
Figura 30 – Fluxograma da sub-rotina VH – parte 2. Fonte: Elaborado pela autora, 2022.	114
Figura 31 - Sub-rotina EC – controle E1. Fonte: Elaborado pela autora, 2022.	115
Figura 32 - Sub-rotina AuxModJan para modulação da abertura. Fonte: Elaborado pela autora, 2022.	115
Figura 33 – Sub-rotina (a) AuxModJanFrioV1 e (b) AuxModJanFrioV2. Fonte: Elaborado pela autora, 2022.	116
Figura 34 – Perfil de temperatura do ar e radiação incidente na Simulação zero para São Paulo. Fonte: Elaborado pela autora, 2022.....	117
Figura 35 – Balanço de calor da janela e demanda de energia para resfriamento dos cenários com sistema de climatização ideal em São Paulo. Fonte: Elaborado pela autora, 2022.	120
Figura 36 – Desempenho relativo e nível de iluminação nos pontos P1 e P2 em São Paulo – Etapa 1. Fonte: Elaborado pela autora, 2022.....	120
Figura 37 - Desempenho relativo e nível de iluminância nos pontos P1 e P2 em São Paulo – Etapa 2. Fonte: Elaborado pela autora, 2022.....	122
Figura 38 – Demanda total de energia para climatização para São Paulo. Fonte: Elaborado pela autora, 2022.....	123
Figura 39 - Percentual de horas no ano para cada estágio da janela eletrocromática para São Paulo. Fonte: Elaborado pela autora, 2022.....	123
Figura 40 - Percentual de horas de conforto adaptativo, horas de ventilação natural e temperatura operativa média para São Paulo. Fonte: Elaborado pela autora, 2022	124
Figura 41 – Temperatura média do ar e demanda de energia de resfriamento para o D3 (17/07)	126
Figura 42 – Perfil de temperatura operativa e demanda de energia para resfriamento para o dia D3, cenário E4-V4.....	126
Figura 43 – Temperatura do ar média e demanda de energia de resfriamento para o D6 (05/08)	127

Figura 44 – Perfil de temperatura operativa e demanda de energia para resfriamento para o dia D6, cenário E2-V1	127
Figura 45 – Resultados de temperaturas operativas para conforto adaptativo para o clima de Curitiba/PR. Fonte: Elaborado pela autora, 2022	128
Figura 46 – Resultados de temperaturas operativas para conforto adaptativo para o clima de Recife/PE. Fonte: Elaborado pela autora, 2022	130
Figura 47 - Perfil de temperatura do ar e radiação incidente na Simulação zero para Curitiba. Fonte: Elaborado pela autora, 2022.	132
Figura 48 - Perfil de temperatura do ar e radiação incidente na simulação zero para Recife. Fonte: Elaborado pela autora, 2022.	132
Figura 49 – Nível de iluminância e desempenho térmico relativo (DR) da janela para Curitiba. Fonte: Elaborado pela autora, 2022.	134
Figura 50 – Demanda total de energia para climatização em Curitiba. Fonte: Elaborado pela autora, 2022.	135
Figura 51 – Percentual de horas no ano para cada estágio da janela eletrocromica para Curitiba. Fonte: Elaborado pela autora, 2022.	135
Figura 52 – Percentual de horas de conforto adaptativo, horas de ventilação natural e temperatura operativa média para Curitiba. Fonte: Elaborado pela autora, 2022.	136
Figura 53 - Nível de iluminância e desempenho térmico relativo da janela para Recife. Fonte: Elaborado pela autora, 2022.	137
Figura 54 - Demanda total de energia para climatização em Recife. Fonte: Elaborado pela autora, 2022.	137
Figura 55 - Percentual de horas no ano para cada estágio da janela eletrocromica para Recife. Fonte: Elaborado pela autora, 2022.	138
Figura 56 - Percentual de horas de conforto adaptativo, horas de ventilação natural e temperatura operativa média para Recife. Fonte: Elaborado pela autora, 2022.	138
Figura 57 – Perda de calor por infiltração e demanda de energia para climatização em São Paulo, nos cenários do grupo V5 com ventilação noturna. Fonte: Elaborado pela autora, 2022.	140
Figura 58 – Perda de calor por infiltração e demanda de energia para climatização em Curitiba, nos cenários do grupo V5 com ventilação noturna. Fonte: Elaborado pela autora, 2022.	140
Figura 59 – Perda de calor por infiltração e demanda de energia para climatização em Recife, nos cenários do grupo V5 com ventilação noturna. Fonte: Elaborado pela autora, 2022.	141
Figura 60 – Desempenho relativo das composições de janela, para São Paulo, Curitiba e Recife, considerando somente demanda de energia para resfriamento. Fonte: elaborado pela autora, 2022.	142
Figura 61 - Desempenho relativo das composições de janela, para São Paulo, Curitiba e Recife, considerando demanda total de energia para climatização. Fonte: elaborado pela autora, 2022.	143
Figura 62 – Desempenho relativo para as composições de janela para os cenários com ventilação noturna para São Paulo, Curitiba e Recife. Fonte: elaborado pela autora, 2022.	145

Figura 63 – Dados das três cidades a partir das funções objetivo de demanda de energia para climatização e fração de horas em conforto. Fonte: Elaborado pela autora, 2022	146
Figura 64 – Dados de São Paulo com indicação da Fronteira de Pareto por tipos de controle VH e EC. Fonte: Elaborado pela autora, 2022	147
Figura 65 - Dados de Curitiba com indicação da Fronteira de Pareto por tipos de controle VH e EC. Fonte: Elaborado pela autora, 2022	149
Figura 66 - Dados de Recife com indicação da Fronteira de Pareto por tipos de controle VH e EC. Fonte: Elaborado pela autora, 2022	150
Figura 67 - Dados de São Paulo com indicação da Fronteira de Pareto considerando todos os cenários. Fonte: Elaborado pela autora, 2022	152
Figura 68 - Dados de Curitiba com indicação da Fronteira de Pareto considerando todos os cenários. Fonte: Elaborado pela autora, 2022	153
Figura 69- Dados de Recife com indicação da Fronteira de Pareto considerando todos os cenários. Fonte: Elaborado pela autora, 2022	154
Figura 70 – Percentual de horas dos estágios da janela EC nas simulações entre as três cidades em (a) São Paulo, (b) Curitiba e (c) Recife. Fonte: Elaborado pela autora, 2022..	158
Figura 71 - Fluxograma do controle E2. Fonte: elaborado pela autora, 2022.	181
Figura 72 - Fluxograma do controle E3. Fonte: elaborado pela autora, 2022.	181
Figura 73 - Fluxograma do controle E4. Fonte: elaborado pela autora, 2022.	182
Figura 74 - Fluxograma do controle E5. Fonte: elaborado pela autora, 2022.	182

LISTA DE TABELAS

Tabela 2– Desempenho típico de uma unidade de vidro insulado SageGlass Clear w/SR 2.0 na América do Norte	41
Tabela 1 – Resumo dos estudos de avaliação do vidro eletrocromico	44
Tabela 3 – Propriedade térmica dos materiais de construção dos modelos	75
Tabela 4 – Descrição da composição das janelas modeladas no Window 7.7	80
Tabela 5 – Resumo das propriedades térmicas das composições da janela Norte	82
Tabela 6 – Níveis de desempenho das esquadrias quanto à permeabilidade do ar	83
Tabela 7 – Relação entre os parâmetros dos estudos citados para os controles EC e as variáveis de saída do EnergyPlus	85
Tabela 8 – Controle das simulações paramétricas da Etapa 2.....	94
Tabela 9 – Intervalos de taxa de radiação incidente para operação do Controle EC-E1	95
Tabela 10 - Intervalos de temperatura de superfície externa da janela para operação do Controle EC-E2.....	96
Tabela 11 - Intervalos de temperatura do ar externo para operação do Controle EC-E3	97
Tabela 12 - Intervalos de nível de iluminância externa para operação do Controle EC-E4 ..	97
Tabela 13 - Intervalos de ângulo de incidência e índice de condição de céu para operação Controle EC-E5.....	99
Tabela 14 – Setpoints mínimo e máximo de temperatura do ar externo para os controles de ventilação híbrida V1 a V5	100
Tabela 15 – Características dos arquivos climáticos utilizados no estudo.....	102
Tabela 16 – Resumo dos valores das variáveis ambientais do arquivo climático de São Paulo	107
Tabela 17 – Resumo das principais variáveis dos Grupos 1 a 9 para São Paulo	108
Tabela 18 – Resumo dos limites do conforto térmico adaptativo para São Paulo/SP.....	109
Tabela 19 – Potencial para ventilação natural nos dias de análise a partir dos resultados da simulação zero.....	118
Tabela 20 – Controles EC selecionados para a Etapa 2	121
Tabela 21 – Indicação do estágio da janela EC para o dia D3 (17/07), média diária da temperatura do ar e demanda de energia para resfriamento	126
Tabela 22 - Indicação do estágio da janela EC para o dia D6 (08/05), média diária da temperatura do ar e consumo para resfriamento.....	127
Tabela 23 – Resumo dos limites de conforto térmico adaptativo para Curitiba/PR.....	129
Tabela 24 – Resumo das principais variáveis dos Grupos 0 a 9 de Curitiba/PR	129
Tabela 25 – Resumo dos limites de conforto térmico adaptativo para Recife/PE	130
Tabela 26 – Resumo das principais variáveis dos Grupos 8 a 12 de Recife/PE.....	131
Tabela 27 – Intervalos dos parâmetros ambientais utilizados dos controles EC para as cidades estudadas	131

Tabela 28 – Economia estimada em demanda de energia para climatização.	143
Tabela 28 – Resumo das funções objetivo dos cenários de Pareto-ótimo de São Paulo ...	147
Tabela 29 - Resumo das funções objetivo dos cenários de Pareto-ótimo de Curitiba	149
Tabela 30 - Resumo das funções objetivo dos cenários de Pareto-ótimo de Recife	151
Tabela 31 – Resumo dos cenários de Pareto-ótimo de São Paulo – todos os dados.....	152
Tabela 32 – Resumo dos cenários de Pareto-ótimo de Curitiba – todos os dados.....	153
Tabela 33 – Resumo dos cenários de Pareto-ótimo de Recife – todos os dados.....	154

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRAVIDRO	Associação Brasileira de Distribuidores e Processadores de Vidros Planos
AC	Ar-condicionado
AFN	Rede de fluxo de ar (<i>Airflow Network</i>)
ANSI	Instituto Nacional de Normas Americanas (<i>American National Standards Institute</i>)
ASHRAE	Sociedade Americana de Engenheiros de Aquecimento, Refrigeração e Ar-condicionado (<i>American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers</i>)
AVAC/R	Aquecimento, ventilação, ar-condicionado e refrigeração
BREEAM	<i>Building Research Establishment Environmental Assessment Method</i>
CBE	Centro do Ambiente Construído (<i>Center for the Built Environment</i>)
CC	Corrente contínua
DOE	Departamento de Energia dos Estados Unidos (<i>Department of Energy</i>)
DR	Desempenho Relativo
DXF	Extensão de arquivo de desenho em CAD
EC	Eletrocromático
EDD	Detalhes do Sistema de Gerenciamento de Energia (EMS) do EnergyPlus
EMS	Sistema de Gerenciamento de Energia (<i>Energy Management System</i>)
Erl	EnergyPlus <i>Runtime Language</i> (Linguagem de tempo de execução do EnergyPlus)
GEE	Gases de Efeito Estufa
IDF	Arquivo de dados de entrada (<i>Input Data File</i>)
IGU	Unidade de Vidro Insulada (<i>Insulated Glass Unit</i>)
ISO	Organização de Normas Internacionais (<i>International Standard Organization</i>)
IPCC	Painel intergovernamental de Mudanças Climáticas (<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>)
JAN	Janela
LAM	Laminado

LBNL	Laboratório Nacional Lawrence Berkeley (Lawrence Berkeley <i>National Laboratory</i>)
LEED	<i>Leadership in Energy and Environmental Design</i>
LOW-E	Baixa emissividade (<i>Low-Emissivity</i>)
MMV	Ventilação de modo misto (<i>Mixed-Mode Ventilation</i>)
N	Norte
O	Oeste
P&D	Pesquisa e Desenvolvimento
PD	Porcentagem de insatisfeitos (<i>Percentage Dissatisfied</i>)
PID	Proporcional Integral Derivativo
PMV	Voto médio estimado (<i>Predicted Mean Vote</i>)
PPD	Porcentagem estimada de insatisfeitos (<i>Predicted Percent Dissatisfied</i>)
PVB	Polivinil Butiral
RDD	Lista de variáveis de saída disponíveis na simulação do EnergyPlus
SCATS	Controle Inteligente e conforto térmico (<i>Smart Controls and Thermal Comfort</i>)
SHGC	Coeficiente de Ganho de Calor Solar (<i>Solar Heat Gain Coefficient</i>)
SPD	Dispositivo de partículas suspensas (<i>Suspended Particles Device</i>)
SWERA	Assessoria em recursos de energia eólica e solar (<i>Solar and Wind Energy Resource Assessment</i>)
TE	Tarifa de Energia
TS	<i>Timestep</i>
TUSD	Tarifa de uso do sistema de distribuição
TV	Transmitância Visível
VH	Ventilação Híbrida
VN	Ventilação Natural
VUP	Vida Útil de Projeto
WWR	Razão entre janela e parede (<i>Window to Wall Ratio</i>)
ZB	Zona Bioclimática

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área (m ²)
A	Fator em função da velocidade do ar para temperatura operativa
A_{incid}	Ângulo de incidência do raio solar na superfície externa (graus)
A_s	Área superficial (m ²)
A_z	Área da zona ocupada (m ²)
c	Calor específico (kJ/kg.K)
E_{AC-LAM}	Demanda anual de energia para climatização do cenário com janela de vidro laminado (kWh/m ² .ano)
E_{AC-n}	Demanda anual de energia para climatização do cenário n (kWh/m ² .ano)
f_{cl}	Fator de vestimenta (adimensional)
\bar{h}	Coeficiente médio de transferência de calor [W/(m ² .K)]
h_c	Coeficiente de transferência de calor por convecção [W/(m ² .K)]
h_r	Coeficiente de transferência de calor por radiação [W/(m ² .K)]
I_{cl}	Isolamento da roupa (m ² .K/W)
Ilum	Nível de iluminância externa (lux)
M	Metabolismo (W/m ²)
m	Massa (kg)
p_a	Pressão parcial do vapor d'água (Pa)
P_z	População da zona (número de ocupantes)
R_a	Vazão de ar externo por unidade de área (L/s.m ²)
Rad	Taxa de radiação solar incidente (W/m ²)
R_p	Vazão de ar externo por pessoa (L/s.pessoa)
SkyC	Condição de céu (adimensional)
t_a	Temperatura do ar (°C)
t_{ar_int}	Temperatura do ar interno (°C)
t_{ar_ext}	Temperatura do ar externo (°C)
t_{cl}	Temperatura da superfície da vestimenta (°C)
t_{neut}	Temperatura neutra operativa (°C)
t_o	Temperatura operativa (°C)
t_{o_min}	Temperatura operativa mínima (°C)

t_{o_max}	Temperatura operativa máxima (°C)
$t_{pma,o}$	Temperatura externa média predominante (°C)
\bar{t}_r	Temperatura radiante média (°C)
t_s	Temperatura da superfície (°C)
T_u	Intensidade de turbulência (%)
U	Transmitância térmica (W/m ² .K)
V_{res}	Vazão de ar externa para zona de respiração (L/s)
v_{ar}	Velocidade do ar (m/s)
W	Trabalho (W/m ²)
α	Constante para conforto adaptativo (adimensional)
ρ	Densidade (kg/m ³)
λ	Condutividade térmica (W/m.K)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	25
1.1	Objetivos	29
1.2	Estrutura do trabalho	30
2	FUNDAMENTOS TEÓRICOS	31
2.1	Tecnologia em janelas na edificação	32
2.1.1	<i>Vidros de alto desempenho para construção civil</i>	33
2.1.2	<i>Sombreamento e Janelas Inteligentes</i>	36
2.1.3	<i>Vidro eletrocromico</i>	38
2.2	Conforto térmico adaptativo	48
2.3	Simulação computacional de desempenho térmico de janelas	57
2.3.1	<i>Modelagem inicial – Rhinoceros e Grasshopper</i>	57
2.3.2	<i>Módulos da simulação energética – EnergyPlus</i>	58
2.3.3	<i>Modelagem da janela – LBNL Window</i>	63
2.4	Otimização multiobjetivo	65
3	MATERIAIS E MÉTODOS	69
3.1	Delimitação do objeto de estudo	70
3.1.1	<i>Seleção do clima</i>	70
3.1.2	<i>Características do modelo</i>	72
3.2	Extração de dados do arquivo climático	76
3.3	Dados de entrada avançados no EnergyPlus	77
3.3.1	<i>Ventilação natural e climatização artificial</i>	78
3.3.2	<i>Extração dos dados de composição de janela no Window 7.7</i>	79
3.3.3	<i>Controles de janela</i>	83
3.3.4	<i>Ativação da simulação de luz do dia</i>	91
3.4	Simulações inicial + paramétricas	93
3.4.1	<i>Sistema de climatização artificial</i>	94
3.4.2	<i>Controles do dispositivo eletrocromico</i>	95
3.4.3	<i>Controles de ventilação híbrida</i>	99
3.5	Aplicação para Zonas Bioclimáticas 1 e 8	102
3.6	Ventilação noturna para V5	103
3.7	Definição das combinações ótimas	104
4	RESULTADOS	106
4.1	Análise do arquivo climático e definição dos Dias de Análise	106
4.2	Limites do conforto adaptativo	109
4.3	Fluxogramas dos controles de janela	111
4.4	Resultados das simulações energéticas	116
4.4.2	<i>Resultados da simulação zero</i>	116
4.4.3	<i>Resultados das simulações paramétricas – São Paulo</i>	119
4.5	Análise para zonas bioclimáticas 1 e 8	128
4.5.1	<i>Limites do conforto adaptativo – ZB1 e ZB8</i>	128
4.5.2	<i>Resultados das simulações zero – ZB1 e ZB8</i>	131
4.5.3	<i>Resultados das simulações paramétricas – ZB1 e ZB8</i>	133
4.5.4	<i>Resultados da ventilação noturna</i>	139

4.6	Desempenhos relativos de São Paulo, Curitiba e Recife	142
4.7	Otimização	146
4.7.1	<i>Cenários das simulações paramétricas</i>	<i>146</i>
4.7.2	<i>Todos os cenários – incluindo a ventilação noturna</i>	<i>151</i>
5	DISCUSSÕES	156
6	CONCLUSÕES	161
6.1	Limitações do trabalho	163
6.2	Trabalhos futuros.....	164
7	REFERÊNCIAS	166
APÊNDICE 1	179
APÊNDICE 2	181

1 INTRODUÇÃO

O edifício surgiu da necessidade do homem se abrigar e cada vez mais atividades começaram a ser exercidas em ambientes fechados. Desta forma, a construção passou a demandar critérios estéticos e de salubridade ao longo dos anos, adaptando-se às tendências arquitetônicas, aos desejos humanos e à tecnologia.

Para acompanhar este ritmo, a demanda por energia tem aumentado em grandes proporções. O 6º Relatório do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC, sigla em inglês de *Intergovernmental Panel on Climate Change*) indica que é muito provável que a temperatura da superfície global tenha aumentado de 0,8°C a 1,3°C entre 1850-1900 a 2010-2019, devido às atividades humanas (IPCC, 2021). Estes efeitos vêm diretamente da produção de energia (47%), da indústria (30%), do transporte (11%) e do setor da construção (3%). As fontes não renováveis de energia são os maiores responsáveis pela emissão de Gases de Efeito Estufa (GEE), sendo que no mundo, 76% da matriz elétrica são compostas por fontes não renováveis, enquanto que no Brasil, esta porcentagem era de apenas 15,9% em 2020, já que maior parte da energia é produzida em usinas hidrelétricas (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (BRASIL), 2021).

No país, 25,9% da energia produzida eram consumidas por edifícios comerciais e públicos em 2019 (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (BRASIL), 2020), caindo para 23,6% em 2020. No setor comercial, o ar condicionado representa 47% do total do consumo de energia, enquanto a iluminação, 22%. No residencial, o consumo depende da região do país (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014), sendo maior em climas mais quentes. No entanto, se prevê um aumento da demanda por energia elétrica para condicionamento de ar no segmento residencial, que poderá passar de 18,7 TWh em 2017 para 45,5 TWh em 2035, correspondendo a um aumento de 5,4% ao ano, impulsionado pelo potencial crescimento da renda da população e pelas condições ambientais do País (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (BRASIL), 2018).

Em projeção realizada por Triana; Lamberts e Sassi (2018), há uma tendência de aumento de 2°C a 3°C na temperatura do ar em 2050, com relação ao cenário atual, na cidade de São Paulo. Tal comportamento poderá trazer consequências nos sistemas construtivos e na forma de construir, considerando a Vida Útil de Projeto

(VUP) maior ou igual a 50 anos para estruturas, segundo a norma ABNT NBR 15575-1 – Edificações habitacionais – Desempenho (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2021a).

Neste contexto, com o intuito de reduzir as emissões de dióxido de carbono (CO₂) e os custos com energia elétrica, foram conduzidos no mundo diversos estudos de eficiência energética em edifícios, para diminuir a demanda e o consumo de energia relacionados ao sistema de climatização. Prieto et al. (2017) realizaram um levantamento de estudos baseados em soluções de fachada para resfriamento de edifícios em climas quentes e classificaram-nas em três tipos: resfriamento ativo, passivo e solar. Dentro do grupo de resfriamento ativo, as estratégias foram subdivididas em prevenção, modulação e dissipação de calor (Figura 1), sendo que as soluções mais avaliadas até então foram as de prevenção de calor. Prieto et al. (2017) citam como tendências de pesquisa a ventilação e o controle solar para resfriamento passivo, e a necessidade de um guia acessível a profissionais da construção para aplicação de soluções de sistemas de resfriamento na arquitetura.

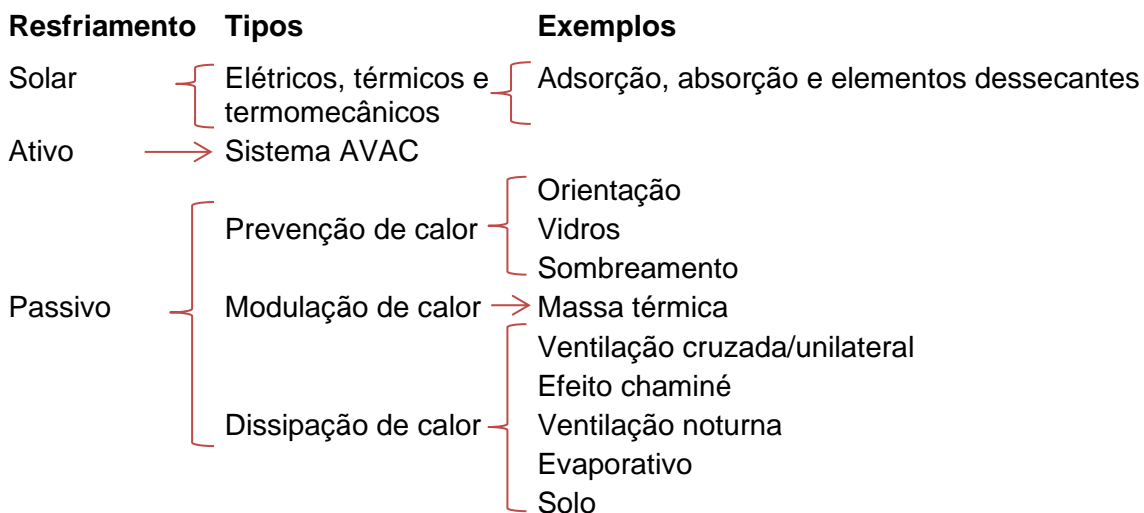


Figura 1 – Diagrama das estratégias de resfriamento de edifícios. Fonte: Adaptado de PRIETO et al., (2017).

No Brasil, que possui climas tropicais e subtropicais, as técnicas de resfriamento passivo desempenham um papel importante para a economia de energia, sobretudo se houver uma combinação de diferentes soluções. Estudos prévios do comportamento de edificações perante os climas brasileiros (BRITO, 2015; MULFARTH et al., 2021; TRIANA; LAMBERTS; SASSI, 2018) mostraram a importância da ventilação natural (CÂNDIDO et al., 2010; OLIVEIRA et al., 2015; RACKES; MELO; LAMBERTS, 2016; ROSSI et al., 2019), da ventilação híbrida

(NEVES; MELO; RODRIGUES, 2019; RUPP; GHISI, 2014, 2017; SORGATO; MELO; LAMBERTS, 2016), dos dispositivos de sombreamento (MARINOSKI et al., 2018) e do uso de vidros de controle solar (MICHELATO, 2007) para garantir conforto térmico e reduzir o consumo de energia em edifícios.

Considerando o potencial do uso de dispositivos dinâmicos de sombreamento no que diz respeito à prevenção de calor para os climas brasileiros, a tecnologia eletrocromica pode ser adequada para reduzir os ganhos solares. Os vidros eletrocromicos (EC) são capazes de alterar as propriedades de transmissão solar e de luz visível, podendo escurecer ou clarear a partir de um sinal elétrico, apresentando de dois a cinco estágios de operação. O controle ativo da luz do dia e do ganho solar pode ser realizado de forma manual ou por meio de automação, a partir da leitura de parâmetros ambientais por sensores.

No entanto, a janela eletrocromica requer a unidade insulada de vidro (duplo, triplo ou quádruplo) que é pouco utilizada no Brasil. As composições de vidro para fachada em edifícios no Brasil geralmente são do tipo laminado com controle solar, aliando o visual desejado em termos estéticos com um desempenho térmico satisfatório, apresentando melhor custo-benefício aos construtores. O tipo insulado é mais caro e sua venda vem caindo nos últimos anos, chegando ao patamar de 2016, representando uma participação de apenas 0,5% dos vidros processados não automotivos produzidos em 2020 (ABRAVIDRO, 2021). Este tipo de vidro é muito utilizado em países de climas frios, em que se faz necessário o uso de isolamento térmico na envoltória de edificações para redução do consumo de energia para aquecimento. Além disso, atua como parte da estrutura do edifício, sendo utilizado mais como um elemento de contato com o exterior e para iluminação natural, e pouco como abertura. Pinto e Westphal (2020) avaliaram o desempenho térmico de janelas de vidro insulado em cidades brasileiras e verificaram que em latitudes maiores do que 20°, o vidro insulado apresenta desempenho igual ou pior do que o vidro laminado, enquanto em latitudes menores, o vidro insulado apresenta desempenho melhor do que o laminado, com uma economia de energia anual de 3,6%.

No caso do clima de São Paulo, que possui latitude 23,5°, para melhorar o desempenho da unidade insulada de vidro na janela, seria necessário considerar uma estratégia adicional de dissipação de calor. Dentre as opções levantadas por Prieto et al. (2017), a ventilação cruzada/unilateral seria a mais adequada para o cenário de

edifícios comerciais, por ser uma estratégia de baixo custo e facilmente operável. No entanto, como o clima subtropical úmido apresenta temperaturas relativamente altas no verão, somente a ventilação natural não é suficiente para garantir o conforto térmico dos ocupantes. Assim, a ventilação híbrida (VH) ou ventilação de modo misto se torna uma solução mais apropriada, adicionando um sistema de resfriamento ativo ao ambiente.

A ventilação híbrida prevê uma programação de operação entre ventilação natural e o sistema de climatização artificial, de maneira a aproveitar as condições de temperatura do ar externo para aquecimento ou resfriamento passivo do edifício. O funcionamento dos sistemas pode ser concomitante ou alternado, dependendo do tipo de ambiente e das condições climáticas locais.

A operação conjunta da janela eletrônica que permite a abertura para ventilação natural, pode parecer contraditória de início, pois ora promove um controle da radiação solar e ora remove a barreira física para a radiação e proporciona o escoamento livre do ar. Porém, como o comportamento climático é dinâmico e sazonal, possibilita tirar proveito dos benefícios de cada dispositivo ao considerar estratégias específicas de controle ao longo do dia e do ano.

Considerando o potencial de operação conjunta otimizada de dispositivos de sombreamento e de remoção de calor em fachadas de edifícios, esta tese propõe definir combinações ótimas de controles de janela para ventilação híbrida e para o vidro eletrocromico, testando opções de limites de controle a partir de simulações paramétricas, a fim de verificar o potencial de economia de energia do sistema de climatização em edifícios comerciais de clima quente e úmido (subtropical e tropical). A hipótese é de que a janela eletrocromica pode ser viável para climas brasileiros e o fato de a janela ser necessariamente insulada pode ser compensada com o uso da ventilação híbrida para incremento da eficiência energética da edificação. Para isto, desenvolveu-se um fluxo de trabalho para as simulações paramétricas, ao combinar as decisões de abertura ou fechamento de janela, da operação do sistema de climatização artificial, e da mudança de estágio do vidro eletrocromico. Tal fluxograma não se limita aos dispositivos desta pesquisa e pode ser utilizado para qualquer composição de vidros, diferentes dispositivos de sombreamento dinâmico de janelas, índices de abertura e limites de temperatura para ventilação híbrida.

A partir do levantamento de referências bibliográficas e de artigos científicos, não foram encontrados estudos detalhados a respeito do controle de janelas para a combinação de vidro eletrocromico e de ventilação híbrida para os climas brasileiros. Porto (2019) desenvolveu uma pesquisa com a realização de medições experimentais em uma janela eletrocromica de óxido de tungstênio (WO_3) e depois conduziu simulações computacionais em ambientes de escritório para cidades localizadas nas zonas bioclimáticas 2 e 8. Considerou-se o uso de ventilação natural e de aparelho de ar-condicionado, assim como a operação do vidro eletrocromico em dois estágios com controle baseado em temperatura do ar externo e não foram detalhadas as condicionantes para a operação conjunta dos dispositivos.

Outros estudos de janelas eletrocromicas conduzidos no Brasil (ANDRADE, 2015; OLIVEIRA; SEMAAN; PONZIO, 2015; PINATTI, 1999; SENTANIN, 2012) possuem foco em engenharia química e de materiais, com ênfase na análise da transmissão solar ótica e no espectro de radiação.

1.1 Objetivos

O objetivo da pesquisa é definir combinações ótimas de parâmetros para o controle operacional de janelas com vidros laminados, insulados e eletrocromicos, instaladas em ambientes de escritório, que têm a possibilidade de ventilação híbrida, nas cidades de São Paulo, Curitiba e Recife, a partir do desenvolvimento de um fluxo de trabalho para a tomada de decisões baseada em parâmetros ambientais para a integração da abertura/fechamento de janelas, da operação do sistema de ar-condicionado e do controle do vidro eletrocromico, e da identificação dos resultados ótimos em termos de consumo de energia do sistema de climatização e percentual de horas em conforto térmico no ano.

A determinação dessas combinações foi embasada por resultados de simulações computacionais, relativos ao conforto térmico e à eficiência energética.

Os objetivos específicos são:

- Verificar o efeito adicional da ventilação noturna na demanda de energia anual para climatização nos climas subtropical e tropical.

- Indicar a adequabilidade de uso de janelas com vidro insulado duplo e com vidro insulado eletrocrômico em edifícios comerciais em locais de climas subtropical úmido com verão quente, subtropical úmido com verão ameno e tropical.
- Compreender os módulos de simulação existentes e suas limitações e propor controles personalizados, abrangendo alternância de operação entre a abertura de janela e o sistema de ar-condicionado, modulação da abertura e alteração do estágio do eletrocrômico.
- Se identificados conflitos operacionais na combinação de janela eletrocrômica e ventilação híbrida, indicar soluções para o controle da operação, com foco na redução da demanda de energia para climatização.
- Definir a função-objetivo da fronteira de Pareto a fim de selecionar os cenários ótimos para eficiência energética e conforto térmico.

1.2 Estrutura do trabalho

A tese foi organizada a partir dos seguintes capítulos:

O capítulo 1 apresenta a introdução, o objetivo e a estrutura do trabalho

O capítulo 2 contém os fundamentos teóricos e a revisão bibliográfica da tese, divididos pelos assuntos que abordam tecnologias de controle solar de janelas, com destaque para as janelas inteligentes e para o dispositivo eletrocrômico; ventilação híbrida; conforto térmico adaptativo; modelagem computacional térmica e energética de edifícios e por fim, otimização multicritérios para estabelecimento dos cenários ótimos e sub-ótimos.

O capítulo 3 contém a descrição do método de trabalho, abordando a análise do arquivo climático de São Paulo (localizado na zona bioclimática 3 – ZB3), obtenção dos limites para o conforto adaptativo e delimitação do objeto de estudo. Em seguida, a modelagem gráfica e configuração inicial para simulação energética, inserção de dados no programa EnergyPlus, desenvolvimento de ações personalizadas para configuração dos dispositivos de controle de janelas. Foi detalhada também a extensão do estudo para cidades de zonas bioclimáticas extremas (1 e 8)

representadas por Curitiba e Recife respectivamente, assim como a inserção da ventilação noturna, os resultados de desempenhos relativos e a definição das combinações ótimas para operação.

O capítulo 4 descreve os resultados detalhados das etapas do capítulo 3, definindo também os fluxos de trabalho de controle do grupo *Energy Management System* (EMS) do EnergyPlus. A partir do EMS, estabeleceram-se os limites dos controles para EC e VH. Foi realizada a compilação dos resultados das simulações anuais paramétricas, agrupados por demanda de energia para resfriamento e aquecimento, desempenho energético das composições de janela, nível de iluminação natural, temperatura operativa média, percentual de horas em conforto térmico de acordo com o modelo adaptativo e percentual de horas em cada estágio da janela EC para cada cidade analisada. E ao final, o resultado da otimização multiobjetivo.

O capítulo 5 contém as discussões, contendo uma análise dos principais resultados e diretrizes de projeto para os climas subtropical e tropical.

O capítulo 6, de conclusões, contém a síntese e os principais resultados da pesquisa, com considerações acerca do método proposto, assim como limitações da pesquisa indicação para os trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Neste capítulo são apresentados os conceitos sobre os temas abordados na pesquisa. Como se trata de assuntos diversificados, foram agrupados em subitens. Os temas são: tecnologia de janelas em edificações, na qual se descrevem os tipos de vidro utilizados na construção civil e a operação de janelas inteligentes, com ênfase ao dispositivo eletrocromico; o modelo adaptativo para conforto térmico; ventilação híbrida; simulação de desempenho térmico de janelas com descritivo sobre os programas EnergyPlus e Window, e a otimização multiobjetivo contendo o desenvolvimento da análise com a fronteira de Pareto.

2.1 Tecnologia em janelas na edificação

A janela é um elemento obrigatório nas edificações, inclusive citado em Códigos de Obras e Edificações dos municípios brasileiros. Normalmente possui um papel polêmico nas fachadas dos edifícios corporativos, pois possui a função de deixar passar a luz e o ar e permitir ver o outro lado, e ao mesmo tempo garantir proteção às intempéries. Para isto, é necessário que seja constituído de material transparente ou parcialmente transparente à luz do sol.

A transparência gera uma conexão entre os espaços internos e externos, proporcionando aos ocupantes uma sensação de amplitude do espaço. Para os ocupantes, garantir acesso à paisagem e à iluminação natural nos ambientes traz um efeito positivo, no que diz respeito a conforto, bem-estar, saúde e produtividade. No Brasil, há a disponibilidade de insolação de 3 a 8 horas por dia, sendo que na cidade de São Paulo, por exemplo, a média anual de insolação é de 7 a 8 horas diárias (TIBA, 2000), o que possibilita um bom aproveitamento de iluminação natural na maior parte do tempo, em qualquer tipo de edificação com ambientes de ocupação prolongada. Nos edifícios comerciais, os vidros são utilizados para ampliar a luminosidade, trazer modernidade e dar visibilidade ao interior dos ambientes.

Esta transparência, no entanto, gera uma fragilidade na envoltória, pois a janela ainda constitui o componente mais fraco do envelope do edifício em termos de desempenho energético (DUSSAULT; GOSSELIN; GALSTIAN, 2012). Neste aspecto, a tipologia de edifícios comerciais tem diversas demandas devido ao tipo de uso da edificação e à preocupação estética: deve fornecer um ambiente de trabalho saudável, atendendo aos requisitos de iluminação e de temperatura adequadas, de qualidade do ar interior e de conforto térmico e acústico, oferecer qualidade estética e segurança, e por fim, operar com o menor consumo de energia possível. O vidro deve permitir o aproveitamento da iluminação natural sem causar ofuscamento e representar uma parcela menor da carga térmica da edificação para reduzir o consumo de energia pelo sistema de ar condicionado.

A radiação de ondas longas é muito importante quando se discute a eficiência energética da janela, pois sua participação na troca de calor entre as superfícies internas e externas do ambiente através do vidro é comparativamente grande na transferência de calor total, sobretudo quando a diferença de temperatura interna e

externa é muito alta (WANG; WANG; LI, 2013). Além disso, o vidro pode ser considerado opaco à radiação de ondas longa (DUFFIE; BECKMAN, 2013), por isso a radiação da região do infravermelho que atravessa os vidros causa um aumento da temperatura do ar interno (PAL; ROY; NEOGI, 2009), o que pode provocar o efeito estufa.

Nos próximos tópicos serão discutidos sobre os tipos de vidro para fachada de edifícios, sobretudo os de alto desempenho estáticos e dinâmicos.

2.1.1 Vidros de alto desempenho para construção civil

Na construção civil, entre os tipos mais comuns de vidro está o *float* monolítico incolor de 3 e 4 mm, apresentando até 90% de transmitância à radiação solar e é utilizado em conjuntos de janelas prontas. Além destes também são utilizados os vidros tipos impresso (comum e aramado), temperado, espelho, laminado, laminado temperado, insulado, de controle solar, serigrafado, gravado (jateado e acidado) e esmaltado, sendo que podem ser combinadas duas ou mais características. Nas fachadas de edifícios, há recomendações específicas para vidros verticais, que garantam segurança contra impactos, que são dos tipos laminado de segurança, aramado e insulado para guarda-corpos e fachada a até 1,10 m da cota do piso (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2016). Acima de 1,10 m, podem ser aplicados tipos mais variados, sendo que em edifícios comerciais, é utilizado em sua maioria o vidro laminado.

Os monolíticos podem ser também coloridos, a partir do acréscimo de compostos químicos como o óxido de ferro (Fe_2O_3), óxido de cobalto (Co_3O_4) e selênio (Se)¹. A partir do *float*, as placas podem ser combinadas para dar origem a outros vidros especiais ou de controle solar, tais como o vidro laminado com película de polivinil butiral (PVB) e o vidro insulado, com a finalidade de conferir mais segurança e, dadas as condições locais de clima e latitude, melhorar o desempenho térmico da fachada.

¹ A composição do vidro, pela CEBRACE. Disponível em: <https://www.cebrace.com.br/#!/enciclopedia/interna/a-composicao-do-vidro>. Acesso em abr. 2021.

O vidro insulado é definido pela norma ABNT NBR 16015 – Vidro insulado – Características, requisitos e métodos de ensaio (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2012, p. 4), como:

O conjunto formado por duas ou mais placas de vidro paralelas, separadas por um espaçador, com as bordas hermeticamente seladas ao longo de todo o seu perímetro, formando em seu interior uma câmara estanque e desidratada. Em alguns casos a câmara pode conter gases inertes para melhorar o comportamento térmico e/ou acústico.

A espessura da composição pode variar conforme o desempenho pretendido e a localidade. O vidro insulado triplo apresenta um valor baixo de transmitância térmica (U) e é utilizado na Europa e na América do Norte, sendo que a espessura mais comum é de 36 mm, com a configuração 4:12:4:12:4 (três folhas de vidros de 4 mm e espaços de 12 mm com gás entre elas), obtendo um valor de transmitância térmica (U), por exemplo, de 0,64 W/m².K (JELLE et al., 2012).

Em 2012, a União Europeia estabeleceu diretrizes para eficiência energética em vários setores, com o objetivo de obter uma redução do consumo de energia de 20% em 2020 e de pelo menos 32,5% em 2030 (THE EUROPEAN PARLIAMENT AND THE COUNCIL OF THE EUROPEAN UNION, 2012). Nas diretivas de desempenho energético de edifícios (THE EUROPEAN PARLIAMENT AND THE COUNCIL OF THE EUROPEAN UNION, 2010) há exigências para edifícios novos a partir de 31/12/2020, que devem ter necessidades quase nulas de energia. Assim, cada país adotou valores máximos de transmitância térmica (U) da janela em edifícios novos ou para *retrofit*. Por exemplo, na Finlândia, a transmitância térmica de portas e janelas novas deve ser de 1,0 W/m².K; na França 1,9 W/m².K e na Itália pode variar de 1,7 a 3,2 W/m².K dependendo da zona climática (GLASS FOR EUROPE, 2019). Tais valores de transmitância são relativamente baixos e podem ser obtidos com unidades de vidro insulados duplos e triplos. Os cálculos para desempenho térmico de vidros insulados estão descritos no Apêndice 1.

No caso do Brasil, a norma ABNT NBR 15220-3, de Desempenho térmico de edificações (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2005a) fornece diretrizes qualitativas de projeto para habitações de interesse social em oito zonas bioclimáticas. Já a ABNT NBR 15575-4, de Edificações habitacionais – Desempenho (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2021b) estabelece para janelas a proporção de elementos transparentes, que é de até 20% para ambientes

com até 20 m². Para ambientes maiores do que 20 m², a área de superfície transparente deve ser de até 4 m². Nas zonas bioclimáticas de 3 a 8, é possível ter uma proporção maior do que 20%, porém para cada 1% de acréscimo deverá respeitar valores máximos de fator solar e nível mínimo de etiqueta de desempenho de esquadria, que por sua vez depende da quantidade de graus-hora de desconforto. Indiretamente há níveis máximos de transmitância térmica a serem observados para janelas de edifícios no Brasil, porém aplicam-se a edifícios residenciais.

Para obtenção de melhores desempenhos térmicos, os vidros laminados e insulados podem receber tratamentos especiais, que conferem uma redução da transmissão de energia e de luz visível. Entre os vidros de controle solar, podem ser citados os vidros a vácuo e o Low-E (abreviação de *low emissivity*, baixa emissividade em inglês). O vidro fotovoltaico também entraria neste grupo, embora o objetivo principal não seja proteger a envoltória da radiação solar e sim promover a captação para produzir energia. Os vidros a vácuo consistem em duas folhas de vidro separadas por um espaço a vácuo estreito, podendo ser combinado também um vidro comum com o tipo Low-E. A vantagem deste produto é a espessura total da composição, que pode ser mais fina.

Já os vidros Low-E possuem um revestimento de metal ou de óxidos metálicos, que podem ser classificados em *hard coat*, (revestimento duro, em inglês) e *soft coat* (revestimento mole, em inglês) (CUCE; RIFFAT, 2015). No mercado brasileiro, são também chamados de pirolítico ou *on line*, e *off line*, respectivamente. As películas *hard coat* apresentam resistência à corrosão e abrasão e possuem espessura de 0,1 a 0,5 µm. Já as *soft coat* são constituídas de camadas ultrafinas, com espessuras de 0,2 µm²; estas últimas apresentam maiores níveis de transparência e refletem mais os raios infravermelhos, mas necessitam de proteção extra, pois são menos duráveis (JELLE et al., 2012). Em estudo realizado para comparar o uso de camada de controle solar em vidro insulado, verificou-se que a janela com a camada de baixa emissividade reduz 53,9% a quantidade de energia transferida para dentro da edificação, com relação a um vidro insulado sem a camada de controle solar (XAMÁN et al., 2016).

² Definições do Banco de vidros da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo. Disponível em: <https://www.fau.usp.br/deptecnologia/docs/bancovidros/low.htm>. Acesso em: abr. 2021.

Os vidros fotovoltaicos são composição de vidros com células solares fotovoltaicas e são considerados semitransparentes, pois os elementos fotovoltaicos possuem influência de outros materiais laminados não transparentes. Os painéis opacos fotovoltaicos podem ser intercalados lado a lado com painéis de vidro na fachada, ou podem ser utilizados filmes finos sobre o vidro, dotados de células solares com um determinado grau de transmitância (LAI; HOKOI, 2015). O objetivo desta composição é aproveitar a radiação solar incidente na fachada para produzir energia elétrica, ao mesmo tempo em que permite a entrada de luz nos ambientes, por isso pode ser combinado com outros revestimentos Low-E, ao utilizar vidro duplo (WU et al., 2016).

2.1.2 Sombreamento e Janelas Inteligentes

Como a posição do sol no céu varia ao longo do dia e ao longo do ano, as características estáticas dos materiais de janela nem sempre garantem bom desempenho na média anual e podem causar desconforto com a incidência de radiação direta, sendo necessário um elemento de anteparo solar para proteção do usuário.

Assim, o sombreamento de janelas pode ser obtido fisicamente, a partir de acessórios instalados na parte interna, externa ou como parte integrante do envelope do edifício, e possuem uma grande variedade de tipos e formatos (VAN DEN WYMELENBERG, 2012). Há desde elementos simples como cortinas, que são utilizadas em residências, até dispositivos móveis que ficam externos à janela, que podem ser operados por sistemas de automação mais sofisticados.

Em edificações residenciais, o sombreamento normalmente é realizado na parte interna da janela, por meio de cortinas, e o usuário pode livremente abrir ou fechar conforme suas necessidades.

Já em edifícios comerciais, os dispositivos de sombreamento deixam de ser primordialmente estéticos e passam a ser utilizados para garantir conforto térmico e lumínico aos seus ocupantes, sobretudo devido às fachadas envidraçadas desta tipologia de edifício. Sendo assim, geralmente são utilizadas persianas ou cortinas de rolo, que podem ser internas ou integradas à fachada. Devido ao layout de ocupação,

a operação da cortina está sujeita à resposta do usuário e nem sempre atende às necessidades da maioria dos ocupantes.

Há ainda elementos externos, como os brise-soleil, que podem ser fixos ou móveis e são mais eficientes na redução do pico de demanda e do consumo total de ar condicionado para resfriamento, quando comparados a elementos internos. O dimensionamento do brise-soleil deve ser realizado de acordo com a orientação da fachada, considerando a geometria solar e pode ser mais eficaz se for móvel, desde que operado corretamente (GIVONI, 1998).

Como não há um consenso sobre a forma como as pessoas operam esses dispositivos de sombreamento e os fatores que motivam e influenciam suas decisões, foram desenvolvidos sistemas inteligentes que detectam parâmetros externos e atuam na operação destes dispositivos (VAN DEN WYMELENBERG, 2012). Nos últimos anos, tem sido utilizada em maior escala uma geração de vidros capazes de alterar propriedades como fator solar e transmissão de radiação do espectro solar em resposta a uma corrente elétrica ou a alterações das condições do ambiente (BAETENS; JELLE; GUSTAVSEN, 2010). Estas janelas, chamadas de *Smart Windows* (Janelas Inteligentes), atuam de forma dinâmica, adaptando-se às diferentes intensidades de radiação solar ao longo do dia em função da orientação e da época do ano.

Podem ser citadas basicamente três tecnologias diferentes, que são acionadas conforme sinal externo: o cristal líquido, o dispositivo de partículas suspensas e os materiais crômicos.

Os dispositivos de cristal líquido promovem uma alteração na transmitância, a partir de um mecanismo de mudança da orientação das moléculas de cristal líquido entre dois eletrodos condutivos, aplicando um campo elétrico. Já os dispositivos de partículas suspensas (SPD, na sigla em inglês de *Suspended Particles Device*) possuem um filme de três a cinco camadas, em que a camada ativa possui partículas que podem ser esféricas ou em formato de agulha, suspensas em um fluido orgânico ou gel, entre dois condutores transparentes. Quando o sistema está desativado, as partículas ficam em posições aleatórias e absorvem luz, mas quando recebe um campo elétrico, elas se alinham, causando um aumento do valor da transmitância térmica (BAETENS; JELLE; GUSTAVSEN, 2010).

Entre os materiais crômicos, há os eletrocromicos, gasocromicos, fotocromicos e termocromicos. Nos eletrocromicos, há uma alteração reversível das propriedades óticas do material, a partir de mudanças nos parâmetros externos, associado a um processo de ionização. Quanto aos gasocromicos, é utilizado um gás como o hidrogênio (H_2) em vez de aplicar uma voltagem, sendo necessária, portanto, uma camada eletrocromica. Os melhores resultados foram obtidos com tungstênio, sendo que o desempenho varia conforme a espessura do filme e a concentração do gás, que por sua vez, define a densidade ótica e a coloração da composição (BAETENS; JELLE; GUSTAVSEN, 2010). Os vidros fotocromicos, por sua vez, respondem aos estímulos naturais de iluminação externa ou radiação e os termocromicos, à variação de temperatura, e são considerados sistemas passivos, pois não permitem o controle direto pelo usuário (CASINI, 2018) e nem a personalização das faixas de operação (TÄLLBERG et al., 2019).

O vidro eletrocromico é o mais adequado para uso em fachadas de edifícios, pois permite um controle ativo com uma velocidade rápida de resposta (HOON LEE; JEONG; TAE CHAE, 2020). Já o cristal líquido é mais utilizado em vidros internos para privacidade e o SPD em veículos, sendo que para este último não há informação de eficiência energética e vida útil de dispositivos (CASINI, 2018; FRATTOLILLO et al., 2019).

2.1.3 Vidro eletrocromico

O princípio da camada eletrocromica em janelas teve maiores investimentos a partir da década de 1980; antes disso, o EC tinha sido cogitado para outras funções, tais como em *displays* informativos e em espelhos retrovisores de veículos (GRANQVIST, 2014). A janela EC consiste em uma unidade de vidro insulado (IGU, da sigla em inglês *Insulated Glass Unit*) que possui uma camada eletrocromica na parte interna do vidro externo, conforme indicado nas Figura 2 e Figura 3. O vidro eletrocromico tem que ser obrigatoriamente insulado, duplo ou triplo, devido ao seu princípio de funcionamento.

A camada eletrocromica consiste em um filme fino aplicado em vidro ou plástico que pode alterar, de forma reversível, seu nível de transmissão ótica aplicando-se uma voltagem baixa. A janela eletrocromica pode preservar a vista externa enquanto

promove a modulação da luz transmitida, do ofuscamento e dos ganhos de calor (LEE et al., 2006a). Há no mercado diversos produtos que utilizam esta tecnologia, com informações amplamente divulgadas a respeito de tempo de resposta, durabilidade, consumo de energia para operação e condições ambientais ideais.

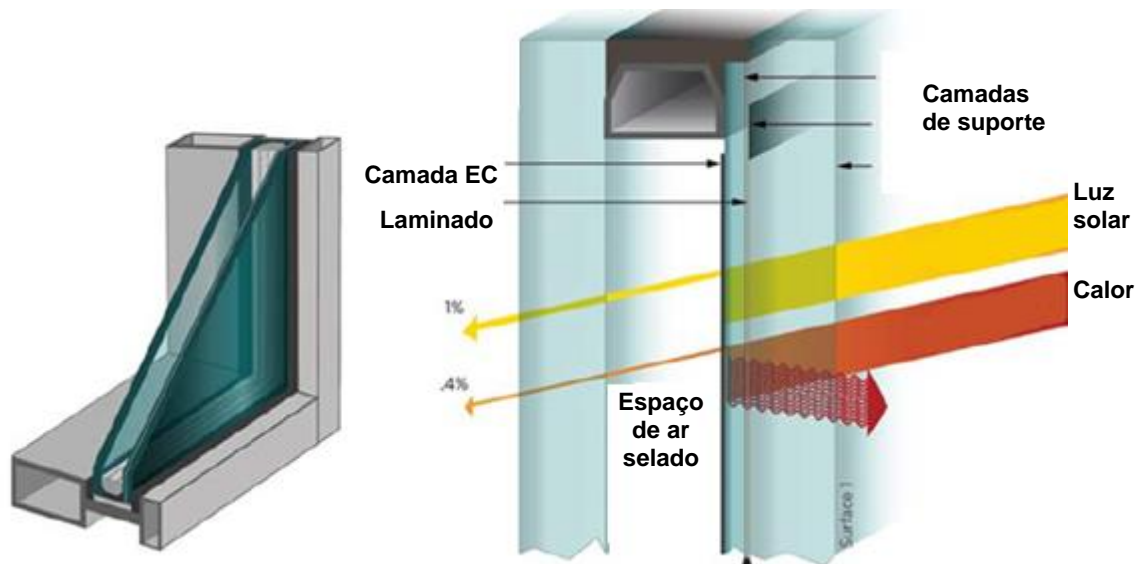


Figura 2 – Esquema da unidade de vidro eletocrômico insulado da SageGlass. Fonte: Adaptado de SAGE (2016a)

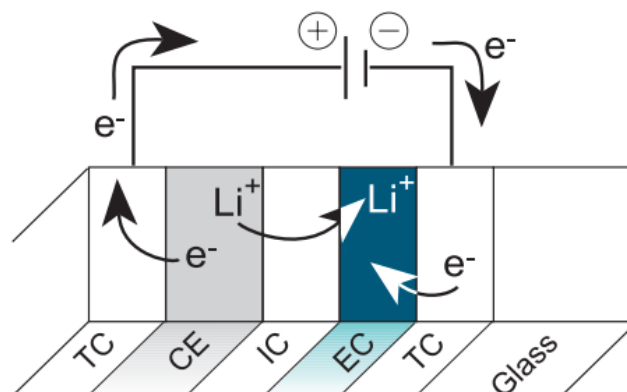


Figura 3 – Esquema do filme eletocrômico fino sobre o vidro. Fonte: SAGE (2010)

Na Figura 3, TC é o eletrodo condutor transparente, CE é o contra-eletródo, EC é o filme eletocrômico e IC, o condutor iônico (eletrólito). Li^+ são os íons de Lítio e e^- , os elétrons associados, e *Glass* representa a camada de vidro (PORTO, 2019; SAGE, 2010).

O revestimento eletrocromico é composto então por cinco camadas, exemplificadas na Figura 3, que escurecem à medida que os íons de Lítio (Li^+) e os elétrons associados são transferidos do contra-eletrodo para o filme eletrocromico. A reversão para o estágio mais claro ocorre quando se inverte a polaridade da tensão e os íons e elétrons retornam à camada original, que é o contra-eletrodo (SAGE, 2010).

O material mais estudado e utilizado comercialmente é o óxido de tungstênio (WO_3) (GRANQVIST, 2014) que ao reagir com os elétrons passa de transparente para azul. Há outros elementos, como o óxido de níquel (NiO), que altera o aspecto da janela para cinza ou em tom de marrom e permite a passagem dos espectros ultravioleta e visível; o óxido de irídio (IrO_2 e Ir_2O_3), que transforma em marrom; e o óxido de nióbio (Nb_2O_5), que pode se tornar cinza, marrom ou azul, dependendo do nível de transparência da camada.

Quando o produto começou a ser comercializado nos Estados Unidos, em meados de 2006, havia apenas o controle binário: liga e desliga (*on/off*). Estudos do Laboratório Nacional Lawrence Berkeley (*Lawrence Berkeley National Laboratory – LBNL*) demonstraram a necessidade de estágios intermediários (LEE et al., 2006a) de transmitância visível para satisfazer as condições de conforto dos usuários. Atualmente, as unidades possuem até quatro a cinco estágios, havendo o estado claro, dois ou três estados intermediários e o estado mais escuro (*fully tinted*). Os desempenhos típicos para o SageGlass Clear w/SR 2.0, um dos modelos mais comercializados no mundo, estão especificados na Tabela 1, que contém transmissão de luz visível e solar em porcentagem, o ganho solar (SHGC) e a transmitância térmica global (U) para cada estágio. Observa-se que a transmitância térmica não muda, e sim a transmissão solar e a transmissão de luz visível. No nível mais escuro, a transmissão de luz visível é de apenas 1%, o que compromete o aproveitamento da iluminação natural, forçando o acionamento obrigatório da iluminação artificial. Neste caso, o controle solar que atua como bloqueio do ganho de calor pela fachada pode ocasionar um ganho de carga térmica interna devido às luminárias.

Tabela 1– Desempenho típico de uma unidade de vidro insulado SageGlass Clear w/SR 2.0 na América do Norte

	<i>Transmissão de luz visível (%)</i>	<i>Transmissão solar (%)</i>	<i>SHGC</i>	<i>Transmitância térmica U (W/m².K)</i>
Claro	60	33	0,41	1,59
Intermediário 1	18	7	0,15	1,59
Intermediário 2	6	2	0,1	1,59
Escuro	1	0,4	0,09	1,59

Fonte: Adaptado de SAGE (2016).

A mudança de estágio ocorre com uma baixa tensão em corrente contínua (CC), de menos de 5 V, a partir de controles baseados em luz do dia, ofuscamento, presença de pessoas e por programação (*schedule*) (SAGE, 2010). A mudança entre os estágios demanda uma quantidade mínima de eletricidade, de 2,5 W/m², e menos de 0,4 W/m² para manter-se no estado desejado (CASINI, 2018). A durabilidade dos produtos EC varia de 40.000 a 100.000 ciclos, estimada de 20 a 50 anos (TÄLLBERG et al., 2019).

O tempo de alteração entre o estágio mais claro para o mais escuro depende do produto e de fatores físicos, tais como a temperatura ambiente e o tamanho dos panos; por isso, quanto mais quente do lado externo e menor o pano, mais rápida é a transição do vidro (LEE et al., 2006b). Os tempos podem variar de 3 a 5 minutos para vidros de tamanho máximo de 1,07 x 1,50 m, 10 minutos para panos de 1,00 x 2,40 m e 15 a 20 minutos para 1,52 x 3,05 m (TÄLLBERG et al., 2019). Todos os exemplos são de composições insuladas duplas ou triplas, baseadas em WO₃ e preenchidas com Argônio (Ar) ou Criptônio (Kr).

Outras tecnologias têm sido desenvolvidas por universidades e centros de pesquisa para melhorar desempenho, economia e durabilidade dos dispositivos EC, tais como a nanotecnologia aplicada a uma operação eletroquímica (nano cristais), ou emprego de abordagens alternativas baseadas em partículas polarizadas (*pixels* eletrocínéticos), eletromecânicas (janela com deformação do elastômero) ou puramente mecânicas, com preenchimento de líquidos na janela. O objetivo destes dispositivos é aumentar a transmissão luminosa e reduzir a transmissão de energia, aumentar a velocidade da mudança de estados do vidro, reduzir os custos de fabricação e garantir conforto visual ao balancear as cores. No caso dos nano cristais, estes controlam a radiação de infravermelho próximo sem bloquear a transmissão de

luz visível, possibilitando uma situação com alta transmissão luminosa e baixa transmissão de calor. No entanto, estudos indicaram que em locais de clima quente, o nível de irradiação é alto, portanto o modo mais claro da janela EC é pouco utilizado, ao contrário dos locais de clima frio, onde talvez não precisaria do estágio mais escuro (CASINI, 2018).

O uso do vidro EC para eficiência energética tem trazido efeitos positivos, sendo que a economia anual de energia pode chegar a 170 kWh/m² de área de janela devido à redução da necessidade para resfriamento (GRANQVIST, 2014). As principais vantagens são (CASINI, 2016):

- Redução de até 60% de demanda de energia para iluminação artificial, ao aumentar a transmissão de luz pelas janelas – com o controle inteligente, é possível aproveitar melhor a iluminação natural;
- Possibilidade de ajuste dos níveis de iluminância no ambiente interno a partir da variação da transmitância visível, enquanto mantém a vista externa;
- Redução das demandas do sistema de climatização ao controlar os ganhos solares devido à radiação solar direta, e consequente redução dos custos de instalação e de gerenciamento de custos de energia com plantas até 25% menores;
- Eliminação de dispositivos de controle solar interno e externo, tais como brise-soleils, anteparos solares, cortinas e persianas;
- Proteção do mobiliário da radiação solar direta, aumentando a durabilidade dos materiais;
- Maior liberdade no projeto de arquitetura, possibilitando o aumento da proporção de janelas na fachada sem afetar muito o desempenho do edifício;
- Potencial para atingir maiores pontuações nos sistemas de certificação, tais como LEED (*Leadership in Energy and Environmental Design*) e BREEAM (*Building Research Establishment Environmental Assessment Method*).

Os fabricantes do vidro EC possuem sistemas próprios de automação de janela, apresentando condicionantes utilizadas para limitar a operação do vidro EC, a fim de economizar energia e prolongar a vida útil do dispositivo (SAGE ELECTROCHROMICS, 2021). Os controles mais comuns são baseados em ocupação, programação pré-definida e por controle manual:

- **Ocupação:** funcionamento da janela EC a partir da presença de pessoas no local; a detecção pode ocorrer por meio de sensores de movimento ou por programação prévia. Em edifícios comerciais, o horário de ocupação acaba sendo mais previsível, portanto, passível de programação horária.
- **Sazonal e horário:** os estados do vidro podem ser estabelecidos de acordo com a época do ano. Em locais mais frios, é desejável manter o estágio mais claro no inverno, favorecendo o aquecimento do ambiente, e manter o estado mais escuro no verão. Além disso, pode-se ter uma programação horária dependendo da orientação das fachadas, bloqueando parte da radiação solar na fachada oeste à tarde, por exemplo.
- **Controle manual:** os usuários podem sobrepor o controle vigente para atender às suas necessidades individuais.

Há outros controles mais sofisticados, cujos dados de entrada do sistema podem incluir leitura dos sensores de temperatura e de iluminância natural na cobertura do edifício e/ou na fachada, tamanho da janela, orientação do edifício, ângulo solar e condições do céu (SAGE ELECTROCHROMICS, 2021), considerando os intervalos de acordo com o tipo de clima, respeitando-se a latitude e a intensidade de radiação solar.

A Tabela 2 contém um resumo de estudos que avaliaram o desempenho do vidro EC para janelas e compreendem a realização de experimentos com protótipos, coleta de dados *in loco* e simulações computacionais. Na maioria dos casos, a composição da janela era de vidro de 7 mm de espessura com a camada EC + 12,7 mm de espaço com 90% Argônio + vidro *clear* monolítico de 6 mm (*float* ou temperado) e utilização do óxido de tungstênio (WO_3).

Tabela 2 – Resumo dos estudos de avaliação do vidro eletrocromico

Referência	U (W/m ² .K)	Localidade	Controles	Nº de estágios	Resultados
Assimakopoulos et al. (2007)	-	Atenas – Grécia	<ul style="list-style-type: none"> - Radiação solar global - Nível de iluminância interna - Programação horária - Controle dinâmico (tipo PID) para o nível de iluminância horizontal interno - <i>Fuzzy</i> baseado em coleta de dados com operação manual 	2	<p>Teste de diversos controles do vidro EC em célula de teste do projeto PASSYS e simulação energética para adoção das estratégias de controle.</p> <p>Redução de 25% a 47,4% da carga de resfriamento entre os tipos de controle. Os controles com melhores resultados foram de radiação solar e nível iluminância interna.</p>
Jonsson e Roos, (2010)	1,3; 1,6; 2,8	Miami e Denver (EUA) e Estocolmo (Suécia)	<ul style="list-style-type: none"> - Temperatura de bulbo seco (interna/externa) - Radiação solar direta transmitida pela janela (W/m²) - Programação horária - Ocupação 	2	<p>Comparação do desempenho de seis combinações de janelas EC e quatro tipos de controle, que incluem otimização de energia e de luz do dia, e mistura entre as estratégias. Para locais com mais demanda de energia para resfriamento, é melhor a combinação com vidro de controle solar. Para locais com mais demanda de energia para aquecimento, vale a combinação de vidros com camada Low-E.</p>
Lee, Claybaugh e Lafrance (2012)	1,93	Washington D.C. – EUA	<ul style="list-style-type: none"> - Nível de iluminância – sensor vertical externo (cd/pé) - Ocupação – hora do dia e por sensor infravermelho e ultrassônico - Controle manual 	2	<p>Avaliação de janela EC em edifício de escritório, em uma sala “piloto” e simulação energética para consumo anual.</p> <p>Economia anual de energia de 39% a 48% devido ao aquecimento passivo no inverno e redução do SHGC no verão, para resfriamento.</p>
Dussault e Gosselin, (2017) Dussault, Sourbron e Gosselin (2016)	1,63	Dez cidades nos EUA e Canadá	<ul style="list-style-type: none"> - Nível de iluminância (lux) - Ofuscamento - Radiação incidente na fachada (W/m²) - Temperatura de bulbo seco interna (°C) - Ocupação 	2 a 4	<p>Análise de sensibilidade de janela EC para controles baseados em regras, preditivos e com algoritmos genéticos.</p> <p>Redução de 4% a 10% do consumo de energia entre os tipos de controle, sendo que o controle baseado em regras pode gerar resultados satisfatórios.</p>

Tabela 1 – Resumo dos estudos de avaliação do vidro eletrocromico (continuação)

Referência	U (W/m ² .K)	Localidade	Controles	Nº de estágios	Resultados
Piccolo (2010) Piccolo et al. (2018) Piccolo e Simone (2015)	2,2	Bolzano e Messina – Itália	- Nível de iluminância (lux)	2	Avaliação experimental em protótipo e simulação computacional em ambiente residencial. Redução de 20% a 40% do consumo de energia para resfriamento com o vidro EC e aumento de 2% a 10% do consumo para aquecimento.
Frattolillo et al. (2019)	1,1	Cagliari – Itália (Clima Mediterrâneo)	- Programação horária e sazonal	2	Estudo experimental em duas câmaras-teste e simulação numérica para avaliar consumo de energia. Redução de 80% do consumo de energia no verão e 35% no inverno.
Tällberg et al. (2019)	1,59	Trondheim – Noruega Madri – Espanha Nairobi – Quênia	- Temperatura operativa (°C) - Nível de iluminância interna (lux) - Radiação solar global (W/m ²)	2	Comparação do desempenho do vidro EC em três localidades com climas diferentes, por meio de simulação. Houve redução do consumo de energia de 79,2% em Trondheim, 61% em Madri e 48% em Nairóbi.
Hoon Lee, Jeong e Tae Chae (2020)	3,24	Miami, Los Angeles, Baltimore, Chicago, Denver, Duluth – EUA	- Temperatura de bulbo seco externa (°C) - Temperatura de bulbo seco interna (°C) - Irradiação horizontal global (W/m ²) - Radiação solar incidente na janela (W/m ²)	2	Proposta de controle otimizado para a janela EC em edifício comercial de médio porte por meio de simulação. Redução de 17,4% de consumo anual total (aquecimento e resfriamento), por janela. O melhor controle foi considerado o de temperatura do ar externo. Os edifícios em locais de latitude menores apresentaram maiores economias.

Fonte: Elaborado pela autora, 2022

Os parâmetros selecionados para controle da operação das janelas EC nas pesquisas estudadas (ASSIMAKOPOULOS et al., 2007; DUSSAULT; GOSSELIN, 2017; DUSSAULT; SOURBRON; GOSSELIN, 2016; FRATTOLILLO et al., 2019; HOON LEE; JEONG; TAE CHAE, 2020; JONSSON; ROOS, 2010; LEE; CLAYBAUGH; LAFRANCE, 2012; PICCOLO, 2010; PICCOLO et al., 2018; PICCOLO; SIMONE, 2015; TÄLLBERG et al., 2019) merecem destaque. Na maioria dos casos foi utilizado o nível de iluminância, em lux, como parâmetro de controle, uma vez que uma das grandes promessas do vidro EC é a redução de ofuscamento. Em alguns casos, foi considerado o nível de iluminância interno e em outros casos, o externo. Outros parâmetros muito utilizados foram a incidência de radiação, em W/m^2 , que podia ser a radiação direta incidente na superfície vertical (na fachada ou na janela), a radiação global no plano horizontal, e as temperaturas do ar interno e externo, em °C.

Os limites utilizados em cada pesquisa para alteração do vidro EC variavam conforme a latitude, tipologia do edifício, níveis normativos locais, quantidade de estágios da camada EC (dois ou quatro) e preferências dos usuários. Por exemplo, nas referências consultadas, o nível de iluminância interno no plano de trabalho horizontal foi estabelecido como 400, 500 e 600 lux, sendo que acima destes valores, o vidro EC seria escurecido. Para radiação solar, foram estabelecidos os limites de 350 e 450 W/m^2 nos casos de janelas de dois estágios; e de 63 W/m^2 a 315 W/m^2 para a janela de quatro estágios. Para temperatura do ar interno, os *setpoints* foram de 23 e 24°C.

Na Tabela 2, há estudos da janela EC em diversos climas, sendo a maioria em locais frios. No entanto, Dussault e Gosselin (2017) descreveram que em locais de clima quente, a especificação de janelas eletrocromicas promove maior economia de energia, tal como na cidade de Atlanta (Cfa, na classificação de Köppen-Geiger). Hoon Lee, Jeong e Tae Chae (2020) identificaram que o vidro EC é mais vantajoso para locais em que há mais demanda por resfriamento, e menos vantajoso para os locais com maior demanda de aquecimento, considerando o consumo anual de energia por sistema de Aquecimento, Ventilação, Ar Condicionado e Refrigeração (AVAC/R). Tällberg et al. (2019) afirmaram que as janelas inteligentes têm maior impacto no desempenho energético de edifícios em climas quentes e ensolarados, como em

Nairóbi, no Quênia. Há, portanto, um potencial para uso do vidro eletrocromico em locais de clima quente, como o Brasil.

A janela eletrocromica (EC), no entanto, não é comercializada no País e até o momento, o único edifício brasileiro que possui este sistema instalado é o Centro de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) da Saint-Gobain, em Capivari/SP (Figura 4), que possui os vidros eletrocromicos na fachada e permitem a mudança de estágio em quatro fases por controle manual. Neste edifício, o vidro eletrocromico possui função educativa, por estar localizado em área de demonstração para visitantes (*showroom*) e não em local de permanência prolongada dos ocupantes.



Figura 4 – Fachada do Centro de P&D da Saint-Gobain com vidros eletrocromicos. Fonte: SAINT-GOBAIN, 2021.

Uma das maiores fabricantes de vidros eletrocromicos, a Sage Electrochromics, possui sede nos Estados Unidos e representação comercial na Europa, Oriente Médio e Índia, e pertence ao grupo da Saint-Gobain. Em consulta ao diretor de desenvolvimento de negócios da Saint-Gobain nos Países Baixos (*Netherlands*), Brian Hansen (2018)³; e ao então diretor da Saint-Gobain Research Brasil, Paul Houang (2018)⁴, não havia interesse em comercializar o vidro eletrocromico no mercado brasileiro devido ao alto custo para o consumidor final e à falta de profissionais qualificados para a personalização e a instalação dos controles. Nos países em que o Sage Electrochromics atua ativamente, o custo do sistema era, no início de 2018, de aproximadamente US\$ 80/ft² a US\$ 120/ft², incluindo os vidros, o cabeamento elétrico e os controles. O preço final seria de US\$ 861,11/m² a US\$ 1.291,67/m², ou R\$ 4.434,72/m² e R\$ 6.652,10/m², em reais por metro quadrado⁵, sem considerar impostos e taxa de importação. Esta variação de preço ocorre em

³ HANSEN, B. **Website Lead: Brazil**. Destinatário: Eliane H. Suzuki. [São Paulo], 12 fev. 2018. 3 mensagens eletrônicas.

⁴ Informação fornecida por Paul Houang durante reunião no Centro de P&D da Saint-Gobain. Capivari, 2018.

⁵ Considerando US\$ 1,00 = R\$ 5,15; cotação de 23/06/2022 (<https://www.bcb.gov.br/conversao>).

função da complexidade do sistema; por exemplo, se todos os módulos ou panos de vidro operassem com o mesmo tipo de controle, ou com controles diferentes.

Embora a janela EC tenha sido inicialmente pensada para climas frios, os controles podem ser modificados de forma a atender à demanda para climas quentes, adaptando-se os parâmetros de controle e os respectivos limites para alteração dos estágios do vidro EC.

2.2 Conforto térmico adaptativo

O conceito de conforto térmico teve início com os estudos conduzidos por Fanger (1972) com estudantes em câmaras climatizadas, que deram origem a normas internacionais. A percepção do ambiente térmico, no entanto, pressupõe uma variação de comportamento do usuário ao longo do tempo, iniciando a discussão a respeito do conforto adaptativo e de sua definição, que é baseado em métodos empíricos.

Os primeiros artigos sobre conforto adaptativo foram publicados na década de 1970 e a abordagem ganhou força na década de 1990, quando a ASHRAE (*American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers*) demandou um estudo extensivo para desenvolvimento de um modelo adaptativo a partir da coleta de dados nas principais zonas climáticas no mundo. A ASHRAE 55 foi a primeira norma a incluir o modelo adaptativo, na versão de 2004, na qual foi considerada a avaliação em edifícios sem ventilação mecânica, o que excluía o sistema de ventilação misto. Dois anos após a publicação da ASHRAE, em um projeto europeu denominado SCATS (*Smart Controls and Thermal Comfort*) foi realizado o mesmo estudo em 26 edifícios de escritórios na França, Grécia, Portugal, Suécia e Reino Unido, que daria uma base empírica de conforto adaptativo para a norma EN 15251 na versão de 2007 (DE DEAR et al., 2013).

O escopo geográfico da ASHRAE 55:2004 era global, enquanto a EN15251:2007 se aplicava aos países europeus. Como a amostra de edifícios no estudo norte americano foi maior, a base de dados permitia utilizar modelos de regressão para identificar a temperatura de conforto (neutralidade) em cada edifício. Já no projeto SCATS, foi utilizado o método Griffiths para se chegar à neutralidade, que possui algumas incertezas (DE DEAR et al., 2013).

O modelo adaptativo é definido pela ASHRAE 55 (AMERICAN SOCIETY OF HEATING REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS, 2013) como o modelo que relaciona temperatura do ar interno de projeto ou intervalo aceitável de temperatura do ar, com parâmetros meteorológicos ou climatológicos externos. Sendo assim, tem sido utilizado para justificar a possibilidade de ventilação natural nos edifícios, em que o ambiente térmico é mais heterogêneo.

De Dear e Brager (1998) classificaram o processo adaptativo como fisiológico, comportamental e psicológico, pois envolve a possibilidade de intervir no meio ao permitir que o ocupante decida pela abertura ou pelo fechamento de janelas, e a tolerância maior às variações de temperatura, em função do ajuste das expectativas de conforto e da aclimatação do corpo.

No modelo adaptativo, há a hipótese de que os ocupantes de edifícios com ventilação natural alcancem o conforto térmico considerando um intervalo maior de temperatura do ar interno, quando comparados aos ocupantes de edifícios com sistema de ar condicionado central. Um dos motivos para isto seria o aumento do nível de controle pessoal garantido pelas janelas operáveis (DE DEAR et al., 2013). Quando há, no entanto, fatores externos indesejáveis como ruído e fumaça de escapamento de veículos, o ocupante pode adiar a abertura da janela, suportando uma temperatura interna ainda maior (RIJAL et al., 2012).

Em edifícios comerciais onde há escritórios integrados no estilo *open space* (espaço aberto) sem divisórias, como a densidade de ocupação é maior e há apenas uma janela para várias pessoas, a decisão por abrir ou fechar depende de um consenso. Por isso, existe a tendência em ignorar o desconforto individual, o que em médio a longo prazo pode causar problemas de saúde em seus ocupantes. Ao mesmo tempo, os escritórios deste tipo podem favorecer ações conjuntas de eficiência energética ao permitir a ventilação natural cruzada, além de promover um ambiente colaborativo (O'BRIEN; GUNAY, 2014).

De acordo com o modelo adaptativo da ASHRAE 55 (AMERICAN SOCIETY OF HEATING REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS, 2013) a temperatura neutra operativa (t_{neut}), que é a temperatura operativa na qual a maioria dos ocupantes adaptados ao clima estará em conforto, varia com a temperatura externa média predominante ($t_{pma,o}$):

$$t_{neut}(t) = 0,31 \cdot t_{pma,o}(t) + 17,8^{\circ}\text{C} \quad (2.1)$$

Tanto a temperatura neutra quanto a temperatura média externa variam com o tempo (t). Para 80% de aceitabilidade térmica durante o ano, a ASHRAE 55 (AMERICAN SOCIETY OF HEATING REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS, 2013) define os limites mínimo e máximo de temperatura operativa para conforto térmico, sendo:

$$t_{min}(t) = 0,31 \cdot t_{pma,o}(t) + 21,3 \quad (2.2)$$

$$t_{max}(t) = 0,31 \cdot t_{pma,o}(t) + 14,3 \quad (2.3)$$

A temperatura externa média predominante ($t_{pma,o}$) deve ser baseada nos últimos 7 a 30 dias anteriores ao dia em questão, representando um ambiente térmico externo onde os ocupantes se adaptam sob diversos aspectos, inclusive fisiológico. No caso de simulação térmica dinâmica nas quais os dados de clima externo estão ajustados no formato TMY (*Typical Meteorological Year* – Ano Meteorológico Típico), a temperatura externa média predominante é expressa como uma média móvel exponencial da sequência de médias diárias dos dias anteriores ao dia em questão. Os dias mais distantes têm menos influência na temperatura de conforto dos ocupantes do que os dias mais recentes, conforme a Equação (2.4).

$$t_{pma,o} = (1 - \alpha) [t_{e(d-1)} + \alpha t_{e(d-2)} + \alpha^2 t_{e(d-3)} + \alpha^3 t_{e(d-4)} + \dots] \quad (2.4)$$

Onde α é uma constante entre 0 e 1 que controla a velocidade na qual a média móvel responde às variações de temperatura externa, $t_{e(d-1)}$ representa a temperatura externa média do dia anterior e $t_{e(d-2)}$, do dia antes deste e assim sucessivamente. Os valores recomendados para α são entre 0,6 e 0,9, correspondendo a uma resposta rápida e lenta do clima, respectivamente. Uma média móvel com resposta lenta ($\alpha = 0,9$) pode ser mais apropriada para climas como o tropical úmido, em que a variação de temperatura externa de um dia para outro é menor.

Esta regra vale para as seguintes condições: temperatura operativa entre 10°C e 33,5°C, velocidade do ar abaixo de 0,3 m/s e pessoas em atividade quase sedentária (1 a 1,3 met), considerando que elas irão adaptar suas vestimentas de acordo com a variação da temperatura do ar interno, visto que os limites estabelecidos estão de

acordo com a temperatura do ar externo (AMERICAN SOCIETY OF HEATING REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS, 2013).

No caso de edifícios com ventilação híbrida, que alterna a ventilação natural com o sistema de ar condicionado, há uma discussão sobre o tipo de avaliação do ambiente térmico para conforto. No estudo de Barbadilla-Martín et al. (2017), concluiu-se que o modelo PMV, do conforto térmico proposto por Fanger, superestima o voto de sensação térmica e o modelo adaptativo de conforto é aplicável a edifícios com ventilação híbrida, embora as temperaturas neutras encontradas tenham sido menores do que as calculadas pela ASHRAE 55 e EN 15251, para o estudo de caso em Sevilha. De Vecchi et al. (2017) observaram que as condições internas dos edifícios com ventilação híbrida em Florianópolis/SC flutuavam de acordo com as condições externas, sendo que as temperaturas de bulbo seco registradas variaram de 17°C a 28°C e a temperatura efetiva entre 19°C e 28°C.

Kim et al. (2019) mostraram que o método adaptativo é mais adequado para avaliar ambientes térmicos com ventilação híbrida, já que ocorre uma oscilação maior de temperatura, mesmo que os métodos descritos pela norma ASHRAE 55 (AMERICAN SOCIETY OF HEATING REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS, 2013) sejam destinados a ambientes com ventilação natural. Em função das influências da velocidade do ar e da temperatura radiante média, a temperatura operativa é o principal parâmetro do modelo adaptativo.

Nesta pesquisa o método adaptativo foi utilizado para avaliação de conforto do ambiente térmico considerando a ventilação híbrida; no entanto, trata-se de um método empírico e que está em processo de desenvolvimento. Pode haver limitações em sua aplicação em ambientes de escritório com alta densidade de ocupação, onde não há tanta liberdade para adaptação de vestimentas por parte dos usuários. Como foi utilizado para um ambiente comercial de pequeno porte com a ocupação de duas pessoas, considerou-se que a adaptação pudesse ser mais flexível.

2.3 Ventilação em edifícios

A ventilação em edifícios possui três funções, que demandam diferentes níveis de fluxo de ar dentro de edifícios, que são (1) garantir a qualidade do ar interno a partir da renovação com a tomada de ar externo, (2) garantir conforto térmico em locais de

clima quente aumentando a perda de calor convectivo pelo corpo e (3) resfriar a massa estrutural do edifício durante a noite de forma a manter a temperatura interna abaixo da temperatura externa (GIVONI, 1998).

A influência do movimento do ar natural ou artificial para o conforto térmico é relevante, pois a perda de calor por convecção aumenta quando o movimento do ar aumenta. Esta situação é mais desejada nos trópicos úmidos de baixa latitude quando a temperatura é relativamente alta o ano todo (DJAMILA, 2017). Ao considerar a ventilação natural em janelas, a tendência é que haja um equilíbrio de temperatura entre os ambientes interno e externo. No entanto, não é somente o escoamento que é responsável pelo equilíbrio térmico do ambiente; a radiação influencia significativamente as temperaturas das paredes, ocasionando um efeito no comportamento convectivo das superfícies, assim como na distribuição da temperatura no ambiente e na previsão da temperatura operativa para conforto (MENCHACA-BRANDAN; DOMINGUEZ ESPINOSA; GLICKSMAN, 2017).

Desta forma, tanto a ventilação natural quanto a mecânica podem ser aproveitadas para trazer conforto térmico aos ocupantes dos ambientes, de forma isolada ou combinadas no sistema de ventilação híbrida.

Em todas as regiões climáticas do mundo há momentos em que a temperatura externa é agradável e a ventilação natural é a forma mais simples e efetiva de garantir conforto (GIVONI, 1998). É uma das estratégias passivas de resfriamento mais eficientes, especialmente em climas em que o resfriamento é mais necessário (*cooling dominant climates*) e seu desempenho é influenciado por uma combinação de características de projeto como o modo de ventilação (unilateral ou cruzada), WWR (razão entre área da janela e da parede, da sigla em inglês de *Window to Wall Ratio*), tipo de abertura, área do ambiente (OMRANI et al., 2017), detalhes das janelas, localização na fachada, quantidade, tamanho e orientação (GIVONI, 1998). Embora haja muitas variáveis, o estudo de Costanzo e Donn (2017) indicou que no projeto de janelas, o WWR não deve exceder 0,3 para reduzir a quantidade de ganhos solares e evitar o uso de dispositivos externos de sombreamento, para diversos climas.

Normalmente, a consideração da ventilação natural é baseada na experiência do arquiteto, na utilização da rosa dos ventos e na análise dos dados da zona climática, que não refletem de maneira exata o comportamento da ventilação no microambiente do edifício (GUO; LIU; YUAN, 2015). A ventilação natural é pouco

considerada como estratégia de ventilação, uma vez que há poucas informações de desempenho, assim como normas disponíveis. Schulze e Eicker (2013) realizaram simulações que utilizaram como critérios de controle da ventilação natural o nível de CO₂, o *setpoint* variável de acordo com a temperatura externa para evitar o resfriamento excessivo e limites de valores para a diferença entre a temperatura do ar interna e externa, em um edifício de escritórios. Resultados indicaram que as temperaturas do ar interno excediam o limite máximo do conforto adaptativo nos meses mais quentes, mesmo em climas mais frios, como na Alemanha, devido à carga térmica interna.

Em se tratando de ambientes com alta densidade de ocupação, este tipo de ventilação pode não ser suficiente para o resfriamento do ambiente, sendo necessário considerar um sistema de climatização artificial.

O sistema de ar condicionado surge a partir da necessidade de adaptar o meio às pessoas e tem como objetivo proporcionar bons níveis de conforto térmico e de qualidade do ar interior, através de um processo de tratamento de ar com controle da temperatura, umidade, filtragem e movimentação do ar. É, portanto, necessário em edifícios onde as soluções passivas não sejam suficientes devido, por exemplo, à existência de um código de vestimenta, ou onde não seja permitido modificar facilmente as características do local, como abrir as janelas (HOLMES; HACKER, 2007), devido a fatores como ruído, poeira, insetos, odores e temperaturas extremas (DRAKE et al., 2010). Em edifícios com ar condicionado central, o microclima observado pode ser considerado permanente ao longo do tempo e pode-se afirmar que os ocupantes possuem uma relação de regime estacionário com o ambiente (DE DEAR, 2004). Embora seja possível considerar um ambiente termicamente estável apenas com o sistema de climatização artificial e ventilação mecânica, o custo com o consumo de energia elétrica é relativamente alto.

Nas últimas décadas, a indústria da construção começou a reconsiderar a questão das janelas operáveis em edifícios comerciais, pois a escolha entre janelas operáveis ou fixas está relacionada com a percepção das pessoas sobre o que é um bom ambiente de trabalho, sendo portanto um fator subjetivo (ACKERLY; BAKER; BRAGER, 2011). Uma das primeiras definições deste conceito é de Heiselberg (1999), em que a ventilação híbrida ou MMV (*Mixed Mode Ventilation* – ventilação de modo misto) é um sistema que fornece um ambiente confortável por meio de dispositivos de

ventilação natural e de sistemas mecânicos de ventilação em diferentes momentos do dia ou por estações do ano. Difere-se do sistema convencional de ventilação por ser um sistema de controle inteligente que comuta automaticamente entre o modo de ventilação natural e o mecânico para minimizar o consumo de energia. Como se trata de um método único para cada caso, a forma de operação e os objetivos deste sistema passam continuamente por mudanças (ACKERLY; BAKER; BRAGER, 2011; SALCIDO; RAHEEM; ISSA, 2016).

Além de reduzir o consumo de energia, a ventilação híbrida pode aumentar a satisfação geral do ocupante com o ambiente de trabalho, reduzindo suas exigências e expectativas quanto ao conforto térmico (ACKERLY; BAKER; BRAGER, 2011), já que os ocupantes tendem a ajustar passivamente a abertura de janela, os dispositivos de sombreamento e realizar adaptação de vestuário (DE VECCHI et al., 2017).

A estratégia de MMV apresenta um modo sustentável de condicionamento de edifícios, porém, até o momento não há normas ou diretrizes sobre como simular ou projetar edifícios de escritório com este sistema (BARBADILLA-MARTÍN et al., 2017; SALCIDO; RAHEEM; ISSA, 2016). O gerenciamento do sistema é complexo devido aos tipos de controle e à natureza da operação, já que o controle da ventilação natural depende das condições do ar externo, que devem ser melhores do que o ambiente interno em termos de temperatura, umidade e níveis de contaminantes (GOMIS; FIORENTINI; DALY, 2021). Assim, podem ser encontrados basicamente três tipos de configuração de modo misto de ventilação: (1) Concomitante (*concurrent*), na qual o sistema de ar condicionado e as janelas operáveis funcionam no mesmo espaço e ao mesmo tempo; (2) Alternado (*change-over*), em que o tipo de ventilação é alternado em um mesmo local por meio de programação ou automação; e (3) Por zonas (*zoned*, ou *zoning-mode*), em que diferentes zonas no edifício possuem diferentes estratégias de ventilação (CENTER FOR THE BUILT ENVIRONMENT, 2013; SALCIDO; RAHEEM; ISSA, 2016). A Figura 5 exemplifica o modo de operação alternado, demonstrando o momento em que o sistema de ar condicionado está funcionando e as janelas estão fechadas, já a Figura 6 mostra o modo concomitante, com as janelas abertas e o ar condicionado em funcionamento.

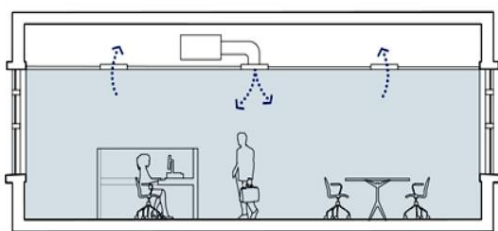


Figura 5 – Operação de ventilação híbrida no modo alternado. Fonte: Center for the Built Environment (2013)

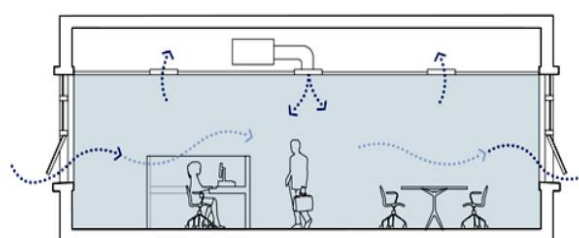


Figura 6 – Operação de ventilação híbrida no modo concomitante. Fonte: Center for the Built Environment (2013)

Quando bem projetados, os três tipos podem gerar benefícios, mas se a operação dos mecanismos de ventilação natural e do sistema de climatização artificial não for realizada de forma apropriada, pode aumentar o custo e a complexidade de operação dos edifícios, frustrando os ocupantes que podem não ter suas necessidades de conforto térmico atendidas. No sistema concomitante pode haver um aumento do consumo de energia se o ar condicionado e a ventilação natural estiverem em conflito, embora não haja estudos que determinem em quais situações isto ocorre. Além disso, a ventilação natural pode não ser desejada devido à presença de poluentes, de agentes alergênicos e de ruído externo (CENTER FOR THE BUILT ENVIRONMENT, 2013). Neste caso, devem ser consideradas variáveis não térmicas, que podem influenciar a expectativa térmica dos ocupantes, como por exemplo a tolerância a temperaturas mais altas devido às características adversas do ambiente externo (RIJAL et al., 2012).

Os edifícios que possuem o sistema de ventilação híbrida têm potencial de redução de 40% do consumo de energia referente à climatização, ao otimizar a rotina de operação das janelas, e acima de 75% ao alternar a ventilação entre natural e mecânica (SALCIDO; RAHEEM; ISSA, 2016). De acordo com o Centro do Ambiente Construído (CBE, sigla em inglês de *Center for the Built Environment*) da Universidade de Berkeley, nos Estados Unidos, a economia de energia pode ser de 15% a 80%, dependendo do clima, da carga térmica e do tipo do edifício (CENTER FOR THE BUILT ENVIRONMENT, 2013). No levantamento de Ledo Gomis; Fiorentini e Daly (2021), estudos realizados no período 2010-2020 indicam uma redução de energia para resfriamento entre 20% e 45% para climas quentes (Csa, Cfa, Csb e Csc, na classificação de Köppen-Geiger). Estudos conduzidos por Zhai, Johnson e Krarti, (2011) mostram que o uso da ventilação híbrida pode resultar em considerável economia de energia com ar condicionado em climas quentes, como o subtropical

úmido, tropical e árido. Belmans et al. (2019) identificaram a viabilidade deste tipo de ventilação em clima Cfb, sobretudo no verão em que a demanda de energia auxiliar é menor; já no inverno seria necessário um dispositivo de recuperação de calor.

Estabelecer a melhor lógica para ventilação híbrida em um edifício não é simples, já que os critérios de operação da ventilação natural e mecânica devem ser considerados ao mesmo tempo, assim como a resposta do edifício a variáveis ambientais. Os edifícios com ventilação de modo misto possuem um controlador que define quando o edifício pode operar com ventilação natural ou quando deve acionar um sistema de ar condicionado baseado em uma configuração de regras pré-determinadas, já que os *setpoints* de temperatura e umidade geralmente são fixos (FIORENTINI et al., 2019).

O parâmetro mais utilizado para controle da ventilação híbrida é a comparação entre temperatura do ar interno e do ar externo, havendo também combinação com a umidade relativa, com indicadores de qualidade do ar (ozônio e material particulado) e com fatores fisiológicos e comportamentais (GOMIS; FIORENTINI; DALY, 2021).

O tipo de controle e os limites utilizados podem variar de acordo com as condições locais de clima. Estudos de avaliação da ventilação híbrida levantados por Ledo Gomis; Fiorentini e Daly (2021) indicaram uma variação de *setpoint* para aquecimento de 20°C e 21°C (média de 20,5°C) e de 23, 24, 25 e 26°C para resfriamento (média de 25°C). A razão entre a área de janela e de piso (WWR, sigla em inglês de *window to wall ratio*) variou entre 20% e 35% e as cargas térmicas internas, entre 10 e 25 W/m².

Fiorentini et al. (2019) desenvolveram um controle baseado na temperatura externa para operação da janela em tipologia residencial, em Wollongong, na Austrália: quando a temperatura externa estivesse entre 20°C e 24°C, a janela permanecia aberta 100%; entre 18°C e 20°C e entre 24°C e 26°C, a abertura seria de 50%. Abaixo de 18°C, o sistema de aquecimento seria ativado, mantendo um *setpoint* de 20°C de temperatura interna do ar e acima de 26°C, o sistema de resfriamento seria ativado, com um *setpoint* de 24°C de temperatura interna. Além disso, foi utilizado um algoritmo de controle que privilegiava a ventilação natural e que alterava a faixa de operação dependendo do modo de ventilação acionado; quando o ar condicionado era acionado, o intervalo era determinado pelo PMV (*Predicted Mean Vote* – Voto médio estimado).

2.4 Simulação computacional de desempenho térmico de janelas

As ferramentas de simulação foram tradicionalmente concebidas para reduzir a complexidade das equações de sistema (CLARKE, 2001), tornando possível a verificação do comportamento térmico e energético da edificação na fase de projeto para a definição de características arquitetônicas e a escolha de materiais de construção. Nos próximos itens estão descritos as ferramentas computacionais e os módulos utilizados nas análises: o Rhinoceros, o EnergyPlus e o LBNL Window.

2.4.1 Modelagem inicial – Rhinoceros e Grasshopper

O Rhinoceros é uma ferramenta que permite realizar uma série de ações para modelagem 3D de objetos diversos. Possui uma plataforma interna, o Grasshopper, que possibilita a interface com plugins para as mais variadas análises, tais com o *Ladybug* que realiza análises climáticas a partir do arquivo climático EPW (*EnergyPlus Weather File*), o *Honeybee*, que roda simulações de modelos energéticos pelo OpenStudio e Therm.

O Grasshopper é um editor gráfico de algoritmos integrado às ferramentas 3D do Rhinoceros. Possui uma estrutura de componentes nos quais são associadas as entradas e saídas para cada objeto do *plugin*. No caso do *Honeybee*, apresenta parte dos objetos do EnergyPlus de forma física, em que os *inputs* são inseridos a partir de uma interface de fluxograma. O *Ladybug* e *Honeybee* têm sido muito utilizados em pesquisas que envolvem desempenho térmico e lumínico em edifícios e no meio urbano.

Além disso, no ambiente do Grasshopper é possível desenvolver simulações paramétricas e utilizar algoritmos genéticos para gerar resultados baseados em variáveis aleatórias, para projetos de otimização com o uso de outros *plugins*, tais como *Galapagos* e *Octopus*, como é o caso de Fang e Cho (2019), que definiram geometrias de janela para melhorar os desempenhos térmico e lumínico, e de Calcerano e Martinelli (2016), que identificaram posições ótimas de árvores ao redor do edifício para reduzir consumo de energia.

O *Honeybee* é conectado ao OpenStudio, que por sua vez utiliza o EnergyPlus para rodar a simulação. No entanto, possui limitações de componentes – nem todos

os objetos podem ser utilizados no ambiente do Grasshopper, a não ser por criação de um código específico. Para uma configuração específica no EnergyPlus, o mesmo deve ser feito diretamente no Editor do IDF (*Input Data File* – Arquivo de dados de entrada), descrito no próximo item.

2.4.2 Módulos da simulação energética – EnergyPlus

O EnergyPlus é um programa de simulação que permite modelar o consumo de energia, sendo baseado em modelos físicos e validado pela norma ASHRAE 140 (AMERICAN SOCIETY OF HEATING REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS, 2020a). Permite a modificação de uma ampla variedade de parâmetros e possui uma comunidade ativa de desenvolvimento e pesquisa (RACKES; MELO; LAMBERTS, 2016). Este programa foi utilizado em 75% dos estudos de simulação para edifícios MMV na última década (GOMIS; FIORENTINI; DALY, 2021) e em 54% das pesquisas levantadas por Feng et al. (2021) para avaliação de desempenho térmico de janelas em edifícios.

Os principais objetos do EnergyPlus que caracterizam a operação da ventilação híbrida são o módulo de ventilação, *Airflow Network*, combinado com o de ar condicionado, *Ideal Loads Air System*, e o controle personalizado pelo *Energy Management System* (EMS). Para a janela EC, utilizam-se os objetos de materiais (*Material*) e construção (*Construction*) e o controle definido pelo EMS para alterar o índice de construção da superfície. Os objetos estão descritos a seguir.

2.4.2.1 Ventilação – *Airflow Network* (AFN)

O módulo *Airflow Network* (AFN) é um modelo de rede de fluxo de ar simplificado, em múltiplas zonas, que representa o edifício como um grupo de zonas, ou nós (*nodes*), conectadas por “caminhos de fluxos”, que por sua vez são delimitadas pelas portas, janelas e outras aberturas (*cracks*) (RACKES; MELO; LAMBERTS, 2016; ROSSI et al., 2019). Os nós podem representar salas, pontos de conexão nos dutos, ou o meio ambiente. Os elementos de fluxo do ar correspondem a passagens discretas como vãos de portas, aberturas na construção, dutos e ventiladores (WALTON, 1989). Os cálculos de pressão e do fluxo de ar determinam a pressão em cada nó e o fluxo de ar através das aberturas é dado pela pressão do vento e pelo

fluxo de ar forçado (U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2020a). O sistema é solucionado iterativamente em cada rodada de simulação (*timestep*) e os fluxos resultantes são passados para a rotina principal de balanço de calor do EnergyPlus para os cálculos de transferência de calor, cargas térmicas e temperaturas.

O objeto AFN não considera os efeitos de distribuição de temperatura dentro da zona. A transferência de calor por condução e o ganho solar através da janela são calculados como se as janelas ou portas estivessem fechadas (U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2020b), por isso o status de abertura da janela leva em consideração o cálculo do fluxo do ar da ventilação natural, portanto a transferência de massa. Mesmo assim, é muito utilizado para simulações de fluxo de ar em edifícios. Martins e da Graça (2016) conduziram estudos de validação e encontraram um erro médio de 23% na vazão volumétrica ao comparar os resultados de simulação com AFN, CFD (*Computational Fluid Dynamics* – Dinâmica dos fluidos computacional) e medições em túnel de vento. Este valor, no entanto, representa um impacto insignificante na temperatura do ar interno (RACKES; MELO; LAMBERTS, 2016), sendo assim o AFN tem sido muito utilizado em estudos de ventilação natural e de infiltração.

As equações para o fluxo de ar através de aberturas verticais utilizadas no EnergyPlus são do Manual COMIS (*Conjunction of Multizone Infiltration Specialists*) (FEUSTEL; RAYNER-HOOSON, 1990). O método de Newton é usado para estabelecer a pressão de ar nos nós e requer uma configuração inicial de valores para as pressões nos nós, que considera coeficiente de vazão mássica do ar, diferença de pressão e viscosidade (U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2020a).

Os objetos essenciais para o módulo AFN são *AirflowNetwork: SimulationControl*, *AirflowNetwork: MultiZone: Zone*, *AirflowNetwork: MultiZone: Surface*, *AirflowNetwork: MultiZone: Component: DetailedOpening*, em que são definidas as configurações de cálculo, os controles de ventilação e as aberturas. Os tipos de controle podem ser do tipo constante, temperatura, entalpia, ou baseado nos modelos adaptativos de conforto da ASHRAE 55 ou EN 15251. No caso do controle de temperatura, as janelas e portas se abrem se a temperatura do ar da zona for maior do que a temperatura externa e maior do que a temperatura de *setpoint*. O mesmo acontece com o controle de entalpia, que compara a entalpia específica do ar da zona e do ar externo. A modulação da abertura ocorre de acordo com a diferença de

temperatura e de entalpia interna e externa (U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2020b).

2.4.2.2 Sistema de ar condicionado – *Ideal Loads Air System*

Os objetos que caracterizam o sistema de Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado (AVAC) são do *Ideal Loads Air System*, que considera um sistema ideal que fornece a energia necessária para resfriamento ou aquecimento. Este sistema foi utilizado em 58% dos casos das simulações para avaliação de ventilação híbrida nos artigos publicados entre os anos de 2010 e 2020 (GOMIS; FIORENTINI; DALY, 2021)

O *Ideal Loads Air System* oferece um sistema que insufla o ar condicionado para a zona de forma a atender aos requisitos de carga térmica. Este componente pode ser pensado como uma unidade ideal que mistura o ar de exaustão com a tomada de ar externo, condiciona a mistura e, uma vez insuflado no ambiente adiciona ou remove calor e umidade com uma eficiência de 100%, produzindo uma corrente de ar de insuflamento com as condições especificadas. A energia necessária para condicionar o ar de insuflamento é medida e reportada como *District Cooling* (Refrigeração distrital) para resfriamento e *District Heating* (Aquecimento distrital) para aquecimento nos relatórios do EnergyPlus (U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2020b).

Para determinar se a unidade precisa de aquecimento ou de resfriamento, é realizada uma comparação entre a carga térmica da zona e a previsão do ar externo em contribuir para o aumento ou para a redução do calor sensível do ambiente. Verifica-se então o tipo de termostato e as temperaturas limites para definir o modo de resfriamento ou de aquecimento. Se nenhuma das condições forem satisfeitas, a unidade entra no modo de banda morta, fornecendo ar externo, mas sem gerar demanda de energia para insuflamento de ar frio ou ar quente (U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2020a). A vazão do ar externo é considerada de acordo com a especificada e então calcula-se a vazão mássica de ar de insuflamento para atender a carga de calor sensível da zona à temperatura limite de insuflamento. Depois, estabelece-se a temperatura do ar de insuflamento para manter o balanço térmico à vazão mássica de ar requerida, porém limitada ao *setpoint* de temperatura.

Os dados de saída necessários para avaliar o desempenho da unidade, para resfriamento, são (U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2020b):

- *Zone Ideal Loads Supply Air Total Cooling Energy*: corresponde à energia consumida pela serpentina do sistema ideal para resfriar e desumidificar o ar de insuflamento.
- *Zone Ideal Loads Zone Total Cooling Energy*: é a energia total de resfriamento (sensível e latente) entregue para a zona, considerando o também o ar externo.
- *Zone Ideal Loads Outdoor Air Total Cooling Energy*: é a energia total de resfriamento (sensível e latente) para condicionar o ar externo à temperatura e umidade do ar da zona de exaustão.

O mesmo acontece para as variáveis de saída *Zone Ideal Loads Supply Air Total Heating*, *Zone Ideal Loads Zone Total Heating Energy* e *Zone Ideal Loads Outdoor Air Total Heating Energy*, porém indicando a demanda de energia para aquecimento.

2.4.2.3 Controles personalizados – *Energy Management System* (EMS)

O módulo do *Energy Management System* (EMS) do EnergyPlus oferece uma forma de desenvolver controles personalizados e modelar as rotinas para o modelo IDF, sobrepondo aspectos pré-existentes no programa. A fim de descrever os algoritmos de controle, é utilizada uma linguagem de programa chamada Erl (*EnergyPlus Runtime Language*) (U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2020c). Trata-se de uma linguagem simplificada que possui instruções de comando, contendo seqüências de declarações, ao utilizar verbos de ação (*run*, *set*, *return*) e condicionais (*if*).

Os objetos básicos do grupo *Energy Management System* (EMS) são os sensores (*Sensor*), atuadores (*Actuator*), gerenciador do programa (*Program Calling Manager*), e o código do programa (*Program*) e das sub-rotinas (*Subroutine*). Outros objetos podem ser definidos, dependendo das funcionalidades do programa, tais como as variáveis globais, de tendência, de índice da construção e novas variáveis

de saída. Os sensores são estabelecidos a partir das variáveis de saída (*Output: Variable*), que fazem a leitura dos resultados. O código do programa contém sequências de ação e condicionantes associados a sensores e atuadores (o que deve ser feito a partir de determinados resultados lidos pelos sensores). Os atuadores são limitados e definidos no arquivo EDD, que apresenta detalhes operacionais do EMS, e podem sobrepor recursos pré-estabelecidos. Dentro do gerenciador do programa é possível determinar em que momento da simulação o programa roda o código próprio (U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2020c).

Com o EMS é possível acessar uma grande variedade de dados de sensores e usá-los para direcionar vários tipos de ação de controle. O conceito é emular, dentro do EnergyPlus, os tipos de controle possíveis com sistemas de gerenciamento de energia digitais utilizados em edifícios reais (U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2020b).

2.4.2.4 Iluminação natural – *Splitflux*

O EnergyPlus possui dois métodos para cálculo da luz do dia, associados à simulação energética, o *Delight* e o *SplitFlux*. O *SplitFlux* é o método a partir do qual é possível determinar o impacto da iluminação natural no consumo de energia, baseado na disponibilidade de luz do dia, condições do local, gerenciamento da janela em resposta ao SHGC e ao ofuscamento, e várias estratégias de controle de iluminação (U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2020a).

Os algoritmos utilizados no modelo de iluminação do *EnergyPlus* são simplificados, fornecendo uma estimativa aproximada do potencial de economia de energia com o controle da iluminação, assim como alerta para o potencial de ofuscamento com grandes aberturas. Para resultados com maior confiabilidade, deve-se utilizar o Radiance, associado a outros programas de interface gráfica (BRACKNEY et al., 2018).

Para a resposta ao controle de sistemas complexos de vidros como o eletrocromico, o *SplitFlux* seria mais adequado (U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2020b), do que o *Delight*. Além disso, para esta pesquisa, os resultados de iluminação foram considerados para uma função secundária, por isso optou-se pelo uso do *Splitflux*. Este pode ser configurado diretamente no *IDF Editor*, no grupo *Daylighting*,

por meio dos objetos *Daylighting: Control*, *Daylighting: ReferencePoint* e *Output: IlluminanceMap*. Definem-se então os pontos de referência para medição do nível de iluminância a partir de coordenadas, o tipo de controle de iluminação artificial, que pode variar conforme a disponibilidade de iluminação natural até atingir um nível limite, e o grid do mapa de iluminância onde são inseridas as coordenadas do plano x e y, com o número de pontos em cada eixo.

2.4.2.5 Simulação paramétrica – *Parametrics*

O *Parametrics* é um pré-processador utilizado para criar uma série de resultados de arquivos IDF a partir de um único arquivo IDF que contém expressões e objetos paramétricos. Possui quatro objetos no grupo, que são *Parametric: SetValueForRun*, *Parametric: Logic*, *Parametric: RunControl* e *Parametric: FileNameSuffix* (U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2020b). O *ParametricPreprocessor* lê o arquivo IDF, processa os objetos e as expressões embarcadas e remove os objetos *Parametrics*, produzindo uma série de arquivos IDF, um para cada rodada descrita nos objetos (U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2020d).

No primeiro objeto (*Parametric: SetValueForRun*), são estabelecidos os parâmetros a serem alterados e os valores que devem ser substituídos em cada rodada. No segundo, (*Parametric: Logic*) é possível digitar linhas de comando para uma parametrização personalizada. No terceiro (*Parametric: RunControl*), selecionam-se as simulações que deverão ser rodadas e no último (*Parametric: FileNameSuffix*), o sufixo a ser acrescentado no nome do arquivo gerado pelo pré-processador. Se por exemplo, se deseja alterar o WWR de um ambiente para verificar o efeito disto para o consumo de energia com climatização, as variáveis a serem parametrizadas são as coordenadas dos vértices dos objetos que especificam a janela (*FenestrationSurface: Detailed*). Assim, haverá um arquivo IDF com dados e resultados para cada tamanho diferente de janela.

2.4.3 Modelagem da janela – LBNL Window

O Window é um programa computacional desenvolvido pelo LBNL para determinar as propriedades térmicas e óticas solares de vidros e sistemas de janela. (MITCHEL et al., 2019). Possui algoritmos consistentes com a norma de desempenho

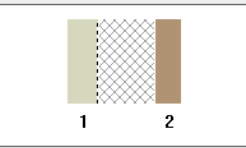
térmico de janelas, portas e dispositivos de sombreamento ISO 15099 (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 2003) e compatibilidade com o *National Fenestration Rating Council* (NFRC), organização norte americana, independente e não-governamental, que certifica produtos como janelas, portas e claraboias para desempenho energético.

Ao especificar o tipo de esquadria, composição de vidros, espaçamentos de ar ou outros gases, espessuras e condições ambientais do NFRC para verão ou inverno, o Window calcula a transmitância térmica, o SHGC e a transmitância visível total da janela e do centro do vidro. Os sistemas de janela são customizáveis, sendo possível determinar também o tipo de abertura, dimensões e as combinações de vidros, quando são do tipo insulado. Quando for necessário detalhar os perfis de caixilho e as propriedades térmicas da esquadria, as informações podem ser compartilhadas com outro programa associado, o Therm.

Os dados dos vidros são obtidos a partir do banco de dados internacional de vidros, IGDB (*International Glazing Database* – Banco de dados internacional de vidros), que é atualizado periodicamente com informações dos fabricantes e revisado pela equipe do LBNL. O IGDB traz as propriedades térmicas e óticas médias e de dados espectrais dos vidros: transmitância solar, refletância solar nas faces frontal e posterior, transmitância visível, refletância visível nas faces frontal e posterior, transmitância do infravermelho, emissividade hemisférica do infravermelho nas faces frontal e posterior, condutividade e fator de correção por uso (sujeira) (MITCHEL et al., 2019). A Figura 7 exemplifica a montagem de uma janela eletrocromica no Window, utilizando as configurações de vidros do IGDB.

Após a configuração e do cálculo das propriedades térmicas e óticas da janela, o arquivo pode ser exportado para o EnergyPlus, em formato IDF, sendo que os dados de entrada podem ser do tipo média (*Average*), utilizados no objeto que especifica as propriedades térmicas do vidro (*WindowMaterial: Glazing*), ou de espectro do vidro (*Spectral*) que pode ser inserido no objeto que detalha os dados óticos do vidro por comprimento de onda (*WindowProperty: GlazingSpectralData*).

ID #: 50 Name: SageGlass_7_SR2
 # Layers: 2 Tilt: 90° IG Height: 1000.00 mm
 Environmental Conditions: NFRC 100-2010 Summer IG Width: 1000.00 mm
 Overall thickness: 24.990 mm Mode: Model Deflection
 Use switching Parameter Value: 0.677 T_{vis} Run



	ID	Name	Mode	Thick	Flip	Tsol	Rsol1	Rsol2	Tvis	Rvis1	Rvis2	Tir	E1	E2	Cond	Comment
-	Glass 1 ▶▶	8905 SageGlass_7_SR2_60c	#	7.0	<input type="checkbox"/>	0.409	0.138	0.145	0.677	0.120	0.080	0.000	0.839	0.140	0.679	
	Gap 1 ▶▶	9 Air (10%) / Argon (90%)	t	12.0												
-	Glass 2 ▶▶	21392 REFLECTASOL 6mm.SC		6.0	<input type="checkbox"/>	0.530	0.376	0.329	0.321	0.535	0.466	0.000	0.846	0.840	1.000	

Center of Glass Results Temperature Data Optical Data Angular Data Color Properties Radiance Results Dynamic Properties

Switching Parameter	System Properties									
Layer T _{vis}	Tsol	Abs1	Abs2	Rfsol	Rbsol	Tvis	Rfvis	Rbvis	SHGC	
0.677	0.188	0.517	0.045	0.250	0.403	0.228	0.377	0.475	0.272	
0.199	0.188	0.851	0.012	0.250	0.403	0.228	0.377	0.475	0.272	
0.145	0.188	0.855	0.009	0.250	0.403	0.228	0.377	0.475	0.272	
0.064	0.188	0.886	0.004	0.250	0.403	0.228	0.377	0.475	0.272	
0.011	0.188	0.883	0.001	0.250	0.403	0.228	0.377	0.475	0.272	

Figura 7 – Configuração de composição de janela no Window 7.7. Fonte: Elaborado pela autora, 2022

2.5 Otimização multiobjetivo

Os processos de simulação computacional para desempenho energético possibilitaram prever o comportamento térmico das edificações para determinados climas. Para melhorar esta análise, uma das primeiras abordagens desenvolvidas foi o método da simulação paramétrica, que permite variar alguns parâmetros de projeto e verificar os seus efeitos nas funções objetivo, enquanto outras variáveis são mantidas constantes. No entanto, como resulta em uma grande quantidade de dados sem interação linear com as variáveis, as otimizações numéricas têm sido as mais empregadas (ASCIONE et al., 2015), podendo reduzir o custo computacional.

Os problemas multiobjetivos são difíceis de resolver, uma vez que geralmente é impossível identificar uma única solução ótima que satisfaça plenamente a todos os critérios. Quando há uma grande quantidade de dados, para orientar uma tomada de decisão, o processo de resolução pode envolver a conversão do problema multiobjetivo em um objetivo único antes do processo de otimização (a priori) ou a realização da otimização multiobjetivo para obter uma série de solução não

dominadas (a posteriori) (PETCHROMPO et al, 2022). A fronteira de Pareto é um exemplo do método a posteriori, que foi selecionado para esta pesquisa.

A otimalidade de Edgeworth-Pareto ou Pareto ótimo, é um modelo matemático pertencente à pesquisa operacional utilizado para se obterem soluções ótimas a partir de um conjunto de dados com mais de uma função objetivo e que são conflitantes entre si (Figura 8). É normalmente utilizado nos problemas de engenharia, da indústria e na área financeira, nos casos em que não há somente uma única solução (SOARES, 2014).

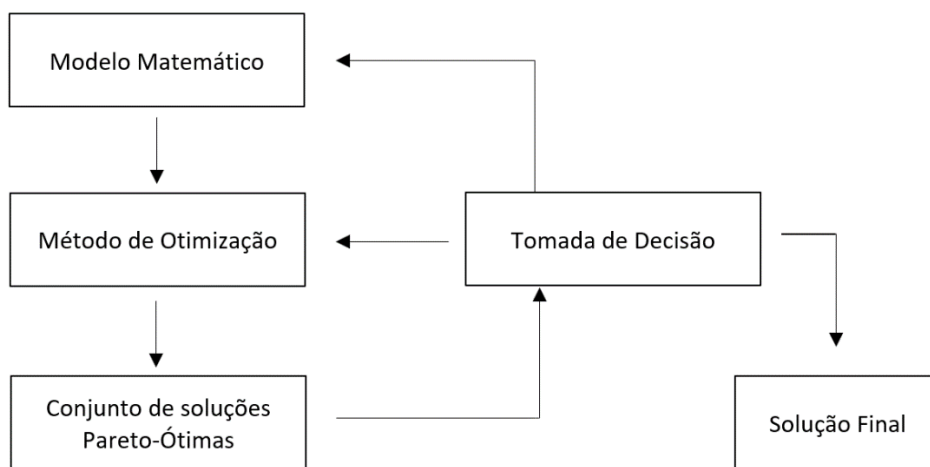


Figura 8 – Estrutura da otimização multiobjetivo. Fonte: Adaptado de Soares (2014)

Por exemplo, se uma solução A é melhor do que B (A desempenha melhor do que B) de acordo com um critério ou função objetivo, mas B é melhor do que A em outro critério e as duas soluções são igualmente ótimas, os dados de saída são um conjunto de soluções ótimas localizadas na fronteira de Pareto (LONGO; MONTANA; RIVA SANSEVERINO, 2019).

A análise com fronteira de Pareto foi realizada em estudos prévios, a fim de encontrar soluções ótimas ao conciliar conforto térmico e luminoso, ou conforto e consumo de energia. Zhao e Du (2020) levantam quatro funções objetivo (consumo de energia para aquecimento, resfriamento, iluminação e conforto térmico) em um edifício de escritórios em quatro cidades na China. Os resultados indicaram conflitos entre consumo de energia para resfriamento e para iluminação. Zhai et al (2019) definiram as funções objetivos de consumo de energia, desempenho luminoso e térmico para as soluções ótimas para janela em termos de tamanho, orientação e tipos de vidros, para uma célula-teste. Verificou-se que o consumo de energia é

inversamente proporcional ao desempenho luminoso, que por sua vez, é proporcional ao nível de desconforto térmico.

Outros tipos de análise também foram realizados. Na revisão de Hashempour, Taherkhani e Mahdikhani (2020), levantaram-se estudos de avaliação de otimização em *retrofit*, em que foram utilizados múltiplos critérios ambientais, sociais e econômicos; como exemplos podem ser citados consumo e demanda de energia, emissão de CO₂, ganho solar, período de retorno de investimento e conforto térmico. No artigo de revisão de Longo, Montana e Riva Sanseverino (2019), verificou-se que os estudos de otimização para edifícios com baixo consumo de energia tinham foco primeiramente em reformas e depois em projetos, referindo-se mais a materiais de envoltória e ao desempenho do sistema de ar condicionado, sendo que as funções objetivo foram concentradas em custo e em consumo de energia.

2.5.1 Formulação geral do problema de otimização multiobjetivo (MOOP)

Um problema de otimização multiobjetivo pode ser formulado da seguinte forma (BAZARRA; SHERALI; SHETTY, 2006):

$$\begin{aligned} & \text{(MÍN ou MÁX)} \quad f(x) = (f_1(x), f_2(x), \dots, f_n(x)) \\ \text{sujeito a (s. a.):} \quad & \begin{cases} g_j(x) \leq 0 & j = 1, 2, \dots, n_{des} \\ h_k(x) = 0 & k = 1, 2, \dots, n_{igu} \\ x_j \in \mathfrak{R} & i = 1, 2, \dots, n_{var} \end{cases} \end{aligned} \quad (2.5)$$

Sendo que $g_j(x)$ e $h_k(x)$ são as funções de restrições, \mathfrak{R} é um subconjunto definido pelo espaço das variáveis de decisão ou espaço de decisão e $x = (x_1, x_2, \dots, x_{n_{var}})^T$ é o vetor de variáveis de decisão. Os valores encontrados destas variáveis no processo e otimização constituem a solução do problema.

Para que a solução do problema de otimização multiobjetivo seja factível, é necessário atender às n_{des} restrições de desigualdades, às n_{igu} restrições de igualdade e aos n_{var} limites. O conceito Pareto-Ótimo é baseado no conceito de dominância de Pareto, em que, dadas duas soluções arbitrárias factíveis $x, y \in \mathfrak{R}$, diz-se que x domina y se as seguintes condições são satisfeitas (SOARES, 2014):

- $f_m(x) \leq f_m(y)$, para qualquer $m \in \{1, 2, \dots, n_{obj}\}$, ou seja, a solução x é melhor ou igual a y em todas as funções objetivos.

- Existe um $m \in \{1, 2, \dots, n_{obj}\}$ tal que $f_m(x) < f_m(y)$, ou seja, a solução x é estritamente melhor que y em pelo menos um dos objetivos.

Um conjunto de soluções, $\mathfrak{N}_{(P)}$, é denominado Pareto-ótimo, se para cada elemento do conjunto não existir nenhuma outra solução factível que melhore um dos objetivos sem piorar simultaneamente um dos demais objetivos. Denota-se P o conjunto Pareto-ótimo global na qual a imagem deste conjunto é conhecida como fronteira de Pareto-ótima.

No entanto, em alguns casos, os métodos de otimização não são capazes de determinar o conjunto e nem a fronteira de Pareto-ótima. Quando isto ocorre, as soluções não Pareto dominadas obtidas não são necessariamente ótimas. Isso significa que é o melhor que o método conseguiu identificar e, portanto, representam as candidatas à solução do problema.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A pesquisa foi desenvolvida pelo método da simulação computacional, na qual foram testados diversos tipos de controle de ventilação híbrida com diferentes composições de vidros nas janelas para um mesmo ambiente representativo de uma sala comercial. Os vidros são do tipo estáticos – laminados e insulados duplo – e dinâmico, representado pelo eletrocromico.

O método do trabalho teve início com o levantamento das características físicas do modelo, a partir de Pereira (2019) e de referências normativas, definindo a geometria, materiais de construção dos fechamentos verticais e horizontais opacos, perfil de ocupação, densidade de potência elétrica de equipamentos, entre outros. Os tipos e modelos de vidros foram definidos a partir de uma pesquisa de mercado e suas propriedades extraídas do programa Window 7.7.

Posteriormente, analisou-se o arquivo climático de São Paulo, para verificação dos parâmetros ambientais pertinentes ao clima e depois os cálculos dos limites mínimos e máximos diários do modelo de conforto térmico adaptativo, de acordo com a ASHRAE 55 (AMERICAN SOCIETY OF HEATING REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS, 2013). Verificou-se o comportamento das variáveis ambientais ao longo do dia e do ano, de forma que os dias puderam ser divididos em nove grupos de dias.

A modelagem foi desenvolvida no Rhinoceros, através do Grasshopper, com o Ladybug e Honeybee, e depois exportado para o EnergyPlus.

Foi rodada uma simulação denominada ‘zero’, sem ventilação, para verificar o comportamento da edificação ao longo do ano. Realizou-se uma análise mais detalhada dos nove dias de análise, em que se estabeleceram os limites de controle para alteração dos estágios da janela eletrocromica e dos *setpoints* da ventilação híbrida. Depois, foi realizada uma primeira rodada de simulações paramétricas, com todas as combinações de vidros para janelas, sendo escolhida uma unidade de cada tipo – laminada, insulada dupla e insulada dupla com eletrocromico.

A partir daí, foram realizadas as simulações paramétricas com todas as combinações possíveis, entre tipos de composição de vidro, tipos de controle de ventilação híbrida e tipos de controle de vidro eletrocromico (quando aplicável).

A fim de testar os limites dos controles em zonas bioclimáticas brasileiras extremas, portanto 1 e 8, conduziram-se simulações paramétricas para as cidades de Curitiba (ZB1) e Recife (ZB8) para se estabelecer a relação entre tipos de clima e desempenho das janelas. No total, foram 98 simulações para as três localidades, cujos resultados estão no Capítulo 4. Consideraram-se também estudos com ventilação noturna para verificar o potencial de economia de energia e de conforto térmico.

Por fim, definiram-se as combinações ótimas para os climas subtropicais e tropical brasileiros, trazendo uma discussão sobre a associação de variáveis e de que forma podem contribuir como diretrizes de projeto.

Nos itens a seguir estão descritos, de forma detalhada, os dados de entrada, configurações, lógicas de controle, normas e o fluxo de trabalho. A Figura 9 contém um resumo das variáveis de entrada das simulações, assim como os programas utilizados.

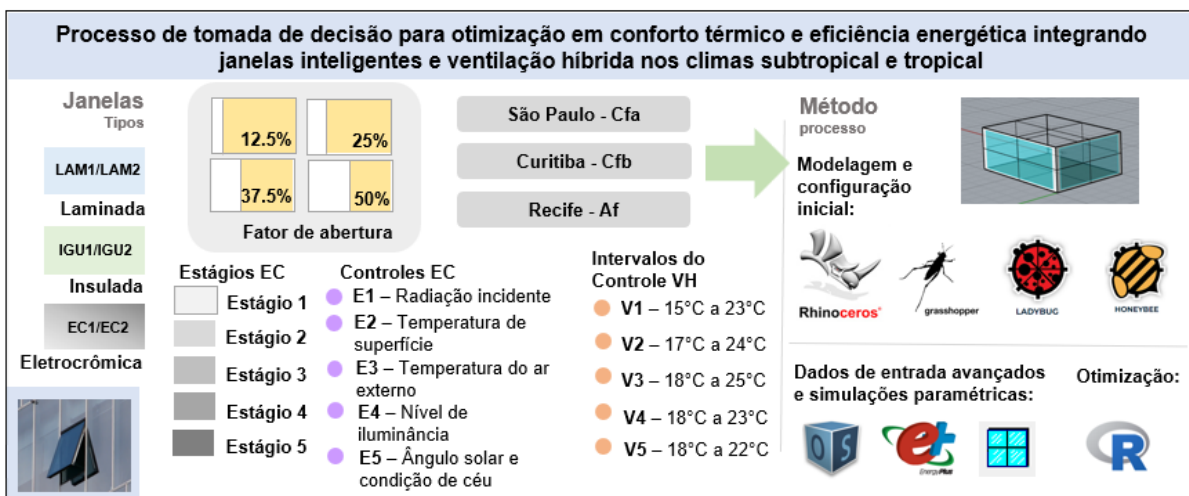


Figura 9 – Resumo das variáveis de entrada e do método. Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

3.1 Delimitação do objeto de estudo

3.1.1 Seleção do clima

O estudo teve início para a cidade de São Paulo, cujo clima é o subtropical úmido (Cfa) conforme classificação de Köppen-Geiger, caracterizada pelas altas temperaturas no verão (19°C a 27°C em janeiro) e temperaturas amenas no inverno (12°C a 22°C em julho) sem uma estação seca definida (Figura 10).

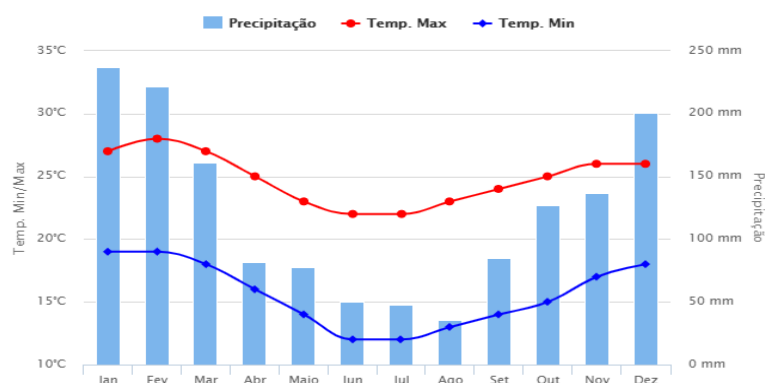


Figura 10 – Médias climatológicas de São Paulo – série de dados de 30 anos. Fonte: Climatempo (2022)

O clima Cfa de Köppen-Geiger está presente em 33,4% do território do estado de São Paulo e em 6,5% do território nacional, basicamente no centro sul do país, em uma faixa que vai do sudoeste de São Paulo até o sudeste do Rio Grande do Sul (ALVARES et al., 2013). Coincide com uma área de alta densidade demográfica (Figura 11 e Figura 12), portanto trata-se de um clima relevante para estudos em conforto térmico. As médias de temperatura diária ao longo do ano favorecem o uso da ventilação natural, exceto no verão. Na Figura 11, as cores representam os tipos de clima de Köppen-Geiger, sendo que os tons de azul são do tipo A, amarelo do tipo B, e verde do tipo C. O verde claro, que representa o Cfa de São Paulo, abrange o sul do estado de São Paulo, os estados da região Sul e uma pequena parte do Mato Grosso do Sul. A Figura 12 apresenta a densidade demográfica do Brasil, sendo que quanto mais para o vermelho, mais densa é a região. O amarelo claro apresenta densidade de menos de 10 habitantes/km², enquanto o vermelho, mais de 100 habitantes/km².

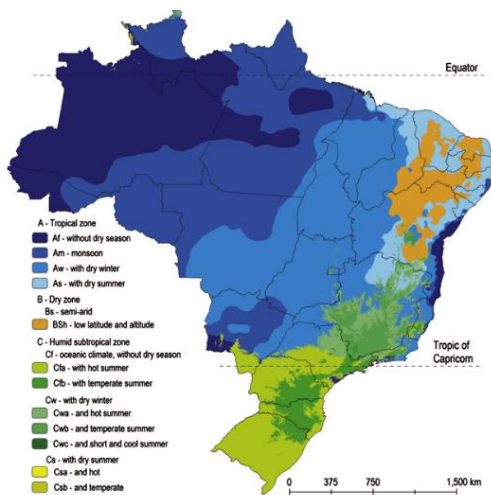


Figura 11 – Classificação dos climas do Brasil, de acordo com os critérios de Köppen-Geiger.
Fonte: Alvares et al. (2013)

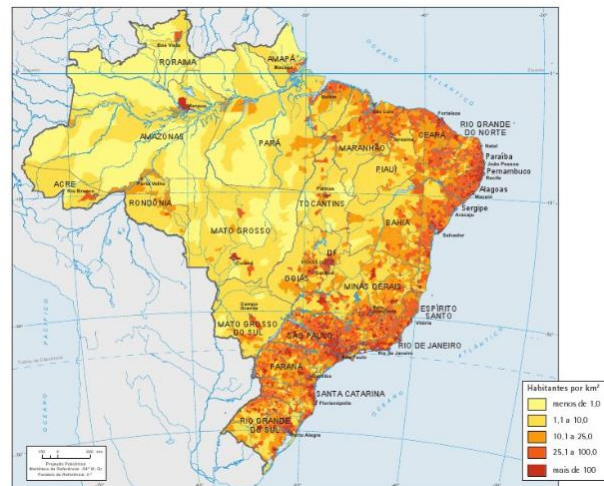


Figura 12 – Densidade demográfica do Brasil, ano base de 2010. Fonte: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2012)

3.1.2 Características do modelo

O processo de modelagem teve início primeiramente no ambiente do Rhinoceros 6.0. A partir da plataforma do Grasshopper, foram utilizados os complementos Ladybug 0.67 e Honeybee 0.64, na qual foram inseridos os dados de entrada iniciais para a simulação energética. Tais complementos possibilitaram uma interface com o OpenStudio e o EnergyPlus 8.9. Depois, o arquivo foi exportado para o EnergyPlus 9.4, em que foram realizadas as configurações avançadas de objetos. A ideia do uso do Honeybee inicialmente foi pela possibilidade da simulação paramétrica. No entanto, devido às limitações de objetos no Honeybee que não possibilitava o uso Energy Management System, a parametrização foi realizada a partir do próprio EnergyPlus.

O modelo foi concebido de forma que representasse uma sala comercial de pequeno porte na cidade de São Paulo. Para isto, foi utilizado o banco de dados desenvolvido por Pereira (2019), contendo dados físicos de uma quantidade representativa de conjuntos comerciais de edifícios de escritório em São Paulo, nos quais houvesse a possibilidade de ventilação híbrida, o que significa permitir tanto a abertura de janelas como o acionamento do sistema de ar condicionado em um mesmo ambiente.

Considerou-se que não haverá mudanças na tipologia de edifícios comerciais nas próximas décadas, assim como dos sistemas construtivos a serem empregados,

justificando o uso do levantamento de edifícios existentes de Pereira (2019) para aplicação de novas tecnologias.

Os edifícios corporativos de médio e grande porte não foram considerados por não permitirem a ventilação natural, ou por conter muitas variáveis que pudessem interferir na avaliação do ambiente térmico, tais como abertura e fechamento de janelas de forma aleatória e ocupação flutuante (com variação de 50 a 100 pessoas por dia, por exemplo).

Assim, foram analisadas as informações do banco de dados dos imóveis comerciais de Pereira (2019), referentes a: largura, comprimento, profundidade, pé-direito, tamanho das janelas, tipo de abertura da janelas (correr, maxim-ar, basculante), orientação solar das janelas, entre outros. A partir disso, foi selecionado o formato retangular, correspondente ao de maior frequência encontrada na amostra e selecionadas as dimensões a partir da mediana: 4,85 m x 8,20 m x 2,47 m (largura x comprimento x pé-direito), com janelas posicionadas nas fachadas Norte e Oeste, uma vez que a maior ocorrência do levantamento era de janelas em fachadas adjacentes. Além disso, posicionar duas ou mais janelas de orientações diferentes permite a ventilação cruzada. Optou-se por estas orientações por serem mais críticas em termos de desempenho térmico e possuírem mais demanda por sombreamento, já que para a latitude de São Paulo, na fachada Norte há uma incidência direta de radiação solar durante o dia todo e na maior parte do ano, e na Oeste, durante o período da tarde. A altura do pavimento considerada foi de aproximadamente do sexto andar, que corresponde à média do banco de dados.

O ambiente foi então modelado com dimensões de 5,20 m x 8,55 m x 3,50 m (largura x comprimento x pé-direito) para contemplar as espessuras de paredes internas e externas (U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2020e), além de uma zona térmica adicional para o entreferro de 0,85 m. O modelo foi elevado a 21,0 m acima do nível do solo. As paredes de divisa (leste e sul) e lajes foram consideradas adiabáticas, enquanto as paredes norte e oeste foram atribuídas como externas, expostas ao sol e ao vento. As janelas possuem dimensões de 1,23 m x 2,46 m na face oeste e 1,23 m x 4,08 m na face norte, centralizadas nas paredes correspondentes, com um WWR total de 26,2%.

Foram definidas duas zonas térmicas para o conjunto, sendo: (1) de escritório, no ambiente de ocupação, que contém as duas janelas e (2) do ático, no volume entre

o forro e o teto, como demonstrado na Figura 13. A Figura 14 indica a planta baixa do modelo, sendo que a linha tracejada representa os limites da zona térmica. A área útil da sala é de $35,2 \text{ m}^2$, e da zona térmica, $44,46 \text{ m}^2$.

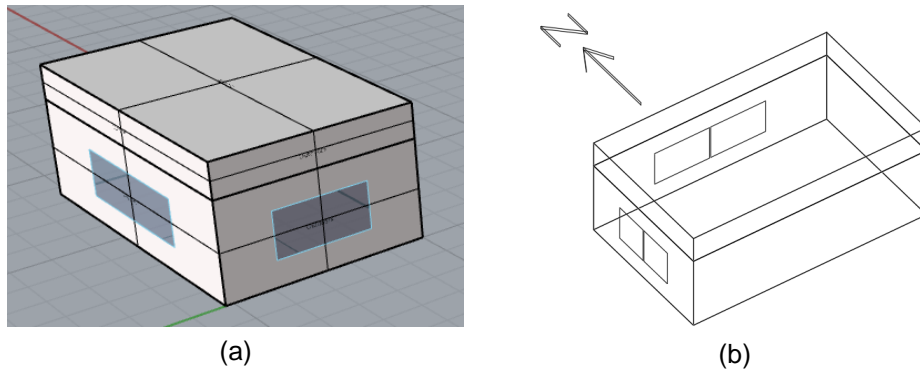


Figura 13 – Modelo tridimensional da sala comercial, com visualizações geradas pelo (a) Rhinoceros e (b) Autodesk AutoCAD em dxf, com indicação de Norte.
Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

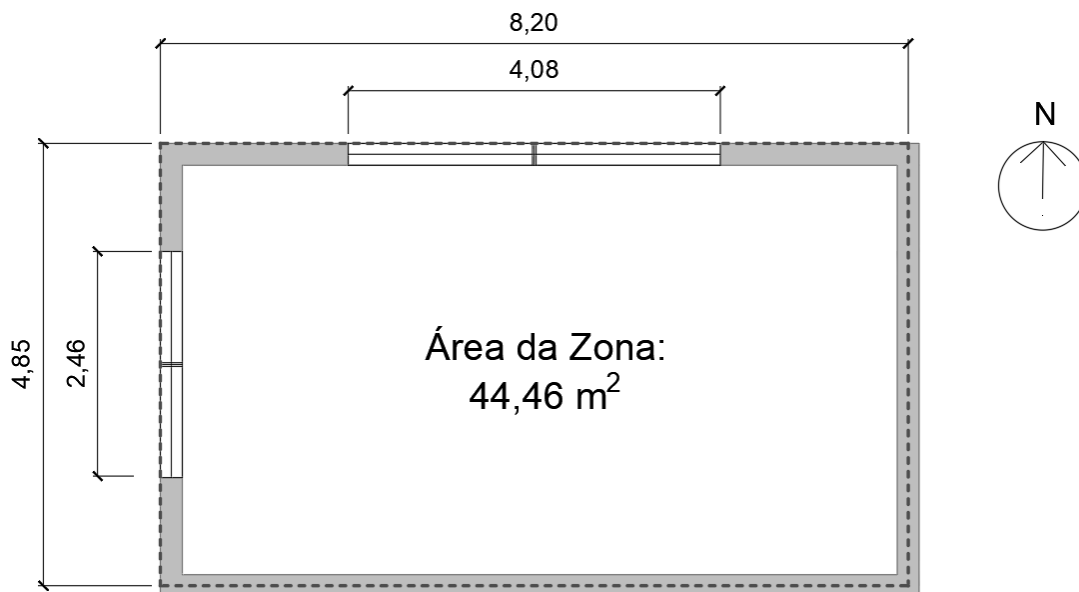


Figura 14 – Planta baixa da sala comercial com indicação dos limites da zona térmica (linha tracejada). Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

O sistema construtivo da envoltória da sala comercial foi de alvenaria de blocos de concreto e lajes de concreto, que é mais comumente utilizado nos edifícios em São Paulo (PEREIRA, 2019). As informações de propriedades térmicas dos materiais de parede, piso, forro e cobertura foram extraídas da norma ABNT NBR 15220-2, de Desempenho Térmico de Edificações – Parte 2: Método do cálculo da transmitância

térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2005b) e de Bergman et al. (2015). Na Tabela 3 há dados de espessura, condutividade, densidade de massa aparente, calor específico e aspereza dos materiais de construção dos elementos opacos do modelo.

Tabela 3 – Propriedade térmica dos materiais de construção dos modelos

Sistema	Espessura (mm)	Condutividade λ (W/m.K)	Densidade ρ (kg/m³)	Calor específico c (kJ/kg.K)	Aspereza
Parede					
Bloco de concreto	190	0,9	1600	0,92	Muito rugoso
Argamassa comum	15-20	1,15	2000	1	Rugoso
Gesso projetado	5	0,5	1000	0,84	Liso
Piso					
Laje de concreto/ contrapiso	150	1,75	2300	1	Rugoso
Forro					
Forro modular de gesso	25	0,35	800	0,84	Liso

Fonte: Adaptado de Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2005b e Bergman et al., 2015

Embora a norma ABNT NBR 15220 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2005b) seja direcionada à habitação de interesse social, os dados de propriedade térmica dos materiais podem ser utilizados na tipologia comercial, uma vez que há sistemas construtivos e materiais em comum a ambos os tipos de edificação.

A ocupação do escritório foi considerada com o mínimo de carga térmica interna possível, baseada em referências normativas; portanto, com baixa densidade de ocupação de pessoas, luminárias mais eficientes e densidade leve de potência de equipamentos. A programação de ocupação foi definida por duas pessoas na maior parte do tempo (100% das 8:00h às 12:00h, e das 14:00h às 19:00h) e por uma pessoa (50%) das 12:00h às 14:00h, no período do almoço. A taxa metabólica dos ocupantes é de 1,2 met (sendo que 1 unidade metabólica = 1 met = 58,2 W/m²), que corresponde a uma atividade leve típica de escritórios. A vestimenta varia de acordo com a época do ano, sendo de 0,57 clo no verão e na primavera, e 0,96 clo no inverno e no outono (1 unidade de clo = 1 clo = 0,155 m².K/W). Os valores foram definidos a partir da ISO 7730 (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 2005).

Adicionalmente, para compor a carga térmica interna foi considerada uma densidade de potência de iluminação de 6,88 W/m², recomendada pela norma

ASHRAE 90.1 (AMERICAN SOCIETY OF HEATING REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS, 2019a), que especifica uma densidade máxima permitida de $0,64 \text{ W/ft}^2$ ($6,88 \text{ W/m}^2$) para escritórios compartimentados e do tipo planta aberta (*open-plan*). Tais valores vêm diminuindo a cada versão da norma, sobretudo com a regulamentação das lâmpadas LED, que oferecem mais eficiência luminosa com uma menor potência.

O Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos (RTQ-C) (BRASIL, 2010) estipula uma densidade de potência de iluminação de $9,7 \text{ W/m}^2$ para o Nível A, pelo método da área do edifício; porém sua primeira portaria data do ano de 2010, em que predominavam as luminárias com lâmpadas fluorescentes.

Quanto à densidade de potência de equipamentos, foi estipulado um valor de $5,4 \text{ W/m}^2$, adequada para uma carga leve, para uma ocupação de $15,5 \text{ m}^2$ por posto de trabalho, composto por um conjunto de computador, monitor e impressora, de acordo com a norma ABNT NBR 16401, de instalações de ar condicionado (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008).

3.2 Extração de dados do arquivo climático

O arquivo climático de São Paulo Congonhas 837800 SWERA foi utilizado como base para análise. Os dados foram extraídos a partir do pré-processador *Weather Converter* do EnergyPlus, que transforma o arquivo EPW (EnergyPlus *Weather data*, dados de clima do EnergyPlus) em planilha eletrônica. O arquivo contém informações de 29 variáveis de 8760 horas para um ano típico.

Foram escolhidos alguns dias do ano para uma análise mais detalhada do comportamento da temperatura do ar externo e do ar interno a fim de estabelecer uma proposta de intervalo dos controles para ventilação híbrida. Para isto, selecionou-se uma variável para definir o critério de agrupamento de dias equivalentes – no caso, a temperatura do ar externo no início do expediente de trabalho, às 8:00h – e definidos os dias que representariam os demais dias do mesmo grupo, para simplificação da análise.

Na mesma planilha eletrônica do arquivo climático, obtiveram-se os intervalos diários de temperatura operativa para conforto adaptativo ao longo do ano,

considerando os critérios da norma ASHRAE 55 (AMERICAN SOCIETY OF HEATING REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS, 2013), especificados em 4.2, para determinação dos limites inferiores e superiores de temperatura operativa diários de forma a garantir 80% de aceitabilidade do ambiente térmico pelos seus ocupantes. Embora houvesse a ventilação híbrida, o modelo adaptativo foi utilizado para avaliação de 100% das horas ocupadas.

Obtiveram-se as temperaturas limites mínima e máxima diárias a partir da média ponderada exponencial dos sete dias anteriores ao dia em questão, para todo o ano. Para isto, calculou-se a temperatura externa média predominante ($t_{pma,o}$) a partir da Equação (2.4, utilizando o coeficiente $\alpha = 0,8$. Depois, os limites mínimos e máximos foram calculados a partir das Equações (2.2 e (2.3. Desta forma, cada dia possui um intervalo diferente de temperatura de conforto, e no caso de dias próximos, a variação é pequena. Por exemplo, para o dia 10 de fevereiro, foram consideradas as médias de temperatura do ar externo dos sete dias anteriores (dias 9, 8, 7, 6, 5, 4 e 3 de fevereiro). Os resultados para temperatura operativa mínima e máxima foram de 20°C e 27°C, respectivamente, o que significa que a temperatura operativa ambiente do dia 10 de fevereiro deve estar entre 20°C e 27°C para garantir conforto térmico à maioria dos ocupantes.

3.3 Dados de entrada avançados no EnergyPlus

Após a modelagem gráfica e as configurações básicas, no EnergyPlus foram inseridos os módulos para cálculo da demanda por energia de resfriamento e/ou de aquecimento e do *Airflow Network*, representando a ventilação natural. As propriedades de vidros foram incrementadas com dados do Window 7.7.

A partir do código Erl do EMS desenvolveram-se os controles de janela para alteração do status do vidro EC considerando vários parâmetros, e para ventilação híbrida, condicionando a abertura da janela ao funcionamento do sistema de climatização artificial. Houve também a simulação da luz do dia pelo método de SplitFlux, para verificação das condições luminosas, como parâmetro secundário.

Nos próximos itens estão descritos o processo de desenvolvimento dos arquivos para simulação.

3.3.1 Ventilação natural e climatização artificial

Os objetos ativados para a ventilação natural fazem parte do módulo de *Airflow Network* (AFN). A ventilação foi considerada como constante, para que sua ativação e desativação, assim como a modulação da abertura, fossem reguladas pelo código Erl no EMS. Cada janela foi dividida em duas partes, a folha direita e a esquerda, sendo uma fixa e outra móvel. A folha esquerda conta com abertura total (100%) e é controlada pelo AFN para as janelas Oeste e Norte.

No objeto *AirflowNetwork: SimulationControl*, o coeficiente de pressão do vento definido pelo cálculo da média de superfície, que é utilizado para edifícios de formato retangular e controle do tipo zonas múltiplas sem distribuição de ar, para simular o fluxo de ar direcionado pelo vento.

Em *AirflowNetwork: Multizone: Zone*, o controle de ventilação foi considerado como constante, para que fosse modificado somente pelo EMS. O uso do controle por temperatura do AFN não permitia que houvesse índices de abertura pré-determinados.

Em *AirflowNetwork: Multizone: Component: DetailedOpening*, foram especificadas as condições das janelas. Quando as janelas estiverem fechadas, a infiltração considerada foi com coeficiente de fluxo de massa de ar de 0,00058 kg/s.m, coeficiente de descarga de 0,001 e expoente de 0,65, adequado para escoamento de ar através de edifícios, em que há uma mistura de fluxo laminar e turbulento (URQUHART; RICHMAN, 2014). Quando abertas, o fator de abertura é de 1 (100%) e coeficiente de descarga de 0,6. Já para o sistema de climatização, considerou-se o módulo do *Ideal Loads Air System*. Adicionalmente, foram utilizados os objetos de termostato com *setpoint* duplo, para aquecimento e resfriamento, em *ZoneControl: Thermostat* e *ThermostatSetpoint: DualSetpoint* e tomada de ar externo em *DesignSpecification: OutdoorAir*.

As configurações gerais incluem temperatura do ar de insuflamento de 13°C para resfriamento e 50°C para aquecimento, sem controle de demanda de ventilação e nem sistema de recuperação de calor. Os limites de temperatura estabelecidos para o termostato foram do tipo constante, de 20°C para aquecimento e 24,5°C para resfriamento. Procurou-se basear nos limites de critérios de projeto da norma ISO 7730 (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 2005), para o

resfriamento, porém no caso do *setpoint* de aquecimento, como a variação de temperatura é relativamente pequena ao longo do ano para o clima subtropical úmido, poderia haver uma sobreposição de condições de resfriamento e aquecimento em um mesmo dia, sobretudo nos dias de inverno. Desta forma, embora a norma especifique um valor de 22°C, estabeleceu-se um *setpoint* de aquecimento de 20°C a fim de aumentar a faixa de banda morta. Este assunto também será discutido no item 3.3.3.2.

A vazão de ar externo, em *DesignSpecification: OutdoorAir*, foi definida a partir dos critérios da norma ASHRAE 62.1 (AMERICAN SOCIETY OF HEATING REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS, 2019b) que estabelece que a vazão de ar externa necessária para a zona de respiração (V_{res}) dos espaços ocupados não deve ser inferior à definida pela Equação (3.1).

$$V_{res} = R_p \cdot P_z + R_a \cdot A_z \quad (3.1)$$

Onde R_p é a vazão de ar externo requerida por pessoa (L/s.pessoa); P_z é a população da zona, em número de pessoas durante a ocupação; R_a é a vazão de ar externo requerida por unidade de área (L/s.m²) e A_z é a área da zona ocupada, (m²). Para ambientes de escritório, R_p é de 2,5 L/s.pessoa e R_a é igual a 0,3 L/s.m². Desta forma, a vazão de ar externo definida como dado de entrada em *DesignSpecification: OutdoorAir* foi a soma entre 0,0025 m³/s.pessoa e 0,0003 m³/s.m².

3.3.2 Extração dos dados de composição de janela no Window 7.7

Para que fossem obtidos valores espectrais de cada camada de vidro, as janelas foram modeladas separadamente no Window 7.7, utilizando o banco de dados internacional de vidros, *International Glazing Database*, IGDB v 76.0. Foram consideradas as composições de vidro laminado, insulado duplo (IGU) e insulado duplo eletrocromico (IGU EC), com as composições descritas na Tabela 4. Selecionou-se um modelo simplificado de esquadria, do tipo personalizado com visão dupla na horizontal (*custom dual vision horizontal*). O Apêndice 1 contém equações para o método de cálculo unidimensional de vidros simples e insulados.

Tabela 4 – Descrição da composição das janelas modeladas no Window 7.7

Nome	Descrição
LAM1	Duas lâminas de 4 mm Cool-Lite ST 120 + 0,38 mm de PVB
LAM2	Duas lâminas de 4 mm Cool-Lite KNT 155 + 0,38 mm de PVB
IGU1	6 mm monolítico clear + 12 mm de espaço de ar + 6 mm Cool-Lite ST 136
IGU2	8 mm Cool-Lite KNT 155 + 12 mm de espaço de ar + 6 mm Cool-Lite ST 136
IGU_EC1	6 mm monolítico clear + 12 mm 90% Argônio + 7 mm SageGlass SR 2.0
IGU_EC2	8 mm Cool-Lite KNT 155 + 12,7 mm 90% Argônio + 7 mm SageGlass SR 2.0

Fonte: Adaptado de Window 7.7 (2022).

A Figura 15 contém os perfis das composições de janela, extraídos do Window 7.7. As linhas tracejadas indicam a presença de camada Low-E. Nas composições insuladas, o lado esquerdo se refere ao interno e o direito, ao externo.

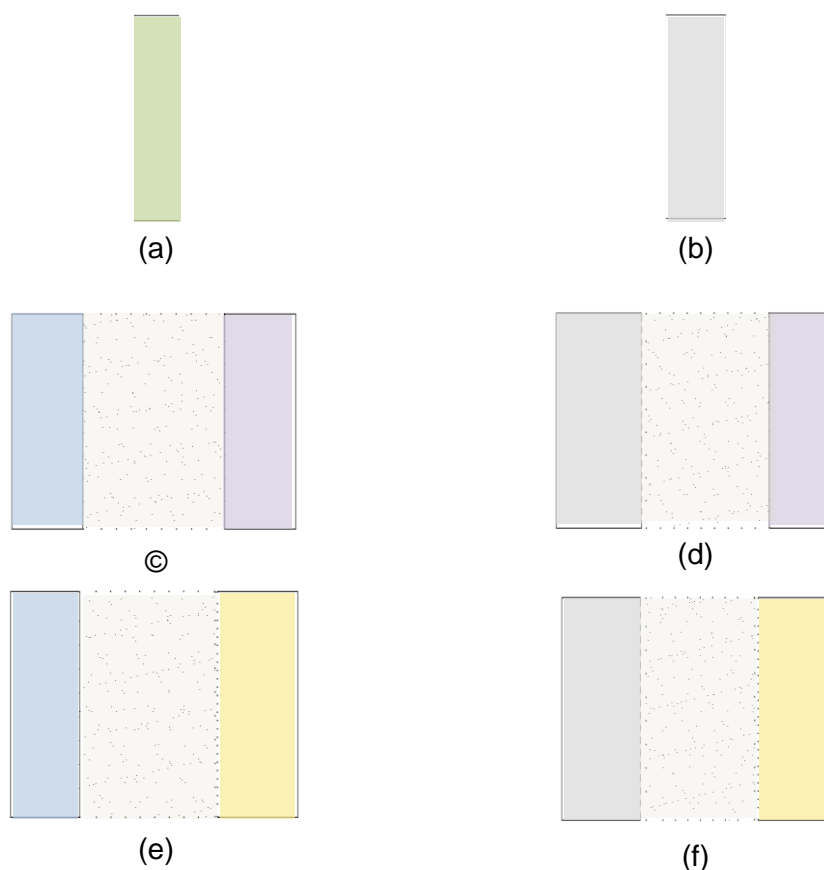








Figura 15 – Perfil das janelas estudadas (a) LAM1 (b) LAM2 (c) IGU1 (d) IGU2 (e) IGU EC1 (f) IGU EC2. Fonte: Adaptado de Window 7.7 (2022)

	Cool Lite ST-120 laminado 8 mm
	Cool Lite KNT-155 laminado 8 mm
	Clear monolítico 6 mm
	Cool Lite ST-136 monolítico 6 mm
	SageGlass SR2.0 7 mm
	Espaço de 12 mm (Ar ou Argônio 90%)

Em consulta a empresas processadoras de vidros planos, obteve-se a informação que no mercado da construção em São Paulo o tipo laminado é o mais

utilizado em fachadas de edifícios comerciais, principalmente os reflexivos com aspecto de cores cinza ou prata. Os modelos selecionados para simulação foram indicados por Martins⁶, da PKO do Brasil, e Ferrari⁷, da Cebrace, como os mais vendidos no primeiro semestre de 2020, para os tipos laminado e insulado duplo: o Cool-Lite ST 120 possui um aspecto externo reflexivo prata e o Cool-Lite ST 136, semi-reflexivo prata; os modelos da linha “S” são os mais vendidos no Brasil. O Cool-Lite KNT 155, de cor neutro-acinzentada, é de uma linha superior ao ST e possui uma camada Low-E, e também estava na lista dos mais vendidos.

No caso do vidro EC, utilizou-se uma composição mais comum em especificações pelo fabricante SageGlass e também empregada em pesquisas referidas anteriormente (DUSSAULT; GOSSELIN, 2017; DUSSAULT; SOURBRON; GOSSELIN, 2016; FRATTOLILLO et al., 2019; HOON LEE; JEONG; TAE CHAE, 2020; LEE; CLAYBAUGH; LAFRANCE, 2012). Os dados estavam disponíveis em documentos oficiais de declaração ambiental de produtos – *Environmental Product Declaration* – EPD (SAGE, 2016) e confirmado por Hansen⁸, da equipe da SageGlass na Europa, como potencialmente adequadas para o clima de São Paulo.

As demais especificações de tipos e espessuras de vidro foram determinadas de acordo com práticas de mercado, catálogos comerciais e requisitos técnicos normativos. No catálogo de produtos da linha Cool Lite de vidros de proteção solar da Cebrace, as informações técnicas sobre fatores luminosos e energéticos são referentes a composições de vidro laminado de 8 mm, com película de PVB incolor de 0,38 mm, e de insulado de 24 mm, com vidros monolíticos de 6 mm e espaço de ar de 12 mm (CEBRACE, 2019). As normas ABNT NBR 7199, de vidros na construção civil (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2016) e ABNT NBR 16015, de vidro insulado (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2012) estabelecem que no caso de vidros verticais insulados para uso em edificações, a peça de vidro interior deve ser de vidro laminado ou aramado, por questões de segurança. Assim, consideraram-se os dois tipos de vidro na camada interna das janelas insuladas, de 6 mm e de 8 mm.

⁶ MARTINS, V. **Solicitação de informações – pesquisa USP**. Destinatário: Eliane Hayashi Suzuki. [São Paulo], 16 jul. 2020. 3 mensagens eletrônica.

⁷ FERRARI, D. **Solicitação de informações – pesquisa USP**. Destinatário: Eliane Hayashi Suzuki. [São Paulo], 13 out. 2020. 1 mensagem eletrônica.

⁸ HANSEN, B. **Website Lead: Brazil**. Destinatário: Eliane H. Suzuki. [São Paulo], 12 fev. 2018. 3 mensagens eletrônicas.

A camada Low-E foi adicionada às composições para avaliação do desempenho térmico e desconforto localizado por assimetria radiante. Na janela eletrocromica, a superfície externa pode ficar muito quente em função da absorção da radiação solar em seu estado mais escuro, transmitindo o calor para a camada de vidro. Já com uma composição insulada contendo uma camada Low-E, a temperatura da superfície interna da janela pode ficar próxima à temperatura do ar ambiente (LEE et al., 2006b), reduzindo a chance de desconforto localizado.

As propriedades térmicas de cada composição para a Janela Norte estão demonstradas na Tabela 5, que contém dados de transmitância térmica (U), SHGC e transmitância visível (TV). Estes parâmetros são calculados pelo programa Window 7.7 após a montagem de composição.

Tabela 5 – Resumo das propriedades térmicas das composições da janela Norte

Tipo de janela	Espessura (mm)	U (W/m².K)	SHGC	TV (%)
LAM1	8	5,14	0,32	0,18
LAM2	8	2,98	0,41	0,46
IGU1	24	3,28	0,35	0,29
IGU2	26	2,47	0,28	0,17
IGU_EC1	24,99	2,25	0,39 0,11	0,53 0,01
IGU_EC2	26,99	2,10	0,35 0,10	0,31 0,01

Fonte: Adaptado de Window 7.7 (2022)

Os dados dos vidros foram exportados para o IDF, a partir dos objetos, *WindowMaterial: Glazing* e *MaterialProperty: GlazingSpectralData*. Este último contém informações de transmitância e refletância para cada intervalo de comprimento de onda dentro do espectro solar, para os vidros especificados na Figura 15.

Embora o perfil da esquadria não tenha sido detalhado, para as simulações com a sala comercial sem a ventilação natural (portanto, 100% climatizadas artificialmente) que não contava com os objetos do Airflow Network, considerou-se uma taxa constante de infiltração de ar pela janela de acordo com a norma ABNT NBR 10821-2, de Esquadrias para edificações (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2017). A Tabela 6 apresenta o desempenho em função da permeabilidade do ar, para os níveis Mínimo, Intermediário e Superior, sendo que os dados de ‘Vazão por área’ correspondem à vazão de ar por área de janela (m³/h.m²).

Tabela 6 – Níveis de desempenho das esquadrias quanto à permeabilidade do ar

Critério	Mínimo (M)	Intermediário (I)	Superior (S)
Vazão por área	62,45 m ³ /h.m ² a 163,52 m ³ /h.m ²	6,66 m ³ /h.m ² a 62,44 m ³ /h.m ²	< 6,65 m ³ /h.m ²
Vazão por comprimento	15,61 m ³ /h.m a 40,88 m ³ /h.m	1,66 m ³ /h.m a 15,60 m ³ /h.m	< 1,65 m ³ /h.m

Fonte: Adaptado de NBR 10821-2 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2017)

Para inserção dos dados no IDF do EnergyPlus, em *ZoneInfiltration: DesignFlowRate*, a vazão foi estabelecida a partir do nível superior, de 6,65 m³/h.m², multiplicando este valor pela área de janela para encontrar a vazão total, convertendo para m³/s e depois ponderando pela área de piso. Para a configuração das janelas Norte e Oeste com áreas de 9,1 m² no total, a vazão de projeto é de 0,0003785 m³/s.m². Esta vazão é independente da tomada de ar externo do sistema *Ideal Loads Air System* e foi considerada como constante.

3.3.3 Controles de janela

Estabeleceram-se dois tipos de controle de janela com o código Erl, sendo um que altera o índice de construção (*construction index*) e o outro a abertura de janela. Em ambos os casos, foram determinados *setpoints* de variáveis ambientais a partir dos quais são definidos os limites para as ações de abertura e de fechamento de janela e de alteração das propriedades do vidro EC.

Uma peculiaridade de operação do EMS é que a leitura do sensor ocorre no *timestep* corrente e a atuação no *timestep* seguinte, fazendo com que haja um atraso (*time lag*) correspondente a um período de cinco minutos.

Nos próximos subitens estão detalhados o desenvolvimento dos códigos Erl a partir do objeto *Energy Management System* para a janela eletrocromica e para a ventilação híbrida. Importante ressaltar que cada janela foi modelada em duas partes, conforme a Figura 16. A folha direita (cinza) é fixa e opera com o controle EC correspondente (E1 a E5). A folha esquerda (azul) é controlado pelo AFN e tem fator de abertura de até 1 (100%), portanto é móvel; ao abrir, define-se o estágio mais claro e ao fechar, é operada como a folha direita, de acordo com o controle EC. Desta forma, considerando a área total da janela (esquerda + direita), o fator de abertura total é de 50%, sendo 100% de abertura do lado esquerdo.

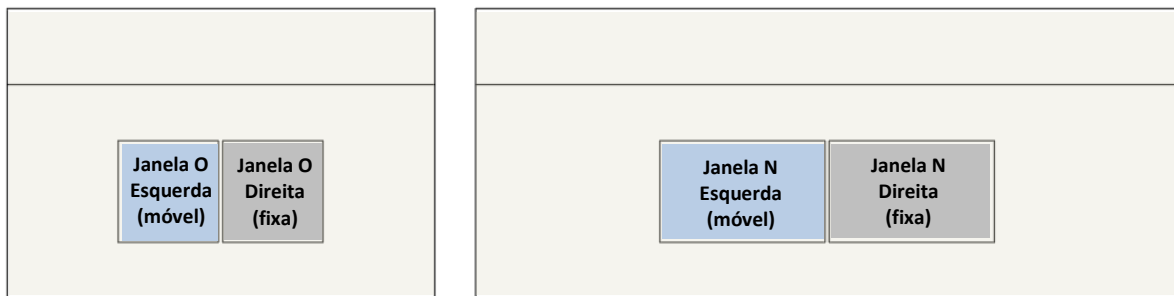


Figura 16 – Vistas lateral direita e frontal do modelo, mostrando a divisão das janelas oeste e norte, respectivamente. Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

3.3.3.1 Controle para vidro eletrocromico

A janela EC possui uma camada eletrocromica junto ao vidro externo, que apresenta cinco estágios com propriedades diferentes de transmitância solar e visível. No IGDB as informações aparecem como se fossem cinco tipos de vidros, mas agrupados sob o mesmo nome. No IDF, cada um deles possui dados de transmitância e refletância para intervalos do espectro solar e em *Construction*, a janela EC é modelada como se fossem cinco janelas distintas.

No EMS, é possível associar cada objeto do *Construction* a uma variável de índice da construção (*EnergyManagementSystem: ConstructionIndexVariable*) e sob condições específicas, alterar a superfície em *FenestrationSurface: Detailed*. Tais condições podem ser determinadas por uma regra baseada na leitura pelo sensor, associada a uma variável de saída e respectiva atuação que atribui o índice de construção. Para que a mudança pudesse ser feita a cada *timestep*, o método de atualização da frequência do cálculo de sombreamento (*ShadowCalculation*) deve ser feita da mesma forma, a cada *timestep*.

Os controles da janela EC foram levantados no item 2.1.3, a partir dos controles utilizados em pesquisas recentes e de sistemas de controle de fabricantes. Depois, foram comparados com as variáveis de saída da lista RDD (de variáveis regulares) do EnergyPlus, para que pudessem representar os sensores no EMS. A Tabela 7 contém tais parâmetros, associados também a sensores físicos, com a intenção de trazer informações úteis a medições reais; dados de saída do EnergyPlus conforme o relatório RDD e as unidades de medida. O primeiro parâmetro, de incidência de radiação solar direta na janela, apesar de não estar diretamente descrito no sistema

de automação de fabricantes, foi incluído por ser um indicador adequado e amplamente utilizado em estudos prévios, conforme citado em 2.1.3.

Tabela 7 – Relação entre os parâmetros dos estudos citados para os controles EC e as variáveis de saída do EnergyPlus

	Parâmetro	Sensores reais	Sensores EMS ***	Unidade
1	Radiação incidente na fachada	Piranômetro	<i>Surface Outside Face Incident Solar Radiation Rate per Area</i>	W/m ²
2	Temperatura de superfície externa da janela	Termopares e sensores de temperatura de superfície	<i>Surface Window Front Face Temperature Layer 1</i>	°C
3	Iluminância na fachada	Sensor fotométrico	<i>Site Exterior Horizontal Beam Illuminance e Site Exterior Horizontal Sky Illuminance</i>	Lux
4	Temperatura do ar externo	Sensor de temperatura do ar (RTD, termopares)	<i>Zone Outdoor Air Drybulb Temperature</i>	°C
4	Ocupação	Sensor de movimento ou infravermelho	<i>People Occupant Count</i>	-
5	Hora do dia e estação do ano	Não há	<i>Schedule</i>	Dias Horas
6	Ângulo solar	Piranômetro	<i>Surface Outside Face Beam Solar Incident Angle Cosine Value</i>	Radianos Graus (0 a 180°)
7	Condição de céu	Não há	<i>Site Total Sky Cover</i>	Índice (0 a 10)

Fonte: Elaborado pela autora (2022).

*** Os termos dos sensores EMS estão em inglês, pois se referem aos objetos descritos em *Output: Variable* do EnergyPlus.

Para o parâmetro 1, de radiação incidente na fachada, considera-se a radiação incidente total na superfície externa da janela, que abrange a radiação direta, difusa e refletida do solo e de outras superfícies externas, em W/m². O parâmetro 2, de temperatura de superfície, é a temperatura média da superfície externa, em °C. O parâmetro 3 considera duas variáveis de saída, cuja soma fornece a iluminância externa total: a iluminância do feixe horizontal externa e a iluminância horizontal externa produzida por céus com uma distribuição de luminâncias uniforme, ambos em um plano horizontal desobstruído na superfície da Terra, em lux. O parâmetro 4 é a própria ocupação, que fornece o valor em números inteiros de pessoas. O parâmetro 5 é realizado a partir de uma programação pré-definida, que pode ser fixa ou variável ao longo do ano, baseada em dados conhecidos do clima em questão. O parâmetro 6

se refere ao valor do cosseno do ângulo de incidência solar do feixe na superfície externa (não refletido), sendo que varia de 0,0 para o feixe paralelo à superfície da janela (ângulo de incidência de 90°) até 1,0 para o feixe perpendicular à superfície (ângulo de incidência de 0°), podendo apresentar valores negativos se o sol estiver atrás da superfície. Por fim, o parâmetro 7 apresenta a cobertura total do céu, em valores fracionados de 0 (céu claro) a 10 (totalmente encoberto).

Para definir os controles, foram propostas combinações de parâmetros e de intervalos de operação para cada estágio de janela EC, como será descrito em 3.4. Os dados de saída de *Output: Variable* (da quarta coluna da Tabela 7) foram inseridos como sensores em *EnergyManagementSystem: Sensors*. Em alguns casos, os parâmetros foram agrupados de forma que dois ou mais sensores fossem utilizados em conjunto para tomada de decisão.

Em *EnergyManagementSystem: Actuators*, determinaram-se os atuadores que alteram a superfície da construção; o tipo de controle pré-definido é o *Construction State*. Em *EnergyManagementSystem: ProgramCallingManager*, o ponto de intervenção durante a simulação foi o *BeginZoneTimestepBeforeInitHeatBalance*, isto é, que ocorre no início de cada *timestep* antes da execução do balanço térmico, porém depois do gerenciamento climático, sendo útil para controlar componentes que afetam a envoltória do edifício, incluindo superfícies da construção, sombreamento de janelas e de outras superfícies (U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2020c).

O *EnergyManagementSystem: Program* contém a condição de rodar as sub-rotinas se houver ocupação, caso contrário, é estabelecido o estado mais claro da janela EC, tanto para a Norte quanto para a Oeste. Em *EnergyManagementSystem: Subroutine*, estão as sub-rotinas que ditam as regras da mudança de status do vidro EC, contendo um grupo de sentenças SE-ENTÃO (*IF-THEN*). Basicamente, no código consta a verificação dos dados de saída do sensor no *timestep* anterior e então define qual estágio do EC deve ser aplicado ao *timestep* atual, a partir de um intervalo pré-definido de valores.

E por fim, em *EnergyManagementSystem: ConstructionIndexVariable*, há os cinco objetos que estão relacionados às composições de janela EC definidas em *Construction*. É como se houvesse cinco janelas diferentes, que seriam trocadas a cada *timestep* dependendo da decisão do atuador.

Em *Output: Variable* foram inseridos os dados de saída específicos, utilizados como sensores EMS com um valor chave (*Key Value*), que no caso é o nome da construção da janela. Ainda, foram inseridos outros dados de saída criados a partir do EMS, tais como o índice da construção da superfície (*Surface Construction Index*) para cada janela – que indica, dentro das variáveis de saída, qual o estado do vidro EC em cada um dos 105.120 pontos de dados da simulação anual. No item 4.3 há um fluxograma que sintetiza a lógica de desenvolvimento do código Erl.

3.3.3.2 Controle para ventilação híbrida

A fim de estabelecer um controle de ventilação do tipo alternado ou *change-over*, desenvolveu-se um código baseado em Veiga et al. (2019) e depois comparado com Sakiyama et al. (2021), que relacionaram ocupação, intervalos de temperatura operativa, e temperatura de bulbo seco interna e externa em ambientes residenciais. Ao atender às condições pré-definidas, ativa-se uma ou outra programação de disponibilidade – de ventilação natural associada ao AFN, ou de condicionamento artificial, associado ao *Ideal Loads Air System*. O EnergyPlus possui um objeto para ventilação híbrida, o *AvailabilityManager: HybridVentilation*, que pode utilizar controles para temperatura do ar, temperatura de orvalho e entalpia, mas não atendeu aos propósitos desta pesquisa. Este objeto permite configurar regras gerais de operação, enquanto que neste estudo, consideraram-se controles específicos para cada faixa de temperatura do ar interno.

Para isto, foi necessário criar uma rotina no EMS que ativa o AFN e desativa o *Ideal Loads Air System*, e vice-versa, sob determinadas condições. Por exemplo, nos dias quentes de verão, convém abrir a janela somente se a temperatura do ar externo for menor do que a do ar interno e também que seja propício para que a temperatura do ar da zona se mantenha dentro da faixa de conforto. Esta condição (dentre outras) foi transformada em códigos utilizando a linguagem Erl para personalizar a operação.

Durante o desenvolvimento dos código Erl para o conjunto comercial, foram observadas restrições de operação, aumentando a quantidade de argumentos nas condicionantes; portanto, no código foram incorporadas variáveis para limitar a temperatura externa mínima e máxima para abertura de janela, variáveis de tendência para considerar o histórico dos *timesteps* anteriores, e ajuste da faixa de banda morta

na transição entre fechamento de janela e acionamento do sistema de climatização, ou entre desligamento do sistema de climatização e abertura de janela.

As restrições de operação consideradas foram:

- Acionamento da ventilação híbrida somente durante a ocupação de pessoas.
- A janela é aberta para favorecer o aquecimento ou o resfriamento passivo do ambiente quando desejado, com restrições a partir de 15°C para temperatura mínima do ar externo e de 23°C para máxima como diretriz inicial. Para a ventilação natural, valores inferiores a 18°C de temperatura do ar externo podem causar resfriamento excessivo, por este motivo, para os controles com temperaturas de *setpoint* inferiores a 18°C, foi proposta a abertura parcial e gradativa da janela, de forma a reduzir o resfriamento excessivo e devido à possibilidade de economizar energia pelo sistema de climatização.
- Faixa maior de banda morta (*setpoint* de 20°C para aquecimento e 24,5°C para resfriamento), pois na ventilação híbrida, a variação de temperatura é relativamente alta de um *timestep* para outro – se a banda morta for muito estreita, pode acontecer do sistema ser ativado para resfriamento e poucos *timesteps* depois, para aquecimento.
- Redução da oscilação entre a operação da janela e do sistema de climatização, para evitar o abre e fecha constante da janela ou o acionamento e desligamento do sistema de climatização a cada *timestep*.
- Modulação da abertura a percentuais pré-definidos e de forma gradativa, já que o controle de abertura do AFN baseado em temperatura ocorre em frações que não representam a realidade de um controle automatizado de janela.

O código inicialmente aplicado para a operação da ventilação híbrida possui como lógica o diagrama da Figura 17, que contém as ações do controle V1 para cada intervalo de temperatura de bulbo seco do ar ambiente. A faixa laranja indica o acionamento do sistema de climatização para aquecimento e a faixa verde indica a

possibilidade de ventilação híbrida. O limite entre a faixa laranja e verde, indicado na Figura 17 como 15°C, varia entre os controles utilizados nas simulações paramétricas.

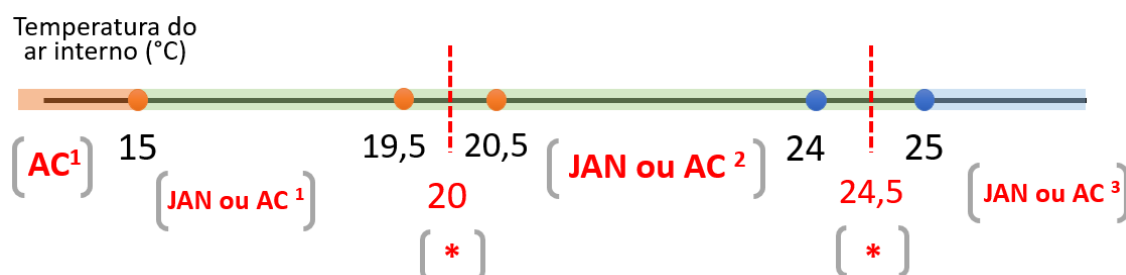


Figura 17 – Diagrama de temperatura interna do ar para o controle V1 de ventilação híbrida. Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

Denominando a temperatura do ar interno como t_a e a temperatura do ar externo como t_{ar_ext} , as legendas do diagrama da Figura 17 indicam o seguinte:

AC¹ – Intervalo em que o sistema de climatização é acionado para aquecimento.

JAN ou AC¹ – Intervalo em que há a abertura de janela se $t_{ar_ext} \geq 15^\circ\text{C}$, caso contrário, o sistema de climatização é acionado para aquecimento. Dependendo da faixa de temperatura, a abertura pode ser parcial ou total.

(*) Intervalos de $\pm 0,5^\circ\text{C}$ do valor de *setpoint* do termostato, sendo de $19,5^\circ\text{C}$ a $20,5^\circ\text{C}$ para aquecimento e $24,0^\circ\text{C}$ a 25°C para resfriamento, que possuem uma condição especial. Em ambos os intervalos, é utilizada uma variável de tendência, que busca o resultado do *timestep* anterior e a soma dos últimos seis *timesteps* (30 minutos) para decidir se repete a operação no *timestep* atual ou se altera para a outra condição. Este mecanismo garantirá que a janela ficará aberta por pelo menos 30 minutos, ou que o ar condicionado se manterá ligado por 30 minutos, até que se decida por alternar o modo de ventilação.

JAN ou AC² – Intervalo em que a abertura de janela ocorre de forma gradativa se $15^\circ\text{C} \leq t_{ar_ext} \leq 23^\circ\text{C}$. O sistema de climatização é acionado se $t_{ar_ext} < 15^\circ\text{C}$ e se $t_{ar_ext} > 23^\circ\text{C}$. Trata-se de uma faixa intermediária entre aquecimento e resfriamento, mas a tendência é que a ventilação híbrida se aproxime do *setpoint* de resfriamento, devido à carga térmica interna, que eleva a temperatura do ar interno.

JAN ou AC³ – Intervalo em que a abertura total da janela ocorre se $t_{ar_ext} \leq 23^\circ\text{C}$. Caso contrário, o sistema de climatização para resfriamento é acionado.

No *EnergyManagementSystem: Sensor*, foram estabelecidos três objetos para operação da ventilação híbrida, que são ocupação, temperatura do ar interno (*zone mean air temperature*) e temperatura do ar externo (*zone outdoor air dry bulb temperature*) associados à zona térmica da sala comercial. Outros dois sensores foram criados para que pudessem aparecer como dados de saída, a fim de se conferir a efetividade do controle: um atrelado à programação de disponibilidade da ventilação natural no AFN, e outro atrelado à programação de disponibilidade do sistema de climatização artificial, utilizado no *Ideal Loads Air System*. O nome do dado de saída associado é “*Schedule Value*”, que seria o valor da programação, retornando valores binários, 0 ou 1.

Os atuadores, em *EnergyManagementSystem: Actuator*, são referentes às programações de disponibilidade, sendo que o tipo de controle também é o *Schedule Value*, e ao de fator de abertura, pelo componente *Airflow Network Window/Door Opening*. Em *EnergyManagementSystem: ProgramCallingManager*, o ponto de chamada do código Erl é *BeginTimestepBeforePredictor*, que ocorre no início de cada *timestep*, porém antes de calcular a carga térmica da zona, que é adequado para o controle de componentes que afetam a carga térmica para o sistema AVAC/R (U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2020c). Assim como para o vidro EC, em *EnergyManagementSystem: Program*, há uma condição que chama a sub-rotina se houver ocupação na zona, caso contrário estabelece a programação de disponibilidade como zero, isto é, janela fechada e demanda por resfriamento/aquecimento desativada.

Em *EnergyManagementSystem: Subroutine*, há um código Erl com um grupo de sentenças SE-ENTÃO (IF-THEN) que estabelecem as ações de abertura e fechamento de janela, assim como o acionamento ou desligamento do sistema de climatização artificial de acordo com as faixas de temperatura do ar interno e externo. Tomou-se o cuidado para manter a ventilação híbrida alternada, de forma que quando o AFN é ativado, o *Ideal Loads Air System* é desativado, e vice-versa, e para que a abertura da janela ocorresse de forma parcial quando a temperatura do ar externo estivesse muito baixa, gradativa em temperaturas intermediárias, e total em temperaturas mais próximas ao limite superior de admissão da ventilação natural.

As variáveis de tendência foram declaradas em *EnergyManagementSystem: TrendVariable* e seus tipos e valores foram definidos no início da sub-rotina. Três

destas variáveis se referem à programação de disponibilidade e retornam os valores 0 ou 1 (*schedule value*) sendo estabelecidas para verificar o status da ventilação híbrida:

- Status da janela no último período de 5 minutos, que resgata o *schedule* ligado ao objeto AFN (1 – disponível/ 0 – não disponível).
- Status do sistema de ar condicionado no último período, que resgata o *schedule* ligado ao *Ideal Loads Air System* (1 – disponível/ 0 – não disponível).
- Status do sistema de ar condicionado nos últimos seis períodos (1 a 6, que corresponde à soma de disponibilidade dos últimos seis *timesteps*); o valor de 6 significa que o *Ideal Loads Air System* está ativo há 30 minutos.

Estes recursos foram desenvolvidos para evitar uma alternância de operação dos dispositivos a cada *timestep*.

Outra variável de tendência desenvolvida foi com relação ao fator de abertura da janela, que retorna um valor fracionado de 0 a 1, indicando o percentual de abertura da janela, em área, do último período. Esta informação permite ao controle operar a abertura gradativa da janela a cada *timestep*, com incrementos de 0,25, de forma a reduzir a probabilidade de resfriamento excessivo. Como a abertura ocorre de forma modulada, os valores possíveis são zero, 0,25, 0,50, 0,75 e 1.

Para alguns tipos de controle foram definidas variáveis globais no *EnergyManagementSystem: GlobalVariable*, de forma que a informação inserida no EMS possa ser utilizada em outras rotinas e sub-rotinas. E finalmente, em *EnergyManagementSystem: OutputVariable*, criaram-se novos dados de saída, que aparecerão no objeto *Output: Variable*, para conferência.

3.3.4 Ativação da simulação de luz do dia

Para este estudo, os cálculos de iluminação foram utilizados com a finalidade de verificar se com a atuação do vidro EC, o ambiente seria prejudicado em termos de iluminação natural, isto é, se a transmitância visível reduziria excessivamente o aproveitamento da iluminação natural com os controles utilizados.

Sendo assim, para ativação do *SplitFlux*, os objetos do grupo *Daylighting* foram configurados, definindo-se os pontos de referência a partir de coordenadas (x,y,z) e a malha para o mapa de iluminância, com a quantidade de pontos nos eixos x e y. Os pontos e a malha estão destacados na Figura 18. Os pontos de referência foram posicionados nos centros de dois quadrantes, portanto, na diagonal, sendo (1) P1, no 2º quadrante, que seria o ponto mais favorável para iluminação natural e mais propenso a ter ofuscamento, e (2) P2 no 4º quadrante, que seria o ponto menos favorável para a iluminação natural. As cotas indicam a posição relativa às faces internas da parede, que são diferentes dos limites do modelo, já que a visualização do modelo de simulação térmica não contempla as espessuras de parede. Desta forma, houve uma sobreposição entre os pontos periféricos da malha com a espessura de parede, que não prejudicou o resultado nos pontos P1 e P2.

A altura do plano de trabalho foi definida como 0,75 m e utilizada a referência de iluminância de 500 lux no plano horizontal para atividades de escritório, conforme as normas ABNT NBR ISO/CIE 8995-1, de Iluminação de ambientes de trabalho (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013) e ABNT NBR 15215-4, de Iluminação natural (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2005c).

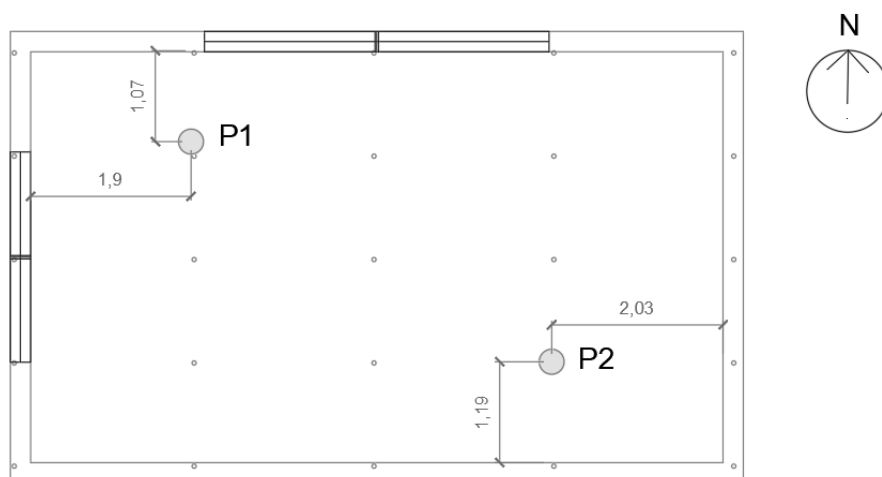


Figura 18 – Planta baixa com indicação dos pontos de referência. Fonte: Elaborado pela autora, 2022

Os resultados do *SplitFlux* indicam os níveis de iluminação natural nos pontos de monitoramento e não o efeito combinado da iluminação natural e artificial. Assim, os dados de níveis de iluminância informados são apenas indicativos do

escurecimento excessivo que poderia ser proporcionado pela operação do vidro eletrocromico, e não foram considerados na tomada de decisão.

Não foi objetivo desta tese considerar controles adicionais para dimerização de iluminação artificial e nem contabilizar o consumo de energia elétrica pela mesma. Nas simulações, as luminárias permaneceram ligadas durante o período ocupado e consideradas como carga térmica.

3.4 Simulações inicial + paramétricas

Realizou-se uma simulação inicial denominada simulação zero, com ocupação e sem ventilação, para verificar o comportamento térmico da zona de escritório, a fim de captar os intervalos dos dados de saída para alimentar os controles da janela eletrocromica e da ventilação híbrida. Rodou-se uma simulação anual, porém o estudo detalhado foi realizado nos nove dias de análise, como referência às tendências diárias de variação dos parâmetros ambientais externos.

Depois, foi realizada uma rodada de simulação anual paramétrica do conjunto comercial com todas as composições de janelas laminadas (LAM1 e LAM2), insulada dupla (IGU1 e IGU2) e eletrocromicas (EC1 e EC2) sendo 100% das horas ocupadas com sistema de climatização. Nesta etapa, denominada Etapa 1, rodaram-se 14 simulações.

A fim de realizar uma comparação entre os resultados, calculou-se o desempenho relativo (DR) da janela a partir da relação entre a demanda anual de energia para climatização do cenário “n” e a demanda anual de energia para climatização do cenário com a janela de vidro laminado para o mesmo controle de ventilação (Equação (3.2)).

$$DR (\%) = \frac{E_{AC-LAM} - E_{AC-n} (kWh/m^2 \cdot ano)}{E_{AC-LAM} (kWh/m^2 \cdot ano)} \times 100 \quad (3.2)$$

Onde:

E_{AC-n} = Demanda anual de energia para climatização do cenário “n” (kWh/m².ano).

E_{AC-LAM} = Demanda anual de energia para climatização do cenário com janela de vidro laminado (kWh/m².ano)

O resultado se dá em número percentual, sendo que valores positivos representam desempenho superior ao cenário com janela de vidro laminado, isto é, com demanda menor de energia para climatização do que o cenário com janela de vidro laminado.

Os valores de DR foram comparados, a fim de selecionar uma composição de cada tipo. Foram escolhidos aqueles que apresentaram maiores valores de DR, que no caso dos vidros estáticos são o LAM1 e o IGU2. Já para o vidro dinâmico, a composição escolhida (EC1 ou EC2) dependeu do tipo de controle.

Na Etapa 2, realizou-se uma nova rodada de simulações paramétricas com as composições selecionadas. A Tabela 8 contém o resumo das 35 simulações realizadas na Etapa 2, contendo as nomenclaturas dos cenários.

Tabela 8 – Controle das simulações paramétricas da Etapa 2

Tipos de janela		Controle VH (x5)				
		V1	V2	V3	V4	V5
LAM1		LAM1-V1	LAM1-V2	LAM1-V3	LAM1-V4	LAM1-V5
IGU 2		IGU2-V1	IGU2-V2	IGU2-V3	IGU2-V4	IGU2-V5
IGU EC1 / EC2	E1	E1-V1	E1-V2	E1-V3	E1-V4	E1-V5
	E2	E2-V1	E2-V2	E2-V3	E2-V4	E2-V5
	E3	E3-V1	E3-V2	E3-V3	E3-V4	E3-V5
	E4	E4-V1	E4-V2	E4-V3	E4-V4	E4-V5
	E5	E5-V1	E5-V2	E5-V3	E5-V4	E5-V5

Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

Nos próximos itens estão detalhados os parâmetros utilizados para o cenário com sistema de climatização da Etapa 1 e para os controles VH (V1 a V5) e EC (E1 a E5).

3.4.1 Sistema de climatização artificial

Trata-se do cenário com o sistema *Ideal Loads Air System* com termostato duplo: *setpoint* de 20°C para aquecimento e 24,5°C para resfriamento. O sistema é acionado às 8:00h e desligado às 19:00h durante os dias úteis da semana, correspondendo a 100% das horas ocupadas. O sistema não opera aos fins de semana.

3.4.2 Controles do dispositivo eletrocromico

Os controles para a janela EC foram definidos a partir de combinações de parâmetros da Tabela 7 do item 3.3.3.1, e dos intervalos estipulados a partir dos dados de saída da simulação zero. Como o modelo da janela EC possui cinco estágios de operação, foram definidas cinco faixas de intervalos, resultando em cinco tipos de controle com duas a três propostas de intervalos, exceto para o controle E5, que possui opções com três a quatro estágios do eletrocromico. No EMS do EnergyPlus, estabelecem-se os índices da construção, que foram denominados de 1 a 5, sendo 1 o estado mais claro e 5, o mais escuro. Nos próximos itens estão detalhados os controles E1 a E5.

3.4.2.1 E1 – Radiação incidente na fachada + Ocupação

A variação do parâmetro da taxa de radiação solar incidente por área da superfície externa ao longo do ano é de 0 a 783,4 W/m² na janela norte e de 0 a 867,9 W/m² na janela oeste. Os intervalos foram estabelecidos conforme demonstrado na Tabela 9, em que 'Rad' é a taxa de radiação solar incidente e há três opções de intervalos: E1-1, E1-2, E1-3.

Tabela 9 – Intervalos de taxa de radiação incidente para operação do Controle EC-E1

Índice EC	E1-1	E1-2	E1-3
1	Rad < 200	Rad < 200	Rad = 0
2	200 ≤ Rad < 300	200 ≤ Rad < 250	0 < Rad ≤ 100
3	300 ≤ Rad < 400	250 ≤ Rad < 300	100 < Rad ≤ 200
4	400 ≤ Rad < 500	300 ≤ Rad < 400	200 < Rad ≤ 300
5	Rad ≥ 500	Rad ≥ 400	Rad > 300

Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

Para o caso E1-1, por exemplo, o vidro EC se mantém no estado mais claro com a taxa de radiação de até 200 W/m²; entre 200 W/m² e 300 W/m², no estado 2 e assim por diante, com incremento de 100 W/m² por estado; ao ultrapassar 500 W/m², permanece no estado mais escuro. No caso E1-2, o incremento foi de 50 W/m² a partir do estado 2 e no caso E1-3, o estado mais claro só seria mantido quando não houvesse radiação incidente (isto é, à noite) e depois, o incremento para alteração seria de 100 W/m².

3.4.2.2 E2 – Temperatura de superfície + Ocupação

A variação de temperatura da superfície externa da janela ao longo do ano foi de 5,3 a 71°C na janela norte e de 5,3 a 71,9°C na janela oeste. Desta forma, foram propostas duas divisões, a E2-1, em que o estado mais claro permanece até a uma temperatura de 24°C e os demais estados são acionados a incrementos de 11,5°C, terminando com o estado mais escuro, que abrange a faixa a partir de 58,5°C; e a E2-2, com faixas mais estreitas de temperatura, apresentando incrementos de 6°C nos estados 2 e 3, e depois 11,5°C novamente para o estado 4 (Tabela 10).

Tabela 10 - Intervalos de temperatura de superfície externa da janela para operação do Controle EC-E2

Índice EC	E2-1	E2-2
1	$t_s \leq 24$	$t_s \leq 24$
2	$24 < t_s \leq 35,5$	$24 < t_s \leq 30$
3	$35,5 < t_s \leq 47$	$30 < t_s \leq 36$
4	$47 < t_s \leq 58,5$	$36 < t_s \leq 47,5$
5	$t_s > 58,5$	$t_s > 47,5$

Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

3.4.2.3 E3 – Temperatura de bulbo seco do ar externo + Ocupação

Nos estudos em que este parâmetro foi utilizado, os vidros eletrocromicos apresentavam dois estágios (on/off). Hoon Lee, Jeong e Tae Chae (2020) estabeleceram valores iniciais de 18°C de temperatura do ar externo, dependendo da localidade. Jonsson e Roos (2010) utilizaram critérios de resfriamento e aquecimento para otimização de energia, sem citar valores. Isto é, o vidro seria escurecido se aumentasse a demanda por resfriamento pelo sistema de ar condicionado.

Neste caso, poderia ser utilizada tanto a temperatura do ar interno ou do ar externo como parâmetro, mas como o sistema de climatização atua no ambiente interno e poderia influenciar a atuação do dispositivo eletrocromico, criando um ciclo vicioso. Consideraram-se intervalos de temperatura do ar externo para cada estágio da janela EC, conforme apresentado na Tabela 11.

Tabela 11 - Intervalos de temperatura do ar externo para operação do Controle EC-E3

Índice EC	E3-1	E3-2
1	$t_{ar_ext} < 21$	$t_{ar_ext} < 19$
2	$21 \leq t_{ar_ext} < 26$	$19 \leq t_{ar_ext} < 23$
3	$26 \leq t_{ar_ext} < 30$	$23 \leq t_{ar_ext} < 27$
4	$30 \leq t_{ar_ext} < 33$	$27 \leq t_{ar_ext} < 31$
5	$t_{ar_ext} \geq 33$	$t_{ar_ext} \geq 31$

Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

Na proposta E3-1, o estágio 1 é mantido para temperaturas até 21°C. Os próximos estágios possuem intervalos decrescentes: o estágio 2 com ΔT de 5°C, estágio 3 com ΔT de 4°C, estágio 4 com ΔT de 3°C e estágio 5 temperaturas igual ou maiores a 33°C. Já na proposta E3-2, a condição inicial é de 19°C, e os demais estágios possuem intervalos com ΔT iguais, de 4°C; e por fim, o estágio 5 prevalece para temperatura maior ou igual a 31°C.

3.4.2.4 E4 – Nível de iluminância + Ocupação

O nível de iluminância se refere ao sensor na fachada, portanto é considerada a iluminância externa. Como se trata de duas variáveis somadas, iluminância horizontal do céu e iluminância do feixe horizontal (radiação difusa + direta), considerou-se o intervalo da soma, que no caso foi de 0 a 116.175,6 lux. As maiores ocorrências são até a faixa de 80.000 lux, diminuindo a frequência para valores maiores de iluminância.

Desta forma, foram propostas duas divisões (Tabela 12), E4-1 partindo de 20.000 lux no estado mais claro, depois mudando os estados com incremento de 20.000 lux; e E4-2, também mantendo o estado mais claro até 20.000 lux, porém com incrementos de 15.000 lux para cada estágio.

Tabela 12 - Intervalos de nível de iluminância externa para operação do Controle EC-E4

Índice EC	E4-1	E4-2
1	≤ 20000 lux	≤ 20000 lux
2	$20000 < I_{lum} \leq 40000$	$20000 < I_{lum} \leq 35000$
3	$40000 < I_{lum} \leq 60000$	$35000 < I_{lum} \leq 50000$
4	$60000 < I_{lum} \leq 80000$	$50000 < I_{lum} \leq 65000$
5	> 80000	> 65000

Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

3.4.2.5 E5 – Ângulo de incidência + Condição de céu + Ocupação

Para este caso, houve a combinação de dois parâmetros além da ocupação, para que o vidro EC entrasse em ação quando houvesse ocupação e quando o sol estivesse no horizonte (ângulo solar entre 0 e 90°) e com céu claro, pois quando o céu está encoberto, não haveria necessidade de sombreamento.

Os dados de saída do EnergyPlus incluem o cosseno do ângulo de incidência do raio solar na superfície externa e o índice de cobertura do céu. No primeiro, deve ser encontrado o ângulo a partir da função arco cosseno e feita a conversão de radianos para graus. No segundo, trata-se de um índice de 0 a 10, em que 0 representa um céu claro, e 10 totalmente encoberto.

Em E5-1 (Tabela 13), foram utilizados três estágios do EC, que variam de acordo com o intervalo do ângulo de incidência e se o céu está claro. Os ângulos foram segmentados a cada 30° e a condição de céu basicamente dividida em dois tipos: de claro a semicoberto (0 a 4) e de semicoberto a coberto (maior do que 4 até 10).

A janela EC é mantida no estágio 1 se não houver incidência de radiação direta (com ângulos de incidência maior do que 90° ou menor do que zero) e se o ângulo de incidência estiver entre 0 e 30° e entre 60° e 90°, mas com céu semicoberto a totalmente encoberto. O estágio 2 é mantido se o ângulo de incidência estiver entre 0° e 30° e entre 60° e 90° com céu semicoberto a claro, ou se o ângulo de incidência estiver entre 30° e 60° com céu semicoberto a coberto. E por fim, o estágio 3 permanece com o ângulo de incidência entre 30° e 60°, com céu de semicoberto a claro. O desenvolvimento seguiu o princípio de que seria mais crítico o estágio com céu claro e ângulo de incidência próximo de 45°.

A proposta E5-2 considera a mesma lógica, porém com uma segmentação maior de ângulos de incidência, a cada 15°, abrangendo quatro estágios da janela EC.

Tabela 13 - Intervalos de ângulo de incidência e índice de condição de céu para operação Controle EC-E5

Índice EC	E5-1		E5-2	
1	$0 \geq \text{SkyC} \geq 10$	$\text{AI}_{\text{ncid}} \leq 0$ $\text{AI}_{\text{ncid}} \geq 90$ $0 < \text{AI}_{\text{ncid}} < 30$	$0 \geq \text{SkyC} \geq 10$ $4 > \text{SkyC} \geq 10$	$\text{AI}_{\text{ncid}} \leq 0$ $\text{AI}_{\text{ncid}} \geq 90$ $0 < \text{AI}_{\text{ncid}} < 15$ $75 \leq \text{AI}_{\text{ncid}} < 90$
2	$4 > \text{SkyC} \geq 10$	$0 < \text{AI}_{\text{ncid}} < 30$ $60 \leq \text{AI}_{\text{ncid}} < 90$	$0 \geq \text{SkyC} \geq 4$ $4 > \text{SkyC} \geq 10$	$0 \leq \text{AI}_{\text{ncid}} < 15$ $75 \leq \text{AngInc} < 90$ $15 \leq \text{AI}_{\text{ncid}} < 30$ $60 \leq \text{AI}_{\text{ncid}} < 75$
3	$0 \geq \text{SkyC} \geq 4$	$30 \leq \text{AI}_{\text{ncid}} \leq 60$	$0 \geq \text{SkyC} \geq 4$ $4 > \text{SkyC} \geq 10$	$15 \leq \text{AI}_{\text{ncid}} < 30$ $60 \leq \text{AI}_{\text{ncid}} < 75$ $30 \leq \text{AI}_{\text{ncid}} \leq 60$
4	-	-	$0 \geq \text{SkyC} \geq 4$	$30 \leq \text{AI}_{\text{ncid}} \leq 60$
5	-	-	-	-

Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

3.4.3 Controles de ventilação híbrida

A variação de controles para a ventilação híbrida inclui a alteração do intervalo de temperatura de operação da ventilação natural, que compreende tanto a temperatura mínima do ar externo permitida para abertura de janela, quanto a temperatura máxima do ar externo para fechamento da janela e acionamento do sistema de climatização. A escolha das variações de V2, V3, V4 e V5 foi em função dos limites do conforto adaptativo do arquivo climático de São Paulo.

O controle V1 considera a situação descrita em 3.3.3.2, que admite a ventilação natural quando $T_{\text{ar_ext}} \geq 15^\circ\text{C}$ e a janela se fecha quando $T_{\text{ar_ext}} > 23^\circ\text{C}$. Os *setpoints* para aquecimento e resfriamento do sistema de climatização do *Ideal Loads Air System* foram mantidos em 20°C e $24,5^\circ\text{C}$, respectivamente. Os demais controles apresentam variações dos limites mínimo e máximo conforme a Tabela 14.

As Figura 19 a Figura 23 contêm os esquemas de funcionamento da ventilação híbrida com a modulação da abertura, sendo que a trave superior representa a temperatura do ar interno, e as demais a temperatura do ar externo e o fator de abertura da janela por trechos de operação.

Tabela 14 – Setpoints mínimo e máximo de temperatura do ar externo para os controles de ventilação híbrida V1 a V5

Tipo	t_{ar_ext} mínimo (°C)	t_{ar_ext} máximo (°C)
V1	15	23
V2	17	24
V3	18	25
V4	18	23
V5	18	22

Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

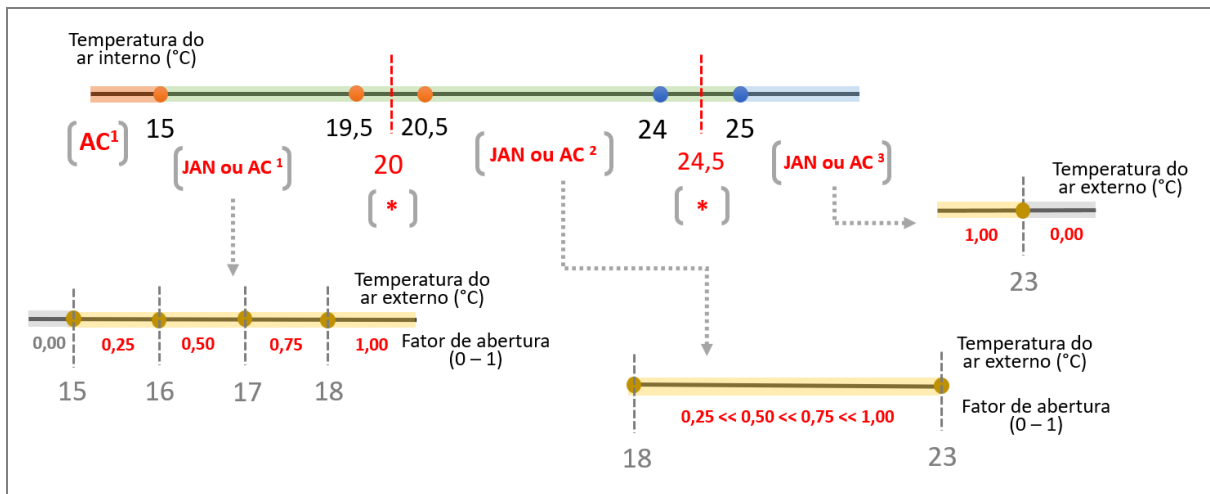


Figura 19 – Esquema do controle de ventilação V1 com a modulação da abertura. Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

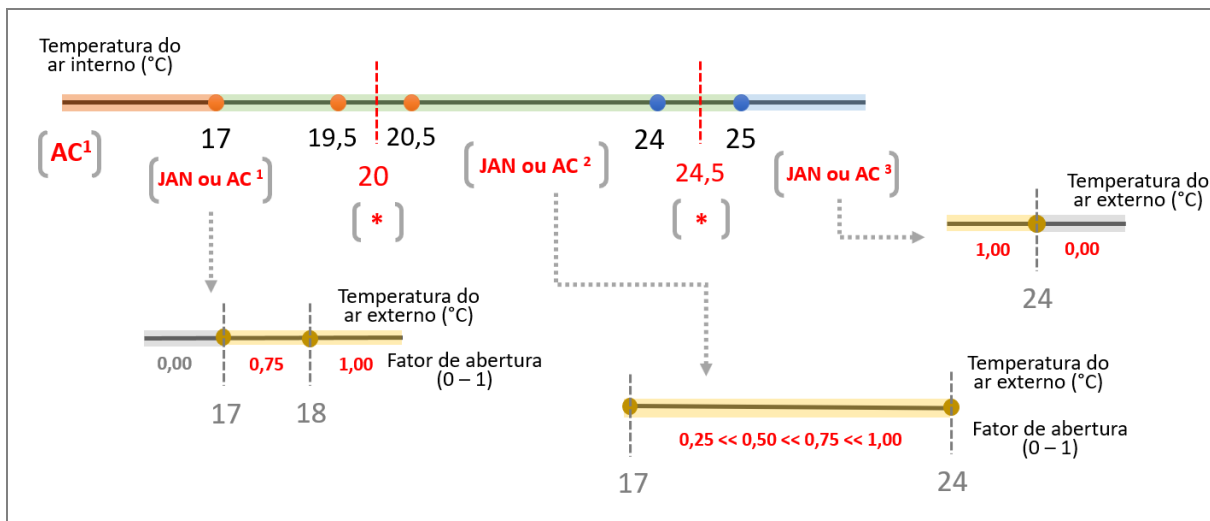


Figura 20 - Esquema do controle de ventilação V2 com a modulação da abertura. Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

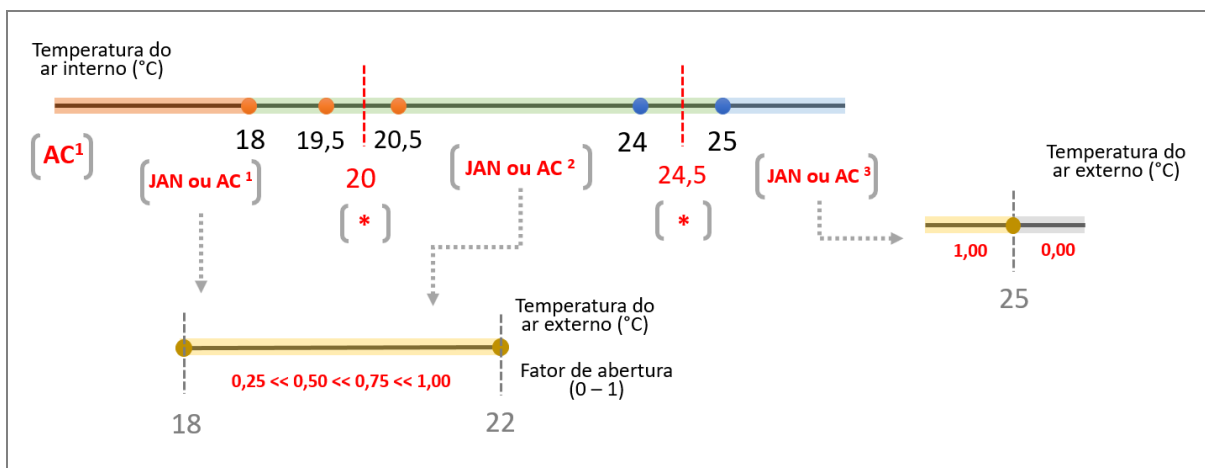


Figura 21 - Esquema do controle de ventilação V3 com a modulação da abertura. Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

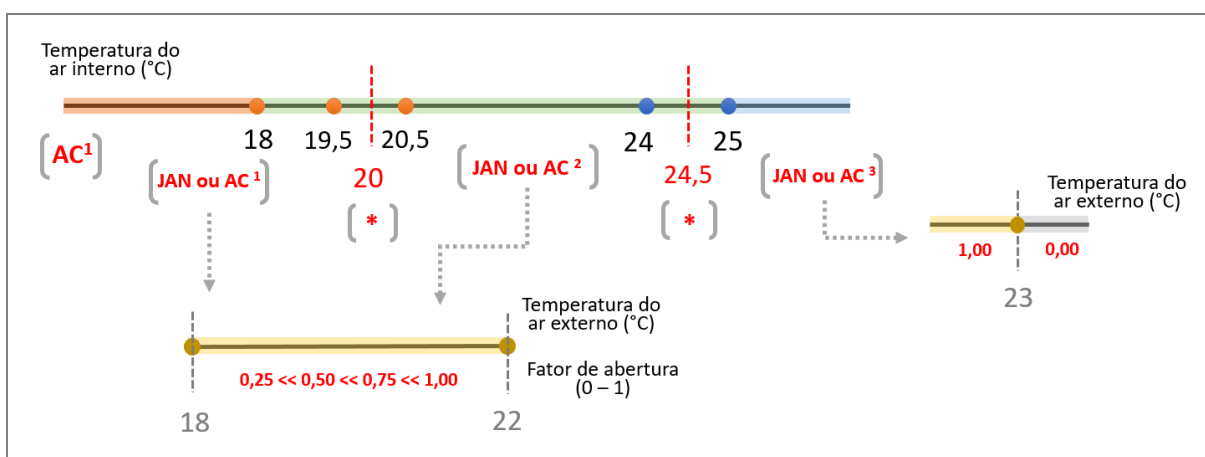


Figura 22 - Esquema do controle de ventilação V4 com a modulação da abertura. Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

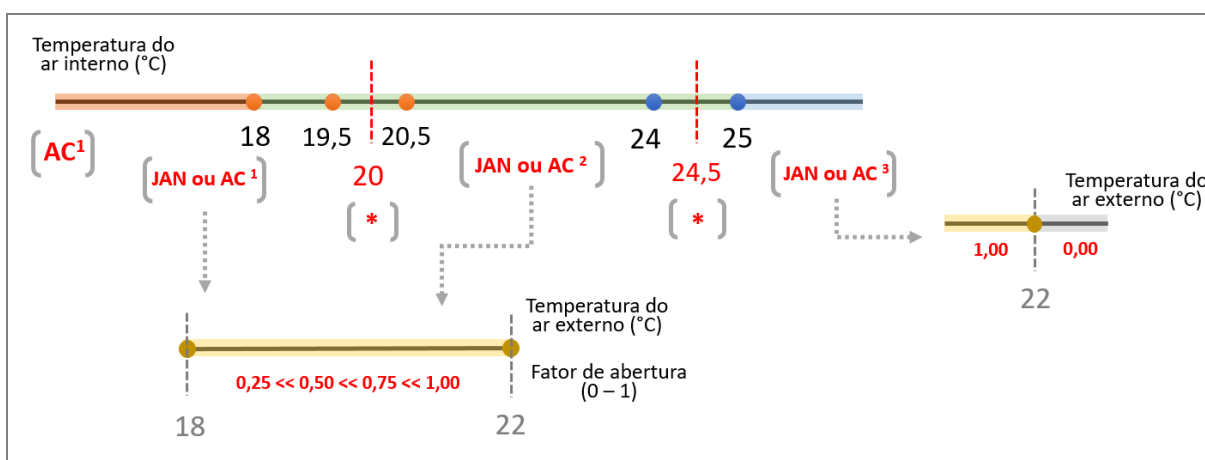


Figura 23 - Esquema do controle de ventilação V5 com a modulação da abertura. Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

3.5 Aplicação para Zonas Bioclimáticas 1 e 8

A fim de aplicar os limites de controles estabelecidos em São Paulo para outros climas brasileiros, foram selecionadas duas cidades de zonas bioclimáticas (ZB) extremas: Curitiba/PR, ZB1 e Recife/PE, ZB8 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2005a). Por serem capitais de estados, possuem arquivos climáticos e mais dados disponíveis. Os arquivos climáticos utilizados foram da base SWERA, 838400 do Aeroporto Internacional Afonso Pena em São José dos Pinhais/PR, próximo de Curitiba, e 828990 do Aeroporto Internacional de Recife/Guararapes – Gilberto Freyre. A Tabela 15 contém as informações de latitude, longitude, classificações de clima de acordo com o método Köppen-Geiger e ASHRAE e a descrição do clima das cidades selecionadas.

Tabela 15 – Características dos arquivos climáticos utilizados no estudo

Localização	Latitude / Longitude	Köppen-Geiger	ASHRAE	Descrição do clima
São Paulo/SP	- 23,62° / - 46,65°	Cfa	2A	Subtropical úmido – oceânico sem estação seca e com verão quente
Curitiba/PR	- 25,52° / - 49,17	Cfb	3A	Subtropical úmido – oceânico sem estação seca e com verão ameno
Recife/PE	- 8,07° / - 34,85°	Af	0A	Tropical sem estação seca

Fonte: Adaptado de Alvares et al. (2013) e American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (2020)

Para cada arquivo climático, foram extraídos os limites de temperatura operativa (neutra, mínima e máxima) a partir das médias de temperaturas diárias para caracterizar o conforto adaptativo. Os grupos de dias de análise foram definidos a partir da temperatura do ar externo às 8:00h, seguindo os intervalos estabelecidos para São Paulo. Quando os intervalos extrapolaram os de São Paulo, foram criados outros grupos de dias.

Com base na simulação zero, verificaram-se os dados de iluminância global, radiação incidente nas fachadas norte e oeste, temperatura do ar externo, entre outros, para decidir pelo ajuste ou não dos controles da ventilação híbrida e da janela eletrocromática. A partir daí, foram conduzidas as simulações paramétricas de ventilação híbrida e da janela eletrocromática, para verificar a viabilidade dos sistemas em climas diferentes. Os resultados referentes à demanda de energia para resfriamento possuem ordens de grandeza diferentes, portanto, foram demonstrados

com seu desempenho relativo, comparando sempre o vidro base (laminado) com as outras combinações.

3.6 Ventilação noturna para V5

A partir dos resultados das simulações paramétricas, identificou-se que os maiores valores de temperatura do ar interno no horário ocupado ocorriam pela manhã, na maioria das vezes às 8:00h, o que sugeria a presença de carga térmica residual que permanecia no ambiente à noite. Desta forma, foi realizada uma rodada de simulação com ventilação noturna para o Grupo V5 de controle de ventilação híbrida, com três períodos de abertura de janela: das 0:00h às 6:00h, das 0:00h às 3:00h e das 3:00h às 6:00h, para São Paulo, Curitiba e Recife. Foi utilizada a mesma programação nas três cidades para fins de comparação.

O método escolhido foi o da abertura total da janela nos períodos citados, por meio do código Erl que ativa o *schedule* do AFN e estabelece o fator de abertura de 100% das folhas móveis das janelas. Independentemente da temperatura do ar externo, a ventilação natural é permitida durante as três ou seis horas fixas para cada programação, em todos os dias do ano.

Para a implantação do dispositivo, é necessário que haja um controle automatizado de janelas com temporizador, que promova a abertura e o fechamento da janela nos horários programados. Além disso, como a sala do modelo está localizada em andar alto, é possível promover a abertura sem comprometer a segurança patrimonial.

Foram escolhidos os cenários do grupo V5, pois se tratam dos casos com maior demanda de energia para climatização e menos horas de ventilação natural. Como os limites do V5 são mais restritivos, as horas de ventilação natural ao longo do ano são menores quando comparadas às dos outros cenários. Assim, considerou-se que ao aplicar a ventilação noturna para os demais cenários, os resultados poderiam ser iguais ou mais favoráveis, indicando melhores desempenhos.

3.7 Definição das combinações ótimas

A fim de obter o conjunto ótimo de soluções, utilizou-se o pacote rPref (ROOCKS, 2016), para o programa R, desenvolvido em C++, para se estabelecer a fronteira de Pareto para cada cidade a partir dos resultados das simulações paramétricas. Trata-se do método a posteriori, que identifica todos os dados dos resultados para se obter um conjunto de soluções diversas e mais próximas possíveis da fronteira Pareto-ótimo, a fim de facilitar o processo de tomada de decisão. Utilizou-se a análise *skyline top-k* que seleciona os pontos ótimos a partir da probabilidade de ocorrência de dados incertos ou aleatórios (ZHANG et al., 2011).

As variáveis de decisão foram definidas como a demanda anual de energia pelo sistema ideal de climatização para resfriamento e para aquecimento (quando aplicável) normalizado pela área ocupada (kWh/m²) e a fração de horas em conforto considerando o modelo adaptativo de conforto térmico da ASHRAE 55 (AMERICAN SOCIETY OF HEATING REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS, 2013). Cada cenário de simulação forneceu um par de dados, já que correspondem a valores anuais; por exemplo, o cenário E3-V2 de Curitiba apresenta uma demanda anual de energia de 16,4 kWh/m² e uma fração de horas em conforto de 0,96.

O rPref foi configurado para uma função objetivo que busca minimizar a demanda anual de energia para o sistema AVAC/R e maximizar o conforto térmico. Considerando E a demanda anual de energia para climatização normalizada pela área do edifício (kWh/m²) e C a razão entre as horas em conforto térmico e as horas ocupadas (não dimensional, de 0 a 1), as funções objetivo são descritas:

$$\begin{cases} f_1 = \min E \\ f_2 = \max C \end{cases}$$

Como o método empregado procura maximizar (ou minimizar) as funções objetivo impostas, f_1 foi editada pra que ambas funções pudessem ser maximizadas:

$$\begin{cases} f_1 = \max \left(\frac{1}{E} \right) \\ f_2 = \max C \end{cases}$$

Atendendo o modelo adaptativo da ASHRAE 55 dos limites de aceitabilidade de 80%, a seguinte restrição foi imposta:

$$C \geq 0,8$$

Para verificar as horas em conforto no ano, consideraram-se os limites de temperatura diários para 80% de aceitabilidade do conforto adaptativo e comparadas as temperaturas operativas em cada *timestep*, no período de ocupação (das 8:00h às 19:00h, em dias úteis), totalizando 2860 horas no ano. A fração de horas em conforto corresponde às horas em conforto anual divididas por 2860.

Assim, foram plotados primeiramente os gráficos com os resultados da simulação paramétricas com as combinações entre os controles EC e VH e depois os dados com todos os cenários, incluindo os com ventilação noturna e os 100% climatizados (sem ventilação natural). Foi realizada uma divisão por cores por estratégias de controle de ventilação e do eletrocômico. Os conjuntos ótimos de dados foram indicados para cada cidade, contendo os pontos de demanda mínima de energia para climatização e máxima fração de horas em conforto. No item 4.7 contém uma análise dos valores das variáveis de decisão de cada ponto selecionado como Pareto-eficiente.

4 RESULTADOS

4.1 Análise do arquivo climático e definição dos Dias de Análise

Nesta etapa, o arquivo climático SWERA referente ao Aeroporto de Congonhas foi analisando, sendo extraídas as informações de temperaturas mínimas e máximas diárias no horário comercial, assim como a amplitude térmica neste mesmo período, para todo o ano.

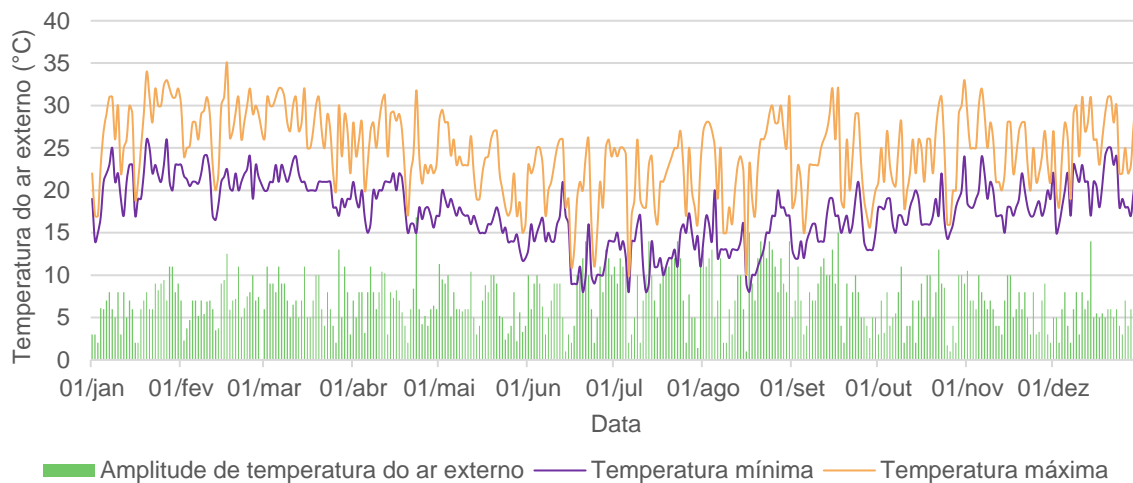


Figura 24 – Valores mínimos e máximos de temperatura do ar externa e amplitude térmica diária de São Paulo. Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

Observa-se, a partir da Figura 24, que há uma grande variação diária de temperaturas mínimas e máximas, sendo que pouco antes do período de inverno (de junho a setembro), as temperaturas sofrem um decréscimo. Neste caso, não devem ser consideradas medidas sazonais de controle de ventilação, pois dificulta a aplicação das premissas de conforto adaptativo, que considera como *setpoint* a média diária de temperatura do ar externo de sete a trinta dias anteriores.

Foram extraídos os valores mínimos e máximos diários. A Tabela 16 contém um resumo de algumas das variáveis, indicando a sua ocorrência.

Tabela 16 – Resumo dos valores das variáveis ambientais do arquivo climático de São Paulo

Variável	Valor mínimo/data	Valor máximo/data
Temperatura do ar, às 8:00h (°C)	8 (17/8)	26 (20-21/1)
Temperatura do ar (°C)	10 (06/07)	35 (17/2)
Radiação global horizontal (Wh/m ²)	190 (23/6)	1095 (18/11)
Umidade relativa (%)	17 (15/9)	94 (14/6)
Velocidade do ar (m/s)	0 (20/6-23/7)	15,4 (14/10)

Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

A fim de facilitar a análise do comportamento de variáveis ambientais ao longo do dia para determinar os limites do controle de ventilação híbrida, foram selecionados alguns dias que poderiam representar os demais dias do ano no arquivo climático. Houve uma tentativa de agrupamento por radiação solar global, umidade relativa e velocidade do ar, porém os parâmetros variam de forma aleatória ao longo do ano e não foi possível estabelecer uma correlação.

Desta forma, o agrupamento foi realizado por temperatura do ar externo às 8:00h, horário que se inicia a ocupação. A partir deste critério, o sistema pode optar pelo início da climatização artificial ou da ventilação natural, comparando com a temperatura do ar interno.

A temperatura do ar externo às 8:00h varia de 8°C a 26°C, com a distribuição de frequências de acordo com a Figura 25, que se aproxima de uma distribuição normal. Neste gráfico, observa-se que a temperatura inicial mais frequente é 17°C, que ocorreu em 39 dias. Depois, a segunda posição fica com a temperatura de 16°C, empatado com 20°C, que ocorrem em 33 dias.

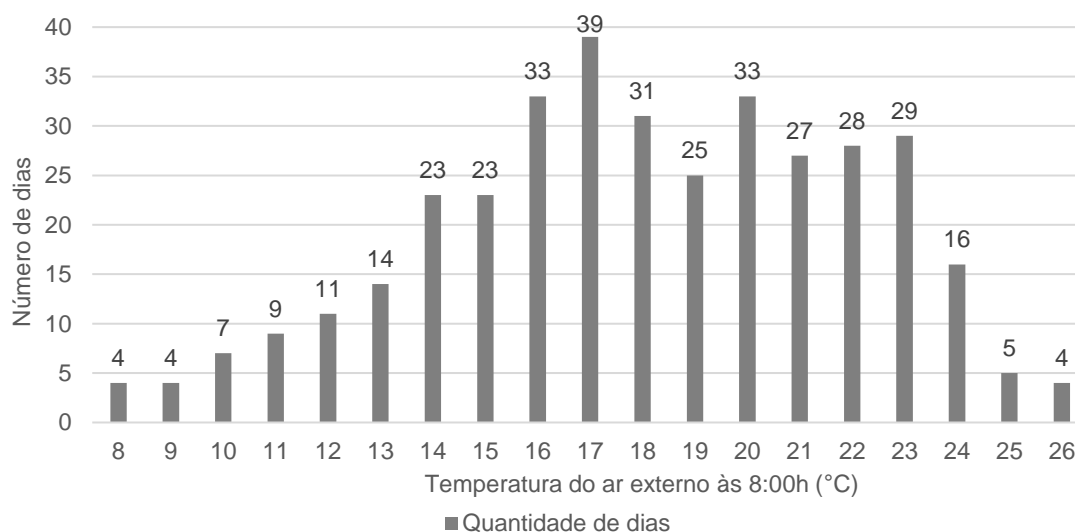


Figura 25 – Distribuição de frequência da temperatura externa do ar às 8:00h, para São Paulo. Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

Foi realizada uma divisão em nove grupos, considerando um intervalo de 2°C da temperatura do ar externo às 8:00h (Tabela 17), com exceção dos Grupos 1 e 9, que apresentam intervalos diferentes. Observa-se que alguns ocorrem em épocas ou meses específicos e outros, ao longo de todo o ano. Os meses da coluna “Período” foram extraídos do arquivo climático de São Paulo.

Tabela 17 – Resumo das principais variáveis dos Grupos 1 a 9 para São Paulo

Grupo	t_{ar_ext} 8h (°C)	Período	Amplitude térmica (°C)	Radiação total (W/m²)	UR min (%)	Var (m/s)	Dia de projeto
1	8 a 9	Jun/jul	2 a 15	212 a 803	31 a 82	0 a 6,2	12/07
2	9,1 a 11	Jun/jul/ago	5 a 14	491 a 810	29 a 67	0 a 7,2	19/06
3	11,1 a 13	Mai a set	2 a 14	471 a 881	20 a 82	2,1 a 10,3	17/07
4	13,1 a 15	Abr a out	2 a 16,8	261 a 818	24 a 88	1,5 a 10,3	09/06
5	15,1 a 17	Todos os meses	2 a 15	265 a 1036	24 a 78	3,1 a 12,3	08/09
6	17,1 a 19	Todos exceto jun	2 a 13	417 a 1036	19 a 94	3,1 a 10,3	08/05
7	19,1 a 21	Todos exceto jul	2 a 12	365 a 1095	35 a 88	3 a 15,4	13/12
8	21,1 a 23	Jan a abr/nov/dez	3 a 14	459 a 1069	18 a 74	3,1 a 11,8	08/02
9	23,1 a 26	Jan/fev/dez	5,4 a 11	731 a 1068	29 a 65	2 a 10,3	10/02

Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

Os grupos 1 e 2 estão concentrados sobretudo nos meses de inverno; a partir do grupo 3 vai estendendo para dias na primavera e no outono, e os últimos grupos, 8 e 9, estão concentrados nos meses de verão. Há, no entanto, uma grande variação de amplitude térmica, radiação global, umidade relativa e velocidade do ar dentro de cada grupo, conforme os intervalos apresentados na Tabela 17. Estas variáveis foram excluídas da definição dos grupos, mantendo-se o foco em temperatura.

Dentro de cada grupo foi selecionado um dia de análise, com valores de amplitude térmica de acordo com a mediana, desde que fosse um dia da semana com ocupação. Portanto, aqueles dias que coincidiam com a mediana de amplitude, porém não tinham ocupação, eram excluídos como dia de projeto, sendo selecionado outro dia próximo da mediana. Para os grupos com mais de um dia com ocupação que atendiam aos requisitos de mediana da amplitude térmica, a escolha foi aleatória.

Esta divisão foi realizada para facilitar a análise dos resultados para realização da proposta dos *setpoints* dos controles, de forma a desenvolver regras abrangendo os nove grupos, com a intenção de contemplar o ano inteiro. Nos resultados das simulações paramétricas são indicadas as demandas anuais de energia para climatização.

4.2 Limites do conforto adaptativo

Os resultados das temperaturas operativas neutra, mínima e máxima para os limites de conforto adaptativo estão resumidos na Tabela 18.

Tabela 18 – Resumo dos limites do conforto térmico adaptativo para São Paulo/SP

Temperatura Operativa	t_o neutra (°C)	t_o mín (°C)	t_o máx (°C)
Mínima	21,1	17,6	24,6
Máxima	24,0	20,5	27,5
Média	22,6	19,1	26,1

Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

Observa-se que a variação da temperatura é de aproximadamente $\pm 1,5^\circ\text{C}$ a partir da média. A Figura 26 mostra a distribuição dos dados de temperatura operativa neutra, mínima e máxima anual. A média apresenta valores próximos da mediana e não há valores discrepantes (*outliers*), o que demonstra uma temperatura relativamente amena ao longo do ano. Evidentemente, se fosse utilizado o coeficiente $\alpha = 0,6$ para o conforto adaptativo, a variação seria maior ($\pm 2^\circ\text{C}$), porém os valores de média e mediana continuariam próximos entre si.

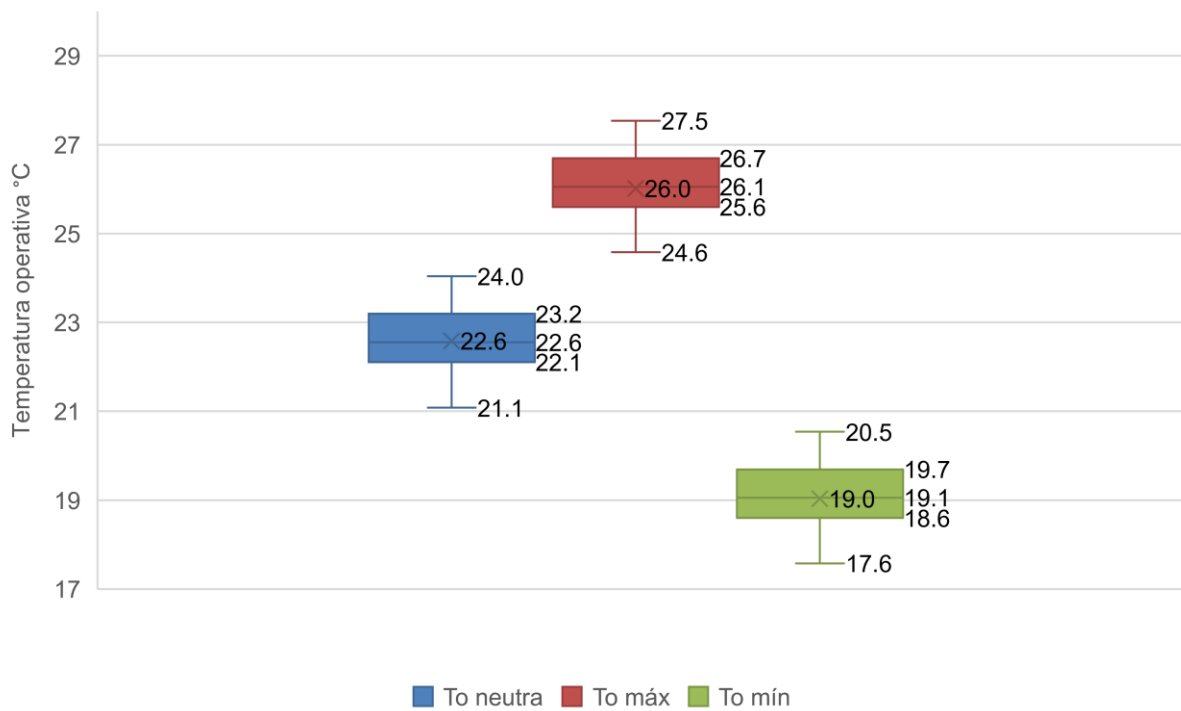


Figura 26 – Resultados de temperaturas operativas para conforto adaptativo para o clima de São Paulo. Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

A Figura 27 contém uma comparação entre temperatura do ar externo (horária) e os limites mínimo e máximo de temperatura operativa do conforto adaptativo, para os nove dias de análise, identificados pelas siglas D1 a D9. Em três dos dias (D7, D8 e D9), a temperatura externa excede o limite superior, o que implica na necessidade de complementação mecânica de um sistema para resfriamento. Nos demais, a ventilação híbrida pode ser aproveitada para resfriamento passivo do ambiente. No D1, como a temperatura máxima do ar externo coincidiu com o limite inferior do conforto adaptativo, deve-se atentar para que não ocorra o resfriamento excessivo do ambiente ao abrir as janelas.

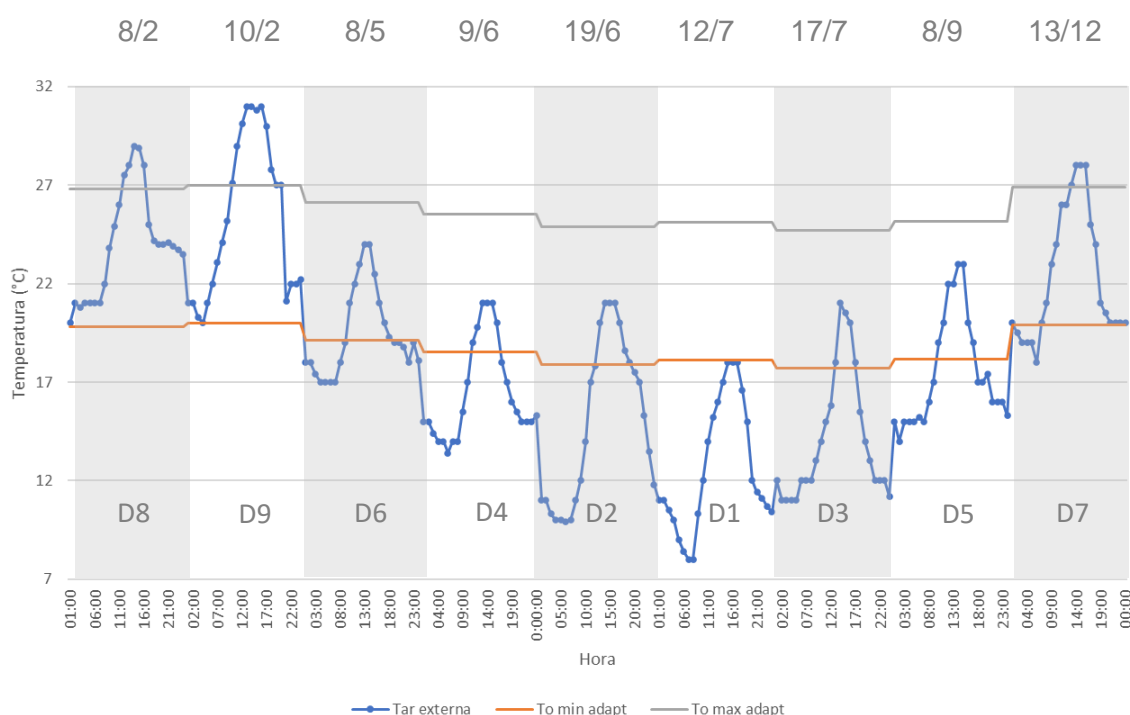


Figura 27 – Temperatura do ar externo e limites do conforto adaptativo para os dias de análise (D).
Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

Importante ressaltar que os dias de análise foram selecionados a partir da mediana de cada grupo, correspondendo às amplitudes com maiores frequências de ocorrência no ano. Se fossem plotados os dias com a máxima amplitude, na maioria dos casos a temperatura do ar excederia o limite máximo de temperatura operativa; porém, como estes ocorrem com uma frequência baixa no ano e representariam apenas os dias mais quentes, não seriam representativos do grupo em questão.

4.3 Fluxogramas dos controles de janela

Para que não houvesse conflitos operacionais entre o vidro EC e a ventilação híbrida, foi necessário priorizar uma das ações, já que o escurecimento do vidro só ocorreria se a janela estivesse fechada. Como o efeito da ventilação natural para resfriamento ou aquecimento é mais rápido do que o controle solar proporcionado pela camada eletrocromica, optou-se por priorizar a ventilação. Assim, no controle da janela é verificado primeiro se a abertura de janela ocorreria e se sim, a folha móvel é mantida no estágio mais claro. Se não, é direcionado para o controle eletrocromico correspondente. Se fosse priorizado o controle EC, o sistema não seria energeticamente eficiente, pois em função das altas temperaturas predominantes nos

climas brasileiros e da carga térmica interna, em pouco tempo ocorreria a elevação da temperatura interna, sendo necessário reverter o escurecimento do vidro para poder abrir a janela, ou até mesmo forçar a ligar o ar condicionado antes de aproveitar a ventilação natural.

A fim de auxiliar no entendimento dos códigos Erl desenvolvidos para a ventilação híbrida e para o controle do vidro EC, elaboraram-se fluxos de trabalho para descrever graficamente o caminho para decisão, assim como a priorização de um dispositivo sobre o outro.

As rotinas dos controle de VH e EC têm início no fluxo da Figura 28, que direcionam para a sub-rotina da Figura 29 e da Figura 30, que por sua vez se associam às sub-rotina auxiliares da Figura 31, Figura 32 e Figura 33.

Os valores utilizados são referentes ao controle V1. Para os demais (V2 a V5) foram alterados os limites mínimos e máximos de temperatura do ar externo e realizada a adequação do uso de sub-rotinas VH para situações de frio.

A Figura 28a contém o início do controle do lado esquerdo da janela, que possui a folha móvel, e a Figura 28b o controle do lado direito da janela, que possui a folha fixa. Em ambos os casos é verificada primeiro a ocupação. Se a folha for móvel, ativa a sub-rotina de VH, se for fixa, ativa direto a sub-rotina do EC. Se não houver ocupação, a janela EC se mantém no estágio 1, mais claro, com as janelas fechadas.

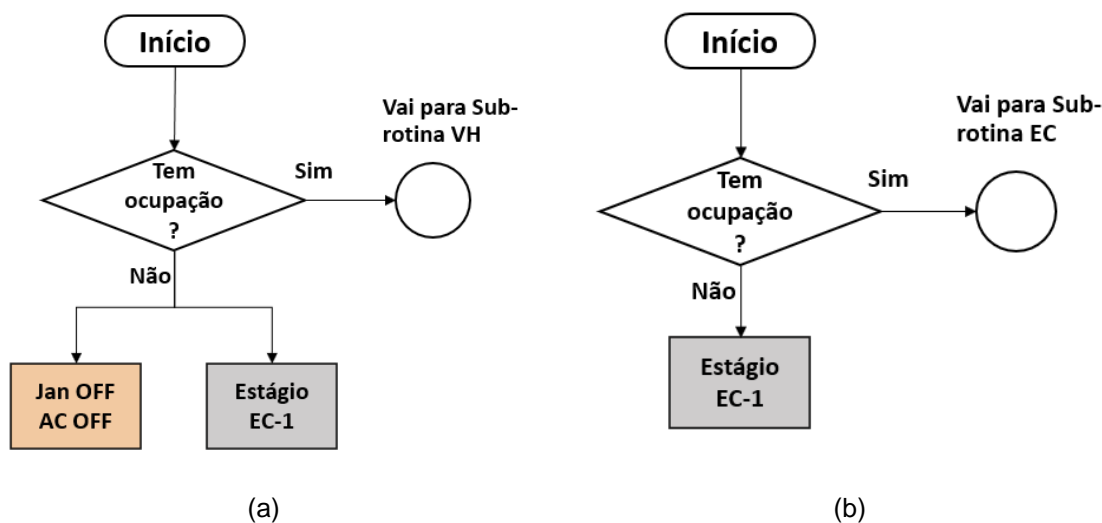


Figura 28 – Fluxograma das rotinas de (a) ventilação híbrida e (b) da mudança de estágio para a janela EC. Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

A sub-rotina VH foi dividida em duas partes, conforme mostram a Figura 29 e a Figura 30. Este controle possui como essência a verificação da temperatura do ar

interno e depois o desdobramento em ações de acordo com o intervalo de temperatura. Se a decisão for pela abertura de janela, é direcionada então para a sub-rotina de modulação de abertura, expostos na Figura 32 e na Figura 33. Se for acionado o sistema de climatização artificial, vai para a sub-rotina EC, da Figura 31.

As ações denominadas Jan OFF significam janela fechada; AC ON, ar condicionado ligado; AC OFF, ar condicionado desligado; Fator de abertura \emptyset , significa percentual de abertura 0%; Fator de abertura 1, representa percentual de abertura 100%; e Estágio EC-1 seria o estado mais claro do vidro EC.

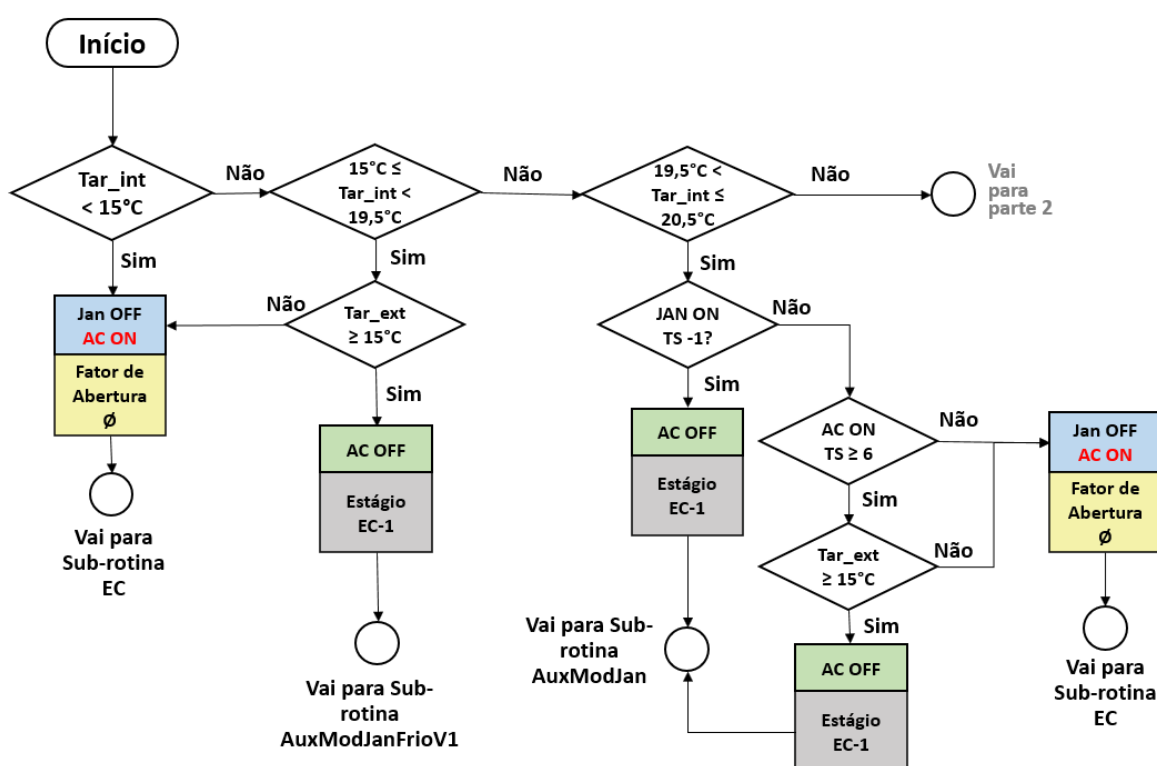


Figura 29 – Fluxograma da sub-rotina VH – parte 1. Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

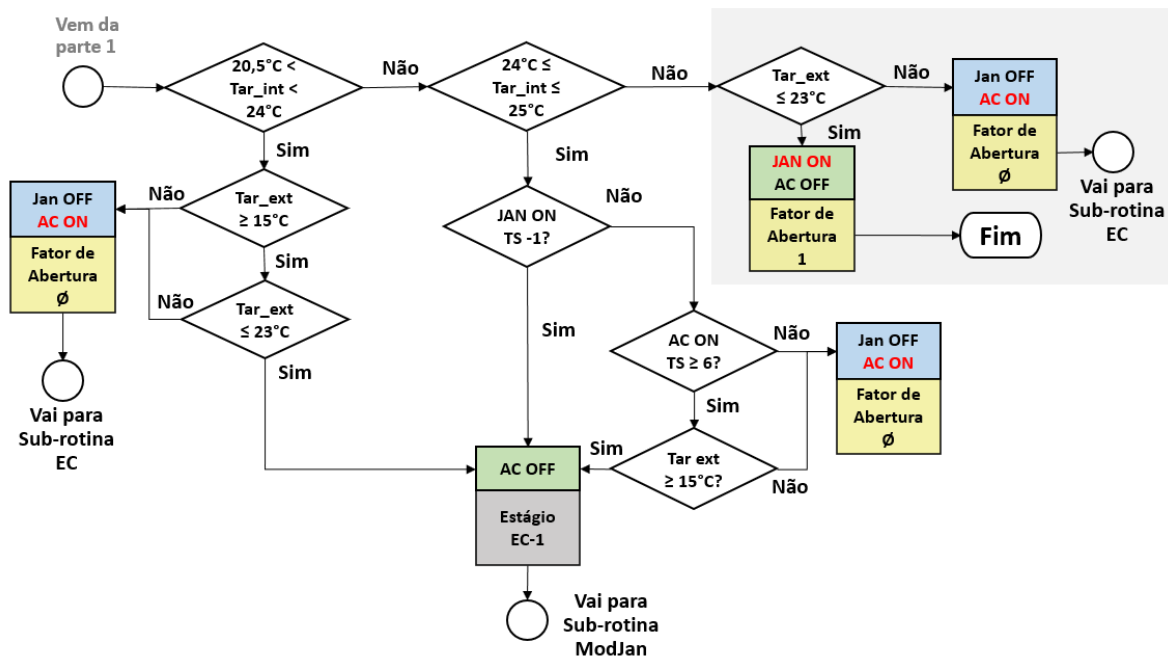


Figura 30 – Fluxograma da sub-rotina VH – parte 2. Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

A Figura 31, Sub-rotina EC, representa o controle E1, baseado em radiação solar incidente na fachada, em que os losangos apresentam os momentos de decisão, que contêm os intervalos de valores em W/m^2 . Os demais controles (E2 a E5) possuem uma lógica de decisão semelhante, sendo que os fluxogramas estão descritos no Apêndice 2.

A Figura 32, sub-rotina AuxModJan, exemplifica o uso da variável de tendência, citado em 3.3.3.2. A decisão pelo fator de abertura depende do *timestep* anterior. Por exemplo, se no último *timestep* a janela estava fechada, neste o fator de abertura será de 25%. Se no último a janela já estivesse aberta 25%, neste será 50%, e assim sucessivamente.

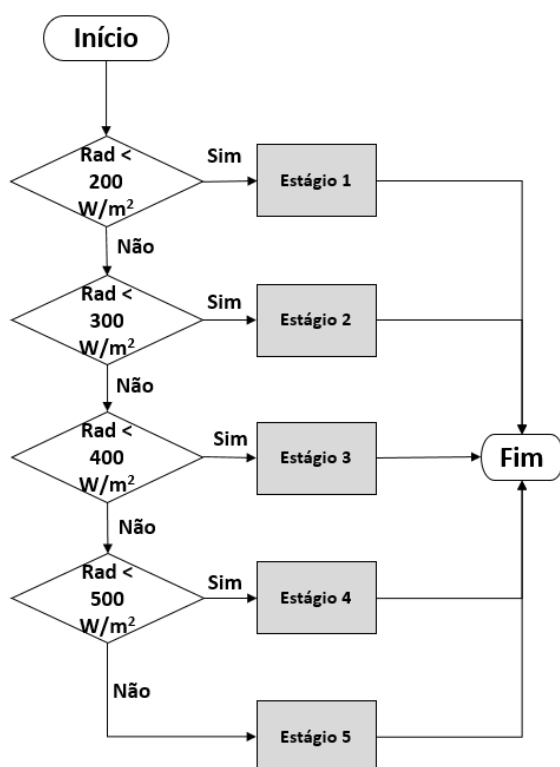


Figura 31 - Sub-rotina EC – controle E1. Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

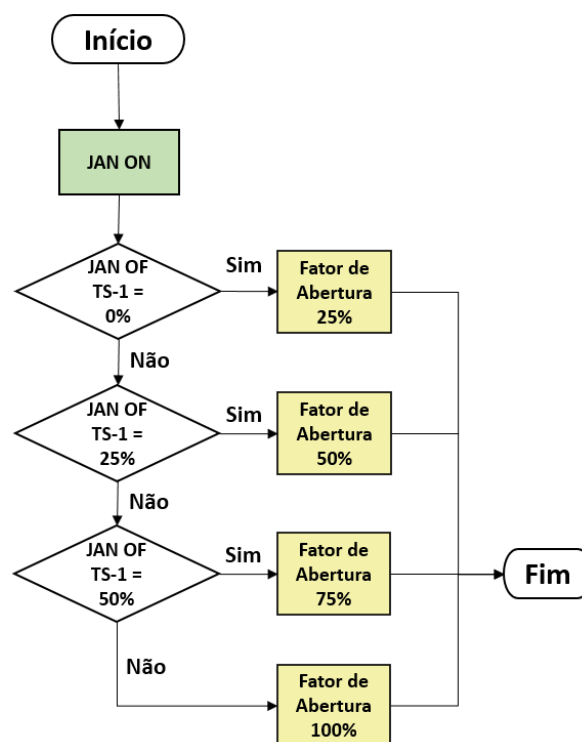


Figura 32 - Sub-rotina AuxModJan para modulação da abertura. Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

O controle da AuxModJanFrioV1 da Figura 33a varia a modulação de acordo com a temperatura do ar externo a partir de 16°C e é exclusivo para os controles V1. O controle AuxModJanFrioV2 da Figura 33b é exclusivo para o controle V2, variando a modulação de acordo com a temperatura do ar externo a partir de 18°C.

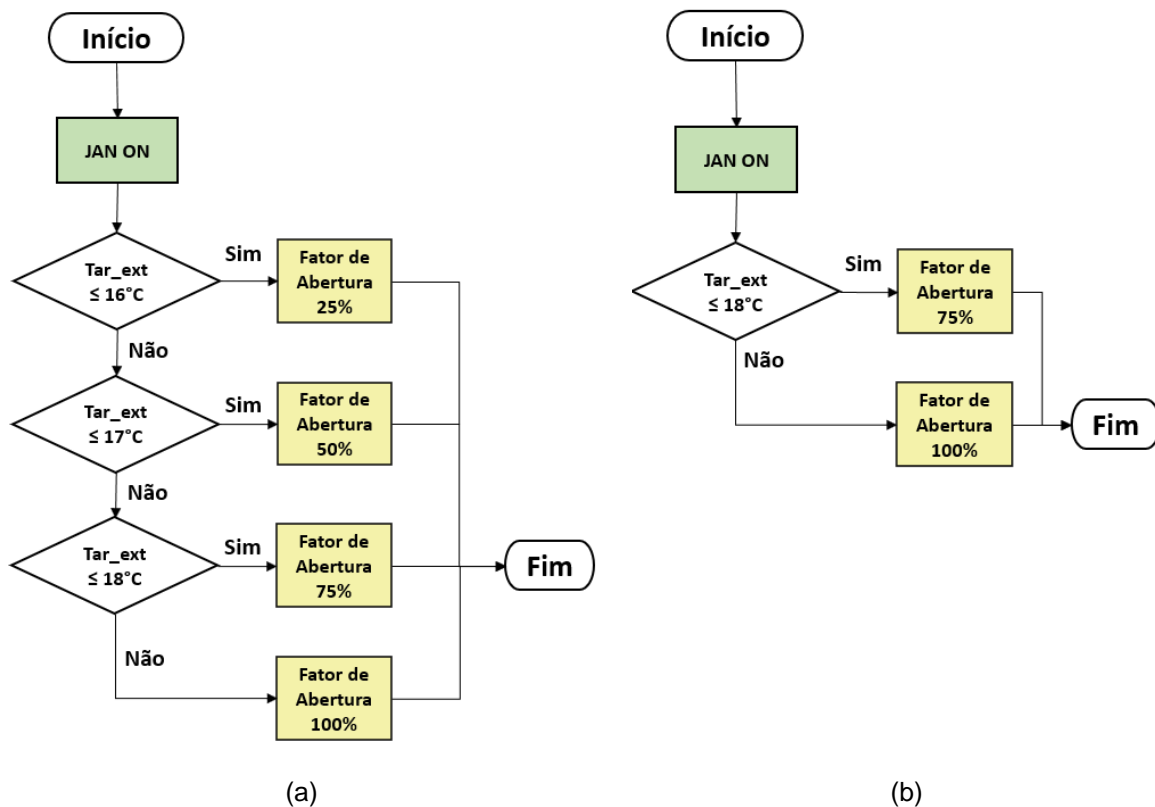


Figura 33 – Sub-rotina (a) AuxModJanFrioV1 e (b) AuxModJanFrioV2. Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

4.4 Resultados das simulações energéticas

Nos próximos itens estão expostos os resultados citados em 3.4, referentes às simulações zero e paramétricas para São Paulo.

4.4.2 Resultados da simulação zero

Na simulação zero foi considerada a zona térmica com a janela de vidro laminado (LAM1) sem ventilação forçada, e verificadas as temperaturas do ar interno e externo dos nove dias de análise (Figura 34), em que t_o é a temperatura operativa, t_{ar} a temperatura do ar e R_{ad} a radiação incidente na superfície da janela. Os perfis de temperatura do ar interno e da operativa acompanham o de temperatura do ar externo, apresentando uma diferença de 0,7°C a 11,4°C. A menor diferença ocorre às 14:00h do dia 10/02 (D8), que é o dia mais quente, e a maior diferença ocorre às 9:00h do dia 12/07 (D1), que é o dia mais frio.

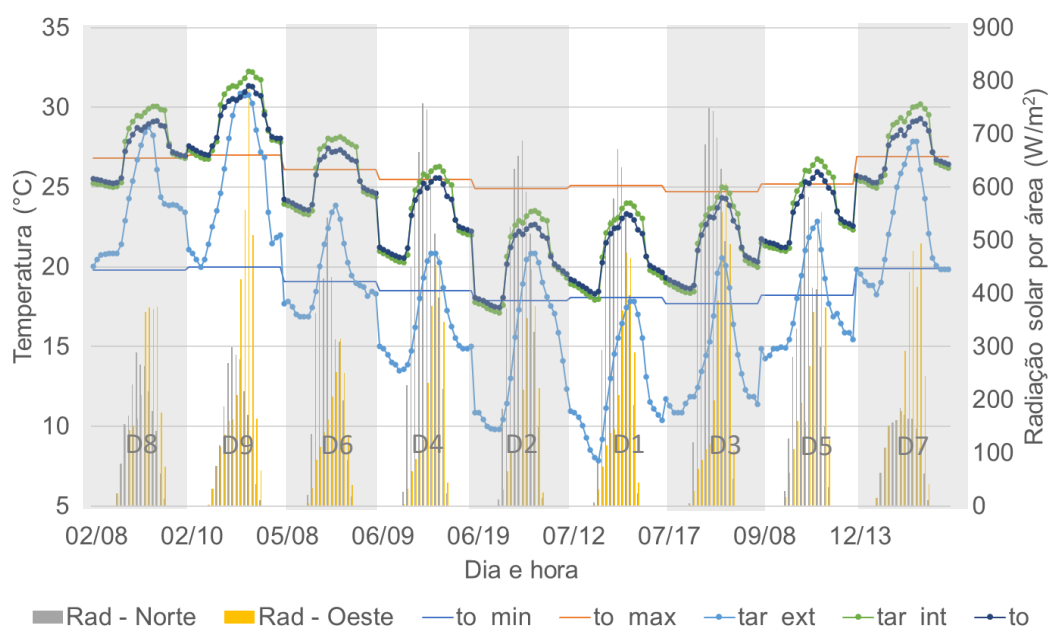


Figura 34 – Perfil de temperatura do ar e radiação incidente na Simulação zero para São Paulo.
Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

Nos dias D1, D2 e D3, que são no inverno, a incidência de radiação solar na janela norte é alta, mas como a temperatura externa é mais baixa, a temperatura operativa se mantém dentro dos limites do conforto adaptativo, portanto não seria necessário o acionamento do sistema de ar condicionado e a ventilação natural poderia promover o resfriamento passivo se desejado. Os dias D4, D5 e D6 são de meia estação e a temperatura operativa alcança o limite máximo em D4 e ultrapassa em D5 e D6, podendo ser controlado por ventilação natural por um período e depois alternado para o resfriamento mecânico nas horas mais quentes, retornando à ventilação natural nas últimas horas do dia. Nos dias D7, D8 e D9, que são de verão, a incidência de radiação solar na janela norte diminui com relação aos outros dias, e nos horários ocupados a temperatura operativa fica acima do limite superior. Como a temperatura do ar externo também é elevada, a abertura de janela até pode ocorrer nas primeiras horas do dia, mas logo deve ser fechada, para o acionamento do sistema de climatização para resfriamento.

Note-se que para estes casos, não houve demanda de aquecimento do ambiente, o que denota a baixa ou nula necessidade de aquecimento, devido à carga térmica interna, que aumenta a temperatura do ar interno. Além dos dias de análise, há outros dias que podem apresentar um perfil de temperatura descendente ou de

alta amplitude térmica, em que a demanda por aquecimento pode ser maior, mas cuja ocorrência é menor ao longo do ano.

A Tabela 19 apresenta uma proposta inicial de operação da ventilação híbrida a partir da comparação direta entre temperatura do ar externo e interno, para todos os dias de análise, sendo que as células em verde indicam o potencial para a ventilação natural, e nos demais casos, a climatização artificial. O critério foi a comparação entre temperaturas a cada hora, considerado como favorável para ventilação natural quando a temperatura do ar interno fosse maior ou igual a 23°C, que a temperatura do ar externo fosse menor do que a do ar interno e que a temperatura do ar externo fosse maior ou igual a 16°C e menor ou igual a 23°C. Evidentemente que ao abrir a janela, a temperatura do ar interno é alterada, o que poderia mudar também o perfil da ventilação híbrida inicialmente proposto.

Tabela 19 – Potencial para ventilação natural nos dias de análise a partir dos resultados da simulação zero

Hora	D1		D2		D3		D4		D5		D6		D7		D8		D9	
	Ext	Int	Ext	Int	Ext	Int	Ext	Int	Ext	Int	Ext	Int	Ext	Int	Ext	Int	Ext	Int
08:00	7,9	18,0	10,4	17,6	11,9	18,5	13,9	20,7	15,4	21,2	17,4	23,5	20,4	25,8	21,4	25,3	23,5	27,9
09:00	9,2	20,6	11,4	20,7	12,4	21,5	14,7	23,6	16,4	24,0	18,4	26,2	22,0	28,2	22,9	27,9	24,6	30,2
10:00	11,2	22,1	13,0	21,9	13,4	22,6	16,2	24,8	18,0	24,8	20,0	27,4	23,4	28,9	24,3	28,7	26,2	30,8
11:00	13,0	22,7	15,6	22,6	14,4	23,2	18,0	25,3	19,4	25,2	21,4	27,6	25,0	29,1	25,4	29,1	28,1	31,2
12:00	14,6	23,0	17,3	22,9	15,3	23,7	19,3	25,8	21,0	26,0	22,4	28,1	25,9	29,4	26,7	29,5	29,5	31,4
13:00	15,5	23,1	18,9	22,8	16,9	23,7	20,4	25,7	21,9	26,0	23,4	27,9	26,4	29,1	27,7	29,4	30,5	31,3
14:00	16,4	23,7	20,4	23,2	19,6	24,4	20,9	26,0	22,4	26,4	23,9	28,0	27,4	29,7	28,4	29,7	30,9	31,6
15:00	17,4	24,0	20,9	23,5	20,6	25,0	20,9	26,3	22,9	26,8	23,0	28,2	27,9	30,0	28,8	29,9	30,7	31,8
16:00	17,9	24,0	20,9	23,5	20,1	25,0	20,3	26,3	21,1	26,6	21,5	28,0	27,9	30,1	28,2	30,1	30,8	32,3
17:00	17,9	23,8	20,3	23,4	18,7	24,6	18,7	26,0	19,3	26,3	20,3	27,8	26,1	30,2	26,1	30,1	30,3	32,2
18:00	17,0	23,3	19,0	23,0	16,4	23,8	17,3	25,4	17,7	25,9	19,5	27,7	24,3	29,9	24,4	29,9	28,6	31,9
19:00	15,5	23,1	18,1	22,9	14,5	23,3	16,3	25,1	16,9	25,6	19,0	27,6	22,1	29,5	23,9	29,8	27,2	31,7

Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

A partir desta análise, estabeleceram-se os limites utilizados nos controles, tanto da ventilação natural, quanto da janela EC. Assim, selecionaram-se os *setpoints* de aquecimento e de resfriamento de 20°C e 24,5°C, respectivamente, para o sistema de climatização ideal, e os limites para a ventilação natural, inicialmente entre 15°C e 23°C, sendo propostos outros intervalos nas simulações paramétricas.

Para o controle EC, foram coletados os dados de saída citados em 3.3.3.1, verificados valores mínimos e máximos para determinar os intervalos de operação dos estágios do vidro EC, propostos em 3.4.2.

4.4.3 Resultados das simulações paramétricas – São Paulo

Nos próximos itens estão descritos os principais resultados obtidos a partir das rodadas de simulações paramétricas, primeiramente com o sistema de climatização, todas as opções de composições de janelas e os controles eletrocromáticos. Depois, considerada a ventilação híbrida, já com as composições selecionadas e os controles EC específicos. Os dados de demanda de energia para climatização artificial correspondem à demanda anual, para 2860 horas/ano. Não foram considerados os consumos de energia elétrica referentes à iluminação artificial e equipamentos, somente a contribuição de carga térmica.

4.4.3.1 Etapa 1 – Sistema de climatização ativado

A primeira rodada de simulações se deu com o sistema de climatização ideal, para os seis tipos de composição de vidro, a fim de selecionar apenas um representante de cada tipo – laminado, insulado duplo e insulado eletrocromático. Para o vidro EC, foram considerados todos os tipos de controles propostos (E1 a E5), inclusive as variações de intervalos (por exemplo, E1-1, E1-2, E1-3, etc). A Figura 35 apresenta o balanço anual de calor sensível das janelas, em kWh.ano, e a demanda de energia pelo sistema de climatização ideal para resfriamento, em kWh/m².ano. Para todos os casos, o ganho de calor é superior à perda de calor pela janela ao longo do ano e a maior demanda de energia é verificada em LAM2, que representa o vidro laminado com camada Low-E.

Já a Figura 36 correlaciona parâmetros de iluminação e de energia: as barras representam a média anual do nível de iluminação natural no plano de trabalho em P1 e P2 (em lux) e as linhas e pontos representam o desempenho relativo (DR) das composições de janelas, em demanda de energia para resfriamento e de aquecimento somados, utilizando o vidro laminado LAM1 como base.

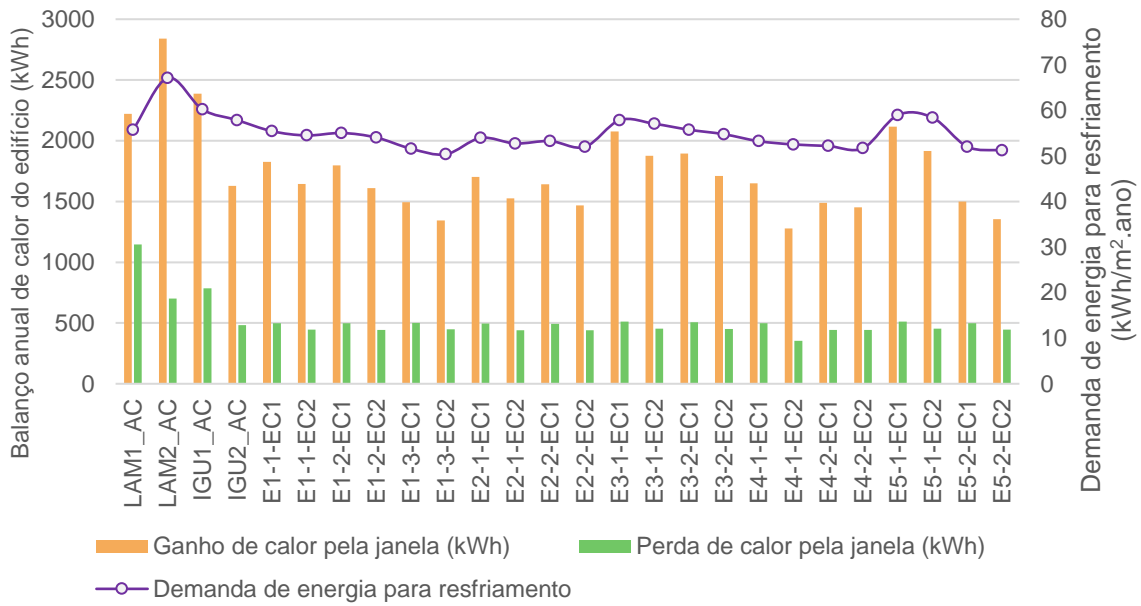


Figura 35 – Balanço de calor da janela e demanda de energia para resfriamento dos cenários com sistema de climatização ideal em São Paulo. Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

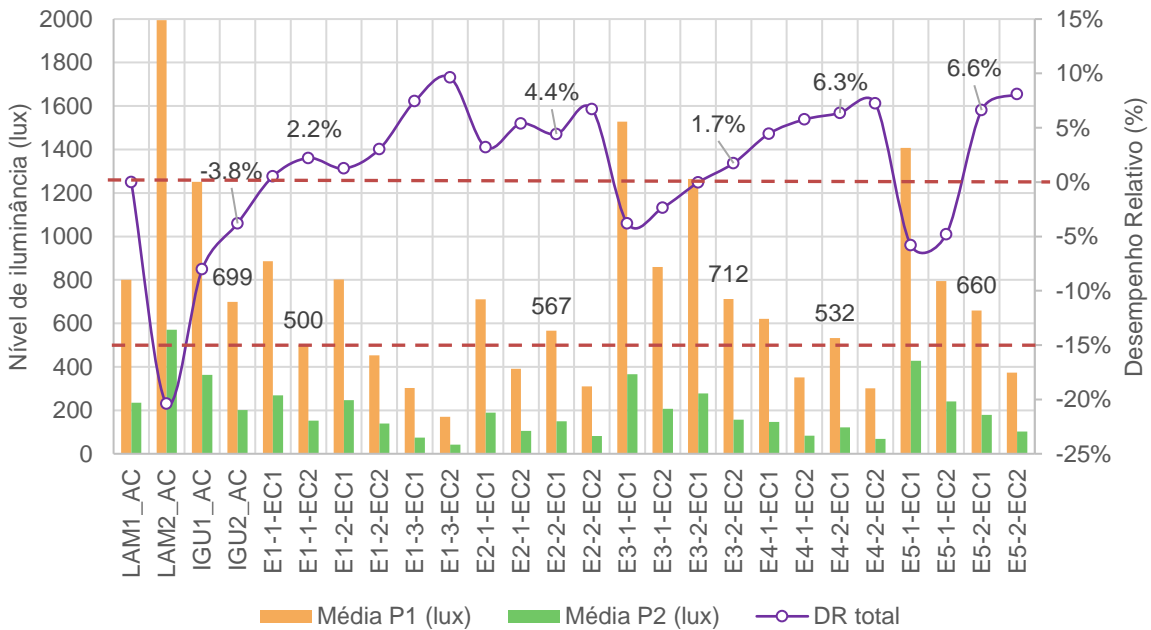


Figura 36 – Desempenho relativo e nível de iluminação nos pontos P1 e P2 em São Paulo – Etapa 1. Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

Assim, se o desempenho térmico relativo for maior do que 0%, significa que a demanda por resfriamento da composição é menor do que a LAM1 e, portanto, o desempenho é melhor.

A composição EC2, janela eletrocromica com a camada low-E, demonstra uma demanda menor por resfriamento quando comparada à EC1, janela eletrocromica sem

a camada low-E, para cada tipo de controle, que coincide também com menor ganho e menor perda de calor pela janela (Figura 35), proporcionado pela camada interna de Low-E. Porém, o nível médio de iluminância também é menor, prejudicando o aproveitamento da iluminação natural e prolongando o tempo de uso da iluminação artificial.

Desta forma, foi selecionado um controle por grupo, que atendesse aos seguintes critérios de forma concomitante: nível de iluminância maior ou igual a 500 lux e desempenho relativo positivo (maior do que 0%). A Tabela 20 contém o resumo dos intervalos de parâmetros para os controles e composições de janela selecionados para os vidros dinâmicos. Os representantes para o vidro laminado e insulado duplo foram o LAM1 e IGU2, respectivamente.

Tabela 20 – Controles EC selecionados para a Etapa 2

Índice EC	E1-1 (EC2)	E2-2 (EC1)	E3-2 (EC2)	E4-2 (EC1)	E5-2 (EC1)	
Controle	Radiação incidente (W/m ²)	Temperatura de superfície externa (°C)	Temperatura do ar externo (°C)	Iluminância externa (lux)	Condição de céu	Ângulo de incidência (graus)
DR	2,2%	4,4%	1,7%	6,3%	6,6%	
1	< 200	≤ 24	< 19	≤ 20000	0 - 10	≤ 0 ≥ 90
					> 4	< 15 ≥ 75
2	< 300	≤ 30	< 23	≤ 35000	≤ 4	< 15 ≥ 75
					> 4	< 30 > 60
3	< 400	≤ 36	< 27	≤ 50000	≤ 4	< 30 > 60
					> 4	30 - 60
4	< 500	≤ 47,5	< 31	≤ 65000	≤ 4	30 - 60
5	≥ 500	> 47,5	≥ 31	> 65000	-	-

Fonte: Elaborado pela autora, 2022

Estas combinações serão utilizadas para as simulações paramétricas, como representativas de cada grupo, de forma a reduzir a quantidade de simulações totais, pois poderia resultar em uma quantidade excessivas de dados, com variações pouco significativas.

4.4.3.2 Etapa 2 – Ventilação híbrida

Na segunda rodada de simulações acrescentaram-se os cinco controles de ventilação híbrida para as composições de janela LAM1, IGU2, EC1 e EC2, estas duas últimas dependendo do tipo de controle do vidro eletrocromico. A Figura 37 contém os níveis médios de iluminância nos pontos P1 e P2, para iluminação natural, e os desempenhos relativos aos do vidro laminado com o mesmo tipo de ventilação. Por exemplo, no cenário E3-V1, com controle EC baseado em temperatura do ar externo e ventilação híbrida de 15°C a 23°C, o desempenho é 6,1% melhor do que o LAM1-V1 (isto é, a demanda de energia para climatização é 6,1% menor). Todos os cenários atendem o nível mínimo de 500 lux no P1 (exceto o E1-V5, o controle EC baseado em radiação incidente e ventilação híbrida de 18°C a 22°C), sendo que os controles E1 (radiação incidente na fachada) apresentam os menores valores, e o E5 (condição de céu e ângulo solar), os maiores. No P2, nenhum cenário atende ao nível mínimo de 500 lux em média.

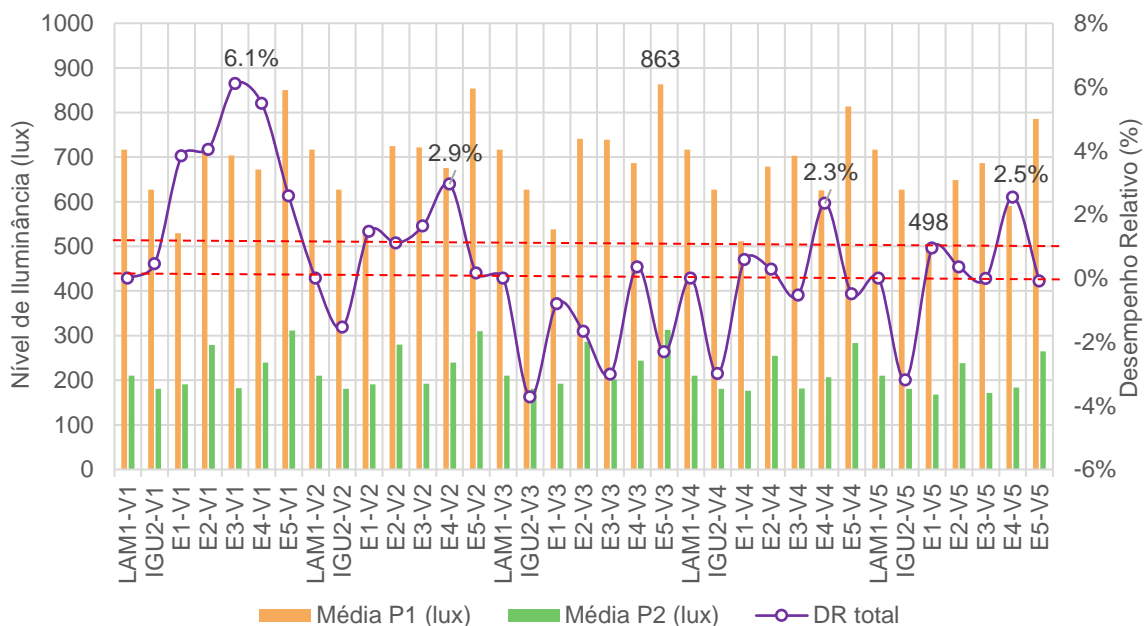


Figura 37 - Desempenho relativo e nível de iluminância nos pontos P1 e P2 em São Paulo – Etapa 2. Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

A Figura 38 mostra a demanda de energia para climatização dos cenários de São Paulo, por grupo de ventilação. O primeiro grupo contém o sistema de climatização, seguidos dos controles de ventilação híbrida. Observa-se que a ventilação híbrida contribui para a redução da energia para resfriamento, sobretudo ao aumentar o limite superior de *setpoint* da ventilação natural, como é o caso do V3

(ventilação entre 18°C e 25°C). Quando o intervalo de operação da ventilação natural é mais estreito, a demanda de energia é maior (por exemplo, em V5, cujo intervalo é de 18°C a 22°C). O perfil dentro de cada grupo, no entanto é semelhante, sendo que as composições de janela com vidros de alto desempenho não apresentam vantagens significativas com relação ao vidro laminado.

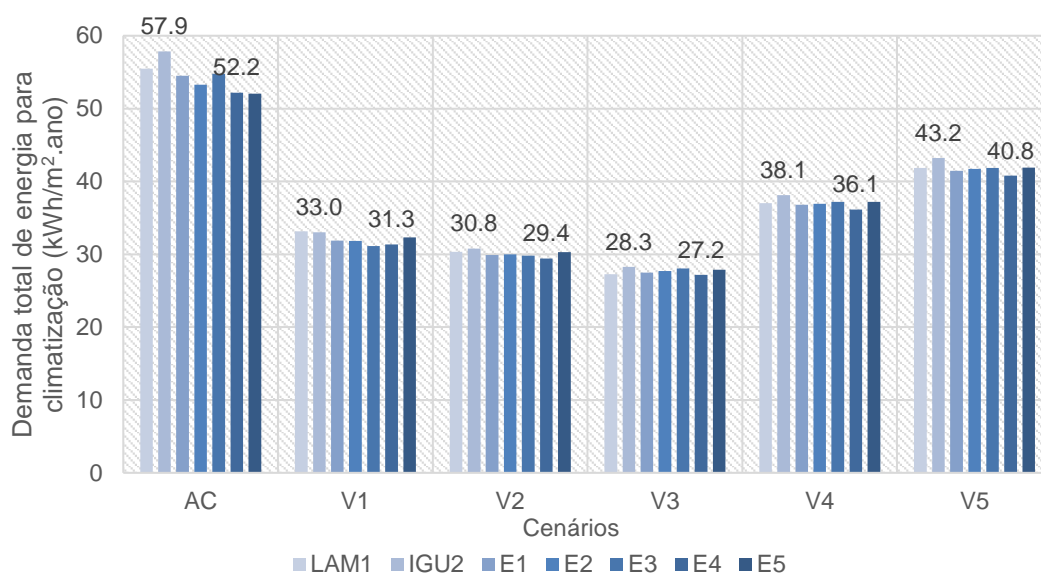


Figura 38 – Demanda total de energia para climatização para São Paulo. Fonte: Elaborado pela autora, 2022

A Figura 39 mostra o percentual de horas no ano para cada estágio da janela eletrocromática, em cada cenário.

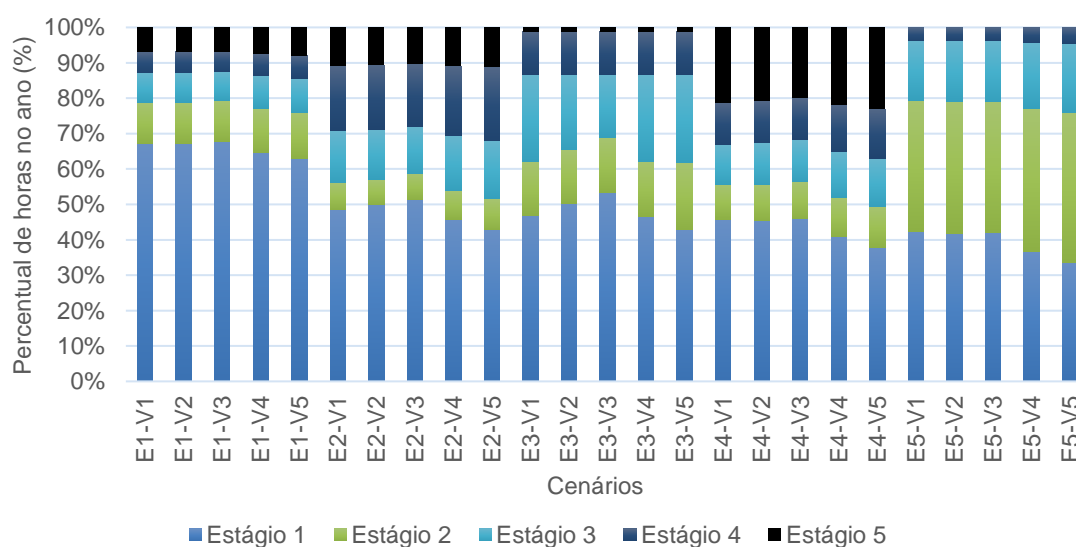


Figura 39 - Percentual de horas no ano para cada estágio da janela eletrocromática para São Paulo. Fonte: Elaborado pela autora, 2022

O controle com mais horas no estágio mais escuro é o E4, que é o controle baseado em iluminância externa e que coincide com os cenários com o menor demanda de energia dentro do grupo de ventilação. A diferença da quantidade de horas em cada estágio entre cenários do mesmo grupo de ventilação híbrida ocorre em função da operação conjunta dos controles VH e EC, em que a folha de vidro retorna ao estado mais claro ao abrir.

Na Figura 40, que contém o percentual de horas em conforto adaptativo e de horas de ventilação natural, e temperatura operativa média anual, observa-se que a maioria dos cenários apresenta um índice de conforto acima de 90%, ficando abaixo apenas para o grupo V3, em função do *setpoint* de temperatura de 25°C, que é mais alto do que os demais controles. As horas de desconforto são de calor. As temperaturas operativas médias variam de 23,8 a 24,6°C e as horas de ventilação natural variam conforme a faixa de operação da ventilação híbrida. Para o grupo de controle V1, em que a faixa de temperatura do ar externo para ventilação natural é de 15°C a 23°C, a temperatura operativa é menor; e para o V3, em que a faixa de temperatura é de 18°C a 25°C, a temperatura operativa é maior.

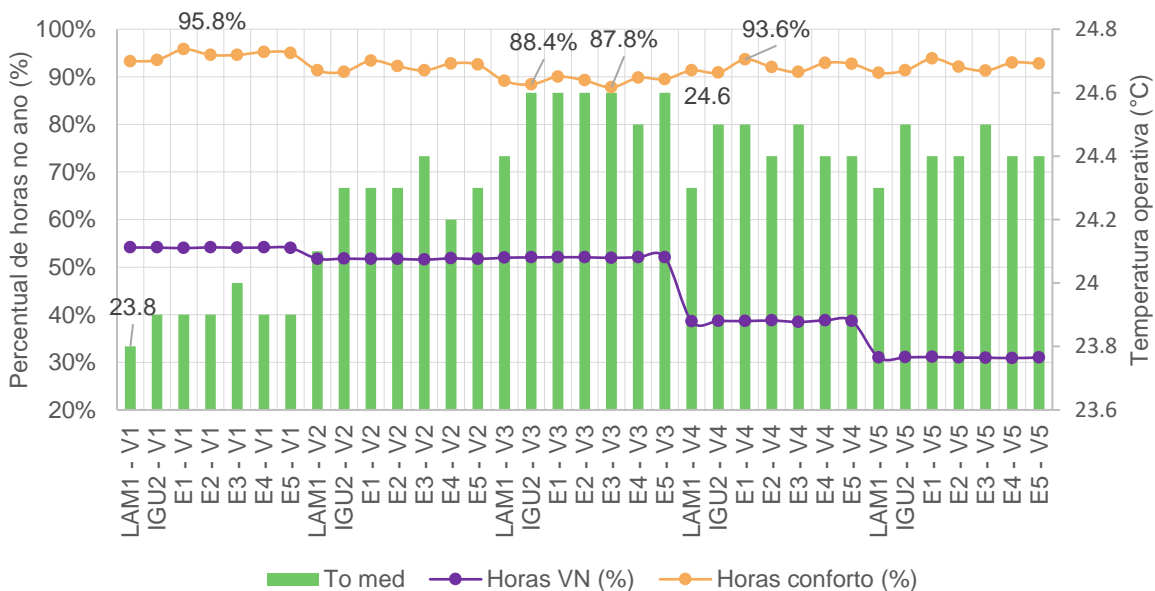


Figura 40 - Percentual de horas de conforto adaptativo, horas de ventilação natural e temperatura operativa média para São Paulo. Fonte: Elaborado pela autora, 2022

Foram detalhados os resultados específicos dos dias de análise D3 e D6, para demonstração da integração entre ventilação híbrida e estágio do vidro EC com relação à temperatura média do ar interno e demanda diária de energia para resfriamento. As tabelas possuem o perfil horário do *status* da janela EC, com os

números de 1 a 5 indicando o estágio do vidro EC da folha fixa, sendo que o fundo de cor verde indica a abertura de janela da folha móvel, e o fundo de cor cinza a janela fechada. Os tons de cinza variam do claro para o escuro, indicando o aspecto do vidro eletrocromico. Cada cenário tem duas colunas, representando as janelas norte e oeste.

Nas últimas duas linhas há a média de temperatura de bulbo seco durante o período (das 8:00h às 19:00h) e a demanda de energia para resfriamento em kWh também para o período. Lembrando que como a janela possui duas folhas, para cada janela uma das folhas é mantida fixa e o EC opera ininterruptamente, e a outra é móvel sendo que quando se abre, a alteração do estágio EC é interrompida, retornando para o estado mais claro.

A Tabela 21 contém o comportamento do dia D3 (17/07), em que a abertura de janela ocorre na parte da tarde. Nos cenários em que o estágio do EC é de 3 a 5, portanto mais escuro, a demanda de energia para climatização diminui. A variação da temperatura do ar média entre os cenários de mesmo tipo de ventilação é pequena. Já a demanda de energia para resfriamento apresenta maior variação, sendo que o menor valor é de 0,5 kWh.dia para os cenários E1-V1, E2-V1, E4-V1 e E5-V1 e o maior, de 4,3 kWh.dia do cenário E3-V5 (controle EC baseado em temperatura do ar externo e VH de 18°C a 22°C). Observa-se que a atuação conjunta da ventilação híbrida e do vidro EC reduz a demanda de energia: todas as simulações do grupo V1 (15°C a 23°C) possuem as mesmas horas de ventilação natural, e a demanda foi maior (0,9 kWh.dia) no E3-V1 (controle EC baseado em temperatura do ar externo e VH de 15 a 23°C), em que o vidro EC se mantém nos estágios mais claros (1 e 2). O mesmo pode ser observado no grupo V5 (18°C a 22°C), o E3 (controle EC de condição de céu a ângulo solar) apresenta o valor com maior desvio, pois para os demais cenários, o valor varia de 2,2 a 2,5 kWh.

A Tabela 22 descreve o comportamento do dia D6 (08/05), em que a abertura das folhas móveis ocorre na maior parte do dia em três cenários, e em todo o período nos outros dois. Os grupos V2 (17°C a 24°C) e V3 (18°C a 25°C) possuem demanda zero de energia para climatização e temperaturas médias de 25,8°C a 25,9°C, no máximo 0,5°C a mais do que o cenário com menores médias, do grupo V5 (18°C a 22°C). Os cenários do grupo V5 são também os que apresentam maior demanda de energia para climatização, de 5,3 a 5,5 kWh.dia.

Tabela 21 – Indicação do estágio da janela EC para o dia D3 (17/07), média diária da temperatura do ar e demanda de energia para resfriamento

	Ta Ext (°C)	E1					E2					E3					E4					E5									
		V1	V2	V3	V4	V5	V1	V2	V3	V4	V5	V1	V2	V3	V4	V5	V1	V2	V3	V4	V5	V1	V2	V3	V4	V5					
08:00	11.9	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
09:00	12.9	4	1	4	1	4	4	1	4	1	4	4	1	4	1	4	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	4	1	4	1	4
10:00	13.9	5	1	5	1	5	5	1	5	1	5	5	1	5	1	5	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	1	4	1	4
11:00	14.9	5	1	5	1	5	5	1	5	1	5	5	1	5	1	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	4	1	4	1	4
12:00	15.7	5	1	5	1	5	5	1	5	1	5	5	1	5	1	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	4	1	4	1	4
13:00	17.9	5	2	5	2	5	5	2	5	2	5	5	3	5	3	5	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	4	2	4	2	4
14:00	20.9	5	4	5	4	5	5	4	5	4	5	5	5	5	5	5	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	4	3	4	3	4
15:00	20.4	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3
16:00	19.9	4	5	4	5	4	4	5	4	5	4	5	5	5	5	5	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	4	4	4	4	4
17:00	17.9	2	3	2	3	2	3	2	3	2	3	3	4	3	4	3	4	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3	3	3	3	3
18:00	15.4	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3	3	3	3	3
19:00	13.9	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3	3	3	3	3
Tar med (°C)		23,4	24,2	24,4	24,4	24,4	23,7	24,6	24,7	24,6	24,6	23,8	24,8	25,0	24,9	25,0	23,5	24,3	24,5	24,4	24,4	23,4	24,3	24,5	24,4	24,4					
Demanda para resfriamento (kWh)		0,5	1,8	2,3	2,2	2,2	0,5	2,0	2,5	2,4	2,4	0,9	3,0	3,9	3,7	4,3	0,5	2,0	2,6	2,5	2,5	0,5	2,0	2,6	2,5	2,4					

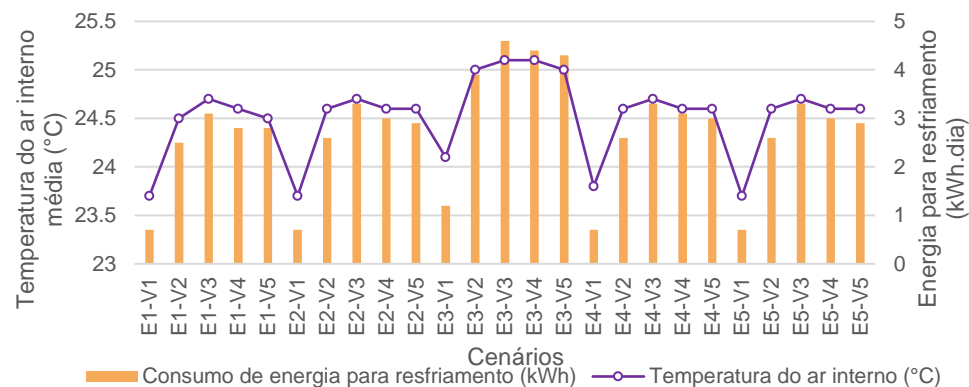


Figura 41 – Temperatura média do ar e demanda de energia de resfriamento para o D3 (17/07)

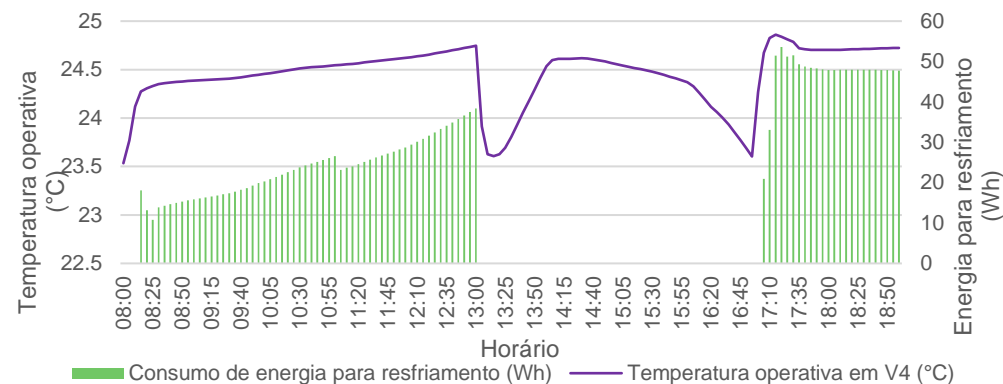


Figura 42 – Perfil de temperatura operativa e demanda de energia para resfriamento para o dia D3, cenário E4-V4

Tabela 22 - Indicação do estágio da janela EC para o dia D6 (08/05), média diária da temperatura do ar e consumo para resfriamento

	Ta ext	E1					E2					E3					E4					E5																				
		V1	V2	V3	V4	V5	V1	V2	V3	V4	V5	V1	V2	V3	V4	V5	V1	V2	V3	V4	V5	V1	V2	V3	V4	V5																
08:00	17.9	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3		
09:00	18.9	4	1	4	1	4	1	4	1	4	1	4	1	4	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3	1	3	1	3	1	3	1	3	1	3	1		
10:00	20.9	4	1	4	1	4	1	4	1	4	1	5	2	5	2	5	2	5	2	5	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
11:00	21.9	4	1	4	1	4	1	4	1	4	1	5	3	5	3	5	3	5	3	5	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	
12:00	22.9	5	1	5	1	5	1	5	1	5	1	5	3	5	3	5	3	5	3	5	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	
13:00	23.9	3	2	3	2	3	2	3	2	3	2	5	4	5	4	5	4	5	4	5	4	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	
14:00	23.9	3	2	3	2	3	2	3	2	3	2	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	3	
15:00	22.4	2	3	2	3	2	3	2	3	2	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3
16:00	20.9	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	2	3	2	3	2	3	2	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3
17:00	19.9	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
18:00	19.2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	
19:00	18.9	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	
Tar (°C)		25,5	25,8	25,9	25,5	25,4	25,5	25,8	25,8	25,5	25,3	25,5	25,9	25,9	25,5	25,4	25,5	25,9	25,9	25,5	25,4	25,5	25,9	25,9	25,5	25,4	25,5	25,9	25,9	25,5	25,4	25,5	25,9	25,9	25,5	25,4	25,4	25,4	25,4	25,4		
Demanda resfriamento (kWh)		3,3	0,0	0,0	3,3	5,3	3,4	0,0	0,0	3,4	5,3	3,4	0,0	0,0	3,4	5,3	3,4	0,0	0,0	3,4	5,4	3,4	0,0	0,0	3,5	5,4	3,5	0,0	0,0	3,5	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5			

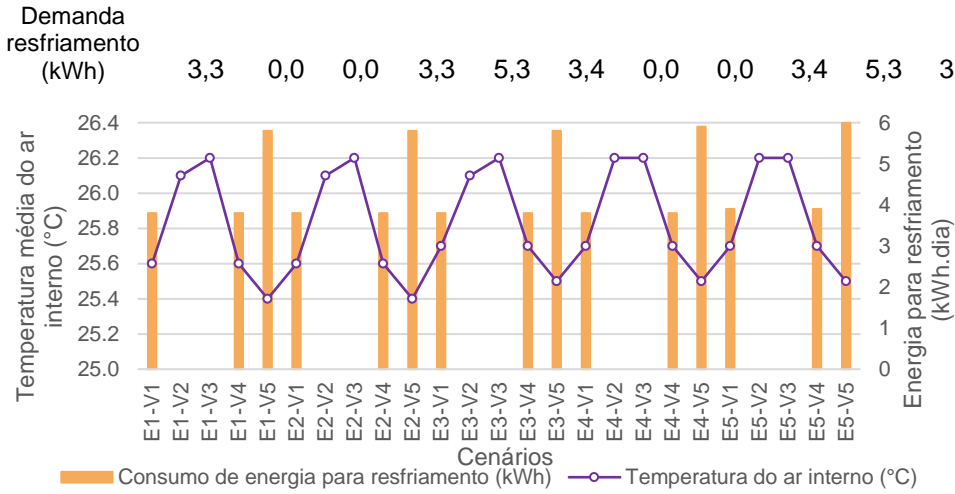


Figura 43 – Temperatura do ar média e demanda de energia de resfriamento para o D6 (05/08)

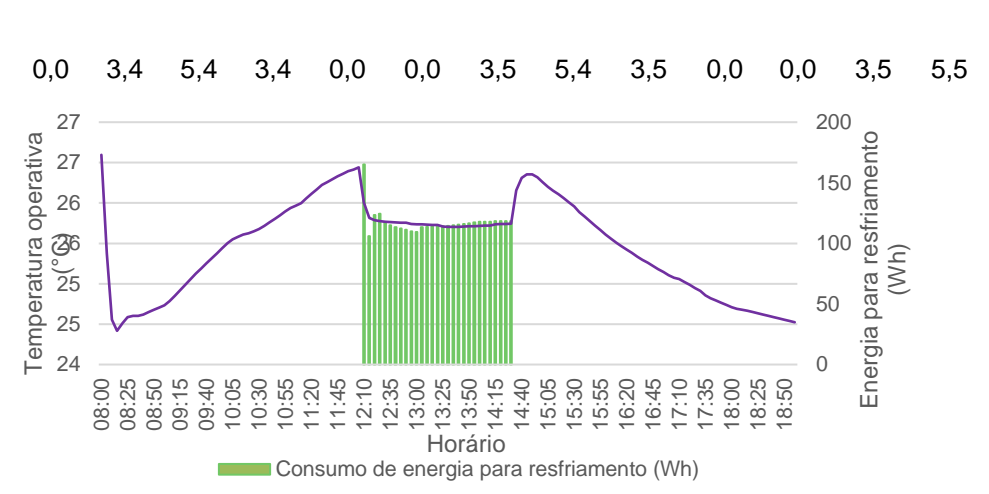


Figura 44 – Perfil de temperatura operativa e demanda de energia para resfriamento para o dia D6, cenário E2-V1

4.5 Análise para zonas bioclimáticas 1 e 8

Os resultados das análises para Curitiba/PR (ZB1) e para Recife/PE (ZB8) estão descritos nos próximos itens.

4.5.1 Limites do conforto adaptativo – ZB1 e ZB8

Os limites de temperatura operativa para o modelo de conforto adaptativo definidos para Curitiba e Recife estão expostos nos próximos itens.

4.5.1.1 Conforto adaptativo para Curitiba

A Figura 45 contém a distribuição dos resultados de temperatura operativa de Curitiba, para os limites do conforto adaptativo. Os valores médios, mínimos e máximos estão descritos na Tabela 23. O desvio-padrão médio encontrado foi de 0,7°C e o intervalo médio de conforto adaptativo é de 18,5°C a 25,5°C.

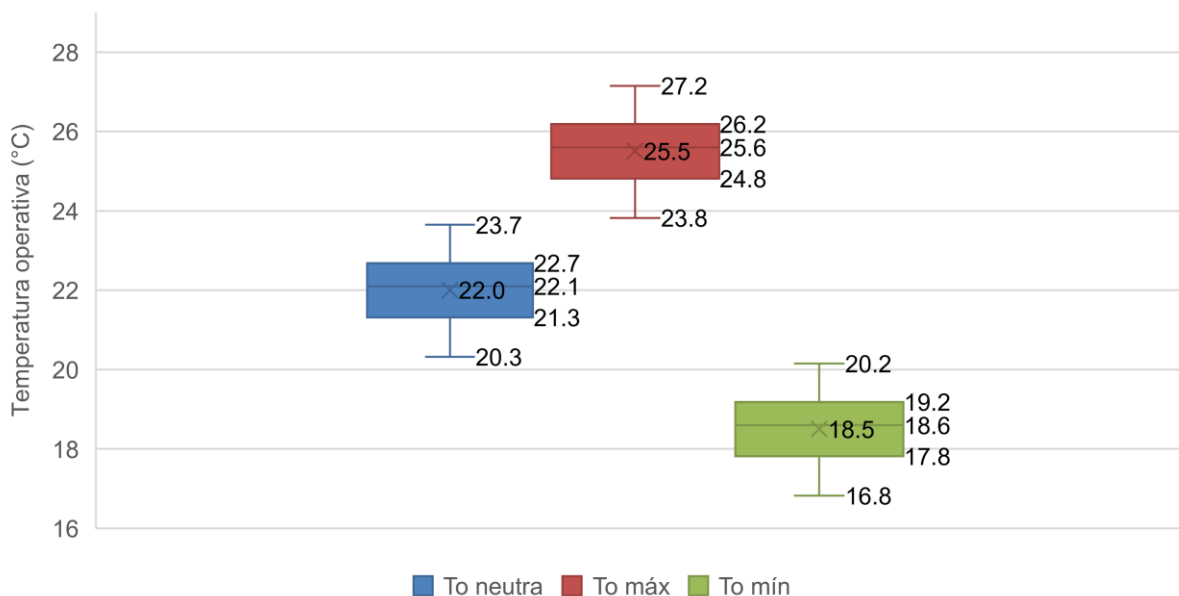


Figura 45 – Resultados de temperaturas operativas para conforto adaptativo para o clima de Curitiba/PR. Fonte: Elaborado pela autora, 2022

Tabela 23 – Resumo dos limites de conforto térmico adaptativo para Curitiba/PR

Temperatura Operativa	T_o neutra (°C)	T_o mín (°C)	T_o máx (°C)
Mínima	20,3	16,8	23,8
Máxima	23,7	20,2	27,2
Média	22,0	18,5	25,5

Fonte: Elaborado pela autora, 2022

Os dias de análise foram selecionados da mesma forma como em São Paulo, o que levou à inserção do Grupo 0, em que a temperatura do ar às 8:00h varia de 3°C a 7,9°C (Tabela 24).

Tabela 24 – Resumo das principais variáveis dos Grupos 0 a 9 de Curitiba/PR

Grupo	Tar 8h (°C)	Período (mês)	Amplitude térmica	Dia de projeto
0	3 a 7,9	Jun/jul/ago	3,3 a 17,4	15/08
1	8 a 9	Jun/jul	0,9 a 16	21/06
2	9,1 a 11	Mai a set	1,8 a 16	26/05
3	11,1 a 13	Abr a out	1 a 15,2	12/07
4	13,1 a 15	Todos exceto jan	0,7 a 15,5	22/09
5	15,1 a 17	Todos	1,3 a 15	28/11
6	17,1 a 19	Todos exceto mai	1,5 a 12	13/03
7	19,1 a 21	Jan-abr / set-dez	1 a 14	26/01
8	21,1 a 23	Jan/fev/out/dez	4 a 13,3	17/02
9	23,1 a 26	Fev/mar/dez	5 a 10	15/02

Fonte: Elaborado pela autora, 2022

4.5.1.2 Conforto adaptativo para Recife

As mesmas informações foram extraídas para Recife, sendo que a Figura 46 contém os limites de temperatura operativa para conforto adaptativo. A

Tabela 25 contém os valores de temperatura operativa neutra, mínima e máxima. Além das médias serem mais elevadas do que as de Curitiba, nota-se que o desvio padrão é menor, de 0,28°C, representadas pelas caixas mais estreitas da Figura 46. O intervalo médio de conforto adaptativo é, portanto, de 20,9° a 27,9°C.

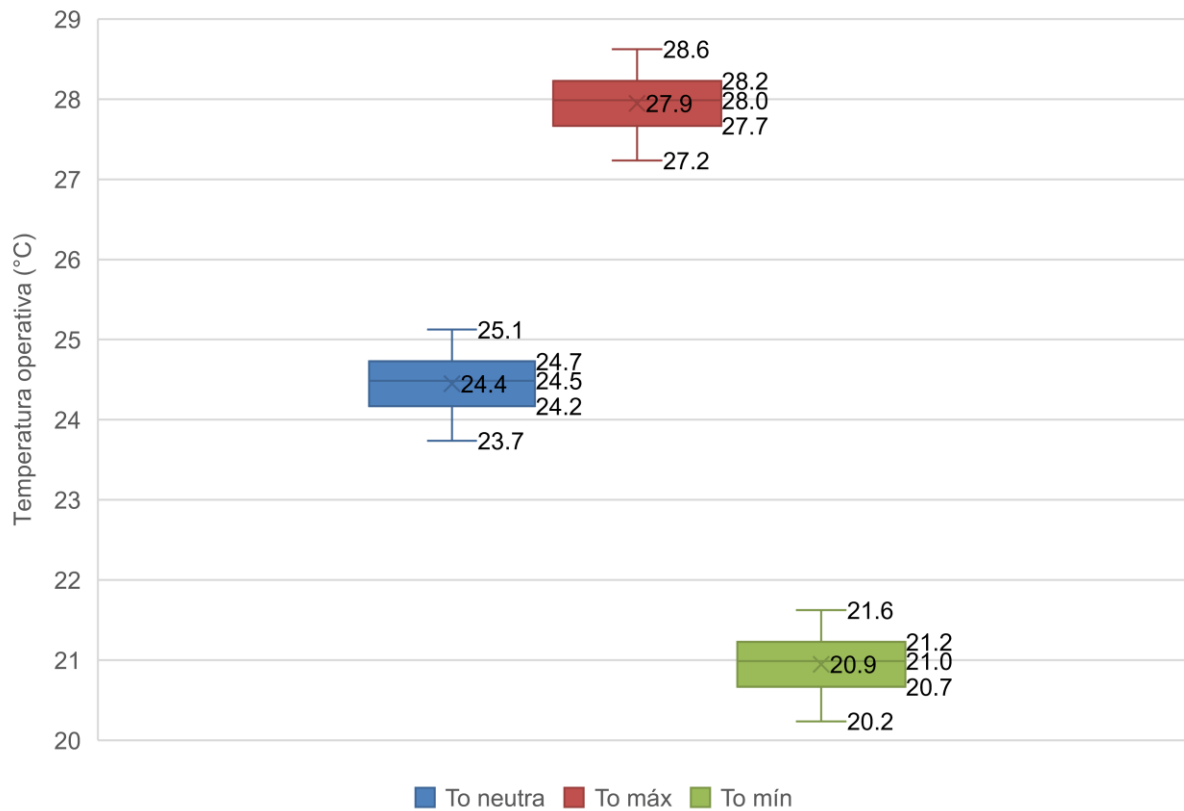


Figura 46 – Resultados de temperaturas operativas para conforto adaptativo para o clima de Recife/PE. Fonte: Elaborado pela autora, 2022

Tabela 25 – Resumo dos limites de conforto térmico adaptativo para Recife/PE

Temperatura Operativa	T_o neutra (°C)	T_o mín (°C)	T_o máx (°C)
Mínima	23,7	20,2	27,2
Máxima	25,1	21,6	28,6
Média	24,4	20,9	27,9

Fonte: Elaborado pela autora, 2022

A partir da mesma base de agrupamento de São Paulo, os dias de análise foram definidos a partir do grupo 8, uma vez que as temperaturas do ar externo em Recife são mais elevadas ao longo do ano. Foram criados mais três grupos para abranger os intervalos de 26°C a 31°C (Tabela 26), grupos 10, 11 e 12. Apenas um dia do ano foi enquadrado no grupo 7 em função da temperatura do ar às 8:00h, mas se tratava de um dia do fim de semana, sem ocupação e por isso não foi incluído na Tabela 26.

Tabela 26 – Resumo das principais variáveis dos Grupos 8 a 12 de Recife/PE

Grupo	Tar 8h (°C)	Período (mês)	Amplitude térmica	Dia de projeto
8	21,1 a 23	Fev/jun/jul/ago/set	1,6 a 7,9	06/07
9	23,1 a 25	Abr a set	1 a 8	10/08
10	25,1 a 27	Todos	1 a 9	23/06
11	27,1 a 29	Todos	1 a 11	09/10
12	29,1 a 31	Jan-abr/nov/dez	1 a 11,3	30/01

Fonte: Elaborado pela autora, 2022

4.5.2 Resultados das simulações zero – ZB1 e ZB8

Para definir os controles de ventilação híbrida e do eletrocômico, foi rodada a simulação zero para os respectivos climas. Os resultados de quatro parâmetros utilizados nos controles, para São Paulo, Curitiba e Recife, estão na Tabela 27. Observa-se que a iluminância externa máxima e a radiação incidente máxima na janela oeste apresentam uma variação pequena entre as localidades, enquanto que para os demais parâmetros o desvio é maior. Curitiba apresentou todos os valores maiores do que São Paulo, exceto pela temperatura do ar externo, já Recife apresentou valores maiores para temperatura de superfície da janela Oeste e temperatura do ar externo.

Tabela 27 – Intervalos dos parâmetros ambientais utilizados dos controles EC para as cidades estudadas

Localização	Radiação incidente máxima (W/m²)		Temperatura máxima de superfície (°C)		Iluminância externa (lux)	Temperatura do ar externo (°C)	
	Norte	Oeste	Norte	Oeste	Máxima	Mínima	Máxima
São Paulo	783,4	867,9	71,0	71,9	116.176	8,0	35,0
Curitiba	805	850,5	74,9	85,5	117.690	3,3	34,9
Recife	621,7	817,1	70,6	79,9	116.125	20,9	38,2

Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

Os dados da simulação zero extraídos dos dias de análise resultam na Figura 47, demonstrando o potencial para a ventilação natural na maior parte do ano em Curitiba.

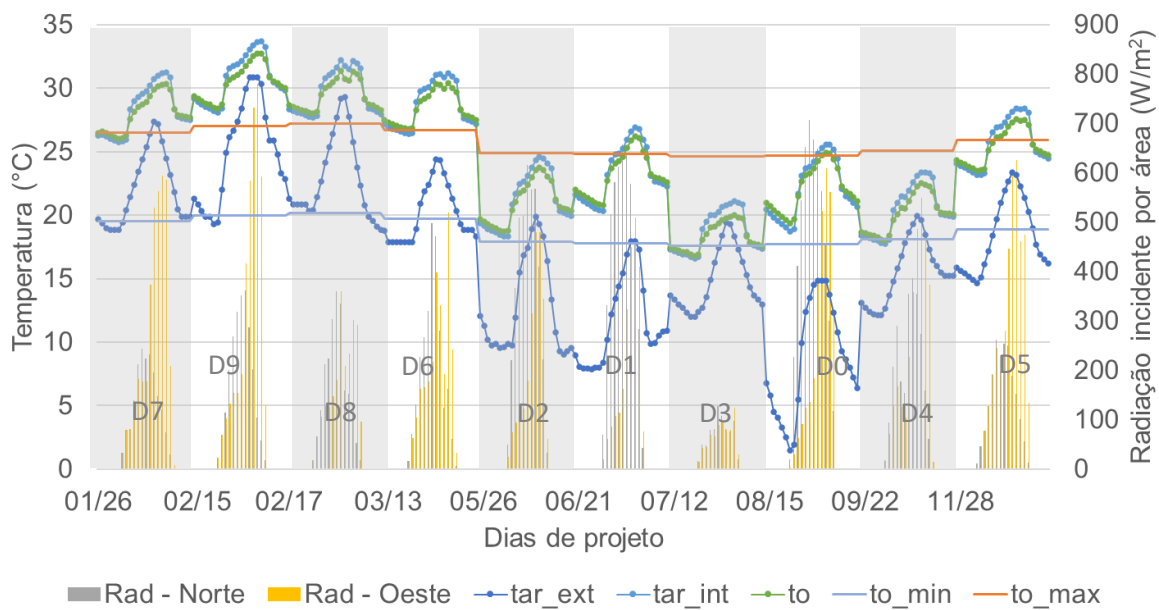


Figura 47 - Perfil de temperatura do ar e radiação incidente na Simulação zero para Curitiba. Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

A Figura 48 contém os resultados da simulação zero para Recife, indicando pouco potencial para aproveitamento da ventilação natural.

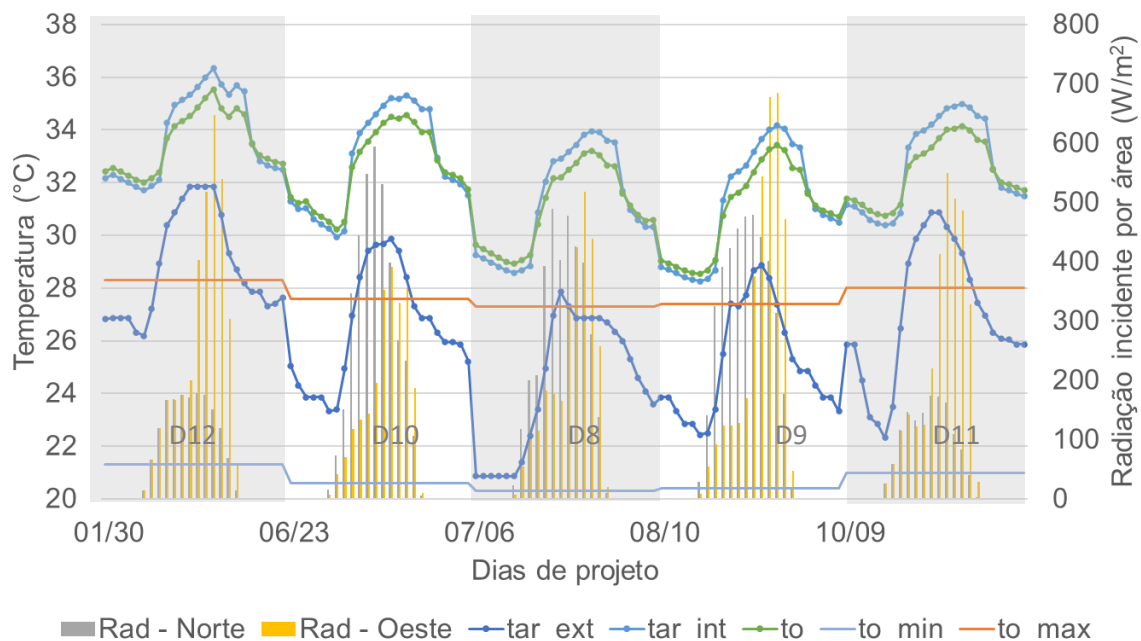


Figura 48 - Perfil de temperatura do ar e radiação incidente na simulação zero para Recife. Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

Diante disso, dado que os controles selecionados para a cidade de São Paulo foram mais conservadores, os mesmos controles E1 a E5 foram mantidos para Curitiba e para Recife.

No caso da ventilação híbrida, a diferença entre a temperatura operativa neutra para conforto térmico adaptativo entre São Paulo e Recife apresentou uma variação máxima de 1,6°C. Assim, os controles V1 a V5 foram mantidos para Curitiba e alterados para Recife, uma vez que a temperatura mínima do ar externo no horário de ocupação é de 20°C, portanto não havia necessidade de climatização para aquecimento. Desta forma, consideraram-se os controles V1, V2, V3 e V5, utilizando os limites máximos da ventilação híbrida para resfriamento (de 23°C, 24°C, 25°C e 22°C, respectivamente) e eliminando o limite mínimo. O V4 foi excluído por possuir um limite de 23°C, igual ao V1. Além disso, o termostato para o *Ideal Loads Air System* foi configurado para apenas resfriamento, com o *setpoint* de 24,5°C.

4.5.3 Resultados das simulações paramétricas – ZB1 e ZB8

Nos próximos itens estão descritos os resultados das simulações paramétricas para Curitiba e Recife.

4.5.3.1 Simulações paramétricas para Curitiba

Na Figura 49, de Curitiba, observa-se que os níveis médios de iluminância para o ponto P1, mais próximo das janelas, são sempre maiores do que 500 lux. O ponto P2 apresenta níveis menores, o que sugere o uso de iluminação artificial com mais frequência. Basicamente os melhores desempenhos relativos são do grupo de controle V1 (15°C a 23°C), que admitem uma temperatura menor do ar externo; seguido do grupo V2 (17°C a 24°C). A partir do grupo V3 (18°C a 25°C), as janelas do tipo insulada estática e com controle E3 (temperatura do ar externo) apresentam os piores desempenhos. Neste caso, a ventilação natural com temperatura do ar externo mais baixa favorece a redução de demanda de energia para climatização.

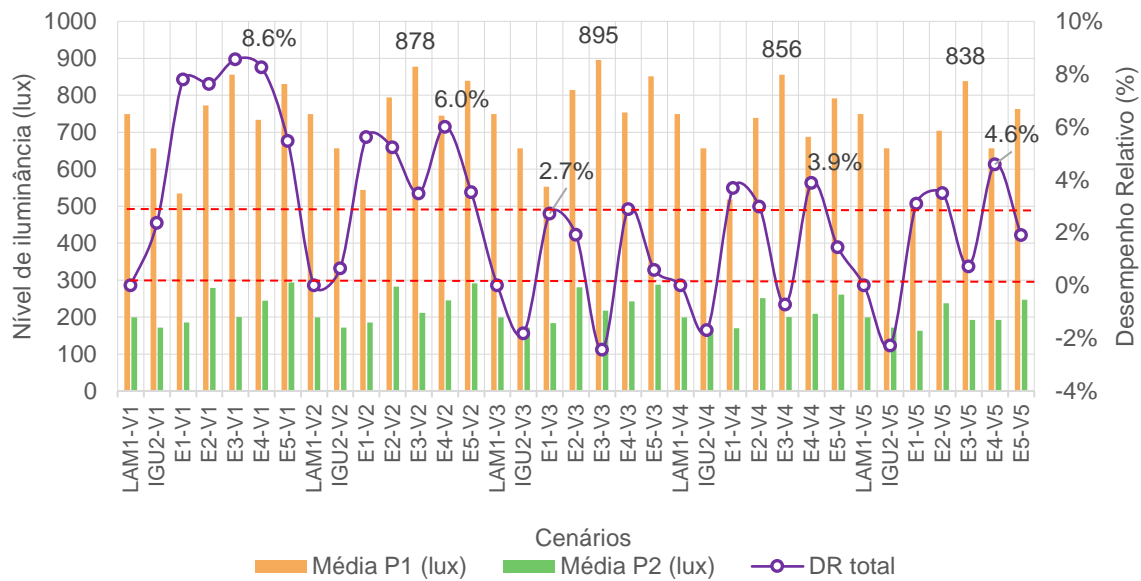


Figura 49 – Nível de iluminância e desempenho térmico relativo (DR) da janela para Curitiba.
Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

A Figura 50 apresenta as demandas de energia para aquecimento e resfriamento ao longo do ano, normalizadas pela área da zona. Em termos absolutos, os cenários do grupo V3 (18°C a 26°C) apresentam as menores demandas de energia para climatização, variando de 14,9 a 15,6 kWh/m².ano. Comparando aos cenários com somente climatização, a ventilação híbrida oferece uma possibilidade de redução de demanda de energia para climatização, cuja magnitude depende da faixa de temperatura do ar externo.

A Figura 51 contém o percentual de horas dos estágios do eletrocromático no ano, para todos os cenários. O tipo de controle de ventilação tem influência na mudança de estágio da janela EC, não em função da alteração da leitura do sensor do controle EC, mas devido à programação prever que ao abrir a janela, a folha de vidro EC retorna ao estágio mais claro. Normalmente, os controles V5 (18°C a 22°C) apresentam mais horas com os estágios mais escuros quando comparados aos cenários do mesmo grupo de controle EC, pois como a faixa de temperatura da ventilação híbrida é mais estreita, a janela abre com menos frequência, permitindo que o controle EC opere com menor interferência do controle VH.

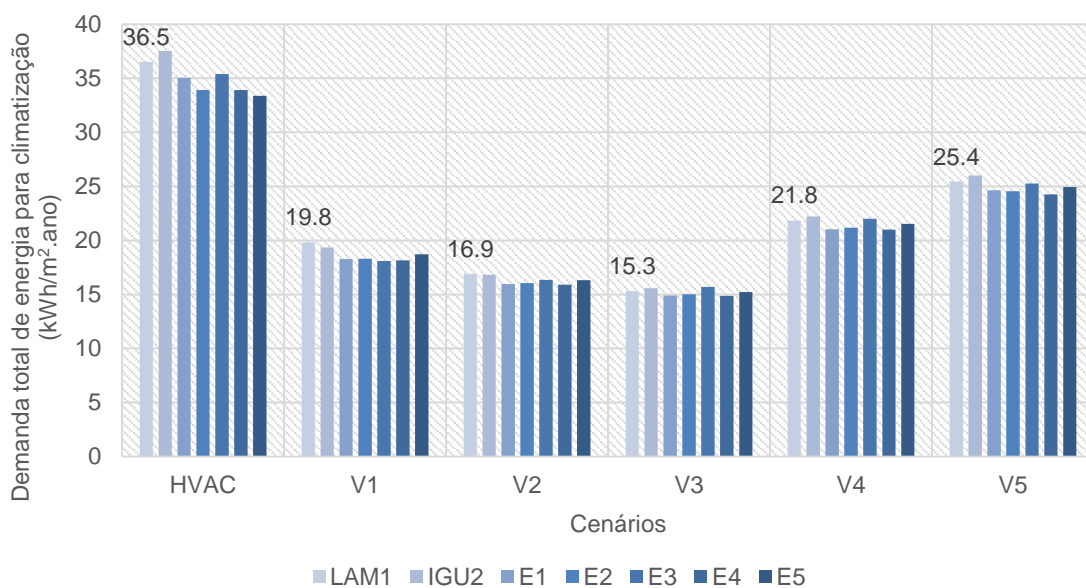


Figura 50 – Demanda total de energia para climatização em Curitiba. Fonte: Elaborado pela autora, 2022

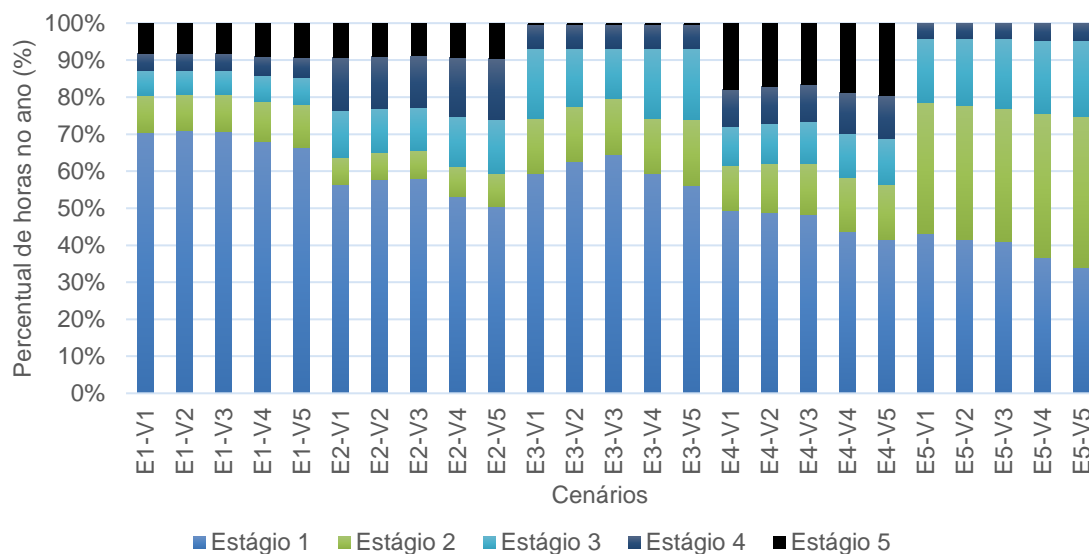


Figura 51 – Percentual de horas no ano para cada estágio da janela eletrocromica para Curitiba. Fonte: Elaborado pela autora, 2022

Os grupos de controle EC, E2 e E4, que operam a partir da temperatura de superfície externa da janela e do nível de iluminância externa, respectivamente, apresentam mais horas com estágios mais escuros. Na maioria dos cenários o maior percentual é do estágio mais claro, variando de 34% no E5-V5 (controle EC de condição céu a ângulo solar e controle VH de 18°C a 22°C) a 70,9% no E1-V2 e E1-

V3 (controle EC de radiação incidente e controle VH de 17°C a 24°C, e 18°C a 25°C, respectivamente).

As horas de ventilação natural já dependem mais do controle VH e a variação de horas de ventilação é de 0,1% entre os cenários do mesmo grupo. No grupo V5 (18°C a 22°C) há ventilação natural em 31,5% das horas do ano, e no V1 (15°C a 23°C), em 56% (Figura 52). O percentual de horas em conforto varia de 94% a 99%, e a temperatura operativa média, de 22,5 a 23,6°C. Dentro de cada grupo de controle VH, as menores temperaturas são observadas nos cenários LAM1 e as maiores em E3 (controle EC de temperatura do ar externo), que coincide com os maiores níveis médios de iluminação natural.

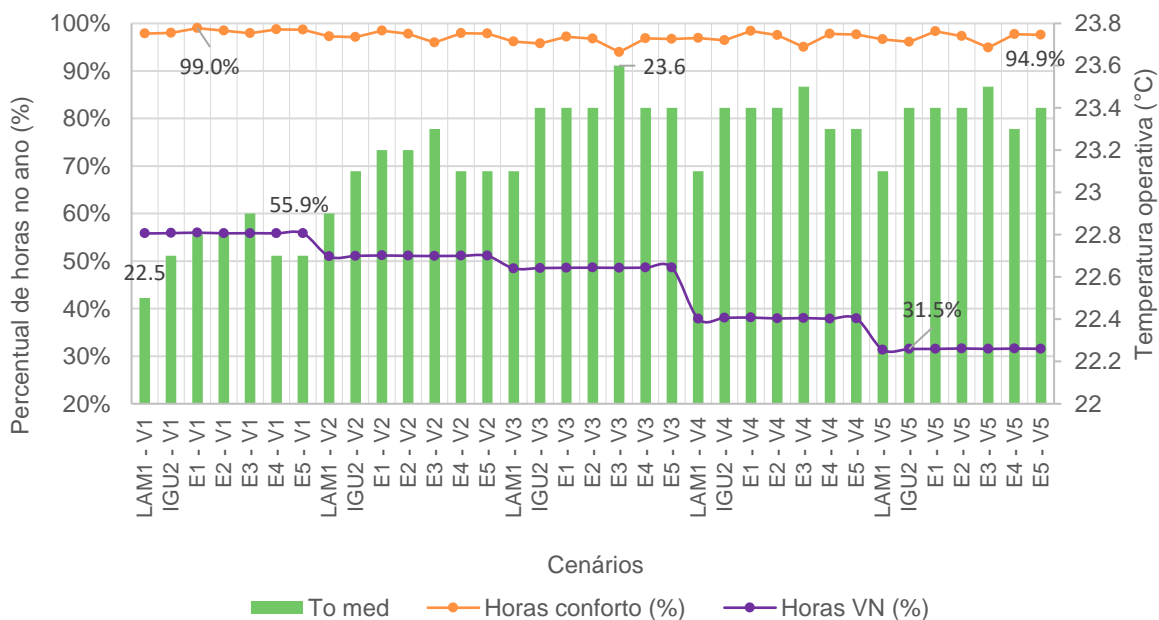


Figura 52 – Percentual de horas de conforto adaptativo, horas de ventilação natural e temperatura operativa média para Curitiba. Fonte: Elaborado pela autora, 2022

4.5.3.2 Simulações paramétricas para Recife

Em Recife, os desempenhos dentro de cada grupo de controle VH apresentam perfis com comportamentos que se repetem (Figura 53), aparentemente não sendo influenciados pela temperatura de *setpoint*, em função das poucas horas de ventilação natural por ano (Figura 56). Os tipos da janela com nível médio de iluminância iguais ou maiores do que 500 lux no P1 são o LAM1, IGU2 e E5; os demais controles EC prejudicam o aproveitamento da iluminação natural, pois além da radiação incidente máxima ser menor para Recife quando comparada às outras cidades estudadas

(Tabela 27), o intervalo estipulado para os controles EC e VH favorecem os estágios mais escuros do eletrocromômico em maior quantidade de horas no ano (Figura 55).

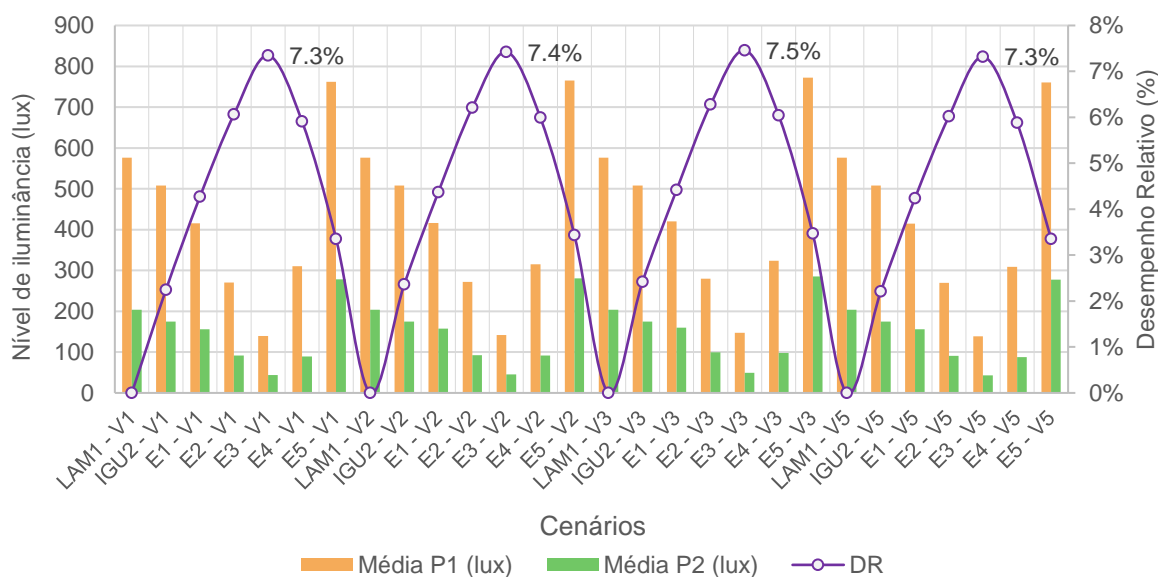


Figura 53 - Nível de iluminância e desempenho térmico relativo da janela para Recife. Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

Na comparação das demandas de energia para resfriamento (Figura 54), os grupos apresentam o mesmo perfil, sendo que os cenários com ar-condicionado têm os maiores valores. Os cenários com VH apresentam uma redução pequena de demanda de energia para resfriamento, sendo que os do grupo V3 têm os menores valores, cujo *setpoint* é de 25°C.

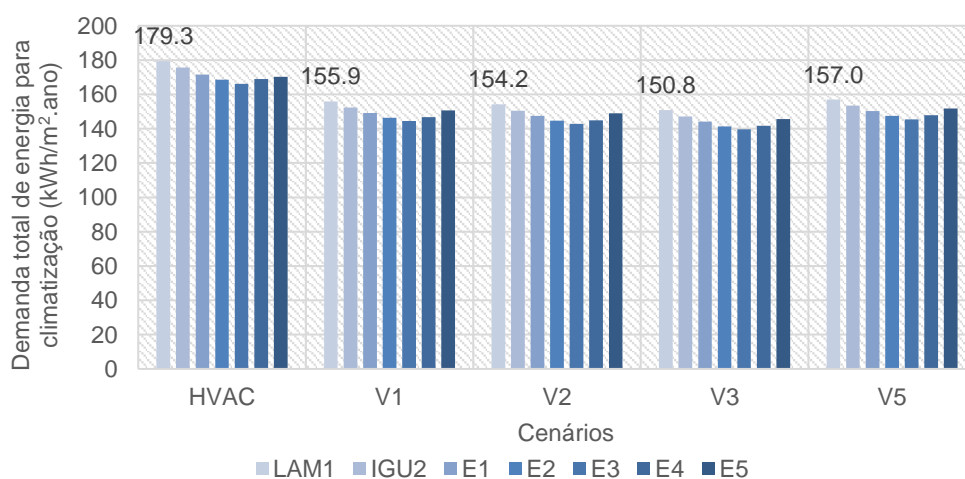


Figura 54 - Demanda total de energia para climatização em Recife. Fonte: Elaborado pela autora, 2022

Quanto ao percentual de horas em cada estágio da janela EC, na Figura 55, o destaque está para o E3, cujas janelas ficam mais escuras na maior parte do tempo,

devido às elevadas temperaturas do ar externo. Como consequência, os níveis de iluminância médio para P1 variam apenas de 138 a 147 lux, forçando o uso da iluminação artificial constantemente.

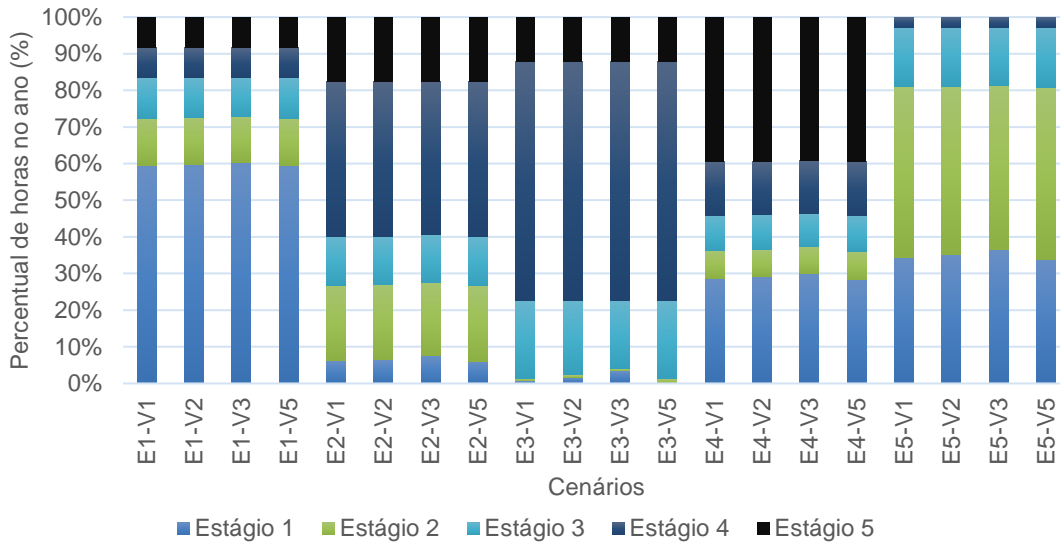


Figura 55 - Percentual de horas no ano para cada estágio da janela eletrocromica para Recife. Fonte: Elaborado pela autora, 2022

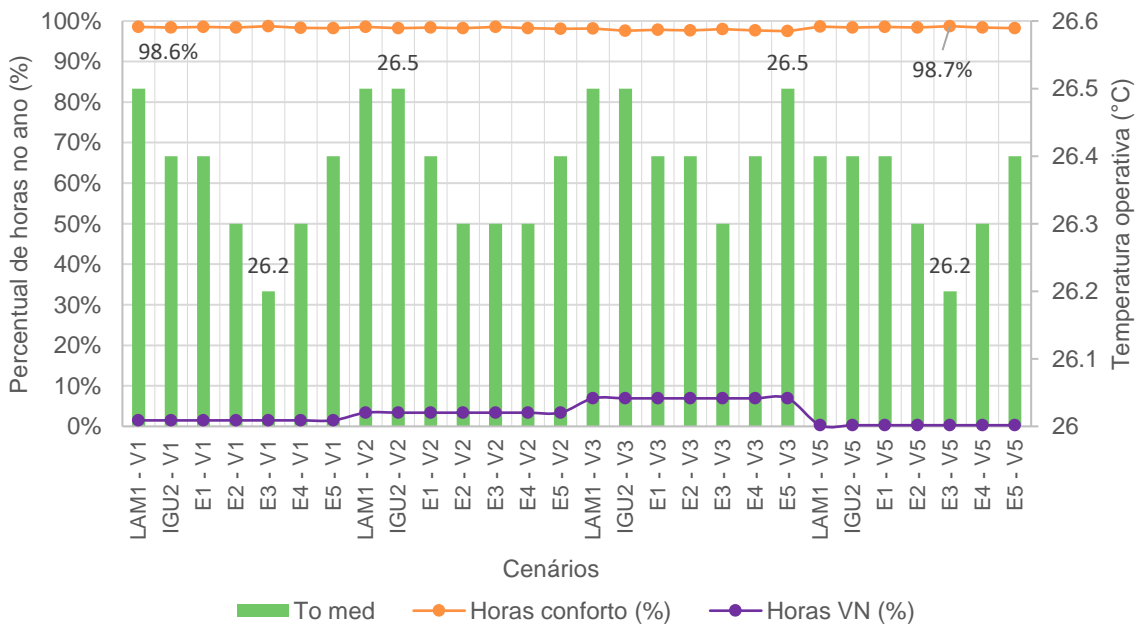


Figura 56 - Percentual de horas de conforto adaptativo, horas de ventilação natural e temperatura operativa média para Recife. Fonte: Elaborado pela autora, 2022

O percentual de horas em conforto adaptativo é alto ao longo do ano (Figura 56), sendo que as médias de temperatura operativa sofrem pequena variação, de 26,2 a 26,5°C. Conforme mencionado anteriormente, a quantidade de horas com ventilação

natural ao longo do ano é pequena, variando de 8 horas (0,3%) para o grupo V5 (controle VH com *setpoint* de 22°C) a 197,75 (6,9%) horas no grupo V3 (controle VH com *setpoint* de 25°C). Como há mais horas com climatização artificial ao longo do ano, as temperaturas do ar interno variam menos e as horas em conforto térmico são maiores.

4.5.4 Resultados da ventilação noturna

As figuras a seguir mostram os resultados das simulações com a ventilação noturna para São Paulo (Figura 57), Curitiba (Figura 58) e Recife (Figura 59) aplicados somente para os cenários com controle V5, com *setpoints* de 18°C e 22°C. As barras laranjas representam a perda de calor por infiltração em kWh.ano das janelas com vidros estáticos (LAM1 e IGU2) e as barras verdes, as janelas com vidro dinâmico (EC). A linha em roxo indica a demanda de energia para climatização em kWh/m².ano; no caso de São Paulo e Curitiba trata-se da soma entre aquecimento e resfriamento, e no caso de Recife, somente resfriamento.

Em todos os casos, observa-se uma diferença pouco significativa entre a ventilação noturna de três horas, da 0:00h às 3:00h e das 3:00h às 6:00h. Uma maior eficiência é obtida com o período de seis horas, da 0:00h às 6:00h, sendo que em São Paulo, o cenário com menor demanda de energia para climatização é o E4-V5 (controle EC por iluminância externa), e em Curitiba e Recife é o E3-V5 (controle EC por temperatura do ar externo).

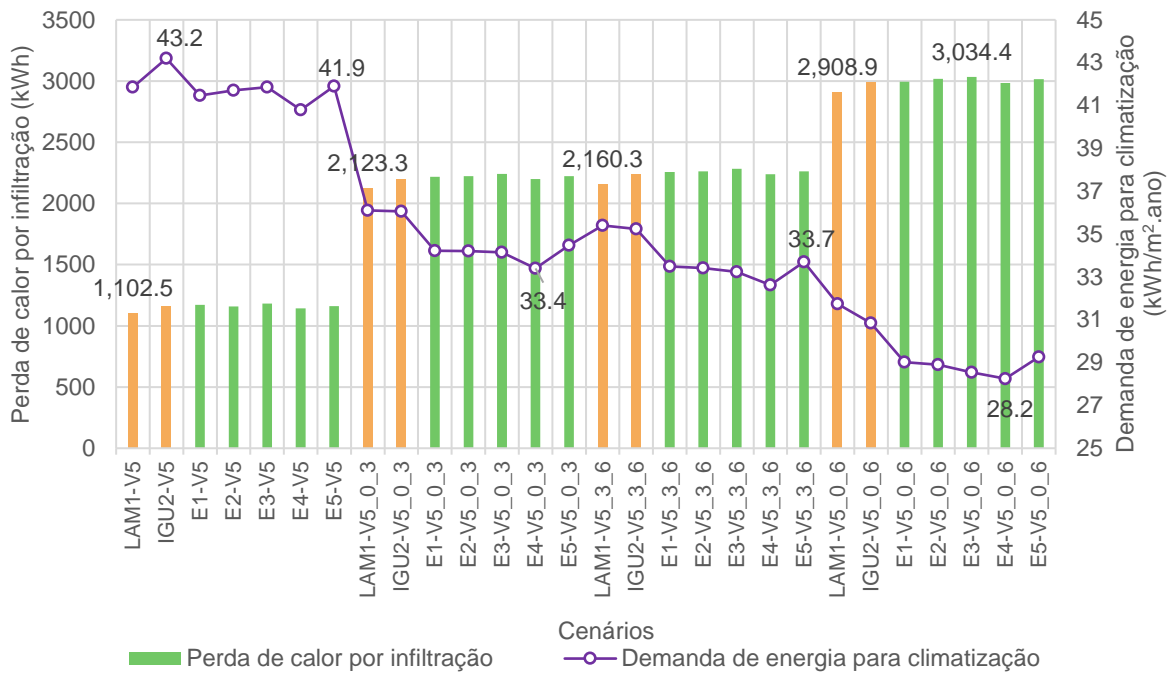


Figura 57 – Perda de calor por infiltração e demanda de energia para climatização em São Paulo, nos cenários do grupo V5 com ventilação noturna. Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

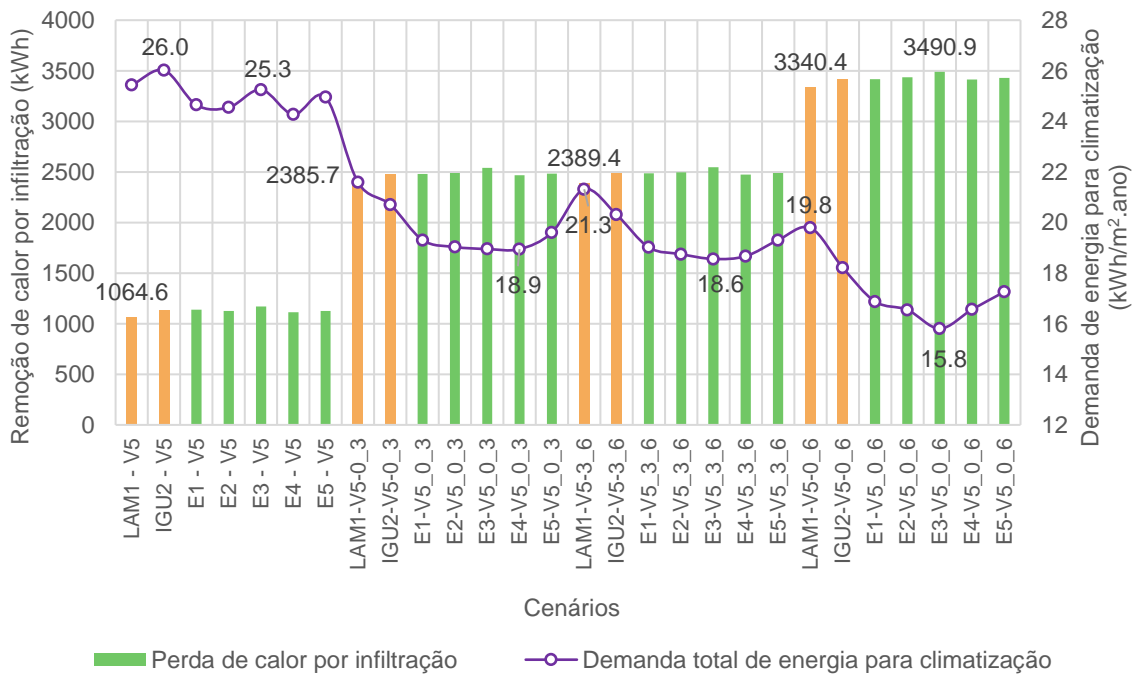


Figura 58 – Perda de calor por infiltração e demanda de energia para climatização em Curitiba, nos cenários do grupo V5 com ventilação noturna. Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

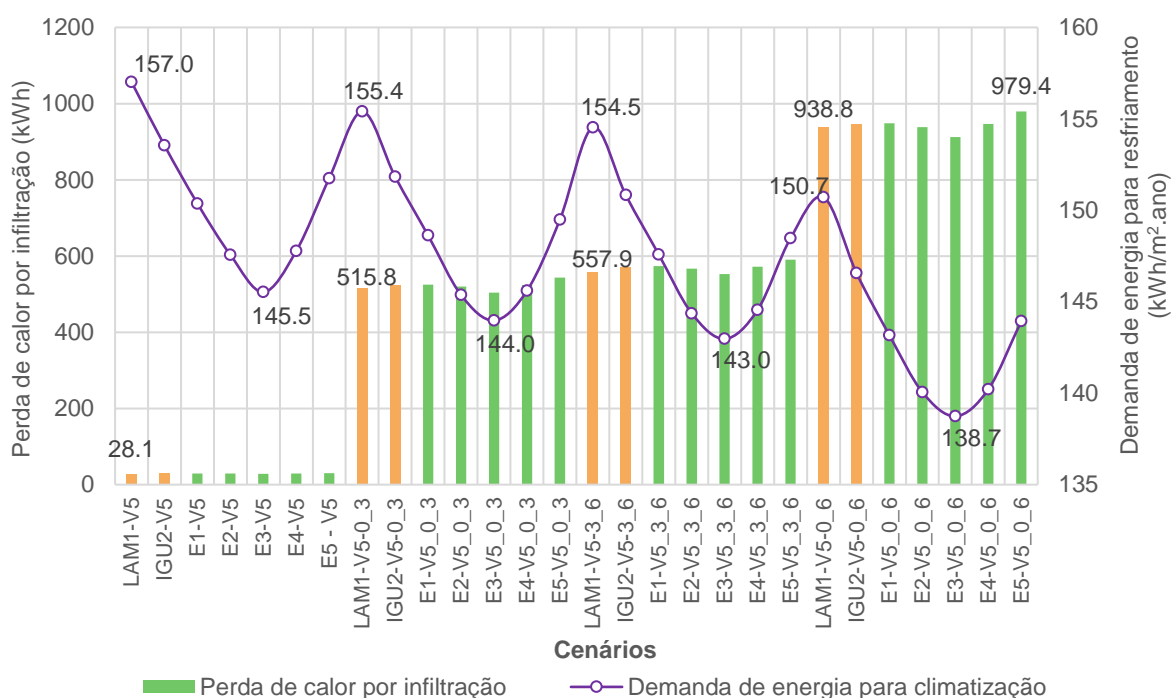


Figura 59 – Perda de calor por infiltração e demanda de energia para climatização em Recife, nos cenários do grupo V5 com ventilação noturna. Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

Comparando os valores entre as três cidades, Curitiba apresenta as menores demandas de energia para climatização e maior remoção de calor por infiltração nos cenários com ventilação noturna, devido ao clima com temperaturas do ar mais baixas. Ocorrem picos de demanda para o vidro laminado. São Paulo apresenta perfil semelhante, porém com demandas maiores de energia e menores perdas por infiltração. Já Recife apresenta picos de demanda para o vidro laminado, as demandas são maiores e a perda de calor é menor por infiltração.

O incremento da dissipação de calor por infiltração para Recife é relativamente maior do que para as outras localidades, apresentando um aumento de 173,6% do cenário sem ventilação noturna, com a ventilação noturna de três horas, e de 324,1% com a ventilação noturna de seis horas. No entanto, a demanda de energia reduz apenas 4% para a composição de janela com vidro laminado, e 4,7% para o E3-V5 (controle EC por temperatura do ar externo), comparando os cenários sem ventilação noturna, com o de ventilação noturna de seis horas.

Analisando em termos absolutos, a ventilação noturna é mais eficiente na remoção de calor para os climas subtropicais, ao aproveitar a temperatura do ar externo mais baixa no período da noite. Em Recife, ocorre uma redução da demanda de energia para resfriamento, porém pouco significativa, de no máximo 4,7%.

4.6 Desempenhos relativos de São Paulo, Curitiba e Recife

Ao comparar os desempenhos relativos referentes à demanda de energia para resfriamento de todas as composições com ventilação híbrida, obtiveram-se os resultados da Figura 60. A curva de São Paulo está muito próxima à de Curitiba o que era esperado como resultado, uma vez que ambos possuem climas subtropicais, com 40% dos pontos com desempenho negativo.

Os tipos de controle para ventilação híbrida tiveram um efeito insignificante em Recife, já que houve poucas horas de ventilação natural ao longo do ano. A ventilação é mais determinante para os climas subtropicais, cuja combinação de parâmetros é essencial para garantir eficiência energética.

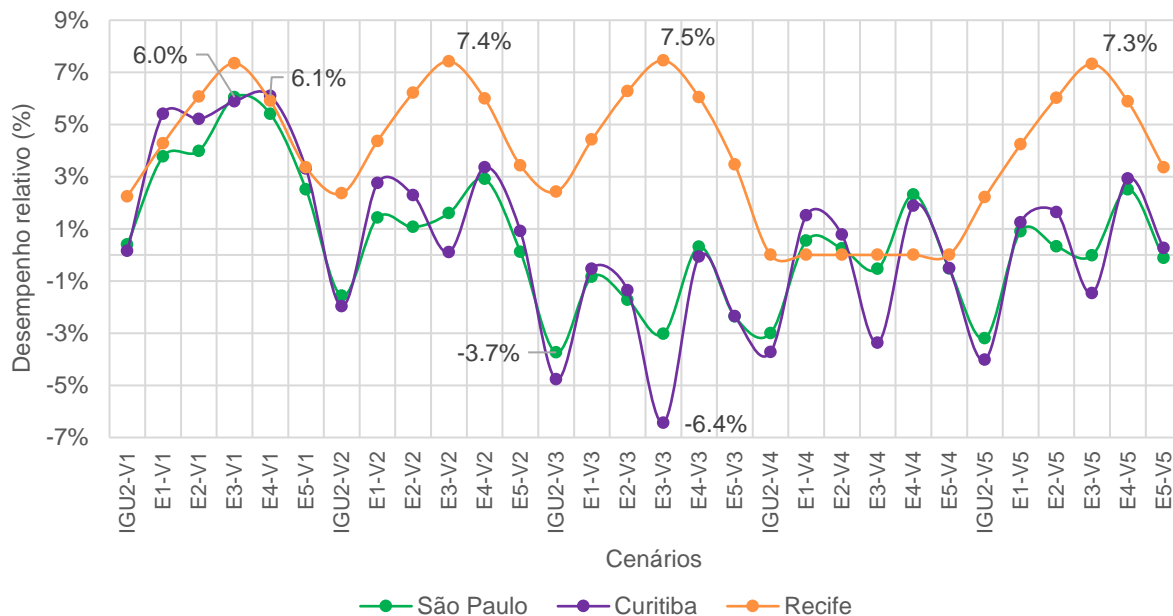


Figura 60 – Desempenho relativo das composições de janela, para São Paulo, Curitiba e Recife, considerando somente demanda de energia para resfriamento. Fonte: elaborado pela autora, 2022

Considerando a soma da demanda de energia para resfriamento e para aquecimento Figura 61, em São Paulo o perfil não apresenta diferenças significativas; já os desempenhos de Curitiba aumentam, apresentando cenários com desempenhos superiores aos de Recife, como ocorre nos cenários com controle V1, de *setpoint* de 15°C a 23°C, e apenas cinco cenários (16,67%) com DR negativo. Isto implica que o vidro EC pode ser mais adequado para climas tropicais, ou para climas próximos ao temperado, isto é, ou para temperaturas do ar externo mais elevadas, ou mais baixas.

Os melhores desempenhos foram no cenário E3-V1 para São Paulo (6,1%) e Curitiba (8,6%), e no E3-V3 para Recife (7,5%). Para todos os casos, o controle EC de temperatura do ar externo foi mais eficiente.

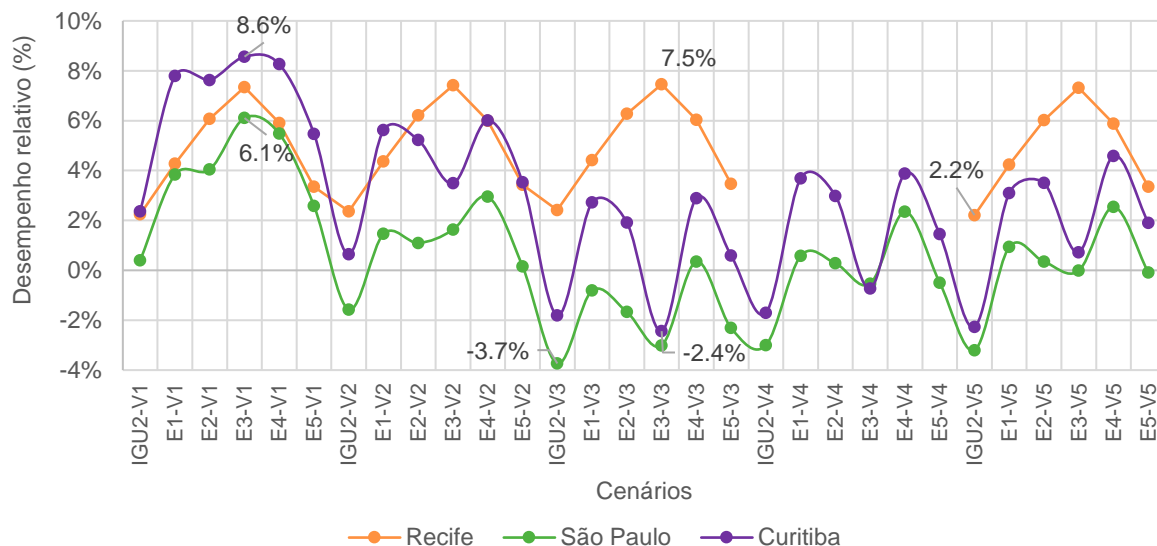


Figura 61 - Desempenho relativo das composições de janela, para São Paulo, Curitiba e Recife, considerando demanda total de energia para climatização. Fonte: elaborado pela autora, 2022

Em termos absolutos, as demandas de energia para climatização dos cenários supracitados estão demonstradas na Tabela 28, assim como a economia estimada.

Tabela 28 – Economia estimada em demanda de energia para climatização.

Cidade	Tipo	Demanda resfriamento (kWh)	Demanda aquecimento (kWh)	TUSD (R\$)	TE (R\$)	Diferença (kWh/R\$)
São Paulo	LAM1-V1	1471,6	2,61	0,3071	0,2874	90 kWh/ R\$ 53,50
	E3-V1	1382,6	1,61			
Curitiba	LAM1-V1	837,4	43,3	0,2889	0,2699	75,4 kWh/ R\$ 42,15
	E3-V1	788,1	17,2			
Recife	LAM1-V3	6706,1	0	0,4022	0,3336	500,1 kWh/ R\$ 367,97
	E3-V3	6206	0			

Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

Os valores referentes à tarifa de energia das contas de consumo foram extraídos no site das concessionárias de energia da Enel em São Paulo, Copel em Curitiba e Neoenergia Pernambuco em Recife, sendo compostos pelo valor de TUSD (Tarifa de Uso do Sistema de Distribuição) e TE (Tarifa de Energia), sem impostos, referência de junho/2022, para o grupo B3, de baixa tensão. A última coluna da Tabela 28 contém a diferença de demanda entre o cenário de janela laminada e o cenário em questão, e o valor em Reais a partir da soma das tarifas TUSD e TE. Trata-se apenas de valores informativos, uma vez que não foram considerados os impostos sobre o

valor de consumo (ICMS, PIS/PASEP, COFINS e alguns casos, COSIP) e nem o COP de equipamentos de ar condicionado.

Considerando a área total de vidro do modelo, de 7,95 m², o custo mínimo do vidro eletrocromico, de US\$ 861,11/m² e do vidro laminado de 8 mm Cool Lite ST-120, de R\$ 280,00/m², tem-se que o custo da janela LAM1 seria de R\$ 2.226,00 e o EC1, R\$ 35.256,00⁹. Desta forma, o tempo de retorno de investimento, mesmo para Recife, seria superior à vida útil do vidro eletrocromico. Estes valores são referentes somente ao valor médio da composição dos vidros por área e não foram considerados custos de instalação, transporte, impostos e de material de esquadria.

Os resultados de desempenho relativo mostram que no geral, a composição da janela com vidro eletrocromico pode ser mais adequada para clima tropical do que para o subtropical. Como a temperatura do ar externo em Recife é relativamente alta, a carga térmica interna não é facilmente removida por resfriamento passivo, então o sistema de climatização requer um consumo alto de energia para resfriar o ambiente. Com o controle solar proporcionado pelo dispositivo eletrocromico, a demanda de energia do ar-condicionado diminui.

Já em climas subtropicais, é necessário analisar o benefício do controle solar, pois a janela eletrocromica aumenta a temperatura média do ar interno por ser constituída de uma composição insulada. Em Curitiba, que apresenta temperaturas relativamente mais baixas ao longo do ano, o vidro eletrocromico reduziu a demanda de energia para aquecimento.

Para o clima de São Paulo, que tem amplitude térmica e temperaturas máximas mais altas do que Curitiba, a infiltração proporcionada por frestas no caixilho auxilia na remoção de calor do edifício, reduzindo a demanda de energia pelo sistema de resfriamento. Nos cenários de ventilação híbrida em que se admitiam temperaturas do ar externo mais baixas como o V1, o desempenho relativo foi positivo para todas as combinações.

Nota-se que a janela insulada dupla IGU2 apresenta sempre o pior desempenho quando comparada às janelas EC do mesmo grupo de ventilação, para todas as localidades, o que significa que as propriedades de controle solar do EC sempre melhoram o desempenho de uma composição insulada.

⁹ Considerando US\$ 1,00 = R\$ 5,15; cotação de 23/06/2022 (<https://www.bcb.gov.br/conversao>)

A Figura 62 contém os desempenhos relativos ao grupo de ventilação V5, incluindo os cenários com ventilação noturna. Os resultados de Recife apresentam perfis semelhantes, enquanto os de Curitiba e de São Paulo apresentam resultados com desempenhos crescentes, na sequência – controle V5 sem ventilação noturna, depois com ventilação natural da 0:00h às 3:00h, das 3:00h às 6:00h e da 0:00h às 6:00h. O período de abertura de janela de seis horas é mais eficiente do que de três horas, pois dá a oportunidade de remover a carga térmica residual por mais tempo e reduzir a temperatura do ar interno. Entre os cenários com abertura de janela durante três horas, os mais eficientes são os das 3:00h às 6:00h, pois trata-se do período mais próximo ao horário de ocupação.

Os valores de DR estão maiores com a ventilação noturna, pois são comparados aos cenários com janela laminada e ventilação noturna no mesmo período. A economia verificada no cenário E3-V5_0_6, de Curitiba, que possui DR de 20,1%, por exemplo, é de 171 kWh (R\$ 98,93), e no cenário E4-V5_0_6, de São Paulo, com DR de 10,9%, é de 156,25 kWh (R\$ 92,89). A economia é maior, mas ainda insuficiente para garantir a viabilidade econômica da janela eletrocromática.

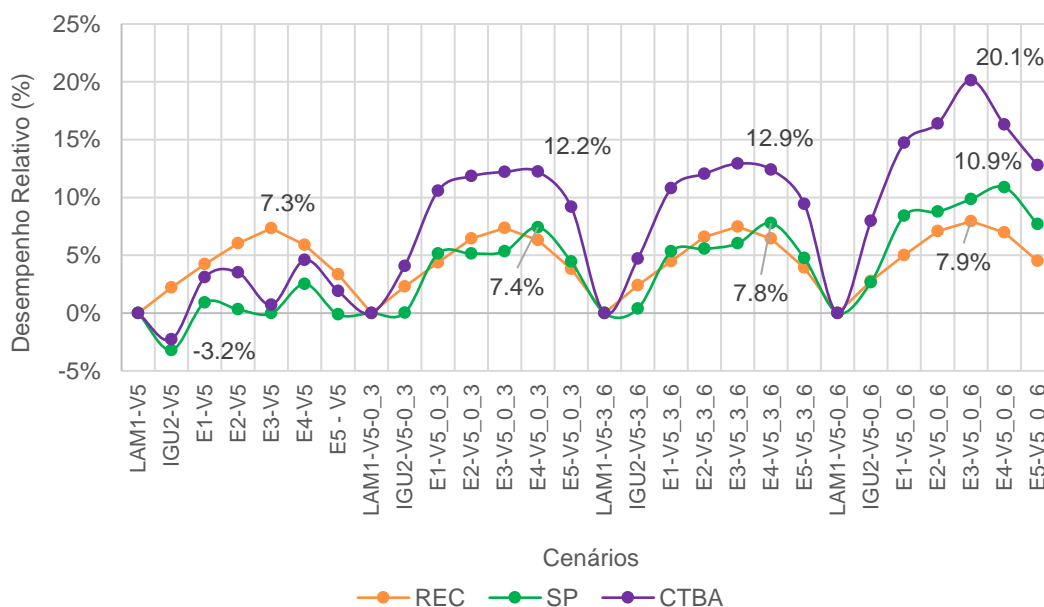


Figura 62 – Desempenho relativo para as composições de janela para os cenários com ventilação noturna para São Paulo, Curitiba e Recife. Fonte: elaborado pela autora, 2022

4.7 Otimização

4.7.1 Cenários das simulações paramétricas

A Figura 63 contém os dados das três cidades, referentes aos resultados das simulações paramétricas com os controles EC e VH reunidos, em que é possível observar a dispersão em três grupos bem definidos. Curitiba apresenta os dados com os melhores compromissos entre demanda de energia e horas em conforto para os controles selecionados. Nas figuras seguintes, estão detalhados os dados de cada cidade, indicando o conjunto de soluções próximas à fronteira de Pareto, que relacionam as funções objetivos de demanda por energia de climatização e fração de horas em conforto.

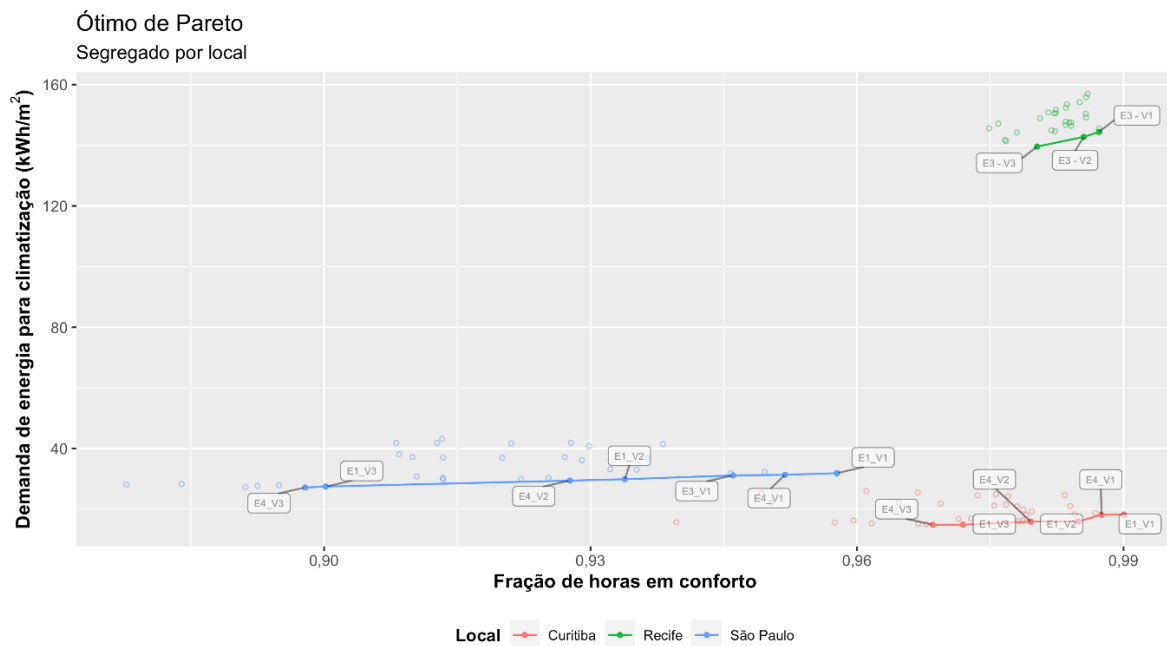


Figura 63 – Dados das três cidades a partir das funções objetivo de demanda de energia para climatização e fração de horas em conforto. Fonte: Elaborado pela autora, 2022

A Figura 64 apresenta os dados de São Paulo diferenciados por cores, conforme os controles VH e EC.

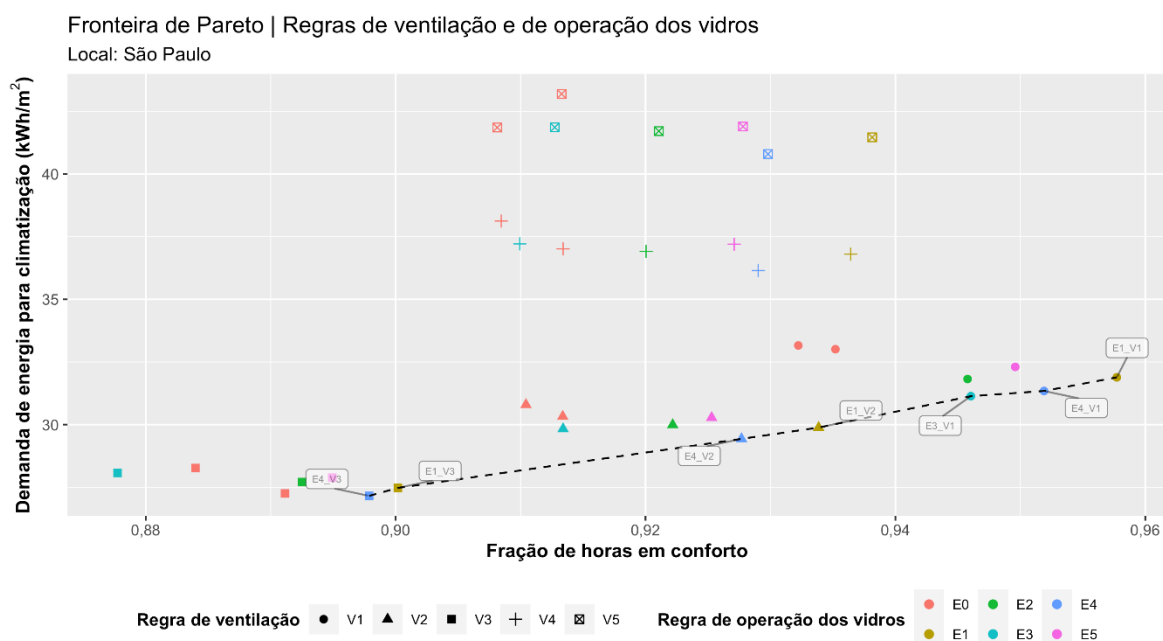


Figura 64 – Dados de São Paulo com indicação da Fronteira de Pareto por tipos de controle VH e EC. Fonte: Elaborado pela autora, 2022

Nota-se um comportamento linear crescente, em que os cenários ótimos aparecem aos pares, sendo que o E4-V3 possui a menor demanda de energia e menos horas em conforto, e o E1-V1 possui maior demanda de energia e mais horas em conforto. A Tabela 29 apresenta os resultados compilados do conjunto de cenários ótimos agrupados aos pares, com colunas intermediárias contendo a diferença de valores entre as funções objetivos dentro de cada grupo de ventilação. Por exemplo, entre os cenários E4-V1 e E1-V1, a demanda de energia adicional é de 24,2 kWh/ano e o acréscimo de horas em conforto é de 16,7, ou 0,6%. Excluiu-se o E3-V1 por apresentar demanda de energia muito próxima ao E4-V1.

Tabela 29 – Resumo das funções objetivo dos cenários de Pareto-ótimo de São Paulo

Cen	E4-V3	E1-V3	Dif.	E4-V2	E1-V2	Dif.	E4-V1	E1-V1	Dif.
Demanda energia (kWh)	1194,6	1208,7	14,1	1294,9	1314,7	19,8	1369,7	1378,9	24,2
Percentual em conforto	89,8%	90,0%	0,2%	92,8%	93,4%	0,6%	95,2%	95,8%	0,6%
Horas em conforto	2567,9	2574,5	6,6	2653,2	2670,8	17,6	2722,4	2739,0	16,7

Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

A decisão pelo cenário ótimo depende da avaliação do custo-benefício entre consumir mais energia com climatização e garantir mais horas em conforto. Entre os

pares de cenários, o acréscimo de energia é relativamente pequeno para se obterem mais horas de conforto no ano, que correspondem a até um dia e meio de trabalho. Ao comparar a variação das funções objetivos entre os cenários extremos no gráfico (E4-V3 e E1-V1), a diferença encontrada é de 208,6 kWh/ano (ou 4,7 kWh/m².ano) e 171,2 horas (6%), o equivalente a 15,5 dias de trabalho. Trata-se de uma diferença relativamente pequena de demanda de energia ao longo do ano e neste caso, o cenário E1-V1 apresenta o melhor resultado.

Os pontos de dados localizados acima da fronteira apresentam demandas maiores de energia para climatização, assim verifica-se que a interação entre os controles EC e VH influem nos desempenhos, porém o controle de ventilação predomina sobre o eletrocromico, já que os cenários dentro do mesmo grupo de controle de VH ficam aproximadamente agrupados. Os grupos de controle V4 e V5 possuem limites de 18°C a 23°C, e de 18°C a 22°C, respectivamente, indicando que faixas de *setpoint* mais estreitas de temperatura não são ideais para o clima de São Paulo. Já os dados mais próximos da fronteira de Pareto são relativos aos grupos dos controles V1, V2 e V3.

Os controles EC mais eficientes são o E1, baseado em intensidade de radiação solar incidente na fachada e o E4, de iluminância externa, que são parâmetros diretamente relacionados às características de insolação. A exceção ocorre com o cenário E3-V1, cujo controle EC é baseado em temperatura do ar externo.

A Figura 65 mostra os resultados da otimização para Curitiba, com comportamento semelhante ao de São Paulo, porém com demandas menores de energia e pontos concentrados em frações maiores de horas em conforto. Os resultados das funções objetivos do conjunto de cenários ótimos estão na Tabela 30.

Os cenários com os controles de ventilação V4 e V5 estão localizados acima da fronteira de Pareto e não são adequados para o clima de Curitiba, enquanto os cenários com os controles V1, V2 e V3 estão próximos da fronteira e aproximadamente agrupados.

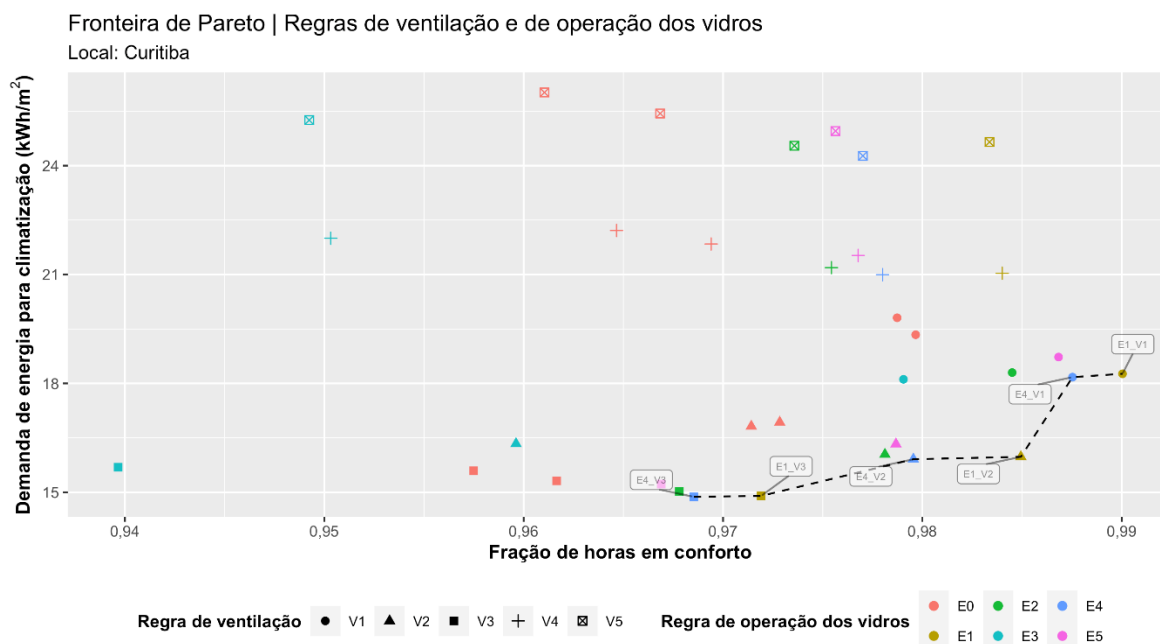


Figura 65 - Dados de Curitiba com indicação da Fronteira de Pareto por tipos de controle VH e EC.
Fonte: Elaborado pela autora, 2022

Os controles EC que se destacam nos cenários ótimos para Curitiba são também o E1 e o E4. Os resultados mostram uma influência maior da ventilação híbrida na economia de energia e nas horas em conforto.

Diferente de São Paulo, Curitiba apresenta uma diferença menor de valores entre parâmetros de cenários da mesma dupla. Assim, com um pequeno aumento da demanda de energia, tem-se mais horas em conforto. Ainda na Tabela 30, verifica-se a variação de valores das funções objetivos nos cenários extremos E4-V3 e E1-V1 são 149,2 kWh/ano (ou 3,3 kWh/m².ano) e 61,5 horas (2,2%). Assim como São Paulo, o melhor cenário é o E1-V1, apresentando uma diferença relativamente pequena de demanda de energia para climatização.

Tabela 30 - Resumo das funções objetivo dos cenários de Pareto-ótimo de Curitiba

Cen	E4-V3	E1-V3	Dif.	E4-V2	E1-V2	Dif.	E4-V1	E1-V1	Dif.
Demanda energia (kWh)	654,4	655,6	1,2	700,1	703,0	2,9	799,5	803,6	4,1
Percentual em conforto	96,9	97,2	0,3	98	98,5	0,5	98,8	99,0	0,2
Horas em conforto	2770,0	2779,7	9,7	2801,5	2816,9	15,4	2824,3	2831,5	7,2

Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

A Figura 66 contém a otimização para Recife. Os cenários próximos ao Pareto-ótimo são do grupo E3, cujo controle é baseado em temperatura do ar externo, que apresentou os menores níveis de iluminância e também o maior percentual de horas nos estágios mais escuros do eletrocromômico.

Em Recife, o controle EC exerce maior influência nos resultados do que o controle VH, ao contrário do que ocorre nas outras cidades. Isto se deve ao fato de o clima tropical apresentar maiores temperaturas do ar externo ao longo do ano, e por isso há no total poucas horas de ventilação natural, o que explica também a maior demanda por energia para climatização. Como não é possível contar com o resfriamento passivo por meio da ventilação, o controle solar passa a ser uma medida mais adequada para reduzir a carga térmica interna.

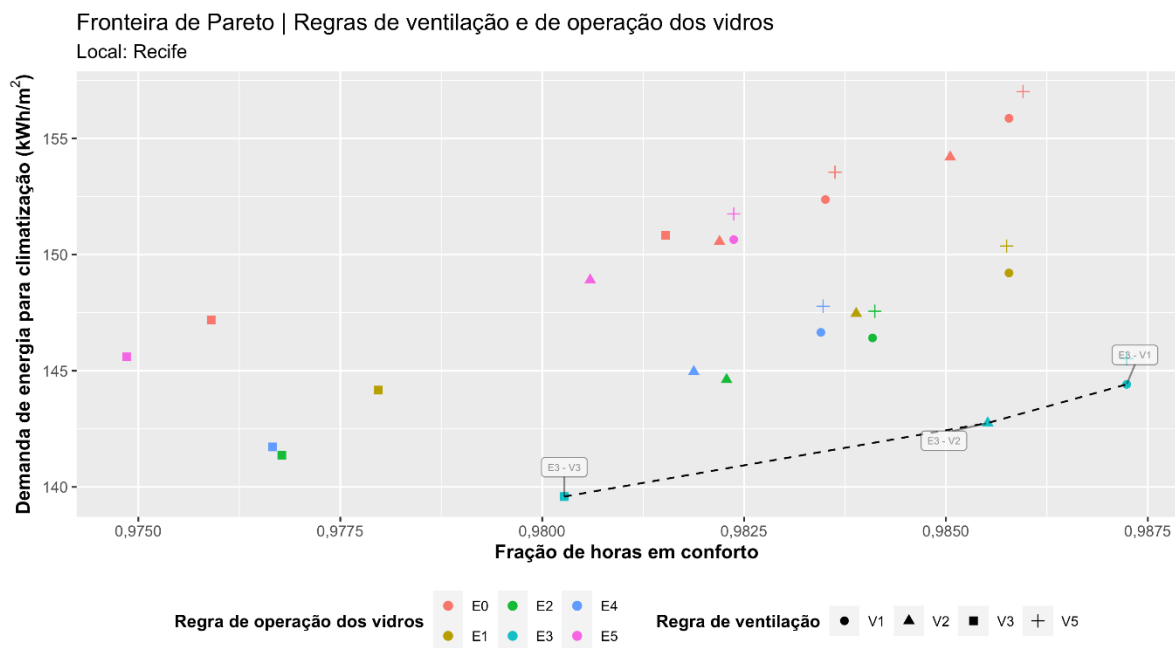


Figura 66 - Dados de Recife com indicação da Fronteira de Pareto por tipos de controle VH e EC.
Fonte: Elaborado pela autora, 2022

Os pontos de dados com maior demanda de energia para climatização são os dos vidros estáticos, laminado e insulado, indicados como E0. A Tabela 31 contém o resumo dos parâmetros dos cenários ótimos de Recife. A diferença de demanda de energia entre E3-V2 e E3-V1 é maior do que as verificadas entre os pares de cenários em São Paulo e em Curitiba, e o incremento em conforto, menor. A variação total entre os cenários E3-V3 e E3-V1, indicado a coluna "Dif.", é de 212,5 kWh e 20 horas em conforto (0,7%). Neste caso, o cenário escolhido é o E3-V3, que apresenta um nível alto de percentual em conforto e menor demanda de energia para climatização.

Tabela 31 - Resumo das funções objetivo dos cenários de Pareto-ótimo de Recife

Cenário	E3-V3	E3-V2	E3-V1	Dif.
Demanda energia (kWh)	6141,8	6281,2	6354,3	212,5
Percentual em conforto	98%	98,6%	98,7%	0,7%
Horas em conforto	2803,6	2818,6	2823,5	19,9

Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

Importante observar que os cenários do grupo V3 (18°C a 25°C) são os que apresentam menor fração de horas em conforto em todas as localidades. Porém em São Paulo e Curitiba, as demandas de energia para climatização são mais baixas, por apresentarem menos horas de climatização artificial, enquanto em Recife a demanda é mais alta, devido ao *setpoint* de temperatura do ar externo mais elevado (25°C) – há mais horas de ventilação natural, mas a temperatura do ar externo eleva a temperatura do ar interno, aumentando a carga térmica interna.

4.7.2 Todos os cenários – incluindo a ventilação noturna

Ao acrescentar os cenários com ventilação noturna ao grupo de controle V5 e aqueles somente com climatização artificial, sem ventilação natural, aumenta a quantidade de pontos com frações menores de horas em conforto, pois para ambientes totalmente climatizados, a avaliação passa a ser pelo método de conforto térmico baseado no modelo de Fanger (1972), que contém uma faixa mais estreita de temperatura operativa em níveis aceitáveis. Além disso, alguns dos cenários com ventilação noturna passam a integrar o conjunto de soluções Pareto-eficientes, conforme a Figura 67, Figura 68 e Figura 69.

Em São Paulo (Figura 67), o conjunto ótimo é integrado pelos cenários com controles E1 (radiação incidente) e E4 (iluminância externa), combinados com a ventilação V3 (18 a 25°C) e a V5 (18°C a 22°C) com ventilação noturna da meia noite às 6:00h. A

Tabela 32 contém o resumo dos resultados.

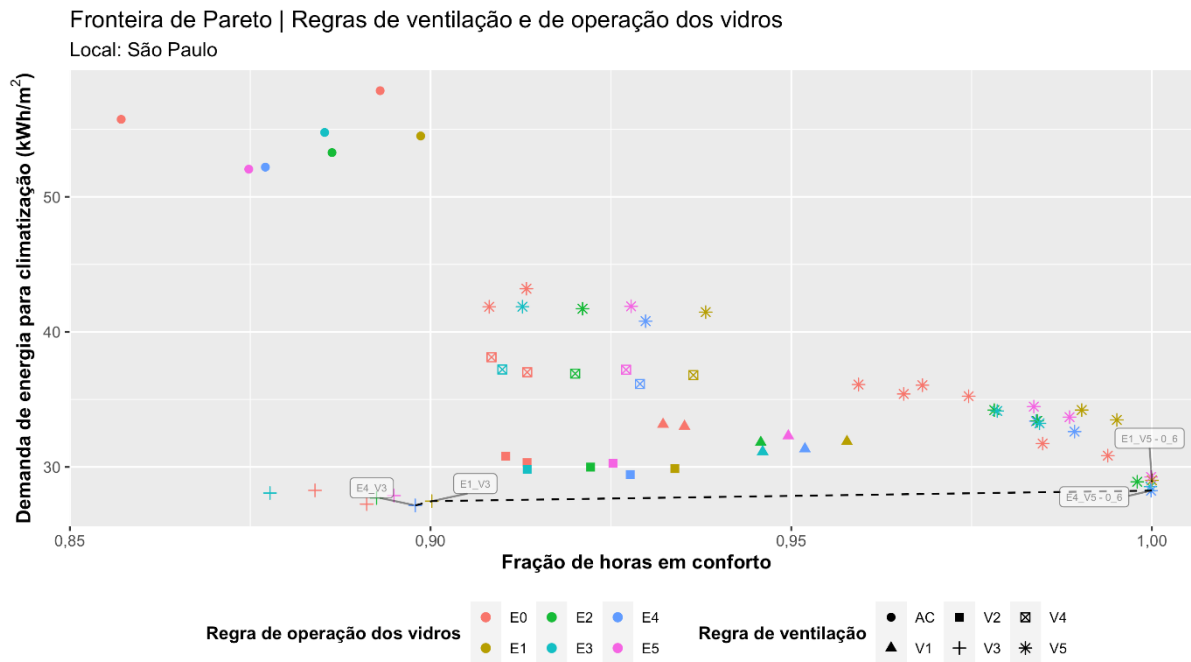


Figura 67 - Dados de São Paulo com indicação da Fronteira de Pareto considerando todos os cenários. Fonte: Elaborado pela autora, 2022

Tabela 32 – Resumo dos cenários de Pareto-ótimo de São Paulo – todos os dados

Cenários	E4-V3	E1-V3	Dif.	E4-V5_0_6	E1-V5_0_6	Dif.
Demanda energia (kWh)	1194,6	1208,7	14,1	1243,0	1276,7	33,7
Percentual em conforto	89,8%	90,0%	0,2%	100,0%	100,0%	0,0%
Horas em conforto	2567,9	2574,5	6,6	2859,7	2860,0	0,3

Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

A variação de parâmetros entre os cenários E4-V3 e E1-V5_0_6 (com ventilação noturna da 0:00h às 6:00h) é de 82,1 kWh e 292,1 horas (10,2%), o que é um aumento considerável das horas em conforto, alcançando 100%. Considerando o par de pontos com ventilação noturna, o melhor é o E4-V5_0_6 com demanda 33,8 kWh menor, maior nível médio de iluminação e diferença de horas em conforto desprezível: controle EC baseado em nível de iluminância externa, controle VH com *setpoint* entre 18°C e 22°C e ventilação noturna da 0:00h às 6:00h.

Já em Curitiba (Figura 68), integram os controles E1 e E4 com a ventilação V3 e a V5 com ventilação noturna da 3:00h às 6:00h, além do cenário E3-V5 com

ventilação noturna da meia noite às 6:00h. Os resultados dos parâmetros estão detalhados na Tabela 33.

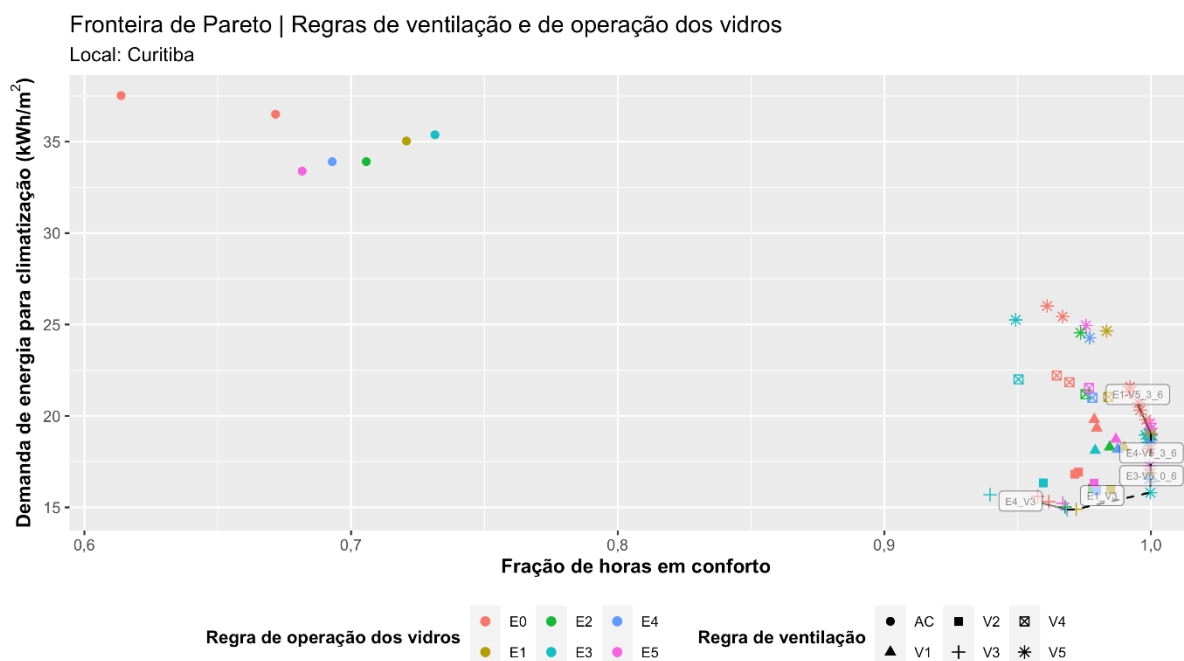


Figura 68 - Dados de Curitiba com indicação da Fronteira de Pareto considerando todos os cenários. Fonte: Elaborado pela autora, 2022

Tabela 33 – Resumo dos cenários de Pareto-ótimo de Curitiba – todos os dados

Cenários	E4-V3	E1-V3	Dif.	E3-V5 _0_6	E4-V5 _3_6	E1-V5 _3_6	Dif.
Demanda energia (kWh)	654,4	655,6	1,2	695,6	821,5	836,8	141,2
Percentual em conforto	96,9%	97,2%	0,3%	100,0%	100,0%	100,0%	0,0%
Horas em conforto	2770,0	2779,7	9,7	2859,3	2859,8	2860,0	0,7

Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

A variação de parâmetros entre os cenários E4-V3 e E1-V5_3_6 é de 182,3 kWh e 90 horas (3,1%). Assim como São Paulo, dentre o trio de cenários com ventilação noturna, o melhor é o que apresenta menor demanda de energia, o E3-V5_0_6, pois a diferença de horas em conforto é também desprezível e o nível médio de iluminação natural, maior. Neste caso, o controle EC seria o baseado em temperatura do ar externo.

Em Recife (Figura 69), os cenários próximos ao Pareto-ótimo passam a ser o E3-V5 e IGU-V5, ambos com ventilação noturna da meia noite às 6:00h. Os parâmetros estão demonstrados na Tabela 34.

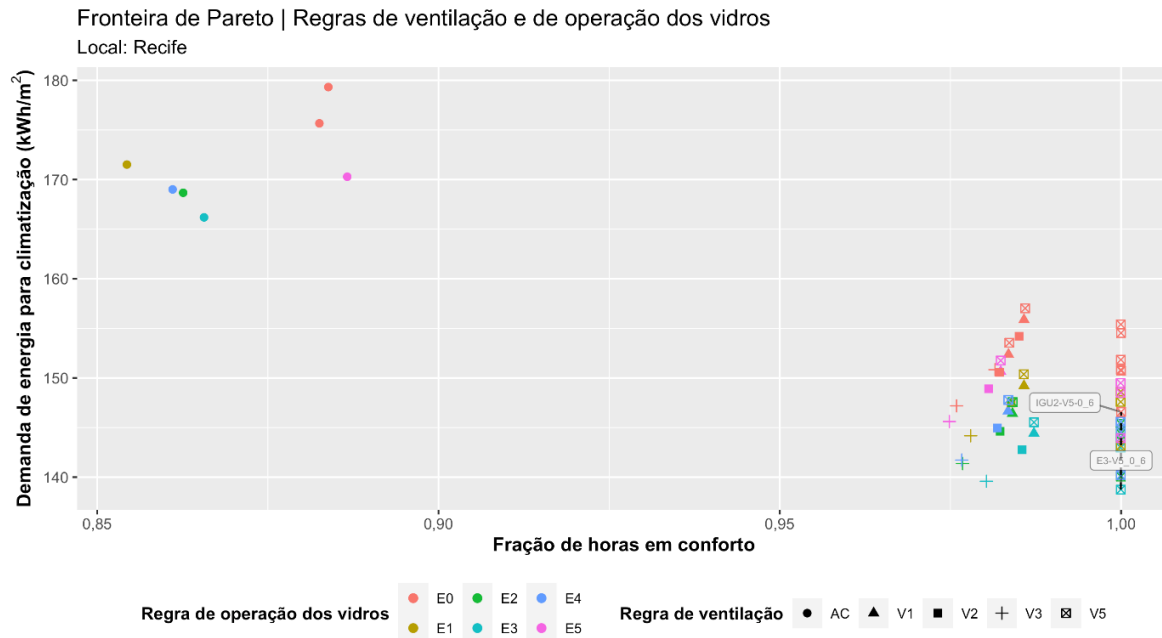


Figura 69- Dados de Recife com indicação da Fronteira de Pareto considerando todos os cenários.
Fonte: Elaborado pela autora, 2022

Tabela 34 – Resumo dos cenários de Pareto-ótimo de Recife – todos os dados

Cenários	E3-V5	IGU-V5	Dif.
	_0_6	_0_6	
Demanda energia (kWh)	6104,7	6449,2	344,5
Percentual em conforto	100,0%	100,0%	0,0%
Horas em conforto	2859,9	2860,0	0,1

Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

A diferença entre os dois cenários é de 344,5 kWh, que representa um valor alto para um incremento desprezível de horas em conforto.

Os resultados com todos os cenários indicaram um potencial para o uso da ventilação noturna, independente do clima. A fração de horas em conforto foi de 100% na maioria dos casos com ventilação noturna, sendo em São Paulo e Recife os casos com ventilação noturna entre 0:00h e 6:00h foram enquadrados na fronteira de Pareto,

enquanto em Curitiba, consideraram-se alguns cenários com ventilação entre 3:00h e 6:00h.

5 DISCUSSÕES

A operação de janelas em edifícios comerciais é complexa, pois envolve a resposta a parâmetros ambientais e ao conforto térmico humano, às demandas de iluminação no plano de trabalho e à frequente necessidade de redução da demanda de energia para climatização, que persegue o edifício ao longo de toda a sua vida útil. Por desempenhar um papel importante, permitindo a vista ao exterior e a incidência de radiação solar no ambiente interno, também é um ponto frágil na edificação, pois contém elementos transparentes ou translúcidos, que influenciam o aumento da carga térmica do ambiente. Por isso, estudos são conduzidos para melhorar o desempenho térmico dos espaços de trabalho, sobretudo no controle solar e na remoção de calor.

O uso de sombreamento dinâmico de janelas (*smart windows*) em climas quentes pode parecer intuitivo em um primeiro momento, pois promove um bloqueio da radiação solar à edificação. No entanto, as características físicas das instalações, tais como a necessidade da composição ser do tipo insulada, impactam diretamente no desempenho térmico destes dispositivos em edificações brasileiras (PINTO; WESTPHAL, 2020). Em locais onde o resfriamento passivo é favorável, o vidro laminado apresenta melhor custo-benefício. Uma forma de compensação para o uso de janelas inteligentes é a combinação de estratégias de ventilação para aumentar a eficiência energética na construção.

A combinação das soluções de prevenção de ganho de calor com o vidro eletrocromico e de remoção de calor com a ventilação híbrida em momentos oportunos do dia em climas subtropicais e tropicais, tirando proveito das condições ambientais externas, pode gerar uma economia de energia referente ao sistema de climatização em até 8,6% e aumentar as horas de conforto térmico. Trata-se de resultados relevantes quando comparados a estudos prévios desenvolvidos em climas semelhantes, como em Baltimore (clima Cfa, na classificação de Köppen Geiger) onde se obteve uma economia de energia de até 4,6% (HOON LEE; JEONG; TAE CHAE, 2020).

Porém, como o custo da janela eletrocromica é pelo menos quinze vezes maior do que o custo do vidro laminado com controle solar, esta medida se torna economicamente inviável.

Ao combinar as duas técnicas para eficiência energética, a economia proporcionada pelo EC quando comparada ao laminado depende muito do clima e do tipo de controle. Para o clima subtropical, a ventilação híbrida se mostrou mais eficaz do que o dispositivo eletrocromico, já que os cenários com os controles de ventilação V1 e V2 (com *setpoints* com temperaturas mais baixas) apresentaram desempenhos positivos, enquanto que para os demais controles de ventilação, o desempenho dependeu da combinação com o controle EC. Aplicando o estudo de otimização, os melhores controles EC verificados para o clima subtropical foram o de radiação solar incidente na fachada e o nível de iluminância externo.

Para o clima tropical, os desempenhos relativos foram todos positivos e o dispositivo eletrocromico teve maior influência nos resultados do que a ventilação, já que tempo de operação da climatização artificial foi bem maior do que o de ventilação natural, uma vez que as temperaturas do ar externo são predominantemente altas em Recife.

Ao adotar a ventilação noturna, por outro lado, reduziu a temperatura operativa média anual, assim como a demanda de energia para climatização, já que se verificou que a temperatura do ar interno era geralmente elevada às 8:00h para os três climas estudados. Maior potencial é verificado em climas amenos como em São Paulo e Curitiba, em que a temperatura do ar externo mais baixa à noite contribui para o resfriamento passivo. Deve-se ter o cuidado, no entanto, com o resfriamento excessivo em algumas ocasiões, podendo aumentar o desconforto térmico devido ao frio.

A dificuldade em garantir o aproveitamento da iluminação natural com a janela inteligente se mostrou evidente nesta pesquisa, assim como em estudos prévios de simulação (DUSSAULT; GOSELIN, 2017; PICCOLO et al., 2018): nos cenários em que a janela eletrocromica apresentava mais horas nos estágios mais escuros, a média do nível de iluminância era menor, assim como o consumo de energia para ar-condicionado também era menor.

Não foi objeto deste estudo, mas ao se otimizar a iluminação natural no ambiente, é possível manter parte da iluminação artificial desativada, o que reduz o consumo de energia elétrica no geral, assim como a carga térmica do edifício, proveniente das luminárias. Embora as luminárias atuais sejam eficientes com o uso

da iluminação de LED, a dissipação de calor produzida pelas lâmpadas acesas pode representar uma parcela relevante de carga térmica ao longo do ano.

Os controles EC utilizados no estudo favoreceram com que os vidros permanecessem mais tempo escurecidos em Recife do que nas outras cidades; na Figura 70 há a comparação do percentual de horas em cada estágio da janela EC nas cidades avaliadas. Associado a este fato, tem-se que a incidência de radiação máxima nas fachadas Norte e Oeste em Recife é menor do que em São Paulo e em Curitiba, devido à latitude. Locais com latitudes maiores podem ter ângulos solares menores, aumentando o tempo em que ocorre a incidência de radiação solar direta na fachada. Caso fossem alterados os intervalos dos controles para favorecer a iluminação natural em Recife, e, portanto, aumentar a transmitância visível ao longo do ano, o consumo de energia para resfriamento aumentaria também. Neste caso, seria interessante realizar um estudo detalhado sobre a influência da carga térmica proveniente da iluminação artificial.

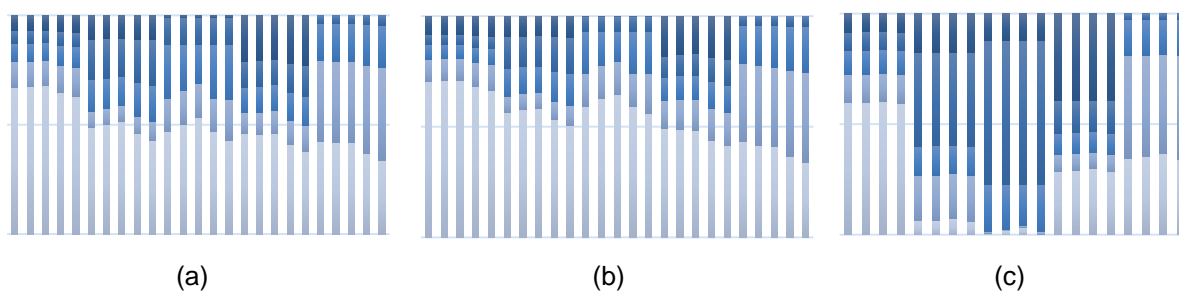


Figura 70 – Percentual de horas dos estágios da janela EC nas simulações entre as três cidades em (a) São Paulo, (b) Curitiba e (c) Recife. Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

Para que esta análise pudesse ser realizada, foi necessário criar um processo para tomada de decisão, estabelecendo a ordem de ações da janela, a partir da leitura de parâmetros e do desenvolvimento de regras de controle.

O fluxo de trabalho da simulação, descrito em 4.3, foi desenvolvido para orientar a decisão dos controles de janela. A partir deste fluxo, foi possível identificar e estabelecer as prioridades das ações da janela, entre abertura e fechamento das folhas móveis, acionamento ou desligamento do sistema de climatização artificial e alteração dos estágios do vidro eletrocromico. Desta forma, o processo de decisão iniciou-se a partir da verificação da ocupação, e depois o acionamento da ventilação híbrida, que por sua vez estabeleceu outras condições para decidir entre a ventilação natural ou o acionamento do sistema de ar condicionado. Uma vez que a janela abre, há uma abertura gradativa e quando a janela fecha, entra em ação a operação do

eletrocromico. O ciclo se repete a cada *timestep* e a operação é interrompida quando não tiver mais ocupação.

A partir deste fluxo, é possível combinar outras estratégias de controle de janelas, considerando limites de temperaturas diferentes para a ventilação híbrida, assim como outras tecnologias para sombreamento dinâmico de janelas citados em 2.1.2.

Diante do disposto, as diretrizes de projeto que podem ser aplicadas às cidades analisadas, considerando a ventilação híbrida de forma alternada e as composições de janela estática e dinâmica, sendo esta última a eletrocromica, são:

Curitiba – clima subtropical (Cfb): uso da ventilação híbrida com ventilação noturna, tirando proveito das baixas temperaturas do ar externo, em média, que permitem a remoção do calor residual do ambiente de trabalho de maneira efetiva. Deve-se tomar cuidado com o resfriamento excessivo em alguns casos. O vidro eletrocromico pode ser utilizado, mas as menores demandas de energia para climatização podem aumentar o tempo de retorno do investimento, sobretudo se a área de fachada envidraçada for muito grande. Em locais classificados na ZB 1 mas que possuem temperaturas externas mais baixas do que Curitiba, a janela EC pode ser adequada para reduzir a demanda de energia para aquecimento. Os parâmetros de controle EC indicados são a intensidade de radiação incidente na fachada (W/m^2) e o nível de iluminância externo (lux). A leitura dos parâmetros pode ser obtida por piranômetro instalado na fachada e sensor fotométrico instalado na cobertura do edifício. Os intervalos entre estágios do EC dependerão da quantidade de estágios e das prioridades estabelecidas pelo projetista ou pelo proprietário do imóvel.

São Paulo – clima subtropical (Cfa): as recomendações para Curitiba são válidas também para São Paulo. No entanto, é o local que apresentou menor economia de energia com a combinação de janela EC e controle VH. Como apresenta maior variação de temperatura do ar externo ao longo do ano, apresentando verão quente, o *setpoint* para controle de VH poderia ser dinâmico em vez de estático – adaptando-se mais às oscilações do tempo. Quanto à janela eletrocromica, os mesmos controles de Curitiba podem ser utilizados: radiação solar incidente na fachada e nível de iluminância externo.

Recife – Clima tropical (Af): o uso da janela EC é recomendado, uma vez que as demandas por resfriamento mecânico são altas e a taxa de retorno de investimento pode ser menor. O parâmetro mais adequado para o controle eletrocromico é o baseado em temperatura do ar externo, a partir da instalação de um sensor externo de temperatura, que pode ser de uma estação climática. Há oportunidade de melhoria dos outros controles EC, desde que ajustados os limites para cada estágio. Para haver economia de energia com climatização, é muito provável que o vidro ficará mais tempo nos estágios mais escuros. No geral, o ideal seria considerar um WWR menor e evitar a fachada em pele de vidro. A ventilação híbrida é pouco eficiente em Recife e a ventilação noturna pode ser utilizada desde que não haja problemas com fatores externos, tais como insetos e alta umidade relativa do ar. Em vez de ventilação natural com abertura de janela, poderia ser pensando em outro sistema de ventilação.

6 CONCLUSÕES

Nesta pesquisa foram definidas combinações ótimas de parâmetros para o controle operacional de janelas de edifícios comerciais em climas subtropical e tropical a partir de simulações paramétricas e posterior análise de otimização multiobjetivo. Foi desenvolvido um fluxo de trabalho para orientar as decisões de operação de janelas dotadas de dispositivo de controle solar dinâmico (vidro eletrocromico) e de resfriamento ativo/passivo (ventilação híbrida) atuando em conjunto nas simulações. Os controles foram aplicados em São Paulo, Curitiba e em Recife e selecionados os cenários ótimos em termos de eficiência energética e conforto térmico, a partir da fronteira de Pareto.

A redução da demanda de energia para climatização das janelas eletrocromicas foi de até 6,1% em São Paulo, 8,6% em Curitiba e 7,5% em Recife, referentes ao controle do eletrocromico baseado em temperatura do ar externo, e da ventilação híbrida de 18°C a 25°C. Apesar de significativos, representa uma economia pouco expressiva, dado o alto custo de aquisição e instalação do dispositivo eletrocromico.

Ao aplicar a otimização multiobjetivo, os cenários ótimos foram referentes ao controle EC baseado em radiação incidente na fachada e controle VH de 15°C a 23°C para São Paulo e Curitiba. Para Recife, o melhor cenário também foi o de menor demanda de energia para climatização.

As simulações com ventilação noturna indicaram um potencial de economia de energia para climatização no clima subtropical, em que a média de temperatura do ar externo é menor, sobretudo à noite, em que é possível eliminar o calor residual acumulado ao longo do dia. No clima tropical, ocorre também uma redução da demanda de energia para climatização, porém a perda de calor em números absolutos é menor, apresentando valores anuais até três vezes menores do que São Paulo.

O vidro eletrocromico requer a especificação do vidro insulado duplo, por isso foi avaliado também o desempenho do vidro estático. A unidade insulada de vidro se mostrou viável em Recife; já em São Paulo e Curitiba na maioria dos casos aumentou a demanda de energia para climatização quando comparada ao vidro laminado, em até 3,7% em São Paulo, sendo mais sensíveis à variação do controle de ventilação

conforme resultados das simulações paramétricas das três cidades em 4.4.3, 4.5.3.1 e 4.5.3.2.

Os módulos de Airflow Network, Ideal Loads Air System e Energy Management System do EnergyPlus foram combinados, sendo que os dois primeiros eram caracterizados pela ventilação híbrida alternada. Já o código desenvolvido no EMS realizava o controle EC a partir da alteração do índice da construção, a ativação e desativação de programações (*schedules*) para a ventilação híbrida e a modulação da abertura da janela.

Durante o desenvolvimento da operação das janelas, verificaram-se conflitos operacionais entre o vidro eletrocromico e a ventilação híbrida, principalmente no que dizia respeito à prioridade de operação, já que a folha de janela que estivesse aberta não teria a necessidade de ser escurecida pelo eletrocromico. Assim, a tomada de decisão pela ventilação híbrida ocorre primeiro, para depois atuar o eletrocromico, uma vez que o efeito de resfriamento da ventilação é mais rápido. Outro conflito operacional trabalhado foi o abre e fecha de janelas a cada *timestep* (período de cinco minutos), em que foi criado um comando que dependia da decisão no *timestep* anterior. Estes critérios foram discutidos em 3.3.3, Controles de janelas e 4.3, Fluxograma dos controles de janela. Neste último item, foram detalhadas as estratégias de controle em formato de fluxograma.

Para a análise dos cenários ótimos na fronteira de Pareto, considerou-se a função objetivo que buscava reduzir a demanda de energia para climatização e maximizar a fração de horas em conforto térmico, descrito em 3.7.

Assim, pôde-se estabelecer diretrizes gerais de projeto de janelas em edifícios comerciais para os climas subtropicais e tropical no item 5, em discussões, tais como aproveitar o potencial de eficiência energética da ventilação híbrida em Curitiba e em São Paulo a partir de um *setpoint* dinâmico e da ventilação noturna, e utilizar o controle eletrocromico baseado em temperatura do ar externo em Recife.

Conclui-se que a janela eletrocromica ainda é economicamente inviável para escritórios de pequeno porte no Brasil. Em se tratando de conforto térmico, proporciona maiores frações de horas em conforto no ano, considerando o método adaptativo. A ventilação híbrida ainda traz maior potencial de economia de energia

para o clima subtropical, enquanto que para o clima tropical a ventilação natural é pouco aproveitada.

O fluxo de trabalho desenvolvido nesta tese pode orientar arquitetos e projetistas para o adequado dimensionamento de janelas e para a combinação de tecnologias de controle solar e ventilação híbrida. Trata-se da possibilidade de indicar diretrizes iniciais e verificar as respostas das soluções de projeto em termos de demanda de energia para climatização e de conforto térmico em um mesmo ambiente, por meio de simulações paramétricas. Ao ser desenvolvido para climas tropical e subtropical, traz uma importante contribuição para o projeto de edifício em climas quentes, tirando proveito da arquitetura bioclimática e do resfriamento passivo.

6.1 Limitações do trabalho

Esta tese forneceu um processo de tomada de decisão para janelas, considerando a operação conjunta da ventilação híbrida e dos vidros estáticos e dinâmico, porém é importante ressaltar que se trata de um modelo simplificado em que as simulações paramétricas foram desenvolvidas considerando um ambiente de escritório com dados de entradas de valores normativos. O método e os códigos criados podem ser utilizados para quaisquer outras condições, com diferentes tipologias e arquivos climáticos, adaptando-se os controles EC e VH. A seleção do dispositivo eletrocromico e da ventilação híbrida proporcionou a análise da combinação de duas medidas de eficiência energética, no entanto outras técnicas podem ser combinadas e avaliadas.

Os resultados aqui descritos são válidos para uma sala comercial de pequeno porte, com paredes de alvenaria e janelas adjacentes nas fachadas norte e oeste.

Foram utilizados arquivos climáticos do ano meteorológico típico (TMY), portanto as simulações consideram o comportamento térmico da construção diante dos parâmetros ambientais que não consideram as mudanças climáticas ou variações atípicas.

Sobre a modelagem no EnergyPlus, observaram-se os seguintes aspectos:

- O AirflowNetwork (AFN) considera a abertura de portas e janelas, permitindo a transferência de massa, mas o balanço de calor é calculado como se a porta e janela estivessem fechados.
- O efeito do tipo de abertura da esquadria não é detalhado (basculante, de correr, etc.), sendo considerada apenas a área de abertura equivalente por onde ocorre a passagem do fluxo de ar. O efeito de sobreposição ou inclinação de folhas não é considerado.
- O SplitFlux fornece o nível de iluminância nos pontos de monitoramento somente da iluminação natural.
- O Energy Management System (EMS) realiza a atuação do comando no *timestep* seguinte, ocasionando um atraso na operação de 5 minutos (no caso deste trabalho, em que foi utilizado o *timestep* de 12).

Com relação ao tratamento dos dados, os níveis de iluminância nos pontos P1 e P2 foram considerados como uma média anual nas horas ocupadas, não revelando a ocorrência de ofuscamento em dias e horários específicos.

A avaliação do ambiente térmico durante a operação da ventilação híbrida foi realizada com base no conforto adaptativo segundo a ASHRAE 55, mesmo nos momentos em que o sistema de ar condicionado era acionado. Os resultados de fração de horas em conforto devem ser analisados sob esta condição, uma vez que a aplicabilidade do modelo adaptativo se encontra ainda em discussão pela comunidade científica.

6.2 Trabalhos futuros

Como trabalhos futuros, os seguintes tópicos podem ser explorados:

- Estabelecer intervalos sazonais dos controles da janela EC, como por exemplo o ângulo solar de acordo com as estações do ano.
- Considerar a otimização com algoritmos genéticos para trabalhar com variáveis contínuas, em vez de discretas, para os controles EC e VH.

- Realizar o controle de outros tipos de janelas inteligentes em climas subtropicais e tropical, tais como o termocrômico e o gasocrômico, ou mesmo o eletrocrômico com nanocristais.
- Promover a parametrização de elementos da zona térmica, tais como geometria, dimensões do ambiente, altura de peitoril, orientação das janelas e fator de abertura.
- Realizar o mesmo estudo para as demais zonas bioclimáticas brasileiras – ZB 2, 4, 5, 6 e 7.
- Considerar o consumo de energia do próprio dispositivo eletrocrômico ao alterar a cor da superfície do vidro, já que alterar a cor consome mais energia do que manter no estado mais claro, assim como utilizar outros modelos de janela eletrocrômica, tais como as camadas azuis ou verdes, ou com espessuras diferentes de vidros e do espaço de ar/gás.
- Realizar a análise da demanda ou consumo de energia com climatização considerando a dimerização da iluminação artificial e avaliando a contribuição da carga térmica pela luminária.
- Adicionar a análise do conforto luminoso, ocorrência de ofuscamento e o desempenho lumínico na tomada de decisão do controle do dispositivo eletrocrômico.
- Desenvolver estudos específicos em ferramentas CFD, para detalhar a operação da janela em sua abertura/fechamento e durante a alteração do estágio do EC.
- Realizar estudos de ventilação e vidros dinâmicos considerando as mudanças climáticas e visando cenários futuros de temperatura em elevação, uma vez que neste estudo considerou-se o uso do arquivo climático TMY (ano meteorológico típico).

7 REFERÊNCIAS

- ABRAVIDRO. Panorama Abravidros - O mercado vidreiro em números 10ª edição 2021. **O vidroplano**, p. 12, jun. 2021.
- ACKERLY, K.; BAKER, L.; BRAGER, G. **Summary Report April 2011 - Window use in mixed-mode buildings: a literature review**. Berkeley: University of California, 2011.
- ALVARES, C. A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.
- AMERICAN SOCIETY OF HEATING REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. **ASHRAE Standard 55: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy**. Atlanta: ASHRAE, 2013.
- AMERICAN SOCIETY OF HEATING REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. **ASHRAE 90.1 - Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings**. Atlanta: ASHRAE, 2019a.
- AMERICAN SOCIETY OF HEATING REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. **ANSI/ASHRAE Addendum to ANSI/ASHRAE Standard 62.1-2016 - Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality**. Atlanta: ASHRAE, 2019b.
- AMERICAN SOCIETY OF HEATING REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. **ASHRAE 140 - Method of test for evaluating building performance simulation software**. Atlanta: ASHRAE, 2020a.
- AMERICAN SOCIETY OF HEATING REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. **ANSI/ASHRAE Addendum a to ANSI/ASHRAE Standard 169-2019 - Climatic Data for Building Design Standards**. Atlanta: ASHRAE, 2020b.
- ANDRADE, J. R. **Desenvolvimento de dispositivos eletrocrômicos**. 2015. Tese (Doutorado). Instituto de Química de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos: 2015.
- ASCIONE, F. et al. A new methodology for cost-optimal analysis by means of the multi-objective optimization of building energy performance. **Energy and Buildings**, v. 88, p. 78–90, 2015.
- ASSIMAKOPOULOS, M. N. et al. Comparing the energy performance of an

electrochromic window under various control strategies. **Building and Environment**, v. 42, n. 8, p. 2829–2834, 2007.

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: ABNT, 2005a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220-2 - Desempenho térmico de edificações parte 2: Método de célula da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações**. Rio de Janeiro: ABNT, 2005b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15215-4 - Iluminação natural. Parte 4: Verificação experimental das condições de iluminação interna de edificações - Método de medição**. Rio de Janeiro: ABNT, 2005c.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16401-1 - Instalações de ar condicionado - Sistemas centrais e unitários. Parte 1: Projetos de instalações**. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16015 - Vidro insulado - Características, requisitos e métodos de ensaio**. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO/CIE 8995-1 - Iluminação de ambientes de trabalho. Parte 1: Interior**. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7199 - Vidros na construção civil - Projeto, execução e aplicações**. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 10821-2 - Esquadrias para edificações. Parte 2: Esquadrias externas - Requisitos e classificação**. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575-1 - Edificações habitacionais - Desempenho. Parte 1: Requisitos gerais**. Rio de Janeiro: ABNT, 2021a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575-4 - Edificações habitacionais - Desempenho. Parte 4: Requisitos para os sistemas de vedações verticais internas e externas - SVVIE**. 5. ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2021b.

BAETENS, R.; JELLE, B. P.; GUSTAVSEN, A. Properties, requirements and possibilities of smart windows for dynamic daylight and solar energy control in buildings: A state-of-the-art review. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, v. 94, n. 2, p. 87–105, 2010.

BARBADILLA-MARTÍN, E. et al. Field study on adaptive thermal comfort in mixed mode office buildings in southwestern area of Spain. **Building and Environment**, v. 123, n. Supplement C, p. 163–175, 2017.

BAZARAA, M. S.; SHERALI, H. D.; SHETTY, C. M. **Nonlinear Programming, Theory and Algorithms**. Hoboken: John Wiley & Sons, 2006

BELMANS, B. et al. Set-up and evaluation of a virtual test bed for simulating and comparing single- and mixed-mode ventilation strategies. **Building and Environment**, v. 151, n. October 2018, p. 97–111, 2019.

BERGMAN, L. T. et al. **Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa**. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2015.

BRACKNEY, L. et al. **Building Energy Modeling with OpenStudio**. Cham: Springer International Publishing, 2018.

BRASIL. **Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior. Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial. Portaria n. 372. Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serv.** Brasília: Inmetro, 2010.

BRITO, A. C. **Contribuição da inércia térmica de ambientes na eficiência energética de edifícios de escritórios na cidade de São Paulo**. 2015. Tese (Doutorado). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo: 2015.

CALCERANO, F.; MARTINELLI, L. Numerical optimisation through dynamic simulation of the position of trees around a stand-alone building to reduce cooling energy consumption. **Energy and Buildings**, v. 112, p. 234–243, 2016.

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, 2010.

CASINI, M. **Smart Buildings - Advanced Materials and Nanotechnology to Improve Energy-Efficiency and Environmental Performance**. Sawston: Elsevier, 2016.

CASINI, M. Active dynamic windows for buildings: A review. **Renewable Energy**, v. 119, p. 923–934, 2018.

CEBRACE. **Vidros de proteção solar**, 2019. Disponível em:
<<https://www.cebrace.com.br/Arquivos/Download/21/21.PDF>>

CENTER FOR THE BUILT ENVIRONMENT. **About Mixed-Mode**. Disponível em:
<<https://cbe.berkeley.edu/mixedmode/aboutmm.html>>. Acesso em: 6 dez. 2021.

CLARKE, J. A. **Energy simulation in building design**. 2. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2001.

CLIMATEMPO. **Climatologia em São Paulo, SP**. Disponível em:
<<https://www.climatepo.com.br/climatologia/558/saopaulo-sp>>. Acesso em: 23 jun. 2022.

COSTANZO, V.; DONN, M. Thermal and visual comfort assessment of natural ventilated office buildings in Europe and North America. **Energy and Buildings**, v. 140, n. Supplement C, p. 210–223, 2017.

CUCE, E.; RIFFAT, S. B. A state-of-the-art review on innovative glazing technologies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 41, p. 695–714, 2015.

DE DEAR, R. Thermal comfort in practice. **Indoor Air, Supplement**, v. 14, n. SUPPL. 7, p. 32–39, 2004.

DE DEAR, R. J. et al. Progress in thermal comfort research over the last twenty years. **Indoor Air**, v. 23, n. 6, p. 442–461, 2013.

DE DEAR, R. J.; BRAGER, G. S. Developing an adaptive model of thermal comfort and preference. **ASHRAE Transactions**, v. 104, p. 145–167, 1998.

DE VECCHI, R. et al. Thermal comfort in office buildings: Findings from a field study in mixed-mode and fully-air conditioning environments under humid subtropical conditions. **Building and Environment**, v. 123, p. 672–683, 2017.

DJAMILA, H. Indoor thermal comfort predictions: Selected issues and trends.

Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 74, p. 569–580, 2017.

DRAKE, S. et al. Occupant comfort in naturally ventilated and mixed-mode spaces within air-conditioned offices. **Architectural Science Review**, v. 53, n. 3, p. 297–306, 2010.

DUFFIE, J. A.; BECKMAN, W. A. **Solar Engineering of Thermal Processes**. 4. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2013.

DUSSAULT, J.; GOSELIN, L. Office buildings with electrochromic windows : A sensitivity analysis of design parameters on energy performance , and thermal and visual comfort. **Energy & Buildings**, v. 153, p. 50–62, 2017.

DUSSAULT, J. M.; GOSELIN, L.; GALSTIAN, T. Integration of smart windows into building design for reduction of yearly overall energy consumption and peak loads. **Solar Energy**, v. 86, n. 11, p. 3405–3416, 2012.

DUSSAULT, J. M.; SOURBRON, M.; GOSELIN, L. Reduced energy consumption and enhanced comfort with smart windows: Comparison between quasi-optimal, predictive and rule-based control strategies. **Energy and Buildings**, v. 127, p. 680–691, 2016.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (BRASIL). **Nota técnica EPE030/2018: Uso de Ar Condicionado no Setor Residencial Brasileiro : Perspectivas e contribuições para o avanço em eficiência energética** **Uso de Ar Condicionado no Setor Residencial Brasileiro**. Brasília: EPE, 2018.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (BRASIL). **Balanço Energético Nacional 2020: Ano base 2019**. Brasília: EPE, 2020.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (BRASIL). **Balanço Energético Nacional 2021: Ano base 2020**. Brasília: EPE, 2021.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 673 - Glass in building - Determination of thermal transmittance (U-value) - Calculation method**. Brussels: CEN, 2011.

FANG, Y.; CHO, S. Design optimization of building geometry and fenestration for daylighting and energy performance. **Solar Energy**, v. 191, p. 7–18, out. 2019.

FANGER, P. O. **Thermal Comfort - Analysis and application in environmental engineering**. Copenhagen: McGraw-Hill, 1972.

FENG, F. et al. A critical review of fenestration/window system design methods for high performance buildings. **Energy and Buildings**, v. 248, p. 111184, out. 2021.

FEUSTEL, H. E.; RAYNER-HOOSON, A. **COMIS Fundamentals**. Berkeley: LBL, 1990.

FIORENTINI, M. et al. Development and evaluation of a comfort-oriented control strategy for thermal management of mixed-mode ventilated buildings. **Energy and Buildings**, v. 202, 2019.

FRATTOLILLO, A. et al. Heating and cooling loads with electrochromic glazing in Mediterranean climate. **Energy and Buildings**, v. 201, p. 174–182, 2019.

GIVONI, B. **Climate considerations in building and urban design**. Hoboken: John Wiley & Sons, 1998.

GLASS FOR EUROPE. **The Energy Performance of Buildings Directive - Maximising energy savings from glazing**. Disponível em:

<<https://glassforeurope.com/minimum-performance-requirements-for-windows/>>.

Acesso em: 11 jan. 2022.

GOMIS, L. L.; FIORENTINI, M.; DALY, D. Potential and practical management of hybrid ventilation in buildings. **Energy and Buildings**, v. 231, p. 110597, 2021.

GRANQVIST, C. G. Electrochromics for smart windows: Oxide-based thin films and devices. **Thin Solid Films**, v. 564, p. 1–38, 2014.

HASHEMPOUR, N.; TAHERKHANI, R.; MAHDIKHANI, M. Energy performance optimization of existing buildings: A literature review. **Sustainable Cities and Society**, v. 54, p. 101967, 2020.

HEISELBERG, P. K. Hybrid ventilation in new and retrofitted office buildings. **Aalborg University**, v. R9922, n. 46, p. 8, 1999.

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, 2007.

HOON LEE, J.; JEONG, J.; TAE CHAE, Y. Optimal control parameter for

electrochromic glazing operation in commercial buildings under different climatic conditions. **Applied Energy**, v. 260, n. December 2019, p. 114338, 2020.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Densidade demográfica - Brasil 2010**. Rio de Janeiro: IBGE, 2012.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 15099 - Thermal performance of windows, doors and shading devices - Detailed calculations**. Geneva: ISO, 2003.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 7730: Ergonomics of the thermal environment Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria**. Geneva: ISO, 2005.

IPCC. **Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Geneva: IPCC, 2021.

JELLE, B. P. et al. Fenestration of today and tomorrow: A state-of-the-art review and future research opportunities. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, v. 96, n. 1, p. 1–28, 2012.

JONSSON, A.; ROOS, A. Evaluation of control strategies for different smart window combinations using computer simulations. **Solar Energy**, v. 84, n. 1, p. 1–9, 2010.

KIM, J. et al. Thermal comfort in a mixed-mode building: Are occupants more adaptive? **Energy and Buildings**, v. 203, p. 109436, 2019.

LAI, C. M.; HOKOI, S. Solar façades: A review. **Building and Environment**, v. 91, p. 152–165, 2015.

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. O. R. **Eficiência Energética na Arquitetura**. 3. ed. Rio de Janeiro: Eletrobrás Procel, 2014.

LEE, E. S. et al. **Advancement of Electrochromic Windows**. Berkeley: California Energy Commission, PIER, 2006a.

LEE, E. S. et al. **A design guide for early-market electrochromic windows**. Berkeley: California Energy Commission, PIER, 2006b.

LEE, E. S.; CLAYBAUGH, E. S.; LAFRANCE, M. End user impacts of automated

electrochromic windows in a pilot retrofit application. **Energy and Buildings**, v. 47, p. 267–284, 2012.

LONGO, S.; MONTANA, F.; RIVA SANSEVERINO, E. A review on optimization and cost-optimal methodologies in low-energy buildings design and environmental considerations. **Sustainable Cities and Society**, v. 45, p. 87–104, fev. 2019.

MARINOSKI, D. L. et al. Measurement of solar factor of glazing and shading devices using a solar calorimeter. **Building and Environment**, v. 144, n. May, p. 72–85, 2018.

MARTINS, N. R.; DA GRAÇA, G. C. Validation of numerical simulation tools for wind-driven natural ventilation design. **Building Simulation**, v. 9, n. 1, p. 75–87, 11 fev. 2016.

MENCHACA-BRANDAN, M. A.; DOMINGUEZ ESPINOSA, F. A.; GLICKSMAN, L. R. The influence of radiation heat transfer on the prediction of air flows in rooms under natural ventilation. **Energy and Buildings**, v. 138, p. 530–538, 2017.

MICHELATO, R. **Avaliação do desempenho térmico de vidros refletivos: estudo de caso em células-teste**. 2007. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

MITCHEL, R. et al. **Window 7 User Manual**. Berkeley: Lawrence Berkeley National Laboratory, 2019.

MULFARTH, R. C. K. et al. The environmental response of office buildings from the Brazilian bioclimatic modernism in São Paulo: the case study of Complexo Conjunto Nacional – CCN (1962). **Solar Energy**, v. 220, n. April, p. 617–634, 2021.

NEVES, L. O.; MELO, A. P.; RODRIGUES, L. L. Energy performance of mixed-mode office buildings: Assessing typical construction design practices. **Journal of Cleaner Production**, v. 234, p. 451–466, 2019.

O'BRIEN, W.; GUNAY, H. B. The contextual factors contributing to occupants' adaptive comfort behaviors in offices - A review and proposed modeling framework. **Building and Environment**, v. 77, p. 77–88, 2014.

OLIVEIRA, R. S. DE; SEMAAN, F. S.; PONZIO, E. A. Janelas Eletrocrômicas: Uma Nova Era em Eficiência Energética. **Revista Virtual de Química**, v. 7, n. 1, 2015.

OLIVEIRA, R. D. et al. Thermal Comfort for users according to the Brazilian Housing Buildings Performance Standards. **Energy Procedia**, v. 78, p. 2923–2928, 2015.

OMRANI, S. et al. Effect of natural ventilation mode on thermal comfort and ventilation performance: Full-scale measurement. **Energy and Buildings**, v. 156, p. 1–16, 2017.

PAL, S.; ROY, B.; NEOGI, S. Heat transfer modelling on windows and glazing under the exposure of solar radiation. **Energy and Buildings**, v. 41, n. 6, p. 654–661, 2009.

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

PETCHROMPO, S. et al. A review of Pareto pruning methods for multi-objective optimization. **Computers & Industrial Engineering**, v. 167, p. 108022, 2022.

PICCOLO, A. Thermal performance of an electrochromic smart window tested in an environmental test cell. **Energy and Buildings**, v. 42, n. 9, p. 1409–1417, 2010.

PICCOLO, A. et al. Energy performance of an electrochromic switchable glazing: Experimental and computational assessments. **Energy and Buildings**, v. 165, p. 390–398, 2018.

PICCOLO, A.; SIMONE, F. Performance requirements for electrochromic smart window. **Journal of Building Engineering**, v. 3, p. 94–103, 2015.

PINATTI, A. A. **Indicações sobre a utilização de filme eletrocromicos Nb2O5 como proteção solar em edifícios**. 1999. Dissertação (Mestrado). Interunidades em Ciências e Engenharia de Materiais, IFSC, IQSC, EESC, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1999.

PINTO, M. M.; WESTPHAL, F. S. **Energy Performance of Offices Buildings in Brazil using Insulated Glass Units**. Proceedings of Building Simulation 2019: 16th Conference of IBPSA. **Anais...**Rome: IBPSA, 2020. Disponível em: <http://www.ibpsa.org/proceedings/BS2019/BS2019_211312.pdf>

PORTO, J. S. **Desempenho termoenergético e ótico da janela inteligente por simulação computacional**. 2019. Tese (Doutorado). Centro de Desenvolvimento

Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2019.

PRIETO, A. et al. 25 Years of cooling research in office buildings: Review for the integration of cooling strategies into the building façade (1990–2014). **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 71, n. October 2016, p. 89–102, 2017.

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

RIJAL, H. B. et al. Considering the impact of situation-specific motivations and constraints in the design of naturally ventilated and hybrid buildings. **Architectural Science Review**, v. 55, n. 1, p. 35–48, 2012.

ROOCKS, P. Computing Pareto Frontiers and Database Preferences with the rPref Package. **The R Journal**, v. 8/2, p. 393–404, 2016.

ROSSI, M. M. et al. Metamodels to assess the thermal performance of naturally ventilated, low-cost houses in Brazil. **Energy and Buildings**, v. 204, p. 23–31, 2019.

RUPP, R. F.; GHISI, E. What is the most adequate method to assess thermal comfort in hybrid commercial buildings located in hot-humid summer climate? **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 29, n. Supplement C, p. 449–462, jan. 2014.

RUPP, R. F.; GHISI, E. Predicting thermal comfort in office buildings in a Brazilian temperate and humid climate. **Energy and Buildings**, v. 144, p. 152–166, jun. 2017.

SAGE. **Performance Assessment of SageGlass Electrochromic Coatings and Control Scenarios**. Malvern: SAGE Electrochromics, 2010.

SAGE. **Environmental Product Declaration - SageGlass: Electrochromic Glass**. Malvern: Sage Electrochromics, 2016.

SAGE ELECTROCHROMICS. **Symphony Control System - Overview**. Malvern: Sage Electrochromics, 2021.

SAINT-GOBAIN. **Saint-Gobain Research Brazil**. Disponível em: <<https://www.saint-gobain.com.br/grupo-saint-gobain/inovacao/saint-gobain-research-brasil>>. Acesso em: 5 fev. 2021.

SAKIYAMA, N. R. M. et al. Dataset of the EnergyPlus model used in the assessment of natural ventilation potential through building simulation. **Data in Brief**, v. 34, p.

106753, 2021.

SALCIDO, J. C.; RAHEEM, A. A.; ISSA, R. R. A. From simulation to monitoring: Evaluating the potential of mixed-mode ventilation (MMV) systems for integrating natural ventilation in office buildings through a comprehensive literature review. **Energy and Buildings**, v. 127, p. 1008–1018, 2016.

SCHULZE, T.; EICKER, U. Controlled natural ventilation for energy efficient buildings. **Energy and Buildings**, v. 56, p. 221–232, 2013.

SENTANIN, F. C. **Desempenho de janelas eletrocrômicas**. 2012. Tese (Doutorado). Interunidades em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

SOARES, C. A. O. **Uma formulação multiobjetivo para o cálculo de Equilíbrios de Nash não pareto-dominados**. 2014. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014.

SORGATO, M. J.; MELO, A. P.; LAMBERTS, R. The effect of window opening ventilation control on residential building energy consumption. **Energy and Buildings**, v. 133, p. 1–13, 2016.

SUN, Y.; WU, Y.; WILSON, R. A review of thermal and optical characterisation of complex window systems and their building performance prediction. **Applied Energy**, v. 222, n. March, p. 729–747, 2018.

TÄLLBERG, R. et al. Comparison of the energy saving potential of adaptive and controllable smart windows: A state-of-the-art review and simulation studies of thermochromic, photochromic and electrochromic technologies. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, v. 200, n. June 2018, p. 109828, 2019.

THE EUROPEAN PARLIAMENT AND THE COUNCIL OF THE EUROPEAN UNION. **DIRECTIVE 2010/31/EU OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL**. Brussels: European Commission Department of Energy, 2010.

THE EUROPEAN PARLIAMENT AND THE COUNCIL OF THE EUROPEAN UNION. **DIRECTIVE 2012/27/EU OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL**. Brussel: European Commission Department of Energy, 2012.

TIBA, C. **Atlas Solarimétrico do Brasil: Banco de Dados Solarimétricos**. Recife: Ed. Universitária da UFPE, 2000.

TRIANA, M. A.; LAMBERTS, R.; SASSI, P. Should we consider climate change for Brazilian social housing? Assessment of energy efficiency adaptation measures. **Energy and Buildings**, v. 158, p. 1379–1392, 2018.

U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. **Engineering Reference - EnergyPlus Version 9.4.0 Documentation**, 2020a.

U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. **Input Output Reference - EnergyPlus Version 9.4.0 Documentation**, 2020b.

U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. **Application Guide for EMS - EnergyPlus Version 9.4 Documentation**, 2020c.

U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. **Auxiliary Programs - EnergyPlus Version 9.4.0 Documentation**, 2020d.

U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. **Tips and Tricks for Using EnergyPlus - EnergyPlus Version 9.4.0 Documentation**, 2020e.

URQUHART, R.; RICHMAN, R. **The relationship between flow exponents and flow values and associated implications for air leakage testing using fan (de)pressurization methodology**. 14th Canadian conference on building science and technology: Buildings for tomorrow. **Anais...**Toronto: OBEC, 2014

VAN DEN WYMELENBERG, K. Patterns of occupant interaction with window blinds: A literature review. **Energy and Buildings**, v. 51, n. 2012, p. 165–176, 2012.

VEIGA, R. K. et al. **Manual de Uso do Energy Management System (EMS) no Programa EnergyPlus - Versão 9.1**. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2019.

WALTON, G. N. **AIRNET - A computer program for building airflow network modeling. NISTIR 89-4072**. Gaithersburg: [s.n.]. Disponível em: <<https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/Legacy/IR/nistir89-4072.pdf>>.

WANG, T. P.; WANG, L. B.; LI, B. Q. A model of the long-wave radiation heat transfer through a glazing. **Energy and Buildings**, v. 59, p. 50–61, 2013.

WU, Y. et al. Smart solar concentrators for building integrated photovoltaic façades. **Solar Energy**, v. 133, p. 111–118, 2016.

XAMÁN, J. et al. Thermal performance of a double pane window with a solar control

coating for warm climate of Mexico. **Applied Thermal Engineering**, v. 106, p. 257–265, 2016.

ZHAI, Y. et al. A multi-objective optimisation methodology for window design considering energy consumption, thermal environment and visual performance. **Renewable Energy**, v. 134, p. 1190-1199, 2019.

ZHAI, Z.; JOHNSON, M. H.; KRARTI, M. Assessment of natural and hybrid ventilation models in whole-building energy simulations. **Energy and Buildings**, v. 43, n. 9, p. 2251–2261, 2011.

ZHANG, Y. et al. Ranking uncertain sky: The probabilistic top-k skyline operator. **Information Systems**, v. 36, n. 5, p. 898–915, 2011.

ZHAO, J.; DU, Y. Multi -objective optimization design for windows and shading configurations considering energy consumption and thermal comfort: A case study for office building in different climatic regions of China. **Solar Energy**, v. 206, p. 997-1017, 2020.

APÊNDICE 1

Este apêndice contém as equações para o método de cálculo unidimensional baseado em normas, para as propriedades térmicas dos sistemas de janelas (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, 2011; INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 2003; SUN; WU; WILSON, 2018).

A transmitância térmica do centro do vidro (U), em $W/m^2.K$, pode ser determinada a partir da Equação A1.1.

$$U = \frac{1}{R_t} = \frac{1}{\frac{1}{h_e} + R + \frac{1}{h_i}} \quad A1.1$$

Onde:

h_e = coeficiente de transferência de calor externa ($W/m^2.K$);

h_i = coeficiente de transferência de calor interna ($W/m^2.K$);

R = resistência térmica total da unidade de vidro ($m^2.K/W$).

A resistência térmica total do vidro insulado duplo é dada pela Equação A1.2.

$$R = \frac{1}{h_r + h_g} + \frac{d_1}{\lambda_{p1}} + \frac{d_2}{\lambda_{p2}} \quad A1.2$$

Onde:

d = espessura de cada pano de vidro (m);

λ_p = condutividade térmica de cada pano de vidro ($W/m.k$);

h_r = condutância de radiação entre os dois panos de vidro ($W/m^2.K$);

h_g = condutância térmica da cavidade do ar ($W/m^2.K$).

A condutância da radiação entre os panos de vidro (h_r) e a condutância térmica do gás na cavidade (h_g) podem ser obtidos a partir das Equações A1.3 e A1.4.

$$h_r = 4\sigma \left(\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)^{-1} \cdot T_m^3 \quad A1.3$$

$$h_g = Nu \cdot \frac{k_g}{s} \quad A1.4$$

Onde:

σ = Constante de Stefan-Boltzmann, que é igual a $5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$;

T_m = temperatura média absoluta do espaço de ar/gás (K);

ε_1 e ε_2 = emissividade corrigida da superfície do vidro dentro da cavidade à temperatura T_m (adimensional);

Nu = número de Nusselt;

k_g = condutividade térmica do espaço de ar (W/m.k);

s = espessura da cavidade de ar (m).

APÊNDICE 2

Nesta seção constam os fluxogramas de decisão para os controles da janela eletrocromática, referentes aos controles E2, E3, E4 e E5, conforme Tabela 20 do item 4.4.3.1.

A Figura 71 representa o fluxograma do controle E2, relacionando os intervalos de temperatura de superfície (T_s) com os estágios EC. A Figura 72 representa o fluxograma do controle E3, com os intervalos de temperatura do ar externo (T_{ar_ext}).

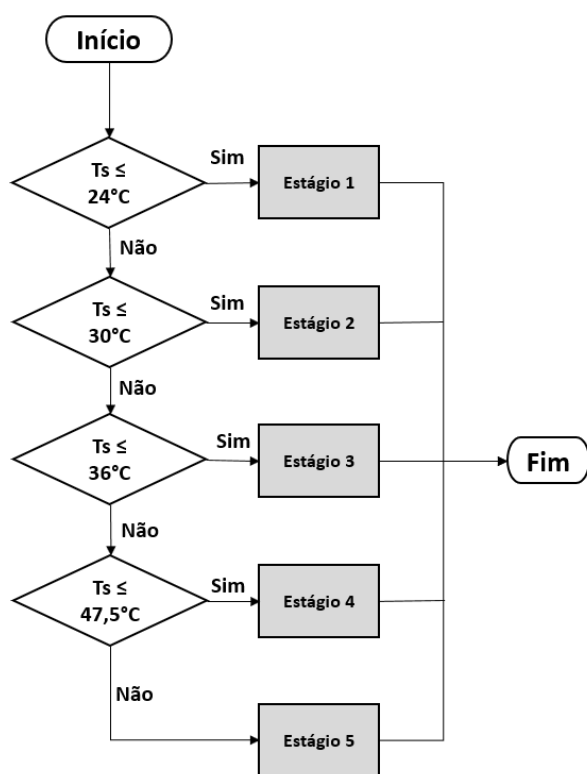


Figura 71 - Fluxograma do controle E2. Fonte: elaborado pela autora, 2022.

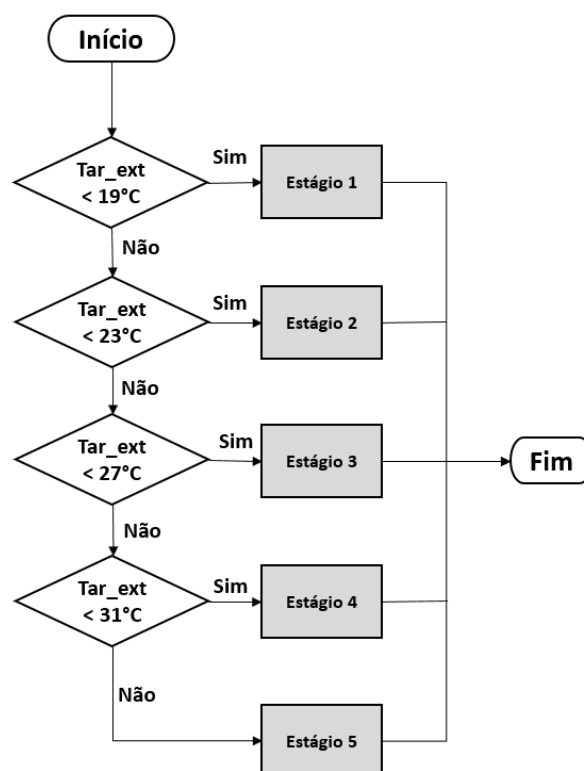


Figura 72 - Fluxograma do controle E3. Fonte: elaborado pela autora, 2022.

A Figura 73 representa o fluxograma do controle E4, relacionando os intervalos de iluminância externa (I_{lum}) com os estágios EC.

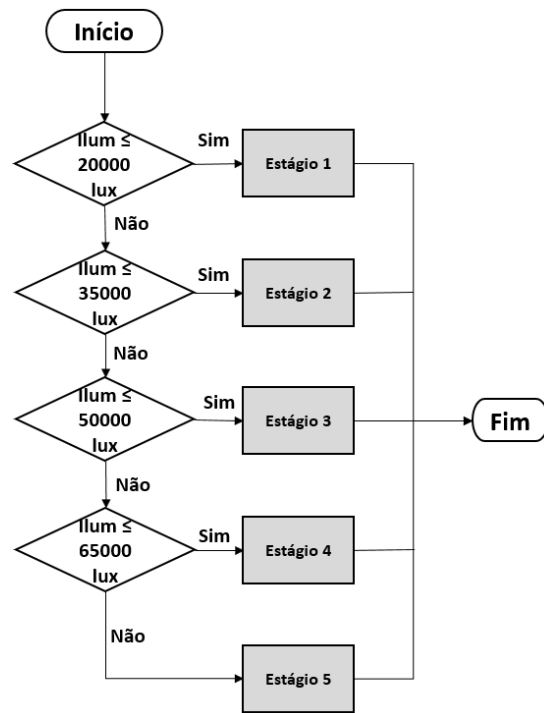


Figura 73 - Fluxograma do controle E4. Fonte: elaborado pela autora, 2022.

Na Figura 74, AI representa o ângulo de incidência, e SkyC, as condições de céu, que variam de 1 a 10.

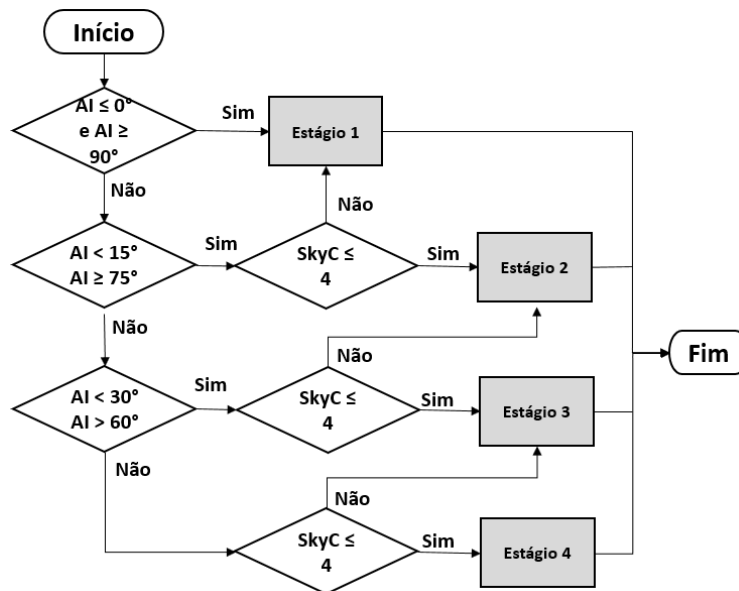


Figura 74 - Fluxograma do controle E5. Fonte: elaborado pela autora, 2022.