



**INSTITUTO LATINO-AMERICANO DE
TECNOLOGIA, INFRAESTRUTURA E TERRITÓRIO
(ILATIT)**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA CIVIL (PPG ECI)**

**MODELAGEM COMPUTACIONAL DE UM SISTEMA DE SOMBREAMENTO
ADAPTATIVO PARA CONTROLE SOLAR EM FACHADAS**

GABRIEL ALVES FEIERTAG

Foz do Iguaçu, PR

2024



**INSTITUTO LATINO-AMERICANO DE
TECNOLOGIA, INFRAESTRUTURA E TERRITÓRIO
(ILATIT)**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA CIVIL (PPG ECI)**

**MODELAGEM COMPUTACIONAL DE UM SISTEMA DE SOMBREAMENTO
ADAPTATIVO PARA CONTROLE SOLAR EM FACHADAS**

GABRIEL ALVES FEIERTAG

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal da Integração Latino-Americana, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Egon Vettorazzi
Coorientador: Prof. Dr. António Figueiredo

Foz do Iguaçu, PR

2024

GABRIEL ALVES FEIERTAG

**MODELAGEM COMPUTACIONAL DE UM SISTEMA DE SOMBREAMENTO
ADAPTATIVO PARA CONTROLE SOLAR EM FACHADAS**

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil na Universidade Federal da Integração Latino-Americana, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Egon Vettorazzi
Coorientador: Prof. Dr. António Figueiredo

BANCA EXAMINADORA

Orientador: Prof. Dr. Egon Vettorazzi
UNILA

Coorientador: Prof. Dr. António Figueiredo
UA

Prof. Dr. Noe Villegas Flores
UNILA

Prof. Dr. Romeu Vicente
UA

Foz do Iguaçu - PR, 03 de julho de 2024

Catálogo elaborado pelo Setor de Tratamento da Informação
Catálogo de Publicação na Fonte. UNILA - BIBLIOTECA LATINO-AMERICANA - PTI

F297

Feiertag, Gabriel Alves.

Modelagem computacional de um sistema de sombreamento adaptativo para controle solar em fachadas / Gabriel Alves Feiertag. - Foz do Iguaçu, 2024.

142 f.: il., color.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal da Integração Latino-Americana, Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Foz do Iguaçu - PR, 2024.

Orientador: Prof. Dr. Egon Vettorazzi.

Coorientador: Prof. Dr. Antônio Figueiredo.

1. Fachadas (Arquitetura)- Fachadas cinéticas. 2. Fachadas (Arquitetura)- Fachadas inteligentes. 3. Brise-soleil (Brises adaptativos). 4. Eficiência energética. I. Vettorazzi, Egon. II. Figueiredo, Antônio. III. Título.

CDU 72.012:004

Dedico este trabalho a minha esposa e família.

AGRADECIMENTO

Primeiramente, agradeço a Deus pela minha vida e pela presença em meu coração. Agradeço ao meu professor orientador, Egon Vettorazzi, não só pela constante orientação neste trabalho, mas sobretudo pela sua dedicação e amizade. Ao meu coorientador António Figueiredo, agradeço enormemente por dispor de seu precioso tempo para assessorar o trabalho. Ambos contribuíram significativamente para a conclusão deste.

Agradeço também à minha esposa, que, mesmo nos momentos difíceis, teve paciência e compreensão durante os períodos em que estive ausente para me dedicar a este trabalho. Aos professores do mestrado, agradeço por compartilharem uma visão de mundo e conhecimentos valiosos para o meio acadêmico e profissional.

Ao amigo e orientador do meu bacharelado, Marcelo Langner, que, nos momentos finais da dissertação, contribuiu de forma valiosa, dispondo de seu tempo para me auxiliar.

RESUMO

Com a crescente demanda de energia nos edifícios em áreas urbanas, é fundamental melhorar a eficiência energética deste setor. As fachadas adaptativas apresentam-se como uma possível solução para otimizar elementos de sombreamento contribuindo assim para um edificado mais eficiente. Este trabalho visa desenvolver um sistema de sombreamento adaptativo com elementos de controle solar, utilizando algoritmos evolutivos para melhorar o conforto térmico e a eficiência energética. O trabalho foi conduzido em três fases em uma edificação modelo localizada na Universidade de Aveiro, em Portugal. Na primeira fase, foram pré-dimensionadas quatro tipologias de brises: um horizontal com três lâminas; um horizontal com dez lâminas; um vertical e um misto. Foi analisado o percentual de sombreamento, identificando os dois modelos com melhores resultados. Na segunda fase, foi estudada a irradiação solar com os brises nos ângulos de -30° , -15° , 0° , $+15^{\circ}$ e $+30^{\circ}$, com brises estáticos e adaptativos, usando um algoritmo de simulação unicritério. A terceira fase focou no conforto térmico e na eficiência energética, utilizando simulações estáticas, manuais e adaptativas, todas com os mesmos ângulos e o mesmo algoritmo computacional. Os resultados mostraram que, na primeira fase, os dois brises horizontais apresentam as melhores características para sombreamento. Na segunda fase, ambos os brises horizontais contribuíram positivamente para minimizar e maximizar a irradiação interna, sendo o brise de três lâminas mais eficaz para a análise estática e adaptativa. Na terceira fase, ao comparar os resultados com a edificação modelo sem o sistema de sombreamento, os brises horizontais apresentaram um aumento no conforto térmico de 7,29% com os brises fixos, 9,41% com os brises manuais e 11,35% com os brises adaptativos. Na demanda de energia para resfriamento, os brises fixos diminuíram 11,06%, os brises manuais 13,70% e os brises adaptativos 14,42%. Todos os brises simulados não afetaram com relevância a demanda de energia para aquecimento. Conclui-se que o sistema de fachada adaptativa com a utilização de brises automatizados, em comparação com um sistema de fachadas compostos por brises fixos ou de acionamento manual, é uma alternativa eficaz para otimizar o controle da irradiação solar nos ambientes, para atender o conforto térmico dos usuários e contribuir para um aumento da eficiência energética das edificações.

PALAVRAS-CHAVES: Fachada Cinética, Fachada Inteligente, Brises adaptativos, Eficiência energética.

ABSTRACT

With the growing demand for energy in urban buildings, it is essential to improve the energy efficiency of this sector. Adaptive façades present themselves as a potential solution to optimize shading elements, thereby contributing to more efficient buildings. This work aims to develop an adaptive shading system with solar control elements, using evolutionary algorithms to enhance thermal comfort and energy efficiency. The study was conducted in three phases on a model building located at the University of Aveiro, Portugal. In the first phase, four types of brise-soleils were pre-dimensioned: a horizontal one with three blades; a horizontal one with ten blades; a vertical one; and a mixed type. The shading percentage was analyzed, identifying the two models with the best results. In the second phase, solar irradiation was studied with the brise-soleils at angles of -30° , -15° , 0° , $+15^\circ$, and $+30^\circ$, with both static and adaptive brise-soleils, using a single-criterion simulation algorithm. The third phase focused on thermal comfort and energy efficiency, utilizing static, manual, and adaptive simulations, all with the same angles and the same computational algorithm. The results showed that in the first phase, the two horizontal brise-soleils exhibited the best shading characteristics. In the second phase, both horizontal brise-soleils positively contributed to minimizing and maximizing internal irradiation, with the three-blade brise-soleil being more effective for static and adaptive analysis. In the third phase, when comparing the results with the model building without the shading system, the horizontal brise-soleils showed an increase in thermal comfort by 7.29% with fixed brise-soleils, 9.41% with manual brise-soleils, and 11.35% with adaptive brise-soleils. For cooling energy demand, the fixed brise-soleils reduced it by 11.06%, the manual brise-soleils by 13.70%, and the adaptive brise-soleils by 14.42%. None of the simulated brise-soleils significantly affected the heating energy demand. In conclusion, the adaptive façade system with automated brise-soleils, compared to a façade system with fixed or manually operated brise-soleils, is an effective alternative for optimizing solar irradiation control in indoor environments, meeting user thermal comfort needs, and contributing to increased energy efficiency in buildings.

KEYWORDS: Kinetic Facade, Smart Facade, Adaptive Sunshades, Energy Efficiency.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Evolução histórica das fachadas	20
Figura 2 - Ilustração portas Shoji	21
Figura 3 - Tecnologias bases para fachada adaptativa.....	22
Figura 4 - Fotos e mecanismo cinético da Villa Girasole.....	23
Figura 5 - Fachada Obra do Berço.....	24
Figura 6 – Isometria da edificação no Interior de Santa Catarina	25
Figura 7 - Fachada do edifício Suite Vollarad	26
Figura 8 - Fachada adaptativa Instituto Mundo Árabe.....	27
Figura 9 - Componentes e Detalhes da fachada do Instituto Mundo Árabe	27
Figura 10 - Museu da Criança de Pittsburgh	28
Figura 11 - Fachada dos escritórios do Conselho de Melbourne.....	29
Figura 12 - Evolução Histórica das fachadas adaptativas.....	30
Figura 13 – Ilustração de diferentes funcionamentos/tipologias de Brises	34
Figura 14 - Fachadas com Brise horizontal, vertical e misto.....	35
Figura 15 - Carta Bioclimática baseada de Givoni	37
Figura 16 – Fachada do edifício Palácio Gustavo Capanema	38
Figura 17 - Fachada do edifício Bosco Verticale	39
Figura 18 - Elementos de sombreamento da Casa Cavalcante e Planta Baixa	40
Figura 19 - Ilustração da capacidade de resposta das fachadas adaptativas	43
Figura 20 - Exemplos de construções com fachadas adaptativas de controle solar ...	43
Figura 21 - Exemplos de Construções com fachadas adaptativas para iluminação natural	44
Figura 22 - Exemplos de construções com fachadas adaptativas para controle de temperatura.....	45
Figura 23 - Número de publicações por ano.....	46
Figura 24 - Categorização das publicações.....	47
Figura 25 - Sistema cinético para controle solar proposto por Ricci et al.	48
Figura 26 - Sistemas para controle de iluminação natural proposto por Shi, Tablada e Wang.....	49
Figura 27 - Sistema cinético proposto por Rizi e Eltaweel.	50
Figura 28 - Modelo de estudo da fachada adaptativa proposto por Mangkuto, et al...	51
Figura 29 - Modelo de fachada adaptativa proposto por Nalcaci e Nalcaci.....	52
Figura 30 - Interface do Grasshopper e Rhinoceros	56
Figura 31 - Ilustração do Ladybug e Honeybee.....	58
Figura 32 - Ilustração Algoritmo Evolutivo	59
Figura 33 - Interface Galapagos e seu uso na modelagem do Rhinoceros.....	60
Figura 34 – Organograma do método.....	61
Figura 35 - Localização da região de estudo.....	62
Figura 36 - Plantas da célula teste.....	63
Figura 37 - Corte e Isometria da célula teste.....	63
Figura 38 – Carta solar e planta de cobertura da Tiny House.....	65
Figura 39 – Carta solar	68
Figura 40 - Dimensão dos brises	69
Figura 41 – Ilustração dos modelos de brise da pesquisa	70
Figura 42 - Angulações dos elementos de controle solar	70
Figura 43 - Fluxograma de trabalho para a etapa dois.....	72
Figura 44 – Desenho esquemático simulações da Fase 3.....	74
Figura 45 - Fluxograma de trabalho etapa três.....	76

Figura 46 - Comparação entre os Brises para posicionamento com um ângulo 0: porcentagem média de sombreamento	78
Figura 47 - Porcentagem média de sombreamento por mês para o Brise H3 e H10 a - 15°	79
Figura 48 – Porcentagem média de sombreamento por mês para o Brise H3 e H10 a - 30°	80
Figura 49 - Porcentagem média de sombreamento por mês para o Brise H3 e H10 a +15°	81
Figura 50 – Porcentagem média de sombreamento por mês para o Brise H3 e H10 a +30°	82
Figura 51 - Irradiação interna no mezanino durante o ano a 0°	83
Figura 52 - Irradiação interna no mezanino durante o ano a -15°	84
Figura 53 - Irradiação interna no mezanino durante o ano a -30°	85
Figura 54 - Irradiação interna no mezanino durante o ano a +15°	86
Figura 55 - Irradiação interna no mezanino durante o ano a +30°	87
Figura 56 – Ângulos dos brises H3 e H10 otimizados – períodos quentes	89
Figura 57 - Ângulos dos brises H3 e H10 otimizados –períodos frios.	90
Figura 58 - Estrutura dos resultados da fase 3.....	91
Figura 59 – Conforto Térmico sem Brise e com Brises H3 e H10 a 0°	92
Figura 60 – Desconforto térmico por calor, sem brise e com os brises H3 e H10 a 0°	93
Figura 61 - Desconforto térmico por frio, sem brise e com os brise H3 e H10 a 0°.....	94
Figura 62 - Energia de aquecimento necessária mensal - sem brise e brises H3 e H10 a 0°	95
Figura 63 - Energia de resfriamento necessária mensal – Sem brise e brises H3 e H10 a 0°	95
Figura 64 - Conforto Térmico sem Brise e com os Brises H3 e H10 na angulação -30°	97
Figura 65 - Conforto Térmico sem Brise e com os Brises H3 e H10 na angulação +30°	97
Figura 66 - Desconforto térmico por calor, sem brise e com os brises H3 e H10 a -30°	99
Figura 67 - Desconforto térmico por calor, sem brise e com os brises H3 e H10 a +30°	99
Figura 68 - Desconforto térmico por frio, sem brise e com os brises H3 e H10 a -30°	100
Figura 69 - Desconforto térmico por frio, sem brise e com os brises H3 e H10 a +30°	100
Figura 70 - Energia de aquecimento necessária mensal – Sem brise e brises H3 e H10 a -30°	102
Figura 71 - Energia de aquecimento necessária mensal – Sem brise e brises H3 e H10 a +30°	102
Figura 72 - Energia de resfriamento necessária mensal – Sem brise e brises H3 e H10 a -30°	103
Figura 73 - Energia de resfriamento necessária mensal – Sem brise e brises H3 e H10 a +30°	103
Figura 74 - Conforto Térmico sem Brise e com os Brises H3 e H10 na angulação -15°	105
Figura 75 - Conforto Térmico sem Brise e com os Brises H3 e H10 na angulação +15°	105
Figura 76 - Desconforto térmico por calor, sem brise e com os brises H3 e H10 a -15°	107

Figura 77 - Desconforto térmico por calor, sem brise e com os brises H3 e H10 a +15°	107
Figura 78 - Desconforto térmico por frio, sem brise e com os brises H3 e H10 a -15°	108
Figura 79 - Desconforto térmico por frio, sem brise e com os brises H3 e H10 a +15°	108
Figura 80 - Energia de aquecimento necessária mensal - Sem brise e brises H3 e H10 a -15°.....	110
Figura 81 - Energia de aquecimento necessária mensal - Sem brise e brises H3 e H10 a +15°.....	110
Figura 82 - Energia de resfriamento necessária mensal - Sem brise e brises H3 e H10 a -15°.....	111
Figura 83 - Energia de resfriamento necessária mensal - Sem brise e brises H3 e H10 a +15°.....	111
Figura 84 - Conforto Térmico sem Brise e com os Brises H3 e H10 adaptativo.	114
Figura 85 - Energia de aquecimento necessária mensal - Sem brise, H3 e H10 adaptativos.....	115
Figura 86 - Energia de resfriamento necessária mensal - Sem brise, H3 e H10 adaptativos.....	116
Figura 87 - Relação entre demanda de energia e o conforto térmico.....	119
Figura 88 - Comparativo dos brises no conforto térmico e na demanda de energia durante o ano.....	120

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades Térmicas da célula teste.....	64
Tabela 2 - Dados climatológicos para Aveiro.....	65
Tabela 3 – Fases da etapa.....	67
Tabela 4 – Agendas de Ocupação e Uso.....	74
Tabela 5 - Parâmetros utilizados no algoritmo de simulação.....	75
Tabela 6 – Percentual médio de sombreamento.....	82
Tabela 7 – Irradiação média solar nos brises H3 e H10.....	88
Tabela 8 - Comparação no aumento de conforto térmico dos Brises H3 e H10 a 0° ..	92
Tabela 9 - Diferença no desconforto térmico por calor e frio dos Brises H3 e H10 a 0°	94
Tabela 10 - Comparação na demanda de energia brise H3 e H10 a 0°.....	96
Tabela 11 - Comparação no aumento de conforto térmico do Brise H3 e H10 a -30° e +30°.....	98
Tabela 12 - Diferença no desconforto térmico por calor e frio dos Brises H3 e H10 a - 30° e +30°.....	101
Tabela 13 - Comparação na demanda de energia brise H3 e H10 a -30° e +30°.....	104
Tabela 14 - Comparação no aumento de conforto térmico do Brise H3 e H10 a -15° e +15°.....	106
Tabela 15 - Diferença no desconforto térmico por calor e frio dos Brises H3 e H10 a - 15° e +15°.....	109
Tabela 16 - Comparação na demanda de energia brise H3 e H10 a -15° e +15°.....	112
Tabela 17 - Síntese dos melhores resultados para o Brise H3.....	113
Tabela 18 – Síntese dos melhores resultados para o Brise H10.....	113
Tabela 19 – Comparação do aumento de conforto térmico do Brise H3 e H10 adaptativos.....	115
Tabela 20 - Comparação na demanda de energia H3 e H10 adaptativos.....	116
Tabela 21 - Ângulos otimizados para os brises H3.....	117
Tabela 22 - Ângulos otimizados para os brises H10.....	118
Tabela 23 - Síntese dos resultados.....	120
Tabela 24 - Síntese dos resultados - comparação entre os brises.....	121

LISTA DE SIGLAS

ASHRAE	<i>American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers</i> – Sociedade Americana de Engenheiros de Aquecimento, Refrigeração e Ar-Condicionado
BIM	<i>Building Information Modeling</i> – Modelagem da Informação da Construção
CAD	<i>Computer Aided Design</i> – Desenho assistido por computador
CAM	<i>Computer Aided Manufacturing</i> – Manufatura Assistida por Computador
DOE	<i>Department of Energy</i> – Departamento de Energia
DDY	<i>Design Conditions in EnergyPlus</i> – Condições de Projeto no Formato <i>EnergyPlus</i>
EPW	<i>EnergyPlus Weather Format</i> – Formato de Clima <i>EnergyPlus</i>
IEA	<i>International Energy Agency</i> – Agência Internacional de Energia
NREL	<i>National Renewable Energy Laboratory</i> – Laboratório Nacional de Energia Renovável
NURBs	Nonuniform Rational B-Splines – B-Splines Racionais não Uniformes
PMV	<i>Predicted Mean Vote</i> – Voto Médio Predito
TIC	Tecnologia de informação e comunicação

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA	15
1.1 OBJETIVOS.....	18
1.1.1 Geral.....	18
1.1.2 Objetivos específicos	18
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	19
2.1 EVOLUÇÃO HISTÓRICA DAS FACHADAS ADAPTATIVAS.....	19
2.2 CONFORTO TÉRMICO E EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NA ARQUITETURA	32
2.2.1 Brises.....	33
2.3 ARQUITETURA BIOCLIMÁTICA	35
2.4 ARQUITETURA CINÉTICA E A ADAPTAÇÃO AO CLIMA	40
2.4.1 Contexto atual da utilização da fachada adaptativa	45
2.5 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL NA ARQUITETURA.....	53
2.5.1 Design paramétrico e algoritmos evolucionários	54
2.5.2 <i>Rhinoceros</i> e <i>Grasshopper</i>	55
2.5.3 <i>EnergyPlus</i> e <i>OpenStudio</i>	56
2.5.4 Ladybug tools: Ladybug e Honeybee	57
2.5.5 Algoritmos evolucionários	58
3 MÉTODO	61
3.1 EDIFICAÇÃO MODELO PARA O ESTUDO DE CASO E CLIMA LOCAL.....	62
3.2 MODELAGEM E CONFIGURAÇÃO DA FACHADA ADAPTATIVA.....	66
3.2.1 Dimensionamento dos elementos de controle solar externo – Fase 1	67
3.2.2 Simulação computacional em angulações estáticas e cinéticas em relação à irradiação solar – Fase 2.....	71
3.2.3 Simulação computacional em angulações estáticas e cinéticas em relação ao conforto térmico – Fase 3.....	72

4 RESULTADOS	77
4.1 PORCENTAGEM MÉDIA DE SOMBREAMENTO DOS ELEMENTOS DE PROTEÇÃO SOLAR – FASE 1	77
4.2 IRRADIAÇÃO SOLAR – FASE 2	83
4.2.1 Otimização com algoritmo evolutivo uni-critério	88
4.3 SIMULAÇÃO TERMOENERGÉTICA – FASE 3.....	91
4.3.1 Análise 1: Sem brises x Brises H3 e H10 na posição inicial	91
4.3.2 Análise 2: Sem brises x Brises H3 e H10 a -30°, -15°, +15° e +30°.96	
4.3.3 Análise 3: Sem brises x Brises H3 e H10 algoritmo evolutivo.	114
4.3.4 Síntese dos resultados	118
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	122
5.1 RECOMENDAÇÃO PARA TRABALHOS FUTUROS.....	123
6 REFERÊNCIAS	124
APÊNDICE A.....	131
APÊNDICE B.....	134

1 INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

As operações de edifícios representam 30% da demanda final de energia global e 26% das emissões relacionadas com a energia. Embora as emissões diretas dos edifícios tenham diminuído em 2022, o uso de energia no setor aumentou 1%. Esforços como padrões mínimos de desempenho e códigos de energia estão se expandindo, mas são necessárias mudanças mais rápidas para atingir as metas de emissões zero até 2050. Grandes economias estão aumentando os requisitos de desempenho energético para novos e antigos edifícios. Notáveis progressos na descarbonização incluem a China, o Japão, a União Europeia e os Estados Unidos. A demanda por resfriamento de espaços aumentou em 2022, enquanto a demanda de energia para aquecimento diminuiu, resultado do sobreaquecimento global. No cenário de emissões zero, espera-se uma queda significativa no demanda de energia e no uso de combustíveis fósseis até 2030 (IEA, 2024).

Projeções indicam que no Brasil, a demanda por eletricidade para refrigeração irá quase triplicar até 2050, no entanto, a implementação de padrões mínimos de desempenho energético e a construção de edifícios mais eficientes podem reduzir esse crescimento em 35%. O pico de demanda de eletricidade aumentará mais de 75% até 2050, impulsionado pelo crescente uso de energia eólica e solar fotovoltaica. Essas fontes renováveis, que atualmente representam 17% da geração de eletricidade, responderão por quase 60% em 2050 (IEA, 2023).

A eficiência e a certificação energética trazem benefícios tangíveis reconhecidos pelo mercado imobiliário. Pesquisas realizadas nos Estados Unidos e na União Europeia mostraram que há uma relação entre o valor de mercado de um imóvel e sua eficiência energética, rejeitando a hipótese nula contrária. Como em condomínios na Romênia, onde indicou que os preços de transação de apartamentos que passaram por *retrofit* visando o conforto térmico são mais altos em comparação com aqueles que não passaram por essa adaptação (Popescu *et al.*, 2012).

A arquitetura de baixo impacto ambiental não está vinculada a um estilo ou movimento arquitetônico específico e pode ser encontrada em diversas culturas, desde a arquitetura vernacular até exemplos modernistas e tecnológicos. A eficiência energética e o conforto ambiental são fundamentais em todos os projetos, independentemente de sua abordagem tecnológica. Projetos que abordam as condições ambientais locais e aproveitam a luz natural contribuem para a realização de uma arquitetura mais sustentável e energeticamente eficiente (Gonçalves; Duarte, 2016). A eficiência energética é um aspecto fundamental a ser considerado na arquitetura, já que essa área tem como objetivo fornecer condições de conforto térmico, visual e acústico para os usuários com a menor demanda de energia possível. Desse modo, um edifício pode ser considerado mais eficiente energeticamente do que outro quando proporciona as mesmas condições ambientais com menor demanda de energia (Lamberts; Dutra; Pereira, 2014).

Um dos recursos empregados para reduzir os impactos ambientais e aumentar a eficiência energética das edificações são os elementos de proteção solar. A criação dos elementos de proteção solar, se deve à necessidade de reduzir a exposição direta aos raios solares (Kremer, 2002). A utilização desses elementos pode minimizar dois dos principais problemas causados pelas aberturas em construções: o excesso de luminosidade que pode causar ofuscamento e um ganho térmico excessivo devido à incidência direta da radiação solar (Fiuza, 2008). Os avanços tecnológicos da computação permitiram que projetistas pudessem obter maiores precisões ao dimensionar e avaliar como os elementos de proteção solar podem se comportar de acordo com os objetivos particulares. Essa precisão é feita através de um modelo de simulação computacional, que em geral é usado para estudar sistemas da vida real, utilizando algoritmos e fundamentos da ciência da computação. Além disso, a simulação procura quantificar o desempenho de um sistema a partir de parâmetros de entrada, auxiliando no gerenciamento e tomada de decisões (Perros, 2009).

No contexto atual, é preciso procurar alternativas que otimizem os elementos que promovem a eficiência energética, no caso dos elementos de

sombreamento, a solução pode estar nas fachadas adaptativas. A tecnologia de *design* digital está se tornando mais poderosa no processo de concessão, permitindo que os projetistas implementem soluções mais complexas, de forma mais eficiente. O desenvolvimento de uma ferramenta de complemento personalizada com algoritmos impulsiona a geração e exploração de fachadas adaptativas (Mallasi, 2018). As fachadas adaptativas são capazes de ajustar suas propriedades termo-ópticas de maneira reversível, de acordo com as condições externas ou internas, a fim de atender às mudanças de prioridades. Seja para minimizar a demanda de energia do edifício, maximizar o uso da luz natural ou alcançar qualquer outro objetivo ao adotar um elemento não estático (Loonen *et al.*, 2017).

O desenvolvimento da pesquisa do presente trabalho utilizou-se de algoritmos computacionais para avaliar a utilização de brises adaptativos para controle solar. A pesquisa foi dividida em três etapas: pré-avaliação, otimização angular e análise de conforto térmico. A primeira etapa consistiu na avaliação prévia de 4 tipos de brises capazes de adaptar suas angulações num intervalo de -30° a 30° e verificar qual desses apresenta o melhor desempenho de sombreamento, com o objetivo de selecionar os dois modelos mais promissores para a etapa seguinte. Na segunda etapa, utilizou-se um algoritmo evolutivo unicritério para determinar a melhor angulação dos brises adaptativos em relação à incidência solar em diferentes horas do dia, gerando assim um padrão de movimento que os brises devem realizar para se adaptar e otimizar seu desempenho. As duas etapas serviram também para otimização do tempo das simulações, pois, para a etapa seguinte, o processo de definição dos brises está concluído, permitindo uma redução de opções a otimizar. Na terceira etapa e última etapa, foi utilizado um algoritmo evolutivo unicritério que avaliou o conforto térmico, levando em conta os dados para cálculo do conforto e os ângulos durante o dia dos brises adaptativos encontrados na etapa anterior.

Para isso, o trabalho está dividido em quatro partes. A primeira parte apresenta o referencial teórico, que aborda as principais definições pertinentes ao escopo do trabalho, bem como um breve contexto histórico de edificações que utilizam os conceitos da arquitetura cinética e fachadas

adaptativas. Também é realizada uma revisão da literatura sobre as fachadas adaptativas, abordando seus diferentes tipos, características, benefícios e desafios. A segunda parte do trabalho detalha o método, apresentando os dados a serem trabalhados e descrevendo como foram realizadas as diferentes etapas de simulação e análise dos brises adaptativos. A terceira parte do trabalho apresenta os resultados obtidos das simulações e análises dos algoritmos utilizados. Por fim, a última parte apresenta as conclusões a respeito do trabalho.

Espera-se contribuir para a compreensão dos benefícios das fachadas adaptativas para o desempenho energético de edifícios, bem como para o desenvolvimento de metodologias computacionais para a avaliação e otimização desses elementos. Além disso, pretende-se incentivar a adoção de soluções arquitetônicas mais eficientes, contribuindo assim para o desenvolvimento de uma arquitetura mais responsável e consciente das questões ambientais.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Geral

O objetivo do presente trabalho é analisar o comportamento de uma fachada adaptativa com o uso de brise estático e adaptativo para controle da radiação solar incidente em uma edificação, o conforto térmico do usuário e eficiência energética da edificação através de um modelo computacional.

1.1.2 Objetivos específicos

- Contextualizar e definir o que são fachadas adaptativas;
- Avaliar a aplicação do componente adaptativo como solução para projetos que visam a eficiência energética;
- Comparar o desempenho do ponto de vista energético e de conforto térmico, do sistema de brises adaptativo automatizados, com sistemas fixos e sistemas de movimentação manual.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo abordará os principais conceitos necessários para dar suporte a pesquisa nas análises de um elemento de controle solar adaptativo. A fundamentação se inicia com uma breve evolução histórica das fachadas, explicando conceitos iniciais e como a humanidade passou a dar sentido e significado as fachadas. Logo em seguida os conceitos básicos de conforto térmico e eficiência energética na arquitetura, para então introduzir a arquitetura bioclimática.

Com isso, é abordado conceitos básicos da arquitetura cinética, explicando como surgiu, como é caracterizado essa forma de projetar, os requisitos para criar uma fachada adaptativa. E por fim, a pesquisa aborda sobre simulação computacional, uma ferramenta de suma importância para qualquer estudo de conforto ambiental.

2.1 EVOLUÇÃO HISTÓRICA DAS FACHADAS ADAPTATIVAS

No início das civilizações, quando o ser humano deixou de ser uma espécie nômade, o principal objetivo das construções era promover proteção contra o clima, contra invasores e para armazenamento das provisões. Em contraste com estruturas como pontes, torres e barragens, as edificações possuem ambientes cuja criação e utilização devem ser consideradas como elementos intrínsecos da civilização humana com a necessidade que é imposta por diversas variáveis, entre elas o clima. A evolução técnica da construção de fachadas cresce fora do contexto dos materiais, técnicas construtivas, sequência de produção e outras circunstâncias. As fachadas (Figura 1) refletem o progresso tecnológico da região, caracterizando então os aspectos da cultura local (Herzog; Krippner; Lang, 2004).

Figura 1 - Evolução histórica das fachadas



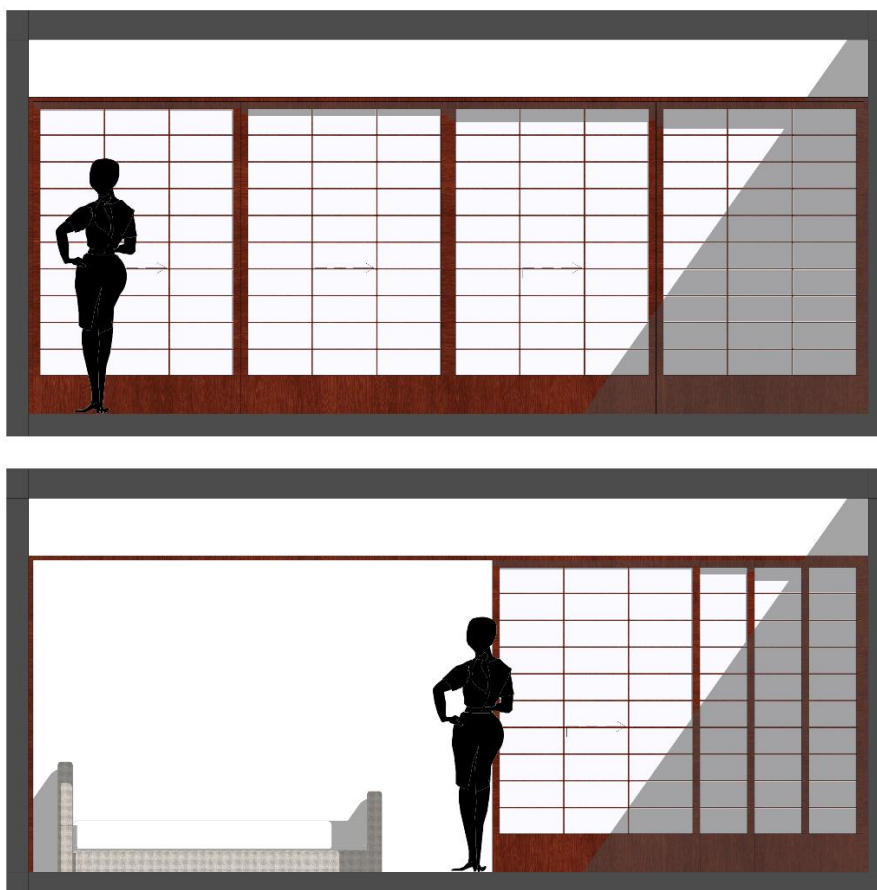
Fonte: Krippner, Lang, Herzog, 2004.

À medida que as fachadas se tornavam mais diferenciadas graças ao refinamento crescente da construção, um efeito semelhante era perceptível em torno das aberturas. Como exigências quanto à entrada máxima de luz por uma abertura mínima, privacidade e ventilação controlada. Os encaixes das aberturas, com partes fixas ou móveis, resultaram em superfícies multicamadas, ampliando a interação entre fachada e abertura (Herzog; Krippner; Lang, 2004).

O conceito de fachadas adaptativas ganhou destaque com os avanços das tecnologias digitais entre as décadas de 1970 e 1980. Atualmente, a arquitetura é baseada em modelos virtuais e processos altamente avançados, demonstrando como a era da tecnologia expandiu de maneira surpreendente a capacidade humana de criação. Entretanto, a fachada adaptativa não é um conceito novo, mesmo sem receber essa nomenclatura, algumas construções antigas utilizaram de princípios adaptativos para promover espaços versáteis (Hosseini; Mohammadi; Guerra-Santin, 2019).

Como é o caso da arquitetura japonesa em meados do século XV, mais especificamente as portas *Shoji*, utilizadas não só como portas, mas como divisores de ambientes internos e externos, que eram partes móveis sendo possível adaptar os ambientes conforme necessidades dos residentes (Figura 2). *Shoji* são painéis de madeira com papel translúcidos que permitem a entrada de luz natural, esse papel dava uma sensação de conforto luminoso e variava a coloração do ambiente conforme o dia avançava (Karpouzias, 2003).

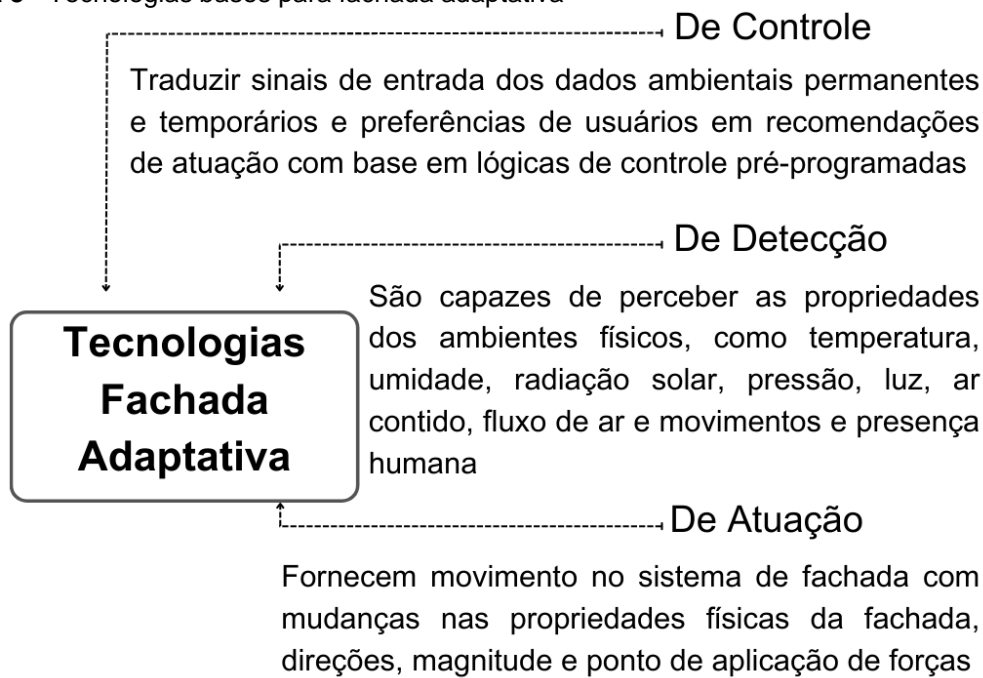
Figura 2 - Ilustração portas Shoji



Fonte: Autor, 2024.

Nos últimos 70 anos, a tecnologia avançou e possibilitou a criação de tendências no projeto de fachadas. Avanços tecnológicos em ciência da computação, sistemas de controle elétrico, inteligência artificial, cibernética e ciência dos materiais oferecem oportunidades para o uso de entidades dinâmicas sistemáticas em fachadas de edifícios. A tecnologia implementada permite que o sistema de fachada mude continuamente a sua função, caráter ou comportamento ao longo do tempo em resposta a estímulos ambientais, preferências e necessidades dos ocupantes, melhorando assim o desempenho térmico e visual da fachada. Em geral, o desempenho de sistemas de fachada adaptativa é influenciada por tecnologias de detecção, controle e atuação construídas usando tecnologia (Figura 3) de materiais e tecnologia estrutural (Heidari Matin; Eydgahi, 2022).

Figura 3 - Tecnologias bases para fachada adaptativa



Base para as definições: MATIN, Negar; EYDGAHI, Ali. **Technologies used in responsive facade systems: a comparative study.** Taylor and Francis. 2022.

Fonte: Autor, 2024.

Outro exemplo significativo de arquitetura cinética é a edificação Villa Girasole ou em português, Casa Girassol (Figura 4) Idealizada em 1929 e construída entre 1931 e 1935 na cidade de *Marcellise*, Itália, gira 360° através de sistemas mecânicos para acompanhar a movimentação do sol. O movimento dos dois pavimentos superiores da casa é feito através do apoio sobre a laje da construção, mediante três linhas centrais onde se apoiam quinze rodas metálicas, duas delas motorizadas, que permitem a rotação. A Casa Girassol corresponde ao processo de concretização do princípio da cinética, em que, pela sua fluidez no espaço, articula um campo ao longo do tempo. Este edifício constitui um laboratório ímpar de ensaios de materiais, soluções construtivas e inovações tecnológicas. A estrutura dinâmica da Casa Girassol exemplifica a integração harmoniosa entre engenharia avançada e arquitetura contemporânea. Com seu design inovador, a Casa Girassol destaca-se como um marco de progresso no campo da arquitetura cinética (Murtinho, Bettencourt, 2014).

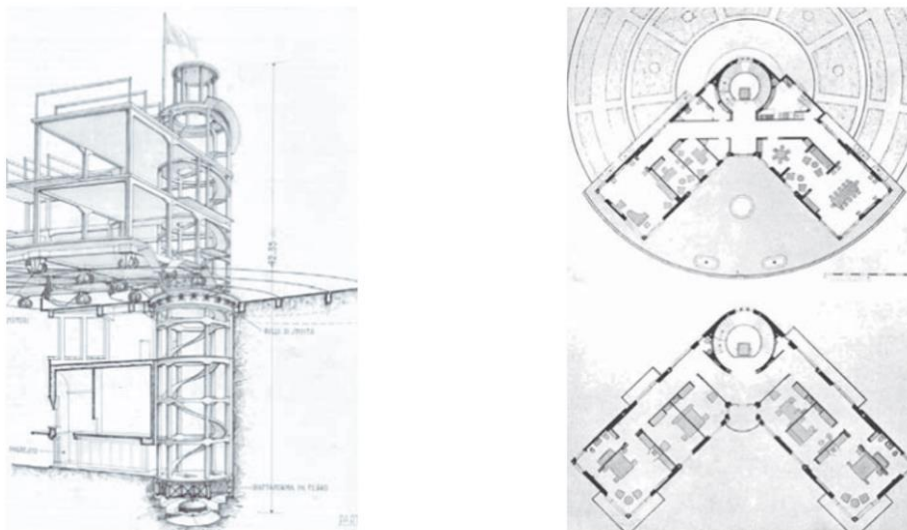
Figura 4 - Fotos e mecanismo cinético da Villa Girasole
Movimento da estrutura



Trilhos e rodas da estrutura giratória



Detalhes construtivos



Fonte: Murtinho, Bettencourt, 2014.

O Brasil também apresenta uma edificação pioneira na adoção de elementos cinéticos na fachada. A Obra do Berço (Figura 5), projetada no Rio de Janeiro por Oscar Niemeyer, que na época era um arquiteto iniciante e trabalhava no escritório de Lucio Costa, foi o primeiro exemplo de integração do brise soleil móvel na arquitetura (Vettorazzi, 2019).

Segundo a *Obra do Berço* (2020), a instituição foi oficializada em 21 de novembro de 1937 e o prédio ficou pronto no ano seguinte; A construção conta com um brise vertical móvel, feito de fibrocimento, na fachada principal.

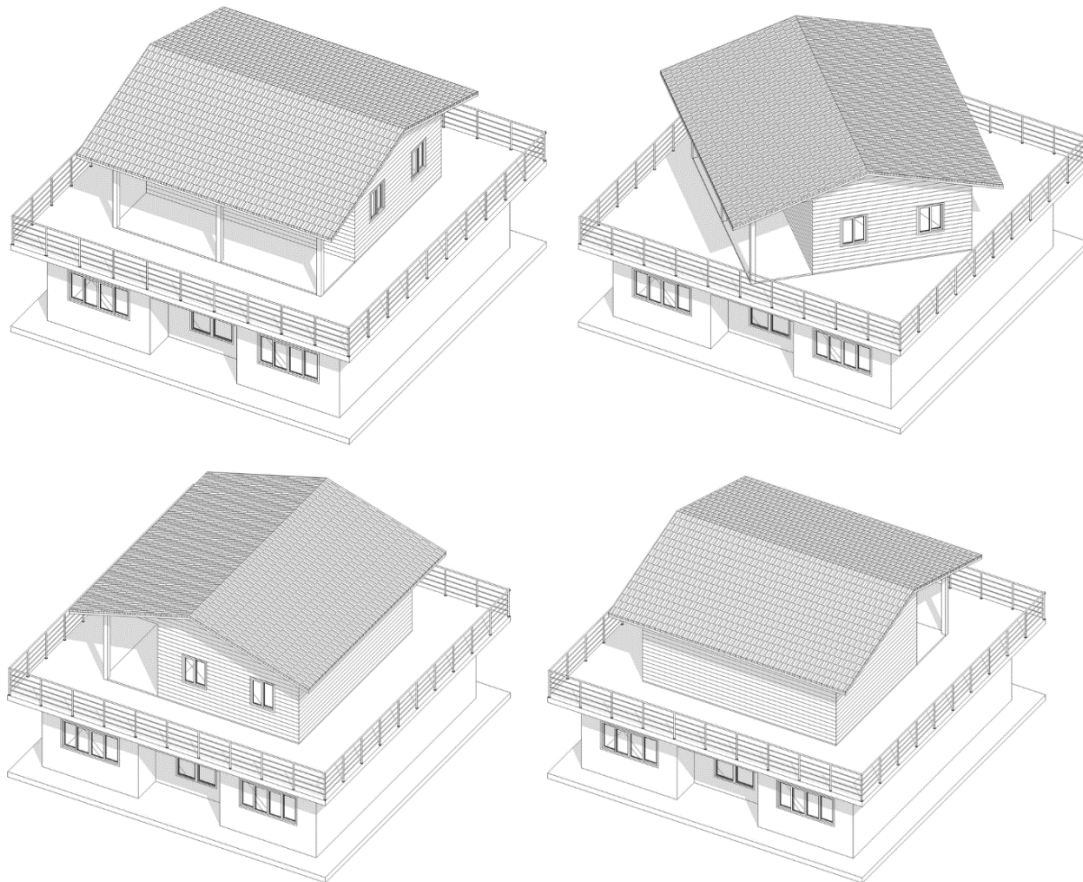
Figura 5 - Fachada *Obra do Berço*



Fonte: Vettorazzi *et al.*, 2022.

Há ainda exemplos de edifícios localizados no Brasil que utilizaram o movimento para rotacionar edificação conforme a necessidade de radiação solar, como é o caso de uma edificação que fica no interior do estado de Santa Catarina (Figura 6). A casa foi construída em 1998 e possui um sistema de roldanas, com acionamento manual, permitindo que o morador rotacione o segundo piso. A arquitetura da edificação segue o padrão encontrado na região, e foi realizada pelo próprio morador, que gostaria de aproveitar para descansar sempre na sombra de sua varanda (Favero, 2016).

Figura 6 – Isometria da edificação no Interior de Santa Catarina



Fonte: Autor, 2024.

Outro exemplo de arquitetura cinética encontrada no Brasil, é a edificação *Suite Vollard* (Figura 7) construída na capital do Paraná, Curitiba em 2005, porém, atualmente não está em funcionamento. A edificação possui 11 *lofts* circulares, um por andar, de 120 metros quadrados cada, que compõem a estrutura. A proposta desses apartamentos é a possibilidade de movimentação independente, por meio de uma plataforma metálica de 90 metros quadrados, que fica apoiada na laje inferior de cada andar. Para permitir o movimento, motores são instalados na parte externa dos apartamentos, que acionam um sistema de rodas dentadas, permitindo que os *lofts* girem no sentido horário ou anti-horário, de acordo com a escolha do morador (Piccoli, 2018).

Figura 7 - Fachada do edifício *Suite Vollard*



Fonte: Autor, 2024.

Um projeto de destaque no âmbito internacional é o Instituto Mundo Árabe (Figura 8) que apresenta uma vitrine do mundo árabe em Paris. Concluído em 1987, o prédio foi projetado pelos arquitetos Jean Nouvel, Gilbert Lézénès, Pierre Soria e *Architecture Studio*. O resultado não é um edifício árabe, mas um edifício ocidental com alguns elementos simbólicos como o *mashrabiya*¹, que remetem à tradição árabe. Os *moucharabieh* (Figura 9), como são chamados em francês, são compostos por polígonos de diferentes formas e tamanhos que criam e fazem referência à arte geométrica das culturas árabes. A parede sul consiste exclusivamente em uma tela de diafragmas semelhantes a câmeras fotográficas. Com pouca luz, os mecanismos do diafragma abrem-se, por meio de uma célula fotoelétrica, fechando-se novamente à medida que o sol começa a brilhar com mais força. Ao mesmo tempo, o grau variável de transparência e fechamento cria padrões de sombras geométricas em constante

¹ Elemento arquitetônico consistindo em uma estrutura de madeira entalhada que é colocada nas janelas para permitir a ventilação e a passagem de luz, sem comprometer a privacidade dos residentes

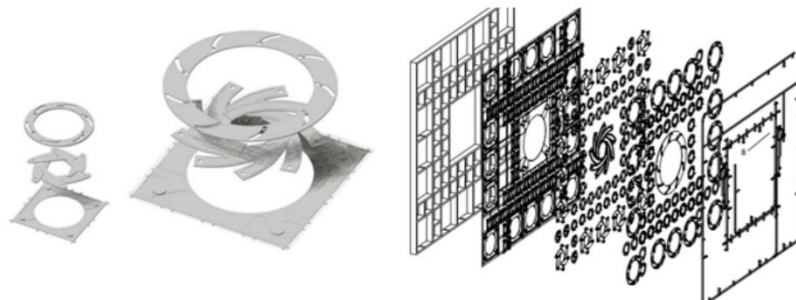
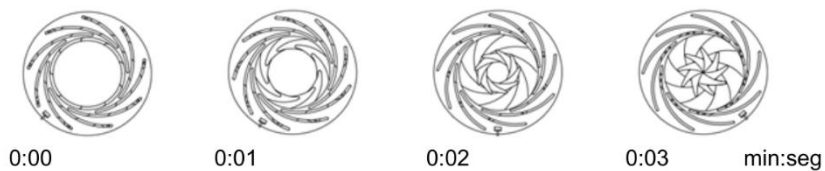
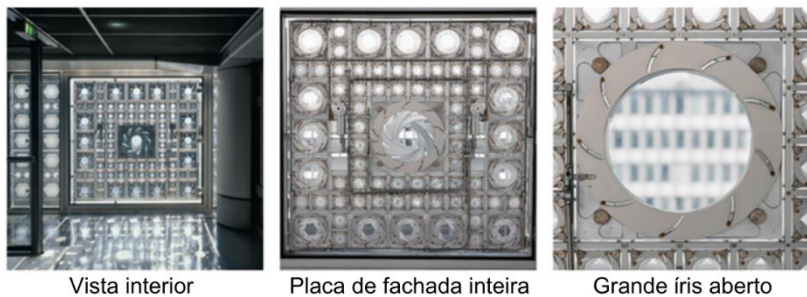
mudança no interior que lembram a decoração dos edifícios árabes (Schumacher; Vogt; Krumme, 2019).

Figura 8 - Fachada adaptativa Instituto Mundo Árabe



Fonte: Winstanley, 2011.

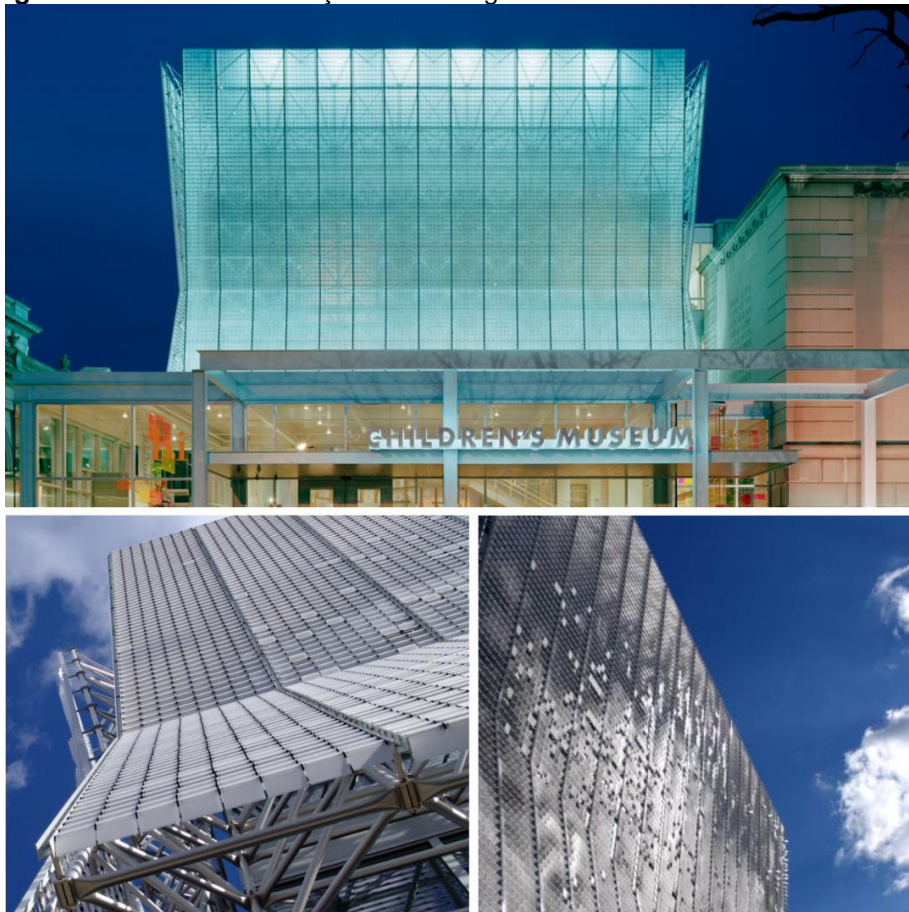
Figura 9 - Componentes e Detalhes da fachada do Instituto Mundo Árabe



Fonte: Schumacher; Vogt; Krumme, 2019.

Edificado em 2004, o Museu da Criança de Pittsburgh (Figura 10), projeto do escritório de arquitetura Koning Eizenberg. Em colaboração com o artista Ned Khan, foi projetado um painel translúcido esvoaçante, que possui a atribuição de se movimentar com o vento, realizando o sombreamento dos vidros da edificação. À noite, esse painel se ilumina, transformando a edificação em uma grande projeção de lanterna (Kearch, 2005).

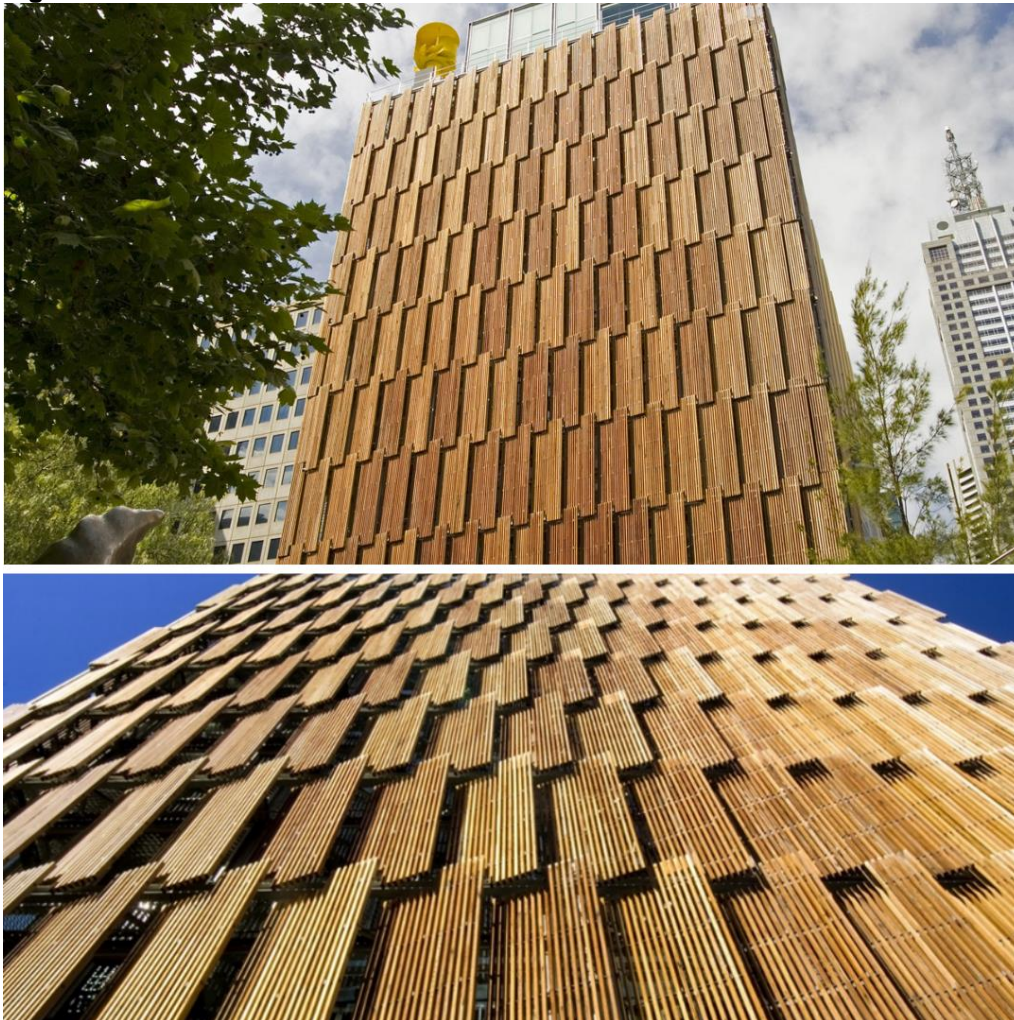
Figura 10 - Museu da Criança de Pittsburgh



Fonte: Eizenberg, 2005.

O escritório de arquitetura *DesignInc*, em parceria com a cidade de Melbourne em 2006, atuaram em conjunto para projetar o edifício que abrigaria os escritórios do Conselho de Melbourne 2 (Figura 11). Os brises verticais de madeira reciclada conseguem fazer o efeito de se moverem por conta das células que captam a energia solar da fachada, ocasionando o efeito de abrir e fechar, dependendo do ângulo do sol e do horário ao dia, fornecendo melhor conforto térmico para os trabalhadores (Mickpearce, 2016).

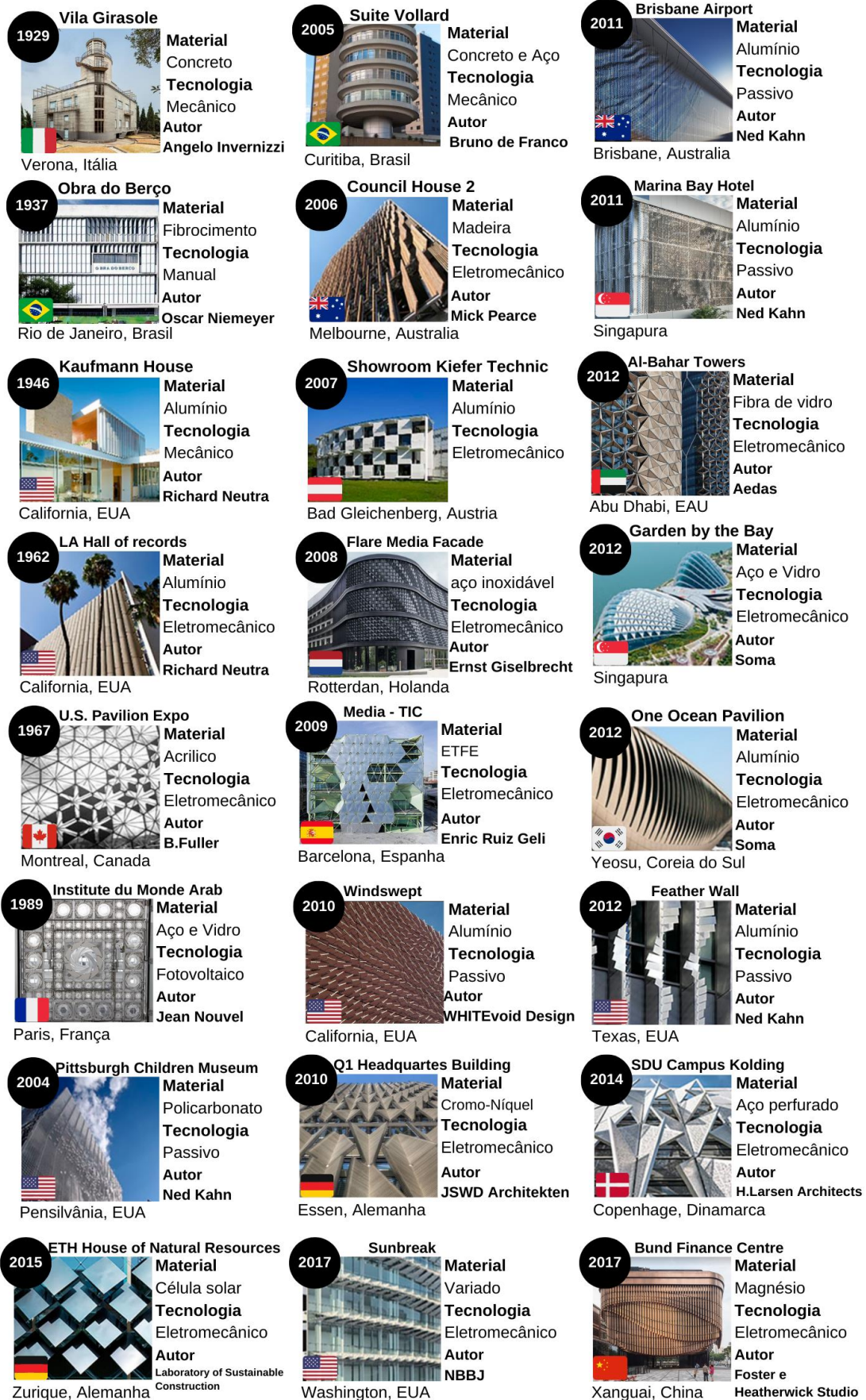
Figura 11 - Fachada dos escritórios do Conselho de Melbourne



Fonte: Designinc, 2013

Existem muitas outras edificações ao longo da história que utilizaram dos conceitos cinéticos e adaptativos para buscar um diferencial construtivo, algumas mais modernas, buscaram também melhorar o desempenho de sua construção (Figura 12). Os métodos de acionamento desses mecanismos podem ocorrer de diferentes formas: manualmente, onde a intervenção direta do ser humano na fachada é necessária; mecanicamente, em que a atividade humana opera um dispositivo para induzir o movimento cinético da fachada; eletromecanicamente, onde a ativação não requer necessariamente intervenção humana direta, mas sim o fornecimento de energia elétrica para acionar o comportamento cinético; e passivamente, onde nem a intervenção humana nem dispositivos externos são necessários, sendo a própria estrutura da fachada responsável pelo movimento planejado sem fornecimento de energia.

Figura 12 - Evolução Histórica das fachadas adaptativas



Fonte: Autor, 2024.

Os padrões arquitetônicos tradicionais enfrentam um limiar tecnológico por conta da evolução constante das tecnologias de informação e comunicação (TIC), pois, as noções tradicionais de representação e formas não são mais baseadas em parâmetros espaciais estáticos estabelecidos no papel. Nesse sentido, as próximas inovações na forma de projetar dependerão de uma arquitetura digital capaz de projetar em um espaço não euclidiano, com sistemas cinéticos e dinâmicos e algoritmos generativos de formas. Além disso, as novas tecnologias permitem a integração de sistemas CAD (desenho assistido por Computador) com sistemas CAM (Manufatura Assistida por Computador), ou seja, a partir de um modelo virtual, máquinas materializam o projeto de forma industrializada. Onde para a indústria automobilística, aeroespacial e navegação esse procedimento já é uma realidade (Nardelli, 2007).

O futuro próximo da indústria de arquitetura, engenharia e construção inclui diferentes níveis de automação, e o projeto e construção virtual é um dos principais recursos para essa automação. A demanda global por automação e ambientes conectados aceleram a popularização da construção virtual, pois esses processos permitem planejar, gerenciar e rastrear diferentes progressos e sistemas de trabalho em qualquer fase de um projeto de construção ou estrutura física, até mesmo em nível de cidade. Essa popularização levará a grandes economias de custos na indústria da construção, como cerca de 950 milhões de dólares nas fases de projeto e construção e 400 milhões em fases de operação e manutenção em 2025. Essas integrações entre projeto e construção virtual estão moldando o futuro da indústria da construção (Rafsanjani; Nabizadeh, 2021).

Além disso, a inteligência artificial surge como uma ferramenta poderosa para o desenvolvimento de fachadas adaptativas, impulsionando a otimização do desempenho energético, conforto ambiental, personalização, segurança e manutenção. A integração da inteligência artificial aos sistemas de controle das fachadas abre caminho para edifícios mais inteligentes, eficientes, adaptáveis e sustentáveis. Essa integração através da automação tem capacidade de interpretar em tempo real e realizar o *feedback* para os usuários (Maksoud *et al.*, 2022).

2.2 CONFORTO TÉRMICO E EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NA ARQUITETURA

A arquitetura deve mitigar o desconforto de climas muito severos (como calor, frio ou vento extremos), ao mesmo tempo em que proporciona um ambiente confortável em relação ao clima externo. Adaptar a arquitetura ao clima de um determinado local significa construir espaços que proporcionem condições de conforto. O conforto térmico é explicado pela sensação de bem-estar do utilizador, ocasionada por um ambiente a cargo da atuação por exemplo, da variação da temperatura. Sendo assim, existe uma faixa de ocorrência de tais elementos, para a qual o indivíduo se mantém em conforto térmico, ou seja, não está frustrado pela alta temperatura e baixa temperatura. Nessas circunstâncias o esforço do utilizador é mínimo e o desempenho em qualquer atividade, otimizado (Frota; Schiffer, 2006). Existem vários modelos e escalas de conforto, porém, segundo a *ASHRAE 55*, a zona de conforto térmico fica no intervalo entre 20 e 28°C, considerando também informações como velocidade do ar, umidade relativa e taxa metabólica (ANSI/ASHRAE 55, 2020).

A temperatura interna do ser humano se mantém constante independentemente de como o clima está. Para isso, o organismo utiliza-se do metabolismo (uso do oxigênio para queimar as calorias dos alimentos consumidos) para produzir energia, gerando calor interno. O conforto térmico sempre foi um conceito subjetivo, há diversos fatores e variáveis que atuam no bem-estar térmico. Diante disso, criou-se formas de classificar o conforto, como o Voto Médio Predito (PMV) e o Modelo Adaptativo. O PMV representa um valor numérico que explica a sensibilidade humana ao frio e ao calor, sendo zero para o conforto térmico, negativo para o frio e positivo para o calor (Lamberts; Dutra; Pereira, 2014). O modelo adaptativo considera fatores além da física fundamental e fisiologia, ou seja, os fatores como características demográficas (gênero, idade, classe social) composição da edificação, estação, clima e cognição, são considerados. Essas adaptações se dividem em três tipos de ajustes que se pode fazer em relação à temperatura: comportamentais, fisiológicos e psicológicos. Os ajustes comportamentais referem-se às mudanças conscientes ou inconscientes que as pessoas fazem em relação à sua roupa, atividade, postura, janelas e ventiladores para modificar o fluxo de

calor. Os ajustes fisiológicos envolvem mudanças nas respostas fisiológicas das pessoas em relação à temperatura. Os ajustes psicológicos incluem percepções e reações das informações sensoriais, que são diretamente ligadas a sensações e expectativas em relação ao clima interno. Há também a adaptação por habituação, onde a exposição repetida conduz a uma diminuição da intensidade da sensação (Lamberts *et al.*, 2016).

Em áreas urbanas as pessoas passam em média 85% a 90% do tempo em ambientes internos. O crescimento urbano provoca o crescimento da demanda diária de energia, onde é esperado que a demanda cresça exponencialmente. Quase 70% do demanda total de energia no mundo é usado para manter um ambiente interno de construção climatizado às exigências dos utilizadores (Ganesh *et al.*, 2021).

As edificações que são projetadas visando uma correta aplicação dos conceitos de conforto térmico do usuário auxiliam na melhora da qualidade de vida e podem contribuir para a eficiência energética. A eficiência energética está diretamente relacionada ao potencial de proporcionar conforto térmico, visual e acústico aos seres humanos com o mínimo de demanda de energia (Lamberts; Dutra; Pereira, 2014). Essas condições de conforto determinam a demanda de energia pelos sistemas ambientais de um edifício; portanto, desempenham um papel importante na construção e na sustentabilidade das mesmas (Yao; Li; Liu, 2009).

2.2.1 Brises

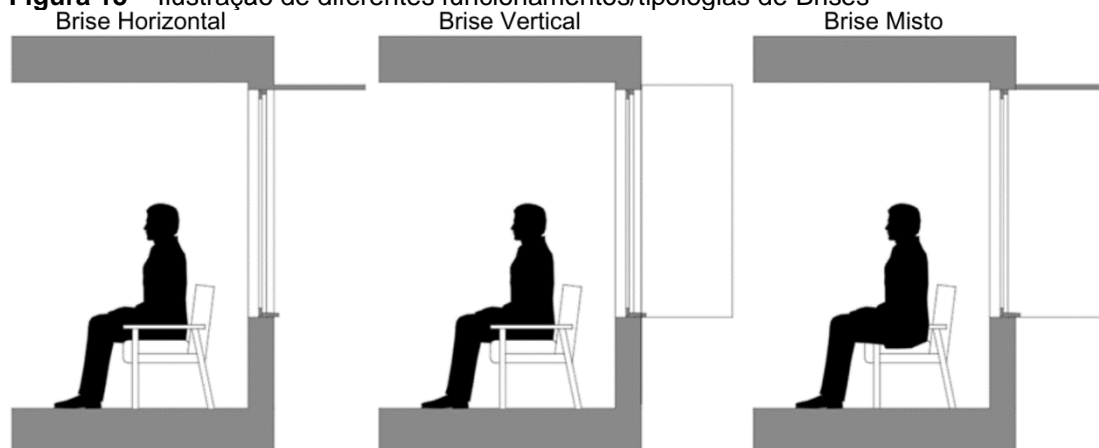
Em meados do século XX, Le Corbusier concebeu o brise-soleil, uma ideia influenciada por dispositivos de proteção solar presentes em culturas construtivas árabes e asiáticas. Embora sua forma, material e estilo possam variar, eles compartilham o mesmo princípio fundamental: controlar a intensa radiação solar em regiões de clima quente (Maragno, 2000). A origem desse conceito pode ser rastreada até elementos da arquitetura tradicional, amplamente empregados para filtrar a luz solar e o calor, especialmente na arquitetura árabe. Apesar da sistematização desses elementos ter sido atribuída

a Le Corbusier, o uso prático e definição é imputada aos arquitetos brasileiros (Vettorazzi *et al.*, 2022).

O brise-soleil pode ser considerado uma evolução das persianas, com a principal diferença sendo sua escala expandida. Suas lâminas são dimensionadas em maior proporção e sua aplicação abrange a totalidade das aberturas, a fim de proteger fachadas inteiras (Fathy, 1986). Embora qualquer tipo de brise-soleil possa ser visto como uma adaptação de métodos tradicionais de proteção contra o excesso de luz e radiação, a linguagem desse novo elemento vai além das referências históricas, incorporando uma base científica em sua concepção. Ele leva em consideração a necessidade de sombra e luz, tornando-se uma parte integrante da estrutura do edifício. Sua forma e a diversidade de soluções que oferece contribuem para a definição de texturas, planos, profundidade, ritmo e movimento na arquitetura. Em resumo, o brise-soleil possui uma identidade estética própria e contemporânea (Mindlin, 2000).

Os brise-soleil são elementos externos às fachadas e são constituídos por uma ou várias lâminas, frequentemente dispostas de forma paralela. Além disso, eles podem ser categorizados com base em sua tipologia, mobilidade e composição arquitetônica, sendo classificados como horizontais, verticais ou uma combinação de ambos (Figura 13).

Figura 13 – Ilustração de diferentes funcionamentos/tipologias de Brises

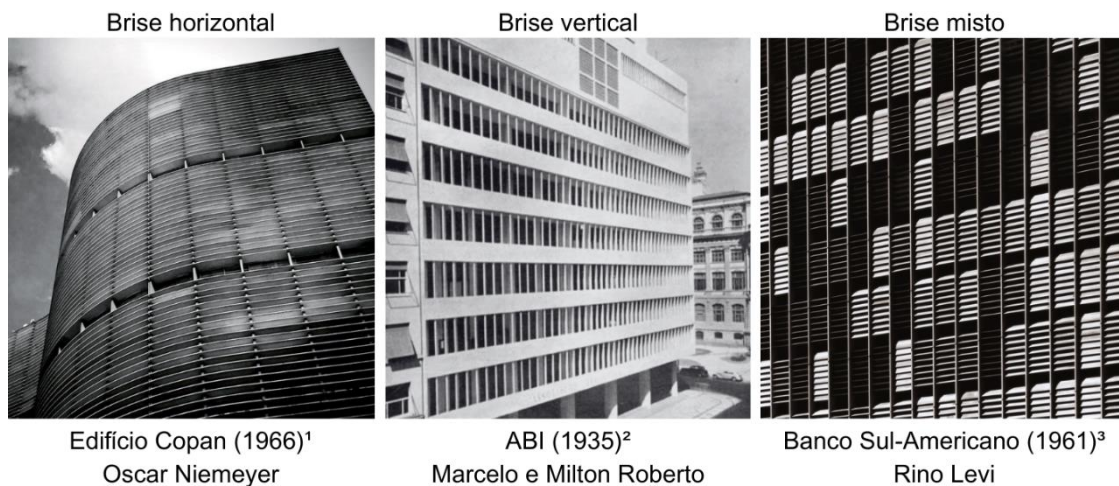


Fonte: Autor, 2024.

Cada tipologia desse tipo de proteção solar é mais eficaz em obstruir raios solares em ângulos específicos (Figura 14). Os brise-soleil horizontais interceptam os raios solares quando o sol está em sua posição mais elevada, enquanto os verticais são mais eficazes quando os raios solares estão em

ângulos mais rasos, próximos ao horizonte. Os brises mistos são eficazes quando se deseja interceptar os raios solares elevados e próximos ao horizonte. No entanto, a eficácia dessas tipologias depende principalmente da variação do azimute solar em relação à orientação da fachada. Além da questão da interceptação da radiação solar, é necessário observar outros fatores no dimensionamento do brise-soleil, como a obstrução da vista para o exterior e o caráter externo da edificação.

Figura 14 - Fachadas com Brise horizontal, vertical e misto



¹Carolina Silva Oukawa. "Clássicos da Arquitetura: Edifício Copan / Oscar Niemeyer" 19 Jan 2020

²Igor Fracalossi. "Clássicos da Arquitetura: Sede da Associação Brasileira de Imprensa (ABI) / Irmãos Roberto" 26 Jul 2013.

³Nelson Kon. Banco Sul-Americano, disponível em <https://www.nelsonkon.com.br/banco-sulamericano/>

Fonte: Autor, 2024.

No que diz respeito à mobilidade, os brise-soleil móveis são dotados de lâminas que podem ser ajustadas para seguir o movimento do sol, proporcionando sombra nos momentos em que a radiação solar incide de maneira indesejada, de acordo com as necessidades do usuário. Quando não há exposição direta ao sol, essas lâminas podem ser completamente abertas, permitindo uma visão desobstruída do ambiente externo. Dessa forma, essa abordagem oferece maior flexibilidade e aprimora a eficácia do sistema de proteção solar (Maragno, 2000).

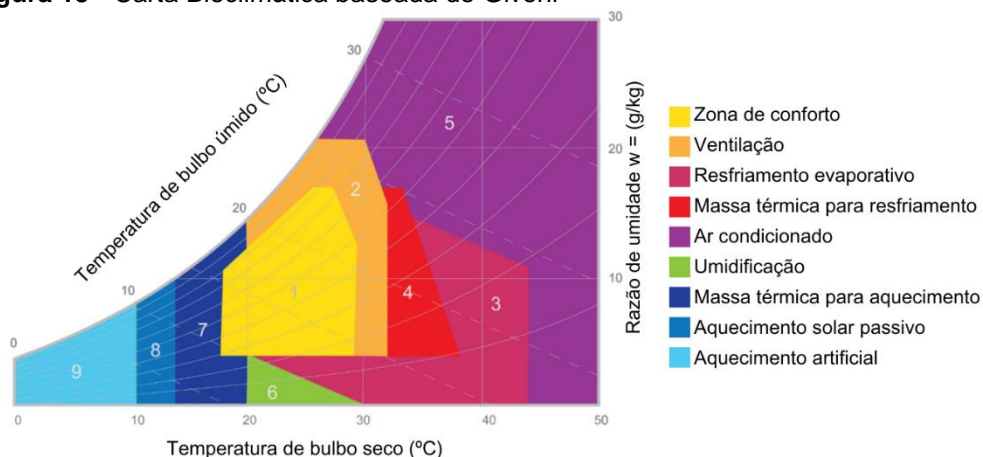
2.3 ARQUITETURA BIOCLIMÁTICA

A missão da arquitetura sempre foi proteger os seres humanos do ambiente externo. A arquitetura bioclimática tenta alcançar o conforto térmico humano interagindo energeticamente com o clima externo, tendo como objetivo

principal seu conforto climático, e isso é inerente à arquitetura desde as suas origens. Ao longo da história e em todos os locais e climas, ocorreram desenvolvimentos arquitetônicos para alcançar os melhores níveis de conforto nos espaços interiores, ou seja, o início sempre esteve ligado à arquitetura vernacular (Manzano-Agugliaro *et al.*, 2015). Para aplicar a arquitetura bioclimática, é necessário considerar os diferentes níveis de severidade climática da localização do edifício, incluindo o clima geral, o mesoclima e o clima próximo ao edifício definido pelos elementos vizinhos ou microclima (Gaitani; Mihalakakou; Santamouris, 2007). O próximo passo passaria pela escolha dos materiais, que exige considerar temperatura, umidade relativa, radiação solar, além da velocidade e direção do vento, como elementos a serem levados em consideração na busca de condições confortáveis (Cañas; Martín, 2004).

Uma forma de determinar quais as soluções arquitetônicas a adotar para que a edificação corresponda ao que o clima externo determina é através da carta bioclimática. A carta bioclimática foi desenvolvida em 1963 pelos irmãos Olgyay e posteriormente aperfeiçoada por Givoni em 1992, adaptando-se particularmente às necessidades de países em desenvolvimento, como o Brasil. A carta de Givoni é um diagrama bioclimático que foi dividido em diferentes zonas, nas quais é necessário aplicar estratégias específicas para alcançar o conforto humano dentro de um edifício (Figura 15). O eixo “x” representa a temperatura de bulbo seco e o eixo “y” mostra a umidade do ar fresco; as curvas psicrométricas no gráfico representam a umidade relativa (Morillón-Gálvez; Saldaña-Flores; Tejeda-Martínez, 2004). Os dados climáticos do local onde a edificação é projetada são então plotados na carta bioclimática, o que permite uma análise precisa das condições ambientais. A partir dessas informações, torna-se possível definir, com base na setorização da carta, as diferentes estratégias arquitetônicas a serem adotadas para maximizar o conforto ambiental. Esse processo permite uma abordagem mais informada e adequada à realidade climática do local, resultando em soluções arquitetônicas mais eficientes e contextualizadas.

Figura 15 - Carta Bioclimática baseada de Givoni



Fonte: Campanhoni, 2011.

Os itens da Figura 15 representam estratégias bioclimáticas, onde cada uma é escolhida individualmente ou combinadas de acordo com as condições impostas pelo clima do local onde o projeto será realizado. Essas estratégias são fundamentais para garantir o conforto térmico e a eficiência energética das edificações. A estratégia de sombreamento, por exemplo, deve ser utilizada sempre que a temperatura do ar for superior a 20°C, pois ajuda a reduzir a carga térmica sobre o edifício, minimizando o uso de sistemas de climatização artificial. Além disso, o sombreamento pode ser implementado através de elementos arquitetônicos, como brises-soleil e vegetação, ou dispositivos móveis, que permitem ajustes conforme as variações climáticas diárias e sazonais. Dessa forma, a correta aplicação das estratégias bioclimáticas contribui significativamente para a sustentabilidade e a qualidade dos ambientes construídos (Lamberts; Dutra; Pereira, 2014). Algumas soluções para promover sombreamento passivo da edificação são:

- Brise-soleil
- Beirais de telhados
- Marquises
- Sacadas e varandas
- Toldos
- Elementos vazados e cobogós
- Uso de vegetação

Um dos exemplares arquitetônicos mais simbólico com utilização de para Brise-soleil é o Palácio Gustavo Capanema (Figura 16). Construído entre 1937 e 1942, é considerado um dos pioneiros da arquitetura moderna no Brasil e no mundo. Coordenado por Lucio Costa, o projeto contou com a participação de Oscar Niemeyer, Carlos Leão, Eduardo Reidy, Ernani Vasconcellos, Roberto

Burle Marx e Le Corbusier. Destacando-se pela inovação na regulação térmica e aproveitamento da luz natural. Na fachada norte do edifício, os elementos fixos verticais com persianas horizontais móveis permitem uma melhor regulação térmica, filtrando os raios solares e promovendo a ventilação cruzada. O Palácio Gustavo Capanema é um marco significativo na arquitetura moderna, combinando funcionalidade e estética de forma exemplar. Sua influência se estende além das fronteiras brasileiras, sendo estudado e admirado internacionalmente como um exemplo de inovação arquitetônica. (Goodwin, 1943).

Figura 16 – Fachada do edifício Palácio Gustavo Capanema



Fonte: ARCHTRENDS, 2021.

Outro projeto que utiliza sombreamento como uma das principais estratégias bioclimáticas é o edifício *Bosco Verticale* (Figura 17), projetado em 2014 em Milão, na Itália, pelo arquiteto Stefano Boeri. A edificação destaca-se pela utilização de vegetação na fachada para proteção solar. Esta vegetação cria microclimas que produzem umidade e absorvem dióxido de carbono, contribuindo para um ambiente mais saudável e sustentável. O uso de árvores de pequeno e médio porte no *Bosco Verticale* oferece proteção contra a radiação solar, além de atuar como uma barreira contra a poluição sonora.

Assim, o projeto combina funcionalidade e sustentabilidade, promovendo a qualidade de vida dos residentes e mitigando os impactos ambientais urbanos (Boeri Studio, 2015).

Figura 17 - Fachada do edifício Bosco Verticale



Fonte: Boeri Studio, 2015.

Um exemplo mais recente de edificação que utiliza o sombreamento como estratégia bioclimática é a Casa Cavalcante (Figura 18). Construída em 2019 no Parque Nacional da Chapada dos Veadeiros, por Bloco Arquitetos, a residência destaca-se pela utilização de uma grande cobertura com balanços estendidos. A grande cobertura cria uma área adicional de circulação protegida, permitindo que os habitantes desfrutem do ambiente natural sem a exposição direta ao sol intenso, comum na região. Além disso, essa estratégia de sombreamento melhora o conforto térmico da edificação, reduzindo a necessidade de sistemas de climatização artificial e, conseqüentemente, o consumo de energia. Os balanços estendidos da cobertura também proporcionam uma estética única à Casa Cavalcante, criando uma sensação de leveza e fluidez entre os espaços internos e externos. A integração de estratégias bioclimáticas, como o sombreamento, na Casa Cavalcante, exemplifica como a arquitetura contemporânea pode ser sensível às condições

climáticas locais e ao mesmo tempo criar espaços habitáveis que são confortáveis (Bloco Arquitetos, 2020).

Figura 18 - Elementos de sombreamento da Casa Cavalcante e Planta Baixa



Fonte: Bloco Arquitetos, 2020.

2.4 ARQUITETURA CINÉTICA E A ADAPTAÇÃO AO CLIMA

A arquitetura, por natureza, geralmente não está associada ao movimento em seu sentido cinético. Esse campo vem crescendo conforme o avanço do *design* digital, das tecnologias numéricas e robóticas. Não há uma definição única para o conceito de arquitetura cinética, cada estudo define seu significado conforme seu tipo de abordagem. O produto de uma arquitetura cinética não é um resultado isolado, é na verdade a resultante de uma somatória de estratégias que requerem uma multidisciplinaridade, experiência e contribuições de outras áreas de estudo além da arquitetura, como, engenharia (materiais, estruturais, mecânicas) e computação no geral.

Os avanços na ciência dos materiais permitiram a evolução da arquitetura cinética, tornando mais fácil a implementação de concepções construtivas complexas. As duas principais abordagens para a concepção da

arquitetura cinética podem ser a estática e a dinâmica. A abordagem estática, o foco está na criação de efeitos visuais arquitetônicos, sem a necessidade de movimento físico real. Por meio do projeto paramétrico² o mesmo adquire flexibilidade e fluidez, ajustando-se às variações dos parâmetros. A sensação de movimento é produzida pela manipulação da luz, cores e formas, resultando em uma ilusão de dinamismo. Na abordagem dinâmica, a tecnologia desempenha um papel central ao impulsionar a estrutura a movimentar-se de forma mecânica. Essa transformação pode ser direcionada a diversos objetivos, como a adaptação às condições climáticas ou a otimização do espaço para diferentes funções. Sensores, atuadores e sistemas de controle colaboram para criar uma harmonia de movimento, permitindo que a arquitetura se ajuste às necessidades do momento (Megahed, 2017).

Há muitos sinônimos utilizados para abordar as fachadas que utilizam os princípios da arquitetura cinética, sendo os mais comuns, Adaptativa, Inteligente, Responsiva, Cinética e outras. Essas definições possuem sim diferenças particulares no momento de realizar sua adaptação ao que foi criado (Romano *et al.*, 2018). Nota-se que, mesmo tendo suas particularidades, os objetivos se convergem em adaptação, do ponto de vista biológico, adaptação é o processo evolucionário onde os organismos se aprimoram para viver melhor em determinado habitat (Dobzhansky, 1968).

Do ponto de vista arquitetônico, o sistema adaptativo é capaz de alterar sua forma, localização³, utilização e, regido pelo princípio de que esses sistemas devem ser governados pela utilização de estruturas leves, otimizando ao máximo os materiais e o peso da estrutura (Mölier; Naungesser, 2015). Então, dentro da arquitetura cinética há as fachadas, que para aos olhos do observador aquele elemento realizará um movimento, mas para o elemento em si, ele está se adaptando (onde pode utilizar várias técnicas e formas de movimento), por

² *Design* paramétrico é um processo de design que usa algoritmos e controles interativos para automatizar e acelerar a criação de projetos, permitindo flexibilidade e eficiência.

³ Alterar a localização, o autor se refere a capacidade tecnológica do elemento ser móvel, ter uma facilidade de transportar, capaz de ser construído e desmontado rapidamente, ou seja, um elemento que pode ser substituído, atualizado.

isso, a pesquisa a partir desse momento vai abordar o termo adaptativo para se referenciar essas fachadas.

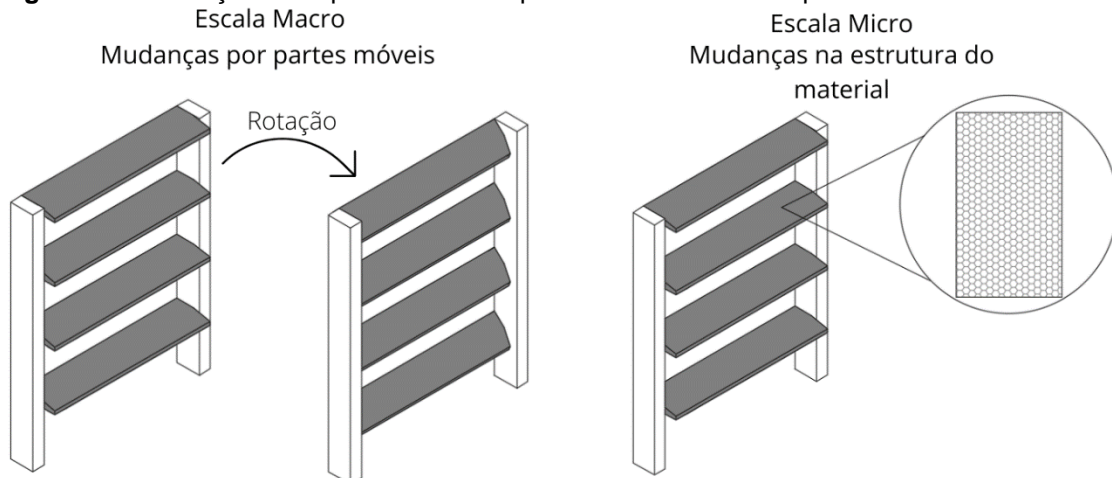
A fachada adaptativa possui a capacidade de ajustar suas propriedades termo-ópticas de forma reversível às condições externas (como o clima) ou internas (comportamento do usuário) com o intuito de atender às mudanças de prioridades, seja ela minimizar o uso de energia do edifício, maximizar o uso de luz natural ou qualquer que seja o objetivo de adotar um elemento não estático (Loonen *et al.*, 2017). Devem responder adequadamente às alterações do ambiente interno e externo, de modo a garantir ou melhorar os requisitos funcionais da envolvente em termos de calor, fluxo de ar, radiação solar, ruído, resistência, estabilidade e estética. Portanto, as fachadas adaptativas multifuncionais podem ser capazes de responder repetida e reversivelmente às mudanças nos requisitos de desempenho e às mudanças nas condições da envolvente ao longo do tempo. Em outras palavras, as fachadas adaptativas devem ser capazes de fornecer isolamento e massa térmica controláveis, troca de calor radiante, ventilação, captação de energia, iluminação natural, sombreamento ou controle de umidade, entre outros parâmetros que influenciam o seu desempenho (Aelenei; Aelenei; Vieira, 2016)

Desenvolver uma fachada dinâmica requer ir além da percepção histórica, a fachada como única interface entre o interior do edifício e o ambiente externo é influenciada por diversos fatores, o que aumenta a complexidade e heterogeneidade da mesma. A multidisciplinaridade permite uma oportunidade de explorar amplos domínios de parâmetros em diferentes campos para detectar soluções multiobjetivos⁴ em problemas de vários domínios (Hosseini *et al.*, 2019). A capacidade de resposta da fachada pode ocorrer numa escala macro, que envolve mudanças em sua configuração por meio de peças móveis ou numa escala micro, que envolve mudanças que afetam a estrutura de um material (Figura 19). A resposta macro pode incluir ventilação ajustável ou proteção solar móvel/dinâmica, usada para otimizar a quantidade de ganho de calor solar e luz visível que é admitida em um edifício, ou sistemas de iluminação

⁴ Busca soluções que não apenas otimizem um único objetivo, mas também considera outros objetivos relevantes. Geralmente envolve encontrar um conjunto de soluções viáveis para cada um dos objetivos, considerando que eles podem ser conflitantes ou interdependentes.

natural que podem ajudar a maximizar a luz natural do dia. A capacidade de resposta micro pode incluir, por exemplo, vidros inteligentes ou materiais de mudança de fase (Designing Buildings, 2020).





Figura 19 - Ilustração da capacidade de resposta das fachadas adaptativas



Fonte: Autor, 2024.

As fachadas adaptativas podem ter funções semelhantes às das fachadas convencionais, seu diferencial é a capacidade de responder de forma a que a mesma adapte e potencialize o seu desempenho diante do que foi projetado. A aplicação da fachada adaptativa pode ser para controle de ganho solar (Figura 20), controle de iluminação natural (Figura 21) e controle de temperatura interna (Figura 22) (Tabadkani *et al.*, 2021a).

Figura 20 - Exemplos de construções com fachadas adaptativas de controle solar

CONTROLE SOLAR	
<p>Instituto Mundo Árabe</p>  <p> França, 1984</p> <p>Material: Metal Autor: Jean Nouvel</p> <p>Padrão Cinético: O sistema incorpora várias centenas de diafragmas sensíveis à luz que regulam a quantidade de luz que pode entrar no edifício. Durante as várias fases da lente, um padrão geométrico mutável é formado e exibido como luz e vazio.</p>	<p>House at the Milsertor</p>  <p> Áustria, 2008</p> <p>Material: Acrílico Autor: Arch.Orgler</p> <p>Padrão Cinético: A posição dessas persianas dobráveis é controlada centralmente. Dependendo da luz, eles podem ser dobrados e enrolados ao redor do edifício como uma camada protetora ou dobrados para trás, proporcionando uma visão desimpedida do lado de fora.</p>

Fonte: Autor, adaptado de Barnuevo, 2017.

Os elementos de controle solar podem ser selecionados levando em consideração as estratégias passivas preconizadas para a localização geográfica, orientação solar e o coeficiente de sombreamento (Langner, 2020). As fachadas adaptativas, por sua vez, buscam otimizar o desempenho dos edifícios, tendo em vista todos esses parâmetros de forma integrada e dinâmica. Dessa maneira, as fachadas adaptativas representam uma evolução das estratégias tradicionais, oferecendo uma solução mais versátil e eficaz para enfrentar os desafios climáticos específicos de cada projeto.

Figura 21 - Exemplos de Construções com fachadas adaptativas para iluminação natural
ILUMINAÇÃO NATURAL

Forum Chriesbach - Eawag	SDU Campus Kolding
	
 Suíça, 2006	 Dinamarca, 2014
Material: Vidro Serigrafado Autores: Bob Gysin Padrão Cinético: Movida por motores hidráulicos, os elementos se movem duas vezes ao dia e essa movimentação tem duração de 10 minutos por fileira.	Material: Aço Perfurado Autor: Hanning Larsen Padrão Cinético: O sistema de proteção solar com persianas triangulares está equipado com sensores que medem continuamente os níveis de luz e calor e regulam mecanicamente as persianas por meio de um pequeno motor.

Fonte: Autor, adaptado de Barnuevo, 2017.

Os benefícios da luz natural nos edifícios são bem conhecidos: melhor qualidade de iluminação e menor demanda de energia elétrica em comparação com a iluminação artificial, com impacto positivo na produtividade, desempenho e conforto dos usuários. É desejável contar com ferramentas que auxiliem na seleção de dispositivos de sombreamento no projeto de fachadas, desde que interajam com o projeto da edificação, pois são itens críticos para capturar e proteger a luz do dia e têm grande impacto no desempenho térmico através do controle da radiação. A escolha adequada desses dispositivos pode não apenas melhorar o ambiente interno, mas também contribuir para a eficiência energética geral do edifício. Portanto, o uso estratégico de sombreamento pode se tornar um diferencial significativo no design sustentável e na otimização dos recursos naturais disponíveis (Matos; Scarazzato, 2017).

Figura 22 - Exemplos de construções com fachadas adaptativas para controle de temperatura
CONTROLE DE TEMPERATURA

Kiefer Technic Showroom	Al Bahar Towers
	
 Austria, 2007	 Abu-Dabi, 2012
<p>Material: Alumínio Autores: Ernst Giselbrecht</p> <p>Padrão Cinético: O edifício apresenta uma nova fachada à medida que o dia avança para regular a temperatura do ambiente interno do edifício</p>	<p>Material: Fibra de vidro Autor: Aedas Architects</p> <p>Padrão Cinético: A tela funciona como uma parede cortina, colocadas a dois metros da fachada externa dos edifícios em um quadro separado e programado para responder ao movimento do sol, como uma maneira de reduzir os raios solares e o brilho. À noite, todas as telas se fecham.</p>

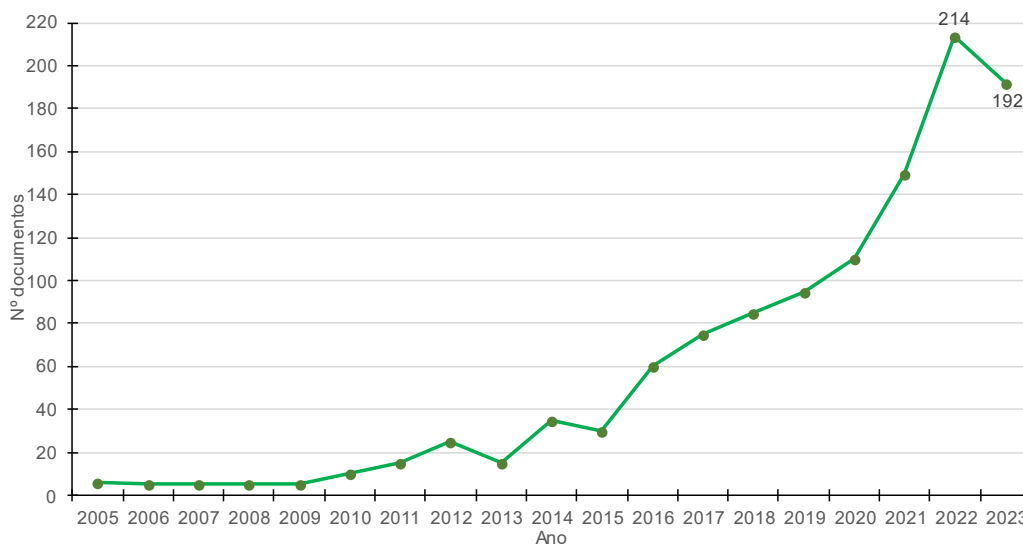
Fonte: Autor, adaptado de Barnuevo, 2017.

As fachadas adaptativas desempenham um papel crucial no controle de temperatura dos edifícios, ajustando-se automaticamente às condições ambientais para otimizar o conforto térmico interno. Ao reagir dinamicamente às variações de temperatura externa, essas fachadas regulam a entrada de calor e a ventilação, reduzindo a necessidade de sistemas de climatização artificiais.

2.4.1 Contexto atual da utilização da fachada adaptativa

Os números de publicações que abordam as fachadas adaptativas, vêm crescendo cada vez mais. De acordo com a base de dados Scopus utilizando as palavras chaves dos termos mais utilizados para referenciar as fachadas adaptativas “*Kinetic Architecture, Adaptive Facade, Responsive Facade e Kinetic Facade*” sendo a query do scopus “(ALL (“*kinetic architecture*”) OR ALL (“*adaptive facade*”) OR ALL (“*responsive facade*”) OR ALL (“*kinetic facade*”))” é possível visualizar que o número de publicações vem aumentando. A Figura 23 ilustra o crescimento de artigos desde 2005 que abordam a fachada adaptativa, a pesquisa foi realizada em janeiro de 2024.

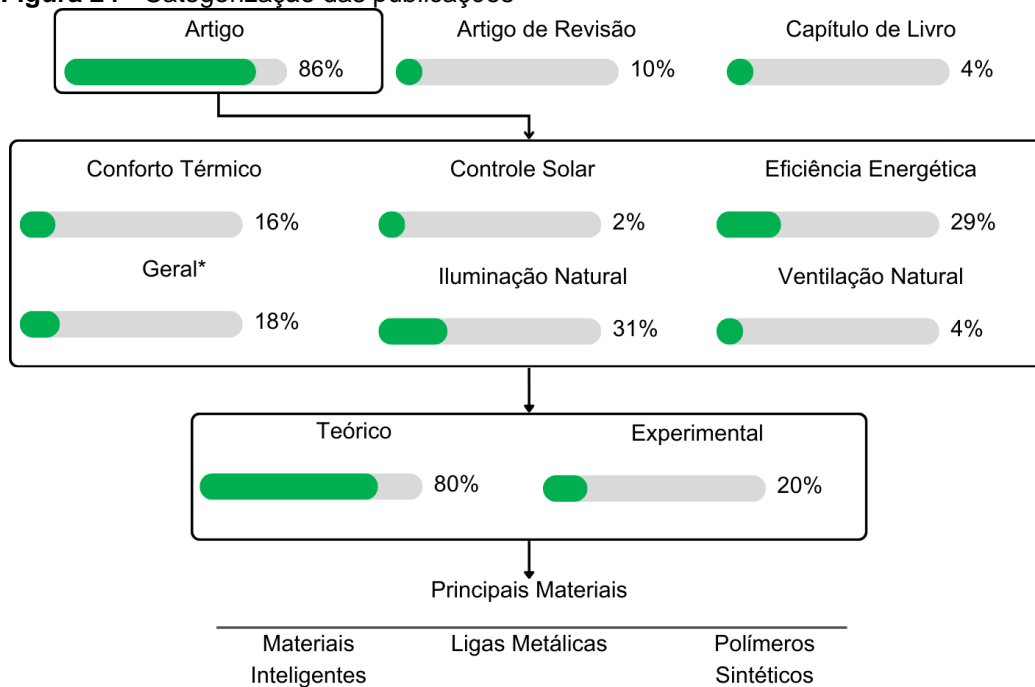
Figura 23 - Número de publicações por ano



Fonte: Scopus, 2024.

Apesar de não ser um conceito novo, o aprofundamento desse conhecimento ainda está em sua fase inicial. De acordo com o gráfico, as fachadas adaptativas são um tema pouco explorado, nota-se que houve um elevado aumento nos números de pesquisas nos últimos anos, com uma queda no ano de 2023. Para entender o cenário das publicações, a figura a seguir contextualiza na classificação dos artigos, quais as principais áreas de solução e materiais utilizados. Para construir a ilustração (Figura 24), foram analisados os 45 artigos mais relevantes, separados em 15 grupos, em que a seleção dos mesmos foi pelo critério das citações. Desta forma, foram selecionados os artigos mais citados de todo o período, mais citados nos últimos 5 anos e no ano de 2023, a fim de proporcionar uma compreensão abrangente do tema em estudo. Os 45 artigos analisados estão dispostos no Apêndice A. Esse levantamento detalhado visa fornecer uma visão mais clara sobre a evolução do campo e identificar as tendências emergentes. Além disso, espera-se que essa análise contribua para direcionar futuras pesquisas e estimular o interesse acadêmico e profissional no desenvolvimento de fachadas adaptativas. A escolha criteriosa dos artigos e a segmentação por períodos de citação destacam a relevância e o impacto dessas pesquisas ao longo do tempo.

Figura 24 - Categorização das publicações



* Busca solucionar dois ou mais dos problemas destacados ou puramente teórico

Fonte: Autor, 2024.

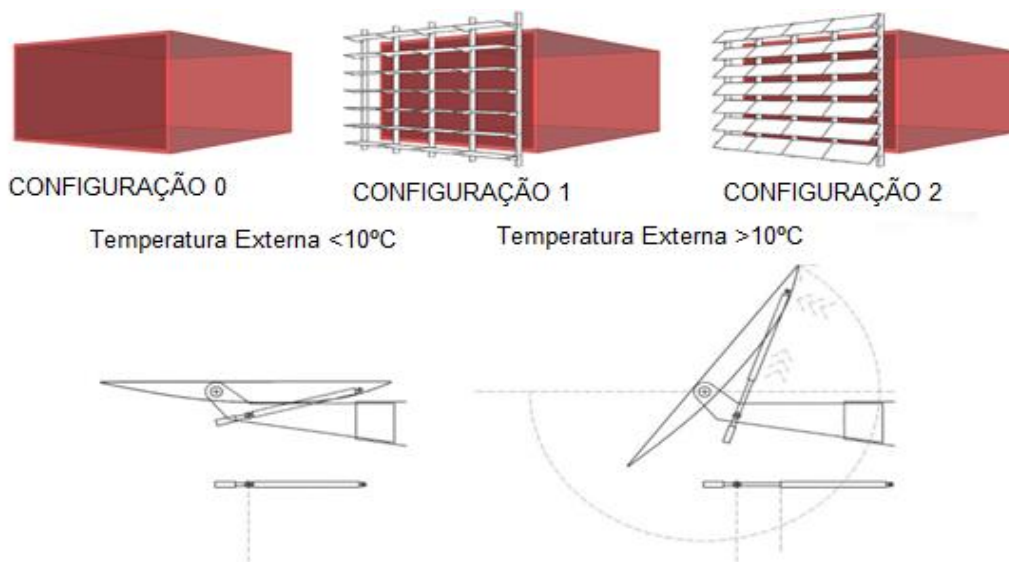
Uma das possíveis explicações para o aumento das publicações está sobre a crescente necessidade de implementar a eficiência energética em edificações ao redor do mundo. Há dois motivos principais para que esse conceito de elementos cinéticos ganhe cada vez mais maturidade. O primeiro, é em relação a necessidade de melhorar o desempenho ambiental das edificações em relação às mudanças climáticas e políticas internacionais. O segundo, é pela crescente utilização e facilitação da utilização de ferramentas computacionais e de dispositivos eletrônicos que permitem um controle melhor dos elementos adaptativos (Velasco; Brakke; Chavarro, 2015).

A computação se tornou uma ferramenta essencial para desenvolver qualquer estudo de eficiência energética. Ao analisar a integração das tecnologias com o *Building Information Modeling* (BIM) com fachadas adaptativas, Mallasi (2018) conclui que a modernização do *design* digital torna o processo de criação mais abrangente, pois, a utilização da parametrização com BIM permite compreender mais o comportamento da fachada como elemento responsivo, porém, ainda necessita de um tempo maior de maturação para que seja amplamente utilizado, principalmente quando se tem a materialização dos elementos projetados. Essa integração seria o próximo passo caso a adoção de

modelos responsivos seja adotada com mais popularidade. As abordagens de projeto e tipologias de fachadas adaptativas envolve um processo mais dinâmico e são avaliados de acordo com seus propósitos definidos, o que permitem empregar mais inovações em comparação das funções prescritivas para sistemas de sombreamento convencionais, como persianas e venezianas (Tabadkani et al., 2021).

Após um avanço nas definições de fachadas adaptativas, diversos artigos buscaram estudar soluções dentro desse escopo, para entender o comportamento, sendo desenvolvido diversos protótipos virtuais, como o de Ricci, Ponzio, Fabbri, Gaspari e Naboni (2020), que abordam uma pesquisa sobre o desenvolvimento climático de uma fachada adaptativa customizada baseada em um sistema passivo auto adaptável às condições climáticas via atuadores (Figura 25). A solução é desenhada com o auxílio de um fluxo de trabalho customizado baseado no *Ladybug Tools*⁵ que é calibrado de acordo com os comportamentos termomecânicos registrados e permite prever os desempenhos dinâmicos de energia e conforto visual (Ricci et al., 2021).

Figura 25 - Sistema cinético para controle solar proposto por Ricci et al.



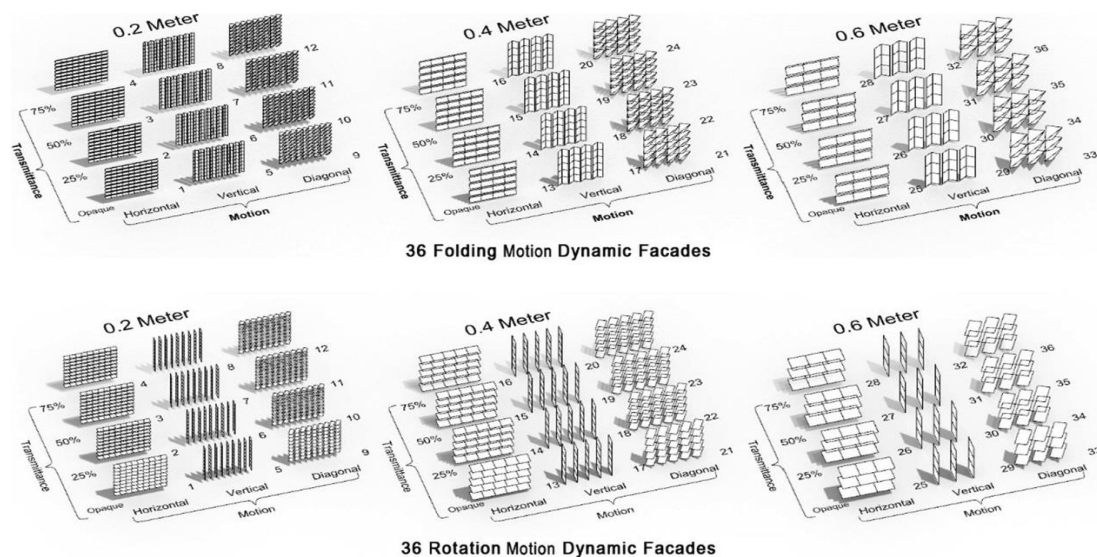
Fonte: Ricci et al. 2020. Adaptado pelo autor.

⁵ *Ladybug Tools* é uma coleção de aplicativos de computador gratuitos que oferecem suporte ao *design* e à educação ambiental. Possui uma série de mecanismos de simulação validados.

O sistema foi testado em quatro climas europeus, traçando os cenários de sua adaptabilidade sob várias situações. Os resultados indicam que o sistema por suas constantes mudanças mecânicas devido à variação de temperaturas proporciona maior grau de adaptação, economia de energia e conforto térmico e visual interno.

Shi, Tablada e Wang (2020), estudaram uma abordagem de simulação paramétrica para a otimização do projeto de fachadas adaptativas capazes de dois movimentos, dobra e rotação de painéis em um edifício comercial tropical do Equador (Figura 26). Foram comparados para determinar a melhor relação entre a demanda mínima de energia e o conforto máximo da luz natural 72 casos representando dois movimentos e diferentes valores de transmitância, eixos e dimensões.

Figura 26 - Sistemas para controle de iluminação natural proposto por Shi, Tablada e Wang.



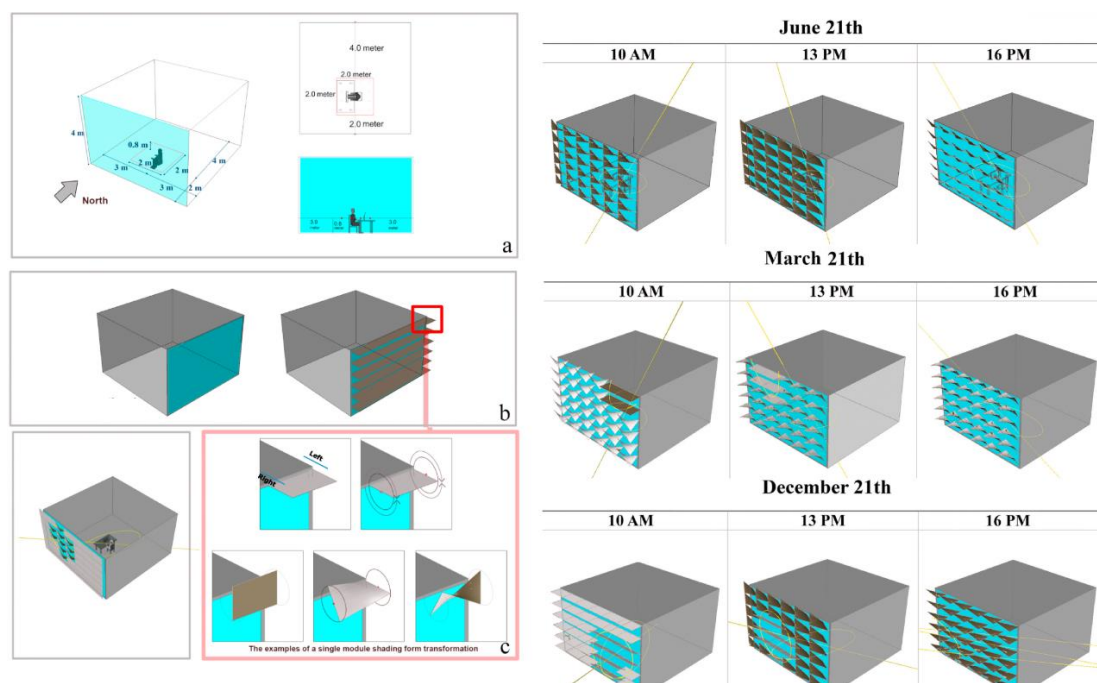
Fonte: Shi, Tablada e Wang, 2020.

Os resultados indicam que a demanda de energia pode ser reduzido em até 21% ao adotar o modelo de fachada adaptativa em relação ao caso estático. O movimento de dobra apresenta melhores desempenhos nas quatro orientações que o movimento de rotação para a iluminação natural, em que a zona de iluminação adequada aumenta de 15% a 32%. Sobre a base de soluções otimizadas globais em termos de desempenhos energéticos, a

concepção otimizada para todas as orientações corresponde ao movimento de rotação. Além disso, os resultados indicam que os ângulos ideais correspondem geralmente a 15° em relação ao seu ponto inicial. Este estudo propõe uma abordagem baseada na performance para ajudar os projetistas a tomar decisões sobre a concepção, o ponto de vista energético e o conforto visual.

Para os estudos de Rizi e Eltaweel, 2021, o objetivo foi abordar duas otimizações simultâneas de fachada adaptativa para melhorar o conforto térmico e visual utilizando uma fachada adaptativa com de dupla pele (Figura 27). A metodologia utilizada levou em consideração a ocupação dos usuários, considerando questões de conforto. Foi utilizado a simulação paramétrica e a otimização de algoritmos genéticos (Rizi; Eltaweel, 2021)

Figura 27 - Sistema cinético proposto por Rizi e Eltaweel.



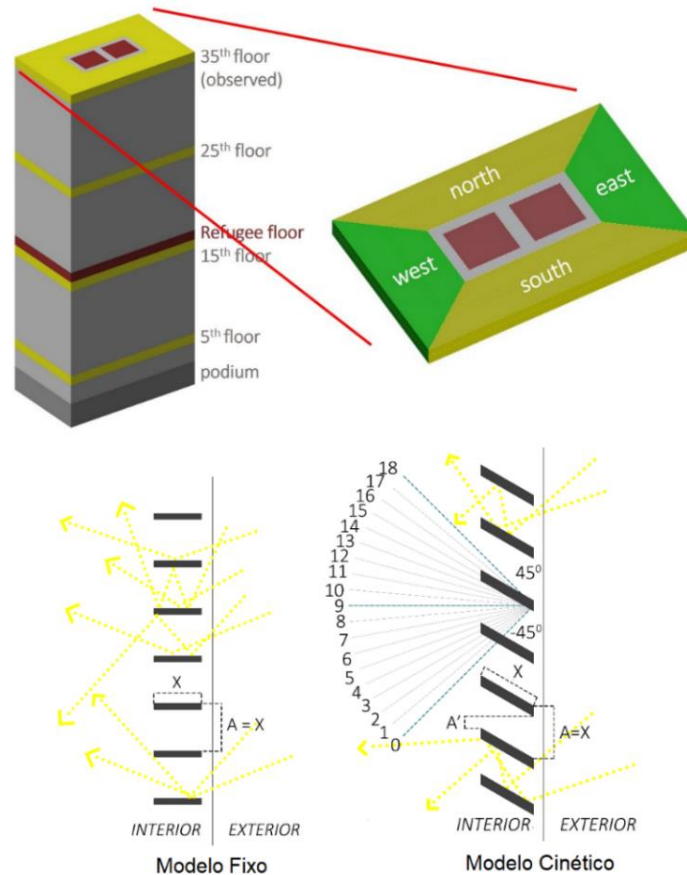
Fonte: Rizi, Eltaweel, 2021. Adaptado pelo autor.

Em média, houve uma melhora de 76% no conforto visual do ocupante ao longo do ano pelo sistema proposto em relação ao estado de sombreamento convencional. Não obstante, houve em média 60% de melhoria do ganho de calor por meio da fachada adaptativa proposta em comparação com o estado de sombreamento convencional, quando a função objetivo foi definida

para aumentar o ganho de calor. Além disso, quando a função objetivo⁶ é definida para diminuir o ganho de calor, uma melhoria de 59% foi alcançada em comparação com nenhum estado de sombreamento.

A pesquisa proposta por Mangkuto, et al, 2021, visa projetar os melhores dispositivos de sombreamento interno em quatro orientações de fachada de um prédio de escritórios em Jakarta, Indonésia, considerando opções de projeto de sombreamento fixo e adaptável, e determinar o impacto no desempenho anual da luz natural usando modelagem e simulação computacional (Figura 28). A simulação é realizada em dois escopos, o primeiro escopo é na opção de projeto fixo, com foco no número e largura das ripas dos brises; e a segunda opção de projeto adaptável, com foco no ângulo da ripa em várias condições (Mangkuto *et al.*, 2021).

Figura 28 - Modelo de estudo da fachada adaptativa proposto por Mangkuto, et al



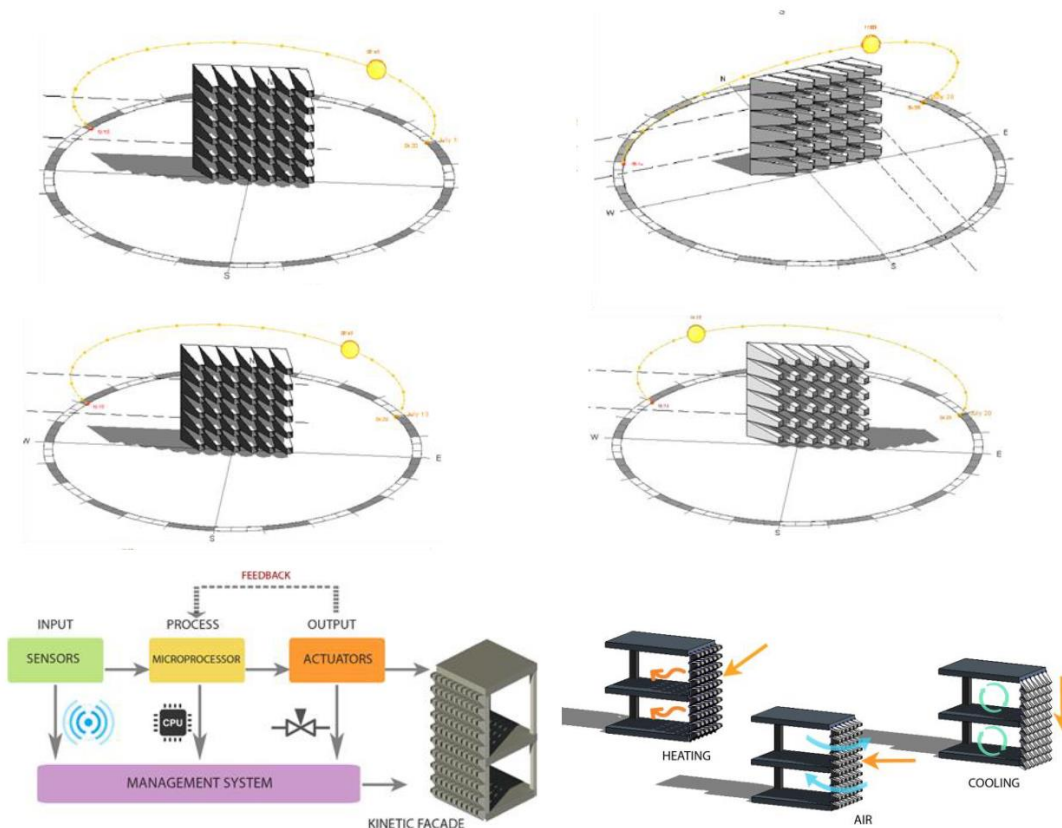
Fonte: Mangkuto, et al, 2021. Adaptado pelo Autor.

⁶ Função objetivo, para os autores, é o parâmetro de otimização utilizado para definir o padrão cinético, ou seja, se o objetivo for iluminação, há uma configuração, se for para conforto térmico, outra.

Sob a opção de projeto fixo, verificou que as metas podem ser alcançadas apenas nas fachadas norte e sul e, portanto, a opção de projeto adaptativo deve ser implementada nas fachadas leste e oeste. Os resultados da simulação da opção adaptativa sugerem que todas as métricas em todas as zonas podem agora satisfazer o requisito de desempenho, com Método Espacial da Luz do Dia $300/50\% \geq 74\%$ e Autonomia Espacial da Luz do Dia $\leq 12\%$.

Por fim, o artigo de Nalcaci e Nalcaci, 2020, apresentou um modelo biomimético para incentivar a implementação de uma forma de proteção para edifícios que visam a sustentabilidade (Figura 29). O tipo de proteção contribui para a demanda de energia ao movimento das células cinéticas colocadas na superfície externa do edifício, proporciona conforto de uso e mantém o equilíbrio térmico dos utilizadores. Segundo os autores o projeto pode ser implementado como um material de revestimento reduzindo a demanda de eletricidade de resfriamento e aquecimento para fachadas de edifícios (Nalcaci; Nalcaci, 2020).

Figura 29 - Modelo de fachada adaptativa proposto por Nalcaci e Nalcaci



Fonte: Nalcaci e Nalcaci, 2020. Adaptado pelo Autor.

A estrutura projetada visa proteger o equilíbrio térmico e luminoso entre interior e exterior e criar espaços confortáveis, mudando de direção de acordo com as condições climáticas. Os componentes da fachada exibem movimentos inteligentes de acordo com as ações solares e as necessidades internas. Para os modos de aquecimento e resfriamento a fachada adaptativa alcançou uma redução de demanda de eletricidade de 310 kW/m² ano para 280 kW/m² ano, que se traduz em uma redução de aproximadamente 9,7% ao ano.

2.5 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL NA ARQUITETURA

A simulação computacional permite prever a demanda de energia anual por metro quadrado de área de piso, levando em consideração fatores como condições climáticas locais, orientação da fachada, área e tipo de vidros, entre outros. A simulação computacional pode ser uma ferramenta útil para melhorar o desempenho térmico e energético de um edifício também no caso da reabilitação (Yu *et al.*, 2015). Diante disso, a simulação computacional se torna fundamental para o desenvolvimento de fachadas adaptativas, pois permite testar e experimentar soluções em condições idênticas às encontradas no local onde o edifício será construído.

A modelagem térmica dinâmica é utilizada para análise das trocas de calor em edifícios. Existem mais de 140 ferramentas de simulação dinâmica de edifícios, cada uma com recursos específicos para análise de desempenho energético e luz natural. Essas ferramentas analisam quatro dimensões de pesquisa: Projeto, Materiais, Engenharia e Arquitetura. A maioria dessas ferramentas modela o edifício como um único volume para simplificar o cálculo e economizar tempo de análise. É possível dividir o espaço interno de um edifício por várias divisórias, que será envolvida na análise térmica (Shafaghat; Keyvanfar, 2022).

Para facilitar as análises de desempenho das edificações, a simulação computacional tem um papel fundamental, é diante dessa ferramenta que se pode gerenciar e realizar complexas modelagens. As simulações de

desempenho são muito eficientes e de baixo custo para analisar e otimizar projetos de edifícios (Balvedi; Ghisi; Lamberts, 2018).

2.5.1 Design paramétrico e algoritmos evolucionários

Programas computacionais paramétricos alteram automaticamente os valores atribuídos aos parâmetros definidos, fornecendo imagens gráficas na forma correspondente às equações usadas para gerar tais elementos. Eles relacionam diferentes objetos de desenho, que podem ser diferentes curvas que compõem a mesma superfície, permitindo que a forma da superfície como um todo mude quando se altera um valor em uma das curvas. Deve-se entender que os objetos geométricos concebidos com a ajuda do design paramétrico não precisam necessariamente consistir em formas curvas.

Qualquer elemento de um projeto tradicional, se modelado em um programa paramétrico, redimensiona automaticamente suas dimensões quando os parâmetros forem modificados, o *software* BIM é um exemplo de design paramétrico amplamente difundido. Existem algumas diferenças significativas a serem consideradas entre os processos de projeto tradicionais e aqueles que usam procedimentos paramétricos. Implicam uma mudança de atitude do projetista no próprio processo de criação, mesmo que a geometria seja plana ou complexa, os elementos construtivos de desenho paramétrico são sempre representados em três dimensões, ou seja, é exigido ao projetista que especifique com mais precisão as características de cada elemento, a importância do conhecimento técnico construtivo desde o início da sua concepção é exigência obrigatória (Tramontano, 2015).

O design paramétrico é visto como uma metodologia que pode dar suporte aos desenvolvimentos de fachadas adaptáveis. É um processo baseado no pensamento no algoritmo que permite a expressão de parâmetros e regras que em conjunto definem as relações entre clima, movimento da fachada e conforto interno/uso de energia (Ricci *et al.*, 2021).

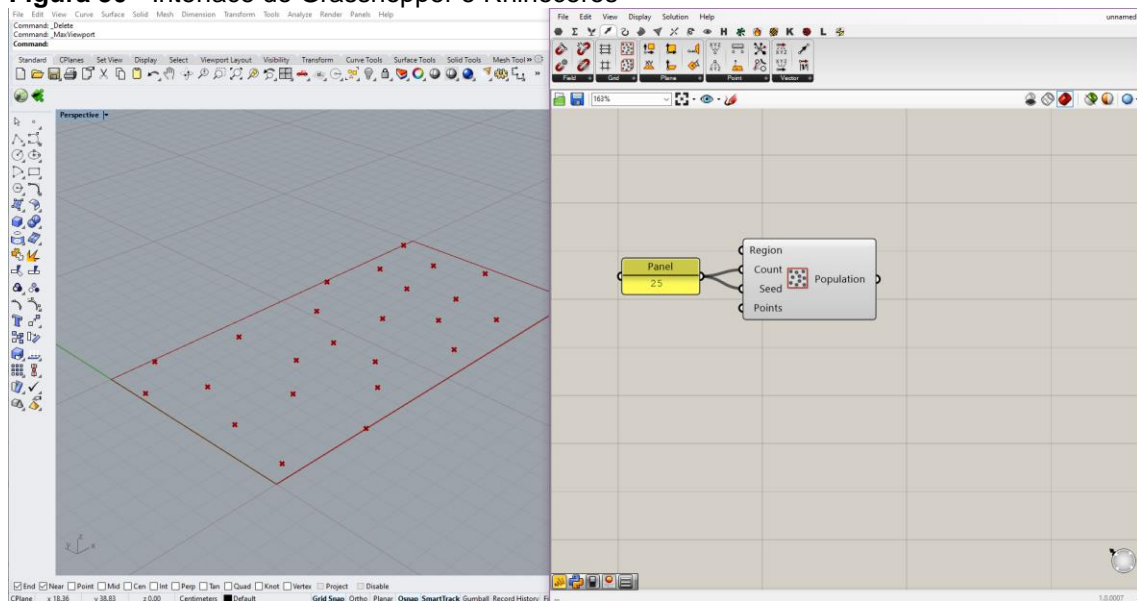
2.5.2 *Rhinoceros e Grasshopper*

O *Rhinoceros* é um programa de modelagem de geometria 3D com mecanismo de criação baseado em NURBs (*Nonuniform Rational B-Splines*). É um método de modelagem utilizado para formas complexas que permite a criação de geometrias através de linhas definidas matematicamente por dois ou mais pontos de controle. Apresenta uma interface de fácil compreensão e resposta de criação rápida.

O *Grasshopper* é um editor de algoritmo de programação visual integrado ao programa de modelagem 3D do *Rhinoceros*, que permite a criação de scripts sem necessidade de conhecimento prévio de programação textual, possibilita a instalação de *plug-ins* para ampliar sua capacidade de atuação, podendo realizar *scripts* que vão desde análise ambiental até controle robótico (Mcneill,2021).

Os ambientes de programação visual podem ser comparados às linguagens de programação textual, essas linguagens permitem ao usuário criar programas a partir da manipulação de componentes gráficos ao invés de linhas de código (Figura 30). Entretanto, esses ambientes de programação visual não são uma linguagem de programação, elas possuem algumas semelhanças, como o uso da interface de caixas e ligações. Além disso, esses ambientes visuais são especialmente úteis para iniciantes, pois reduzem a complexidade e facilitam a compreensão dos conceitos de programação. Eles também permitem uma prototipagem mais rápida e intuitiva, o que pode acelerar o desenvolvimento de projetos (Celani; Vaz, 2011). Outra vantagem é a possibilidade de visualização imediata dos resultados, o que contribui para um aprendizado mais interativo e dinâmico. Dessa forma, os ambientes de programação visual oferecem uma abordagem alternativa e complementar às linguagens tradicionais, promovendo a acessibilidade na criação de software.

Figura 30 - Interface do Grasshopper e Rhinoceros



Fonte: Autor, 2024.

O usuário não necessita de conhecimentos aprofundados em linguagem de programação, pois a utilização da programação visual, ao se utilizar da interface de caixas e fios, a modelagem da programação será de forma visual paramétrica. A utilização desses elementos geralmente está associada a um *software* de modelagem tridimensional permitindo que as alterações aconteçam em tempo real. A programação visual é realizada através de um modelo paramétrico, ou seja, as informações são elaboradas em diagramas que irão representar o algoritmo que gerará o modelo paramétrico (Zardo; Silva; Mussi, 2016).

2.5.3 *EnergyPlus* e *OpenStudio*

EnergyPlus é um *software* de simulação de energia de edificações desenvolvido pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos. Ele é utilizado por arquitetos, engenheiros e pesquisadores para avaliar o desempenho energético de edifícios e sistemas de energia, permitindo a avaliação da demanda de energia, custos operacionais, conforto térmico e qualidade do ar interior, entre outras variáveis. O *EnergyPlus* é considerado uma das ferramentas mais avançadas para simulação energética de edifícios e é amplamente utilizado em projetos de eficiência energética, construção sustentável e pesquisa científica na área de construção civil. É *open source* e

está disponível na *webpage* do Departamento de Energia dos Estados Unidos (DOE, 2022).

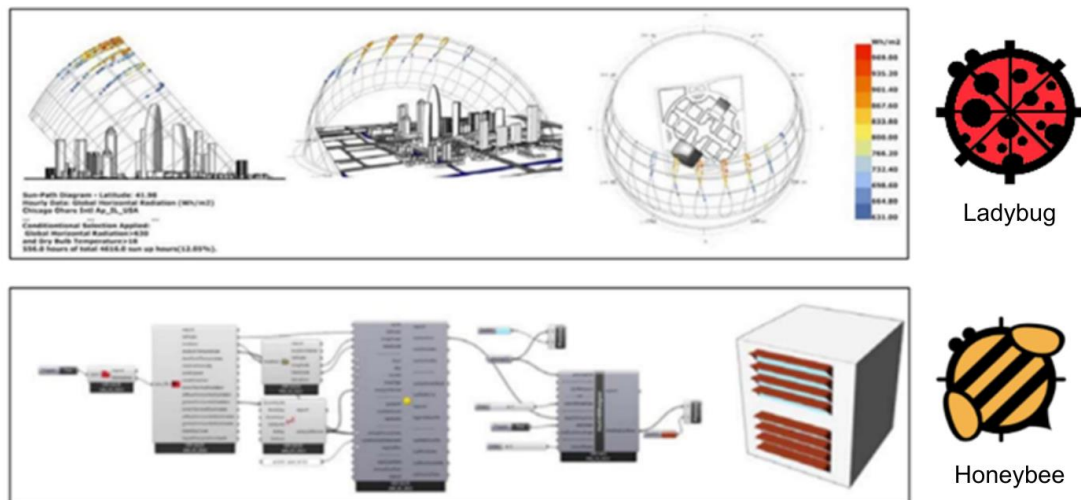
OpenStudio é um software gratuito de modelagem e análise de edifícios desenvolvida pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos em colaboração com outras organizações. Ele usa o *EnergyPlus* como motor de cálculo e permite aos usuários criar modelos detalhados de edifícios em 3D, simular o desempenho energético do edifício e analisar opções de melhoria de eficiência energética (NREL, 2022).

A pesquisa utilizará o *OpenStudio* como um "motor de simulação" por meio de um *plugin* disponível no *Honeybee*. Esse *plugin* será integrado à programação visual do ambiente do *Grasshopper*. Essa abordagem permite que o modelo seja simulado dinamicamente, uma vez que as alterações nos parâmetros do *script* são automaticamente atualizadas na simulação pelo *OpenStudio*.

2.5.4 Ladybug tools: Ladybug e Honeybee

Ladybug realiza análises detalhadas de dados climáticos para produzir visualizações personalizadas e interativas para um design com base no meio ambiente. Para isso o Ladybug importa arquivos de clima no formato EnergyPlus padrão (.EPW) para o Grasshopper, fornecendo uma variedade de gráficos climáticos interativos 2D e 3D que apoiam o processo de tomada de decisão durante os estágios iniciais de projeto. O Ladybug também suporta a avaliação das opções de projeto por meio de estudos de radiação solar, modelagem de horas de luz solar e outros. O Honeybee é projetado para executar análises sobre a construção na iluminação natural detalhada, simulações de modelos de energia. Sua utilização para criação de um algoritmo segue quatro etapas. A primeira é a criação da geometria a ser simulada, a segunda é a verificação dos *inputs* de simulação, ou seja, a análise dos parâmetros. A terceira é rodar a simulação e por fim, é a análise dos resultados de acordo com os objetivos a serem alcançados (Figura 31) (Roudsari; Pak, 2013).

Figura 31 - Ilustração do Ladybug e Honeybee



Fonte: Roudsari; Pak, 2013. Adaptado pelo autor.

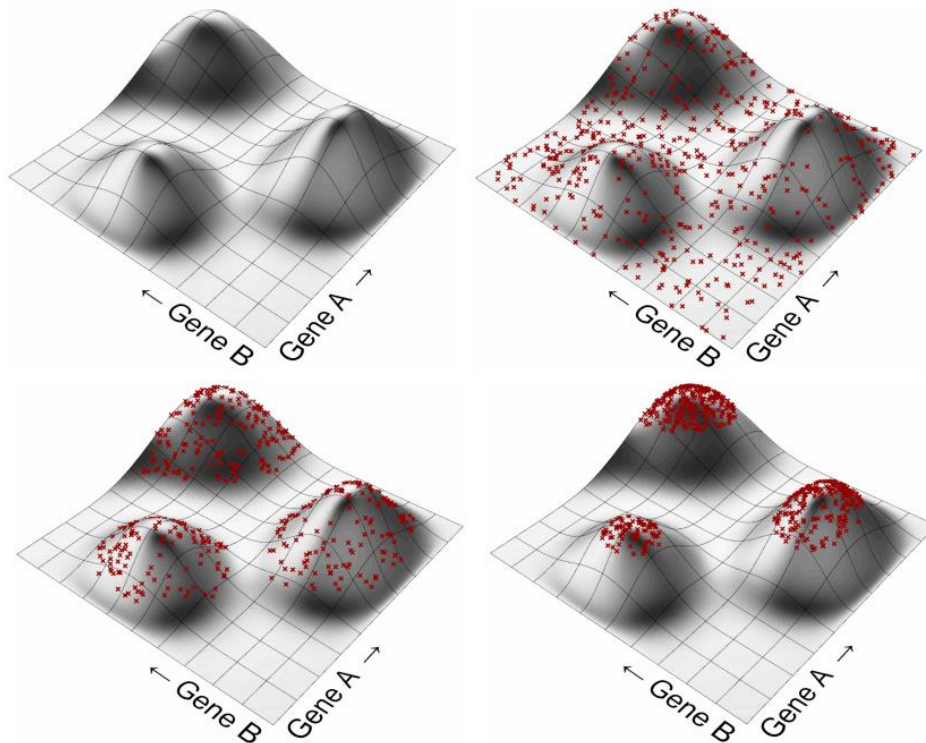
2.5.5 Algoritmos evolucionários

Algoritmos evolutivos são métodos na interseção comum entre ciência da computação e biologia evolutiva. Normalmente, esses métodos foram criados para resolver problemas de busca paramétrica e otimização (Parente *et al.*, 2018). De acordo com o livro “An introduction to genetic algorithms” de *Melanie Mitchell* (1999), essa base de conhecimento começou em meados da década de 1930, mas foi nas décadas de 1950 e 60 que os pesquisadores aplicaram inspiração evolutiva a algoritmos de otimização e aprendizado de máquina. Em 1975, John Holland comparou os padrões comportamentais observados durante o processo de seleção natural com programas de computador e os chamou de algoritmos evolutivos, inspirados na teoria da evolução natural de Darwin, (Melanie, 1999).

Na computação evolutiva, as variáveis são denominadas genes. Conforme se muda os genes, o modelo muda e se torna maximizado ou minimizado (tudo depende da função objetivo). Quando se tem dois ou mais genes, é possível combinar esses genes e cada combinação gera um resultado particular. Para ilustrar esses conceitos, a Figura 32 possui o gene A e o gene B. Sua função objetivo é encontrar o pico mais alto, conforme o solucionador começa, o algoritmo gera inúmeros pontos de forma aleatória, chamados de genomas (um genoma é um valor específico para cada gene e o

conjunto de genomas se chama população). Assim o solucionador avaliará a população. Entretanto, o resultado do melhor gene da população 0 não é bom o suficiente, então o solucionador gera uma nova população de forma aleatória, dessa vez com os resultados da população anterior, gerando a população 1. E para as próximas populações o mesmo processo até que o resultado do melhor genoma se aproxime da função objetivo (Rutten, 2010).

Figura 32 - Ilustração Algoritmo Evolutivo



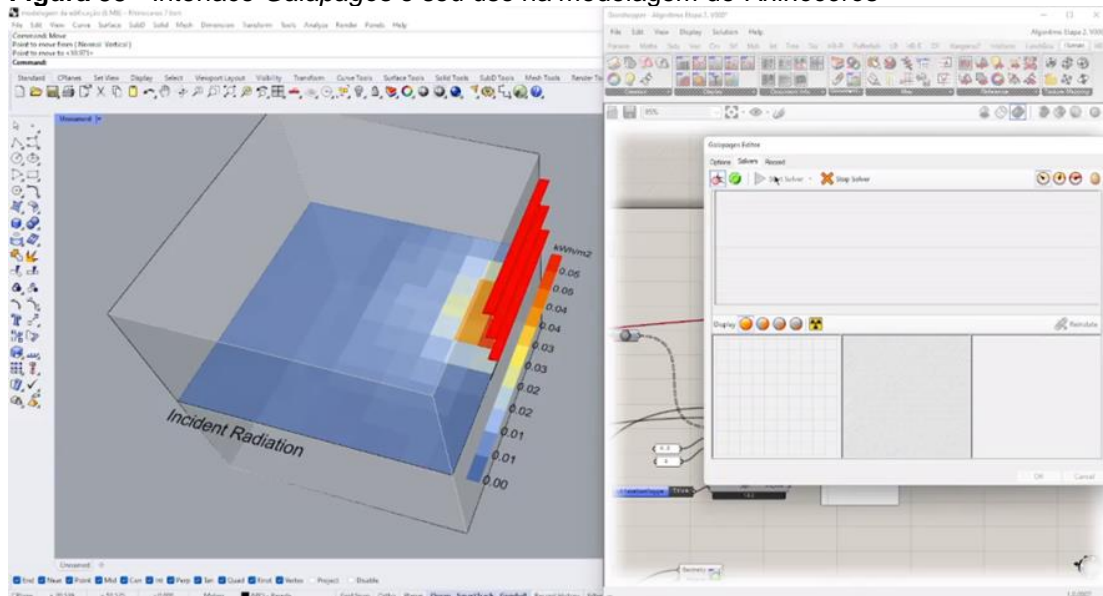
Fonte: Rutten, 2010. Adaptado pelo autor.

Os solucionadores são ferramentas capazes de realizar todos os cálculos necessários, atuando como ferramentas de suporte. O Grasshopper possui um solucionador nativo, denominado Galapagos. Seu objetivo é simplificar a utilização desses conceitos de algoritmos evolutivos para usuários que não possuem conhecimentos avançados em ciência da computação.

Galapagos permite que arquitetos e designers explorem uma vasta gama de soluções otimizadas sem a necessidade de escrever código complexo. Ele utiliza algoritmos genéticos para buscar soluções que atendam a critérios específicos, ajustando parâmetros automaticamente até encontrar a configuração ideal. Além disso, Galapagos pode ser integrado com outras

ferramentas no Grasshopper, permitindo uma abordagem colaborativa e multidisciplinar na solução de problemas complexos (Figura 33).

Figura 33 - Interface *Galapagos* e seu uso na modelagem do *Rhinceros*



Fonte: Autor, 2024.

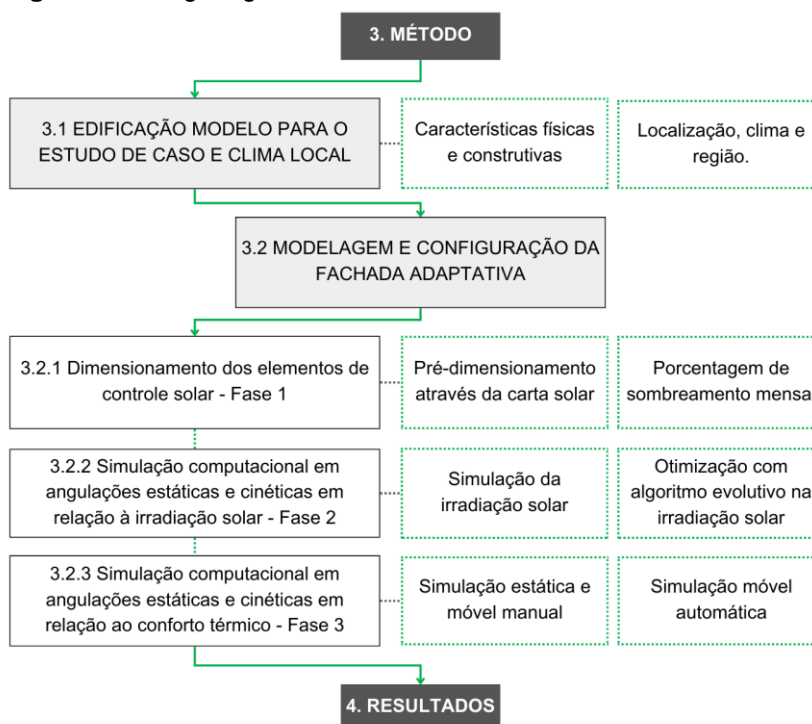
A evolução crescente das tecnologias permitiu que a otimização e as simulações se tornem cada vez mais precisas e eficientes. No âmbito da construção civil, a utilização do software Rhinoceros, em conjunto com o plugin Grasshopper, popularizou o uso de ferramentas de algoritmos evolucionários. A presente pesquisa abordará detalhadamente o solucionador *Galapagos*. Para efeito de comparação, entre os anos de 2016 e 2017, todas as pesquisas focadas em design paramétrico para arquitetura fizeram uso do Grasshopper, sendo que, desse total, 48,88% utilizavam especificamente o plugin para otimização evolutiva, evidenciando sua relevância e popularidade no campo (Parente *et al.*, 2018).

3 MÉTODO

O método utilizado na presente pesquisa está organizado de forma sequencial (Figura 34), com início na definição e apresentação da edificação modelo para o estudo de caso e clima local (item 3.1). Também são apresentadas as características físicas e construtivas, bem como as informações necessárias sobre a localização, clima e região em que a edificação está inserida. Em seguida, inicia-se a etapa de modelagem e configuração da fachada adaptativa (item 3.2). Essa etapa terá três fases de estudo. O item 3.2.1 “Dimensionamento dos Elementos de Controle Solar”, contempla os critérios de pré-dimensionamento dos elementos de sombreamento.

O item 3.2.2, “Simulação Computacional em Angulações Estáticas e Cinéticas em Relação à Irradiação Solar”, aborda os parâmetros necessários para criação do algoritmo de simulação e do algoritmo evolutivo para otimização da irradiação solar. Por último, o item 3.2.3, “Simulação Computacional em Angulações Estáticas e Cinéticas em Relação ao Conforto Térmico”, apresenta o funcionamento do algoritmo e parâmetros de simulação.

Figura 34 – Organograma do método



Fonte: Autor, 2024.

3.1 EDIFICAÇÃO MODELO PARA O ESTUDO DE CASO E CLIMA LOCAL.

O escopo das simulações teve como base uma edificação modelo desenvolvida e implantada na Universidade de Aveiro em Portugal (Figura 35). É uma edificação existente, localizada no campus da universidade, que foi utilizada como célula teste. A edificação possui 30,25 m² e divide-se em dois pavimentos. Todas as fachadas possuem dimensões iguais, porém as aberturas maiores ficam orientadas a Sul. Sua estrutura é composta por aço leve do inglês *Light Steel Frame*.

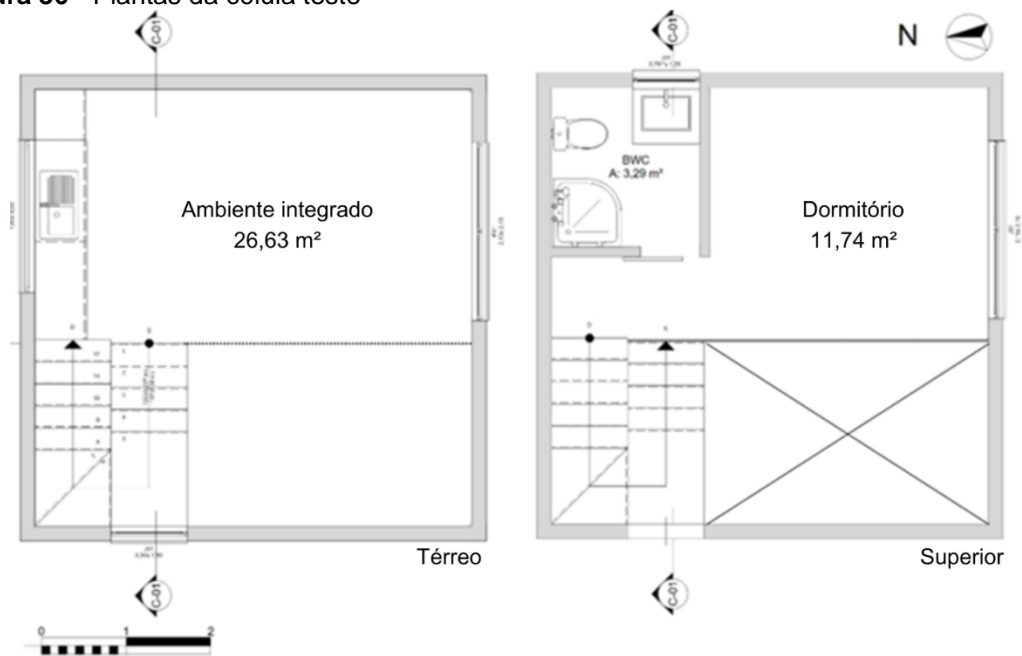
Figura 35 - Localização da região de estudo
Portugal Aveiro Universidade de Aveiro



Fonte: Autor, 2024.

De acordo com os autores do projeto (Figura 36), as tecnologias utilizadas foram escolhidas a partir da tendência crescente dos sistemas construtivos pré-fabricados no setor. Essa abordagem permite uma construção mais rápida e eficiente, atendendo às demandas modernas por edificações de qualidade com prazos de entrega reduzidos. Além disso, o uso de sistemas pré-fabricados contribui para a redução de desperdício de materiais e otimização dos recursos. A escolha dessas tecnologias também reflete uma preocupação com a inovação e a adoção de métodos construtivos mais avançados. Dessa forma, o projeto busca não apenas acompanhar as tendências do mercado, mas também liderar iniciativas que promovam um desenvolvimento urbano mais responsável e inovador.

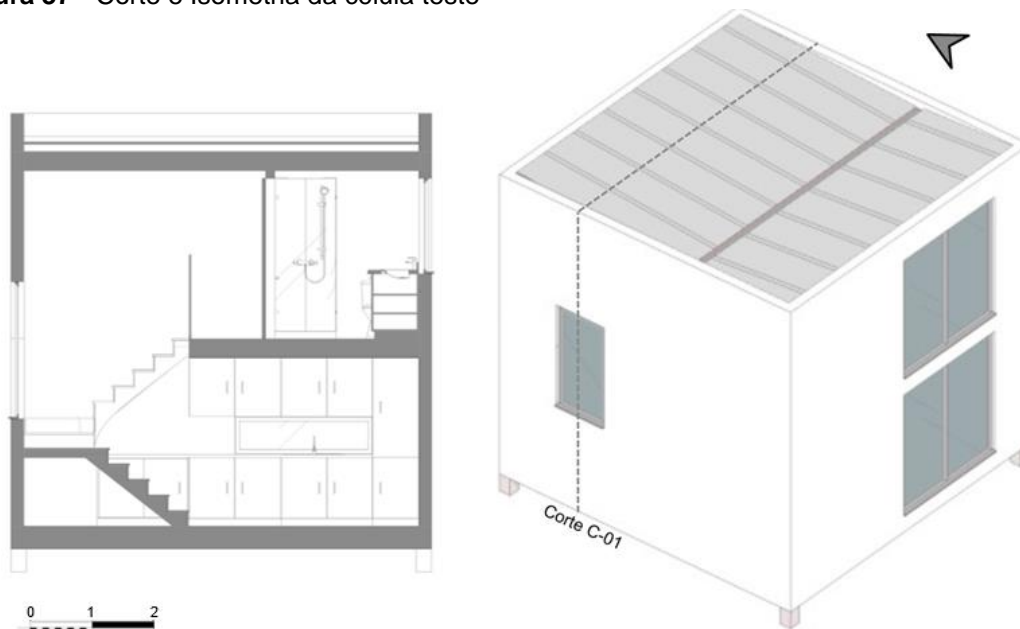
Figura 36 - Plantas da célula teste



Fonte: Autor, 2024.

Para ilustrar o aspecto da edificação, a Figura 37 mostra um corte e uma isometria da edificação.

Figura 37 - Corte e Isometria da célula teste



Fonte: Autor, 2024.

Para que seja possível realizar simulações termo energéticas utilizando o modelo da edificação, é preciso conhecer as propriedades térmicas

dos componentes construtivos utilizados. Desta forma, a Tabela 1 contempla os dados principais de cada componente.

Tabela 1 - Propriedades Térmicas da célula teste

Fechamentos			
Elemento	Solução + Isolamento	Esp. do Isolamento (mm)	U ($W \cdot m^{-2} \cdot ^\circ C^{-1}$)
Piso	Light Steel Frame + Lã Mineral	60	0,54
Paredes Externas	Light Steel Frame + Lã Mineral	60	0,47
Cobertura	Light Steel Frame + Lã Mineral	40	0,63
Aberturas			
Elemento	Composição	Fator Solar (FS)	U ($W \cdot m^{-2} \cdot ^\circ C^{-1}$)
Janelas e Portas	Vidro externo 6mm + Vazio preenchido com gás argônio 16mm + vidro interno 8,76mm	0,21	1

Fonte: Autor, 2024.

Localizada em Portugal, Aveiro é uma cidade distrito e possui uma área territorial de 197,58 km². Aveiro tem um clima temperado úmido e molhado, fresco no verão e moderadamente frio no inverno. A estação chuvosa ocorre durante novembro, dezembro e janeiro, enquanto julho e agosto são os meses mais secos. Aveiro tende a ter ventos costeiros, o que oferece boas condições para usar a ventilação natural como uma forma passiva de reduzir a demanda de resfriamento (Figueiredo; Kämpf; Vicente, 2016).

A classificação do clima é Csb⁷ segundo a Köppen-Geiger. Aveiro tem uma temperatura média de 15,6 °C (Tabela 2). A pluviosidade média anual é de 1064 mm. Aveiro está localizada no hemisfério norte, com latitude 40,64N e longitude -8,65L. Esta cidade portuguesa é conhecida por seu clima ameno e suas estações relativamente equilibradas. As características climáticas de Aveiro são influenciadas pela proximidade ao oceano Atlântico, resultando em verões frescos e invernos suaves.

⁷ Na classificação climática de Köpper-Geiger, o código Csb representa o clima temperado com verão fresco e seco e inverno chuvoso.

Tabela 2 - Dados climatológicos para Aveiro

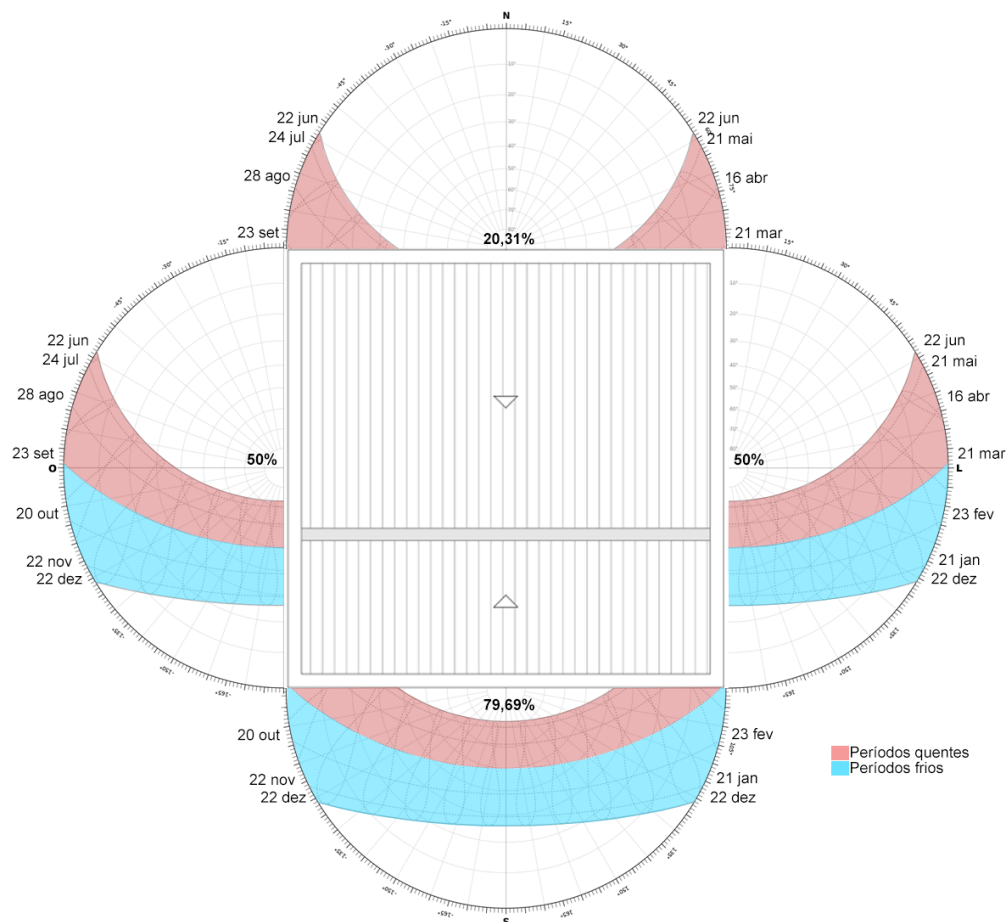
Mês	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Média Ano
T máx. (°C) ¹	14,4	15,4	17,6	18	19,9	22,7	24,2	24,4	23,6	20,9	17,5	15,2	19,5
T mín. (°C) ¹	5,9	7,3	8,9	10,1	12,3	14,8	16	16,1	15	12,5	9,9	7,9	11,4
Precipitação (mm)	111,2	85,5	46,4	89,6	89,3	27,6	11,8	17,8	56,1	110,3	129,2	131,9	906,7

¹ Temperaturas médias.

Fonte: Instituto Português do Mar e da Atmosfera, 2020.

Para a pesquisa, será dividido as estações em dois períodos, onde o outono e inverno denominado períodos frios, as estações de primavera e verão, períodos quentes. Essa divisão será utilizada para facilitar a leitura dos resultados. A pesquisa considerou que a primavera começa no dia 20 de março e vai até 20 de junho, o verão começa no dia 21 de junho e vai até 22 de setembro, o outono do dia 23 de setembro a 21 de dezembro e o inverno do dia 22 de dezembro até 20 de março (Figura 38).

Figura 38 – Carta solar e planta de cobertura da Tiny House.



Fonte: Autor, 2024.

De forma geral, é desejável na fachada Sul, fachada em estudo, a proteção da radiação solar dos períodos quentes e a admissão nos períodos frios. Analisando a carta solar de Aveiro, podemos observar a incidência solar anual nas diferentes orientações das fachadas da edificação modelo. Na fachada Sul há maior incidência solar (79,69%) que na Norte (20,31%) enquanto as fachadas Leste e Oeste recebem a mesma quantidade de radiação solar (50%). Da incidência solar na fachada Sul, 50,69% é incidência nos períodos frios e 29% nos períodos quentes. Durante o solstício de verão (22 de junho), a fachada Norte recebe incidência solar somente nas primeiras horas da manhã e novamente nas horas finais do dia. Para a fachada Sul, a exposição solar no solstício de verão ocorre entre 8 e 16 horas aproximadamente. A fachada Leste recebe radiação solar, durante toda a manhã, enquanto a fachada Oeste recebe durante a tarde. No solstício de inverno (22 de dezembro), a fachada Norte não recebe radiação solar. Para a fachada Sul, a exposição solar ocorre durante todo o dia. Na fachada Leste e Oeste, a radiação é semelhante ao solstício de verão, porém, com menos horas no solstício de inverno.

Para realizar as simulações de irradiação solar, é necessário o arquivo climático no formato EPW (*EnergyPlus Weather Format*). Para a simulação termoenergética, são necessários tanto o arquivo EPW quanto o arquivo DDY (*Design Conditions in EnergyPlus Format*). Nas simulações de irradiação, os dados utilizados são de Aveiro. No entanto, para as simulações termo-energéticas, não foi encontrado o arquivo DDY específico de Aveiro. Portanto, a pesquisa utilizou os arquivos EPW e DDY da cidade mais próxima, que é Ovar, situada no distrito de Aveiro, aproximadamente 25 km de distância.

3.2 MODELAGEM E CONFIGURAÇÃO DA FACHADA ADAPTATIVA

Para esse estudo foi utilizado um sistema de sombreamento adaptativo composto por brise na janela do mezanino, localizado na fachada sul, fachada de maior incidência solar. Toda a edificação foi modelada no *software Rhinoceros v7.0*, e as simulações foram realizadas no *Grasshopper v7.0* com o componente *Ladybug v1.4.0*, com o foco nos resultados do mezanino da

edificação. A pesquisa dividiu a etapa de configuração em três fases, de acordo com a Tabela 3.

A primeira fase consiste no pré-dimensionamento desses elementos e na análise de seu comportamento em relação ao percentual de sombreamento, além da determinação de dois modelos de brises que obtiveram os melhores resultados para as próximas fases. Na segunda fase, explora-se o estudo da irradiação solar com brises na forma estática e na adaptativa utilizando-se um algoritmo de simulação computacional unicritério. A terceira fase segue uma abordagem semelhante à anterior, porém com foco no conforto térmico e eficiência energética com a utilização de um algoritmo computacional unicritério.

Tabela 3 – Fases da etapa

Fase	Nº Modelos	Angulação	Critério	Software	Algoritmo
Fase 1	4 Estáticos	$\pm 30^\circ$, testados a cada 15°	Percentual de Sombreamento	<i>SolarTools</i>	-
Fase 2	2 Estáticos	$\pm 30^\circ$ testados a cada 15°	Irradiação Solar	<i>Rhinoceros/Grasshopper/Ladybug</i>	-
	2 Cinéticos	1° a cada 1 hora			<i>Galapagos</i> (unicritério)
Fase 3	2 Estáticos	$\pm 30^\circ$, testados a cada 15°	Conforto Térmico e eficiência energética	<i>Rhinoceros/Grasshopper/Ladybug</i>	-
	2 Cinéticos	$\pm 30^\circ$, 1° a cada 1 hora			<i>Galapagos</i> (unicritério)

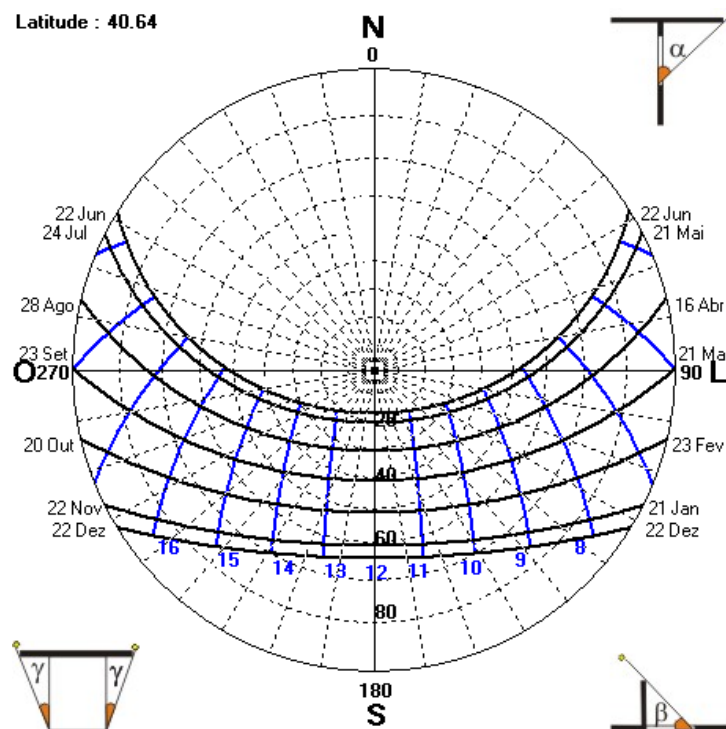
Fonte: Autor, 2024.

3.2.1 Dimensionamento dos elementos de controle solar externo – Fase 1

O pré-dimensionamento dos brises visa proteger as aberturas da incidência solar durante os períodos de maior temperatura e permitir a entrada de radiação solar nos períodos mais frios. Foi considerado que os períodos de maior temperatura vão do equinócio de primavera ao solstício de verão, enquanto os períodos mais frios vão do equinócio de outono ao solstício de inverno. Para o pré-dimensionamento foi utilizado os ângulos, alfa (α), beta (β) e

γ) que podem ser determinados através da análise da carta solar⁸ (Figura 39) durante o equinócio ao meio-dia.

Figura 39 – Carta solar



Fonte: Software SOL-AR, adaptado pelo autor, 2024.

Esses ângulos são essenciais para alcançar as dimensões ideais dos elementos de sombreamento, o ângulo α auxilia no dimensionamento dos elementos horizontais, já o ângulo β nos elementos verticais e o γ na distância que o elemento horizontal deve se estender lateralmente em relação a abertura a ser protegida. Então de acordo com a carta solar apresentada os ângulos que atendem ao critério de sombreamento são; $\alpha = 40^\circ$, $\beta = 75^\circ$ e $\gamma = 50^\circ$.

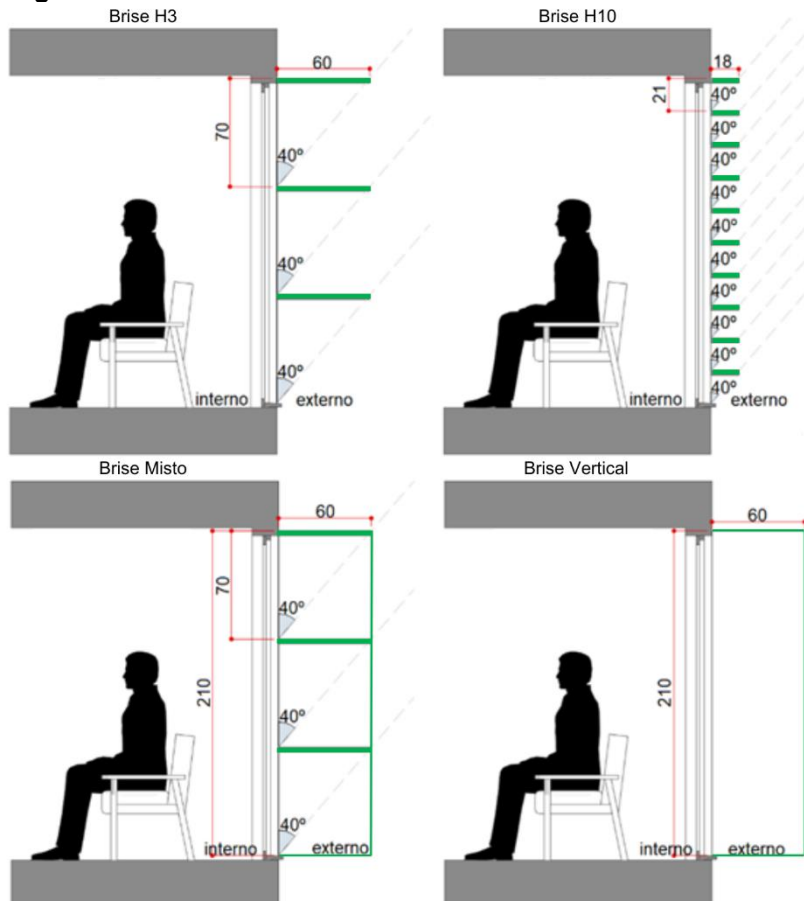
O elemento horizontal, nessas condições deveria ter um comprimento de 180 cm, que em contexto executivo sua realização é pouco viável, então para a pesquisa foi subdividido o brise horizontal em dois modelos de controle solar externos de menores dimensões.

⁸ A carta solar nada mais é que a representação gráfica da trajetória do sol ao longo do dia, em determinada localização durante o período de um ano.

Para o estudo adotou-se um brise horizontal com 3 lâminas e denominado H3 e outro com 10 lâminas, H10, com o objetivo de verificar se há influência do número de lâminas. Além disso, a pesquisa utilizou um brise vertical com duas lâminas em cada extremidade e um misto (combinação do horizontal H3 e vertical), totalizando quatro modelos de elementos de controle solar externos.

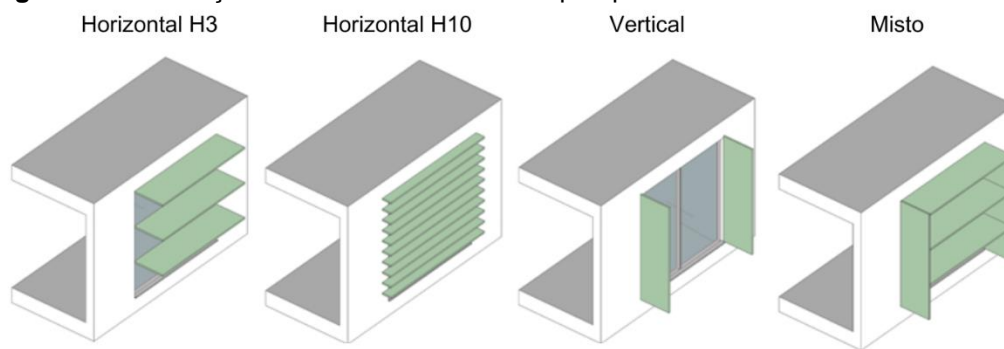
Com isso, a largura do brise H3 é de 60 cm para cada lâmina, H10 com a largura dos brises de 18 cm cada, o brise vertical com largura de 60 cm, e o misto usando as mesmas dimensões do H3 e do brise vertical, conforme Figura 40 e Figura 41.

Figura 40 - Dimensão dos brises



Fonte: Autor, 2024.

Figura 41 – Ilustração dos modelos de brise da pesquisa



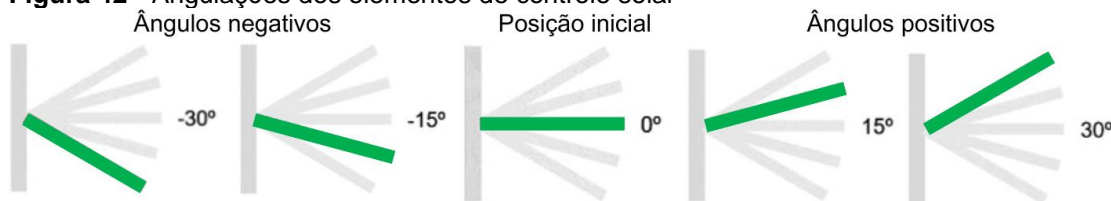
Fonte: Autor, 2024

As dimensões escolhidas para o H3 e H10, foram idealizadas para ter mais espaçamento entre os brises e conseqüentemente maior visibilidade do exterior e outra com um menor espaçamento e menor visibilidade. Embora a pesquisa não avalie a questão da visibilidade e conforto luminoso, focando apenas nas simulações de conforto térmico.

Após o pré-dimensionamento através da carta solar, as porcentagens de sombreamento mensal estimado para cada uma das geometrias selecionadas foram o critério utilizado para classificar os resultados dessa etapa.

Foi utilizado o *software Solar Tool*⁹ para realizar essa estimativa. Além disso, a pesquisa utilizou dois limites de angulações para os brises, que são -30° e $+30^\circ$, para o estudo do sombreamento, os intervalos serão a cada 15° . Essa angulação (Figura 42) foi estimada para permitir estabelecer uma análise prévia do comportamento desses elementos de controle solar ao longo do ano.

Figura 42 - Angulações dos elementos de controle solar



Fonte: Autor, 2024.

⁹ O *Solar Tool* é um software criado por Dr. Andrew Marsh que permite analisar a carta solar, máscaras de sombras e a estimativa de sombreamento de elementos de proteção solar a partir de um dimensionamento através de um modelo 3D.

3.2.2 Simulação computacional em angulações estáticas e cinéticas em relação à irradiação solar – Fase 2

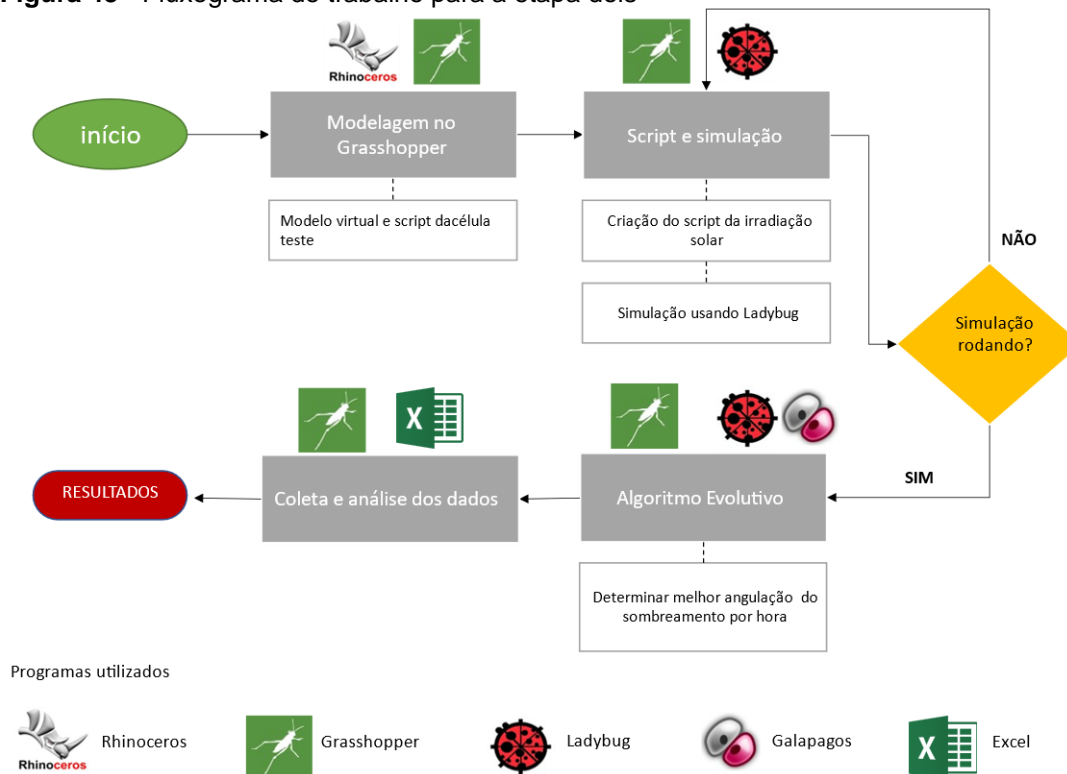
Os dois modelos que obtiveram os resultados mais promissores de acordo com a primeira fase foram utilizados para o desenvolvimento da segunda e terceira fase. A segunda fase consiste na simulação computacional para estimar qual das geometrias permitem o melhor desempenho de sombreamento, levando em consideração a irradiação solar (medida em W/m^2) no interior do mezanino da célula teste.

Para a modelagem da edificação e do sistema de brises na fachada adaptativa, foi utilizado o software *Rhinoceros v7.0*, em conjunto com o *Grasshopper v7.0* para a programação visual. Esse ambiente integrado permitiu a criação de scripts para simulações, otimizando o processo de design. Para a simulação da radiação solar, utilizou-se o plugin *Ladybug v1.4.0*, reconhecido por sua precisão e eficiência em análises ambientais.

Para a otimização do projeto, utilizou-se o componente *Galapagos*, que é uma ferramenta para otimização multicritério, embutida no *Grasshopper*. O algoritmo foi configurado para operar em modo unicritério, onde o objetivo durante os períodos frios era maximizar a captação de irradiação solar, enquanto nos períodos quentes, o foco estava em minimizar essa mesma irradiação. O *Galapagos*, sendo uma extensão nativa do *Grasshopper*, analisa de forma evolutiva os parâmetros solicitados, podendo maximizar ou minimizar a função objetivo conforme as condições estabelecidas.

O algoritmo conduziu a análise utilizando a rotação unitária das lâminas, medida em graus, dentro dos limites de $\pm 30^\circ$, ajustando-se a cada 1 hora. Isso foi feito para determinar com precisão os intervalos de angulação horária otimizada, baseando-se na função objetivo selecionada para cada período específico. A Figura 43 apresenta um detalhamento completo do fluxograma que foi utilizado nesta etapa da pesquisa, proporcionando uma visão clara do processo adotado.

Figura 43 - Fluxograma de trabalho para a etapa dois



Fonte: Autor, 2024.

Foram realizadas simulações para cada angulação (-30°, -15°, 0°, +15°, +30°) de forma estática e simulações adaptativas de grau em grau dentro do mesmo intervalo, ao todo foram 5 simulações estáticas e a para simulação adaptativa, a otimização durou 180 minutos. O APÊNDICE B apresenta os *scripts* de simulação.

3.2.3 Simulação computacional em angulações estáticas e cinéticas em relação ao conforto térmico – Fase 3

Após as análises da fase 2, a próxima etapa envolve a simulação computacional de conforto térmico. Nessa fase, serão analisados também os resultados da demanda de energia para resfriamento e aquecimento. No entanto, os parâmetros e configurações da simulação serão voltados principalmente para o conforto térmico, com a demanda energética, neste estudo, sendo uma resultante vinculada aos resultados de conforto.

A simulação computacional, utilizando o *Honeybee*, segue uma ordem de elaboração do *script* utilizando a programação visual do *Grasshopper*. Com a modelagem da edificação realizada no *Rhinoceros* é feita a vinculação do

modelo no *script* no *Grasshopper*, depois é acrescentado as informações térmicas dos elementos da edificação.

Após isso, foi criada a agenda semanal de uso e ocupação que determina os horários de acionamento, abertura e presença dos usuários no ambiente, é nessa etapa que se vincula às cargas internas para cada tipo de agenda. Com isso, os próximos parâmetros são os de acionamento da ventilação natural e aquecimento e resfriamento artificial.

A faixa de temperatura de acionamento é denominada de *setpoint*. O *setpoint* da ventilação natural, para o aquecimento e resfriamento é a temperatura interna, que funcionam da seguinte maneira: quando a temperatura interna estiver dentro dos limites estabelecidos, a simulação considera a janela aberta (permitindo a ventilação natural), quando ultrapassado o limite de temperatura, a janela é fechada e a simulação avalia se aciona o *setpoint* de aquecimento ou resfriamento.

Essas temperaturas são adotadas de acordo com a faixa de temperatura operativa¹⁰ do conforto térmico utilizado. Na presente pesquisa, é adicionado uma etapa extra que é a modelagem dos elementos de sombreamento, que por serem alterados ao longo das simulações, foi realizado sua vinculação junto ao modelo posteriormente (utilizando um componente próprio do *Honeybee* para esses casos).

Por fim, utiliza-se outro componente para iniciar as simulações, cujo requisitos são o modelo, arquivos climáticos e os parâmetros de simulação, o *script* com todos os componentes utilizados estão dispostos no APÊNDICE B.

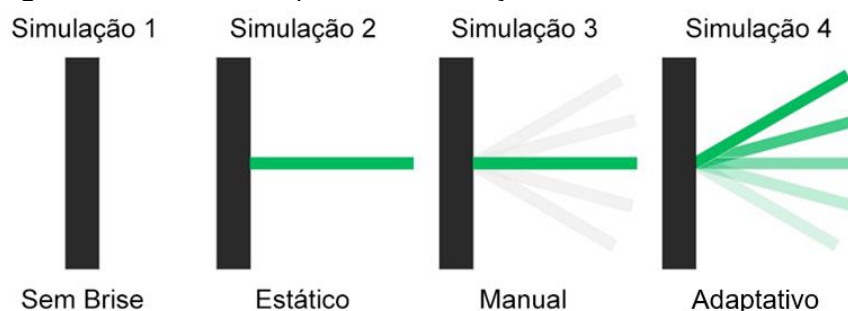
Nessa etapa, foram realizadas quatro simulações, a primeira sem nenhum sistema de sombreamento, chamado de “Sem Brise”, a segunda com os elementos de sombreamento estáticos na posição inicial (0°), denominado “Estático”. A terceira com o sombreamento nas posições -30°, -15°, 0°, +15° e +30°, sendo simulado de forma horária, essa simulação, porém, como

¹⁰ É uma medida do conforto térmico que combina a temperatura do ar e a radiação térmica média de superfícies circundantes, refletindo a sensação térmica real experimentada pelos ocupantes de um ambiente.

o intuito foi simular um possível comportamento de um usuário com o acionamento manual do dispositivo, foi utilizado o termo “Manual” justamente para contrastar com a próxima simulação.

A quarta simulação teve em consideração o movimento do elemento de controle solar variando ao longo do ano de forma automatizada, através do algoritmo evolutivo que ajusta os parâmetros de angulação, nos mesmos intervalos de $\pm 30^\circ$ (a análise de grau em grau a cada 1 hora), com a função objetivo de maximizar o conforto térmico, denominado “Adaptativo” (Figura 44).

Figura 44 – Desenho esquemático simulações da Fase 3



Fonte: Autor, 2024.

Foi utilizada a norma europeia EN 16798 (*Energy performance of buildings*) para definição dos parâmetros, uso e ocupação, conforme Tabela 4 que apresenta as agendas de uso e ocupação diária no ambiente simulado que considera duas pessoas.

Tabela 4 – Agendas de Ocupação e Uso

	Hora																													
Agendas	00h	01h	02h	03h	04h	05h	06h	07h	08h	09h	10h	11h	12h	13h	14h	15h	16h	17h	18h	19h	20h	21h	22h	23h						
Ocupação	100%						50%						100%						50%											
Iluminação	100%						50%						100%						50%											
Equipamento	100%						50%						100%						50%											
Legenda	100%		50%		0%																									

Fonte: Autor, adaptado de EN16798, 2024.

Os parâmetros de iluminação e equipamentos da célula teste, com exceção da temperatura do conforto térmico adaptativo, que foi fixada na faixa de 20°C a 26°C, estão dispostos na Tabela 5.

A faixa de temperatura para o conforto térmico adotada foi fixada nesses valores para permitir uma melhor visualização da contribuição dos elementos de sombreamento no conforto térmico.

Tabela 5 - Parâmetros utilizados no algoritmo de simulação

Conforto Térmico	
Temperatura Operativa (T_o)	$20^{\circ}\text{C} \leq T_o \leq 26^{\circ}\text{C}$
Ventilação Natural	
Faixa de Abertura	$20^{\circ}\text{C} \leq T_{EXT} \leq 26^{\circ}\text{C}$ $20^{\circ}\text{C} \leq T_{INT} \leq 26^{\circ}\text{C}$
Setpoint Aquecimento/Resfriamento	
Resfriamento Acionamento	$T_o > 26^{\circ}\text{C}$
Aquecimento Acionamento	$T_o < 20^{\circ}\text{C}$
Infiltração	
0,0003 m ³ /s por m ² de fachada	
Ocupação	
Usuário	5 W/m ²
Fração Radiante	0,30
Iluminação	
Iluminação	6,37 W/m ²
Fração Radiante	0,32
Fração Visível	0,23
Equipamentos	
Potência (W)	12 W/m ²
Fração radiante	0,30

T_{EXT} = Temperatura Externa T_{INT} = Temperatura Externa

Fonte: Autor, adaptada EN16798, 2024.

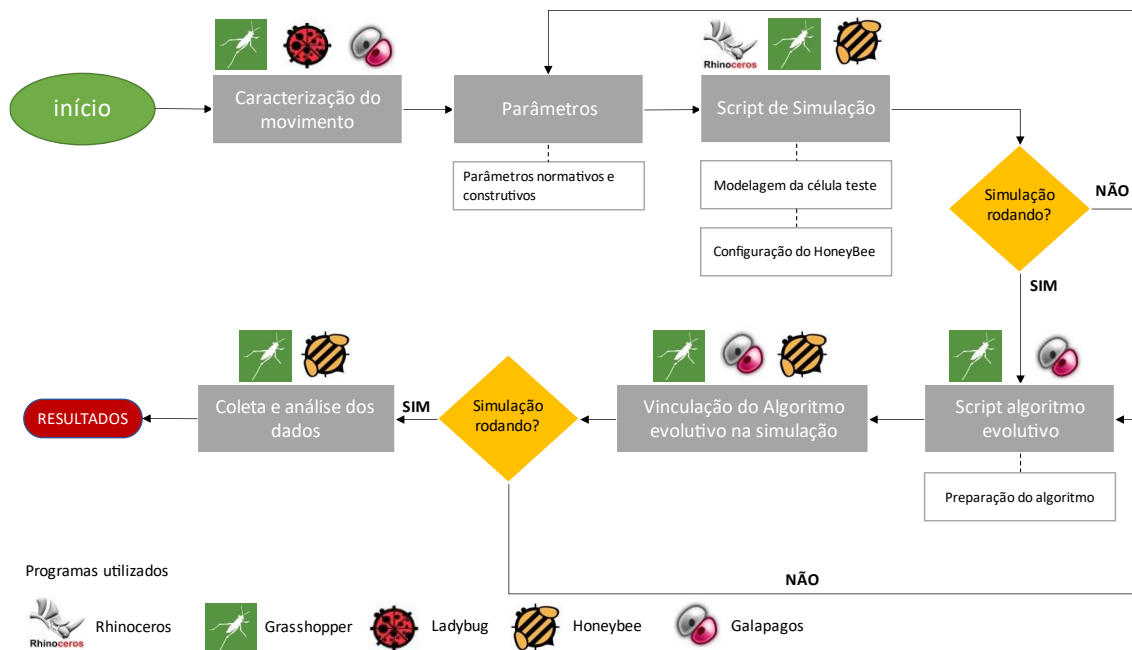
Esses parâmetros dispostos nas tabelas apresentadas não serão alterados nas simulações realizadas, apenas as angulações dos brises serão mudadas.

Conforme a etapa anterior, para a modelagem da edificação e do sistema de brises para a fachada adaptativa foi utilizado o *software Rhinoceros v7.0*, para programação visual o *Grasshopper v7.0*, e para o *script* de simulação termoenergética, utilizou-se o *Ladybug v1.4.0*. Nessa etapa também foi utilizado o *Honeybee v1.4.0* e o algoritmo unicritério com o *plugin Galapagos*. Para a pesquisa, a função objetivo é otimizar as condições de conforto térmico interno (temperatura interna) a partir da angulação dos elementos de proteção solar na simulação termo energética.

As duas fases anteriores serviram como base para auxiliar na otimização dos elementos de sombreamento, ou seja, foi possível compreender inicialmente como cada intervalo dos ângulos são mais ou menos eficientes ao longo do ano. Isso permitiu uma otimização dos limites impostos às variáveis, traduzindo-se numa otimização dos recursos computacionais (realizar simulações, testes e afins) na fase 3. Diante disso, diminui o intervalo dos ângulos que o algoritmo evolutivo avaliou para otimizar a angulação horária, tornando o tempo de análise menor e mais assertivo.

Todos os passos para realização da terceira etapa podem ser analisados pelo fluxograma de trabalho da Figura 45.

Figura 45 - Fluxograma de trabalho etapa três



Fonte: Autor, 2024.

4 RESULTADOS

Os resultados da pesquisa estão divididos de acordo com cada fase. A fase 1 apresenta a porcentagem média de sombreamento dos elementos de proteção solar. A fase 2 exibe a irradiação solar (W/m^2) para cada ângulo de funcionamento dos brises e os resultados da otimização por meio do algoritmo evolutivo. Por fim, a fase 3 apresenta a simulação de conforto térmico para cada ângulo, detalhando os níveis de conforto em porcentagem, nomeadamente desconforto por calor, desconforto por frio, demanda de resfriamento (kWh/m^2) e demanda de aquecimento (kWh/m^2).

4.1 PORCENTAGEM MÉDIA DE SOMBREAMENTO DOS ELEMENTOS DE PROTEÇÃO SOLAR – FASE 1

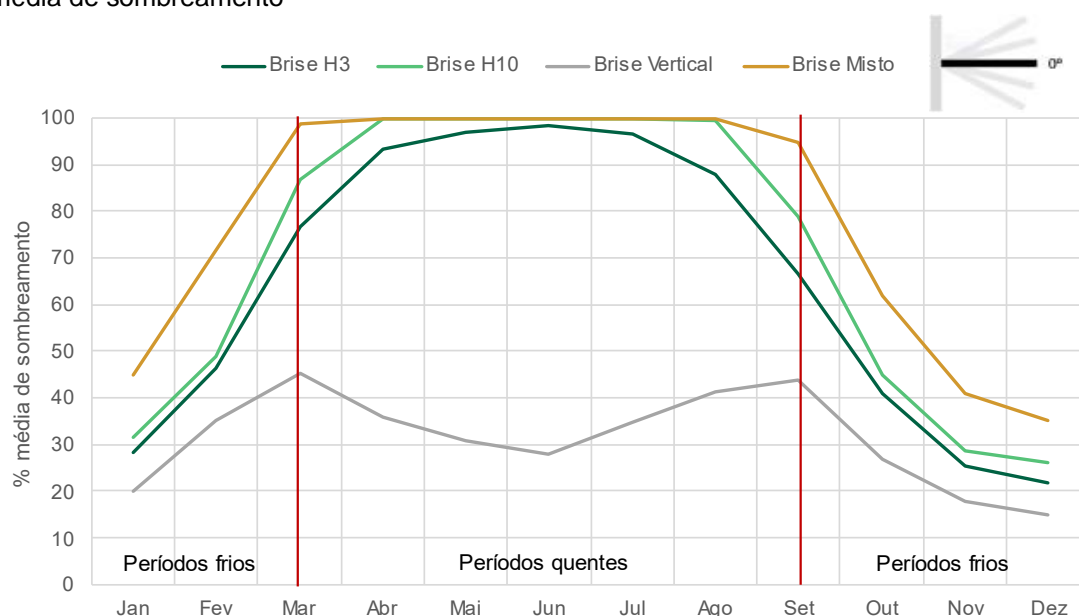
Após o dimensionamento, com o auxílio do programa *Solar Tool* foi analisado como cada tipo de brise sombreia o interior do mezanino (1º andar). A análise abrange todos os meses do ano, apresentando os resultados em forma de porcentagem média. As angulações dos brises nesta fase são estáticas.

Para análise desses resultados, foi estipulado dois períodos do ano, os frios e os quentes. Os períodos frios contemplam as estações de outono e inverno, onde seu objetivo é obter mais incidência de radiação solar e menos sombreamento. O outono é compreendido entre o dia 23 de setembro a 21 de dezembro e o inverno do dia 22 de dezembro até 20 de março.

Para os períodos quentes, as estações são a primavera e o verão, onde o objetivo é alcançar o maior sombreamento, a primavera começa no dia 20 de março e vai até 20 de junho e o verão começa no dia 21 de junho e vai até 22 de setembro.

A Figura 46 mostra a comparação da porcentagem média de sombreamento mensal de cada tipologia de brise adotada.

Figura 46 - Comparação entre os Brises para posicionamento com um ângulo 0°: porcentagem média de sombreamento



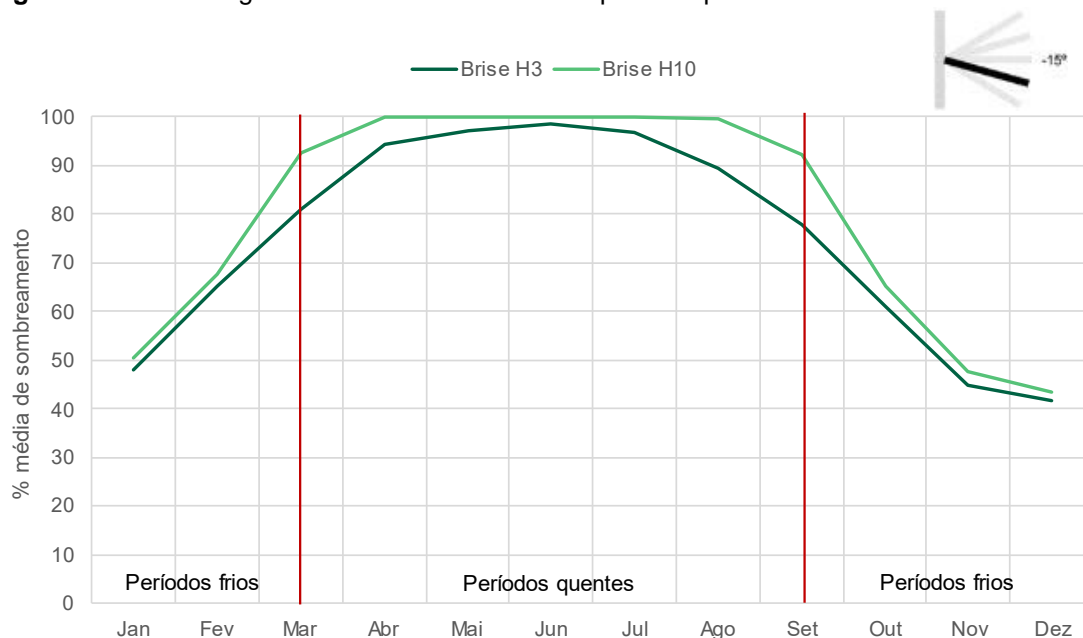
Fonte: Autor, 2024.

Observa-se que o brise misto apresenta uma porcentagem de sombreamento superior às demais tipologias em todos os meses do ano. Porém, esse resultado tem mais influência do brise horizontal, pois, ao analisar comparativamente com o resultado do brise vertical nos períodos quentes, pode-se observar que o percentual de sombreamento é inferior, com um máximo de 45% de sombreamento, já para os brises horizontais o sombreamento máximo é de 100%.

Além disso, o brise misto apresenta um sombreamento maior nos períodos frios, com intervalos de 35% a 97% e os brises horizontais, com 15% a 88%. Então a pesquisa utilizou nas etapas seguintes o brise horizontal com três lâminas (H3) e o brise horizontal com dez lâminas (H10), pois ambos apresentam resultados semelhantes e com melhores resultados de acordo com cada período em relação ao brise misto e vertical.

A Figura 47 a Figura 50 apresentam os resultados de cada angulação das duas tipologias adotadas.

Figura 47 - Porcentagem média de sombreamento por mês para o Brise H3 e H10 a -15°



Fonte: Autor, 2024.

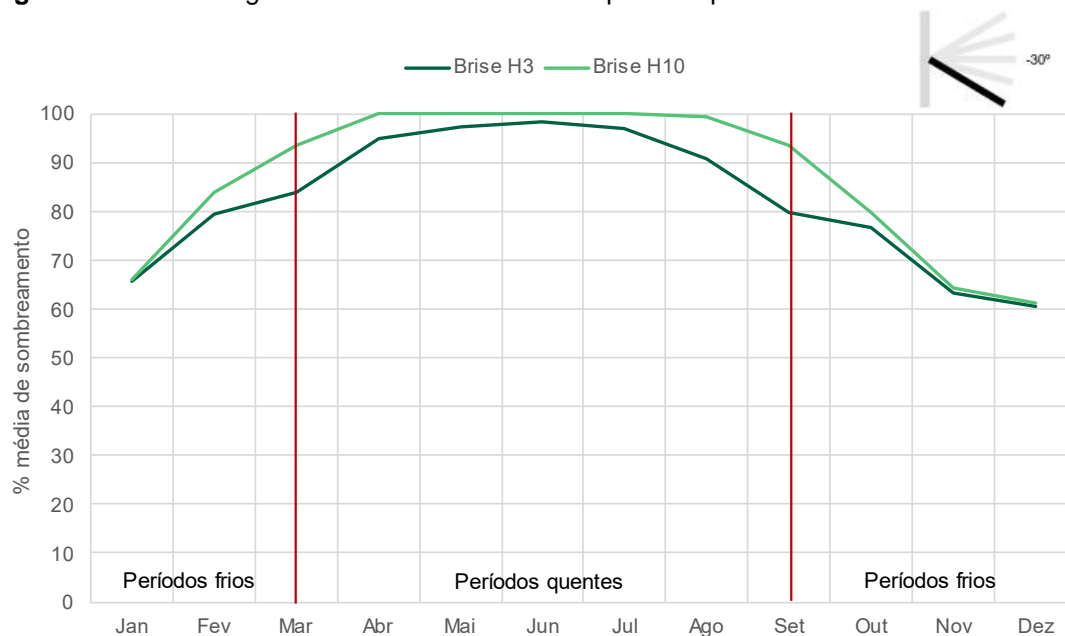
É possível observar que, na angulação de -15° , os resultados nos períodos frios apresentam valores próximos, com as maiores diferenças ocorrendo nos períodos quentes e nas meias estações.

Desta forma, nos períodos frios, para o brise H3, o sombreamento varia de 41% a 80%, enquanto que para os brises H10, o sombreamento varia de 43% a 93%. Nos períodos quentes, os brises H3 proporcionam sombreamento de 80% a 98%, enquanto os brises H10 variam de 93% a 100%.

Analisando os resultados para cada período, observa-se que os brises H3 sombreiam até 13% menos que os H10 nos períodos frios, e os brises H10 sombreiam até 13% mais que os H3 nos períodos quentes.

Comparando com os resultados dos brises a 0° , as porcentagens de sombreamento nos períodos frios são maiores em todos os meses com a angulação a -15° . Nos períodos frios, o menor sombreamento a 0° para o brise H3 é de 23% e para o H10 é de 28%. Já para o ângulo de -15° , o menor sombreamento com H3 é de 41% e com H10 é de 43%, representando uma diferença de até 18% para o H3 e 15% para o H10.

Figura 48 – Porcentagem média de sombreamento por mês para o Brise H3 e H10 a -30°



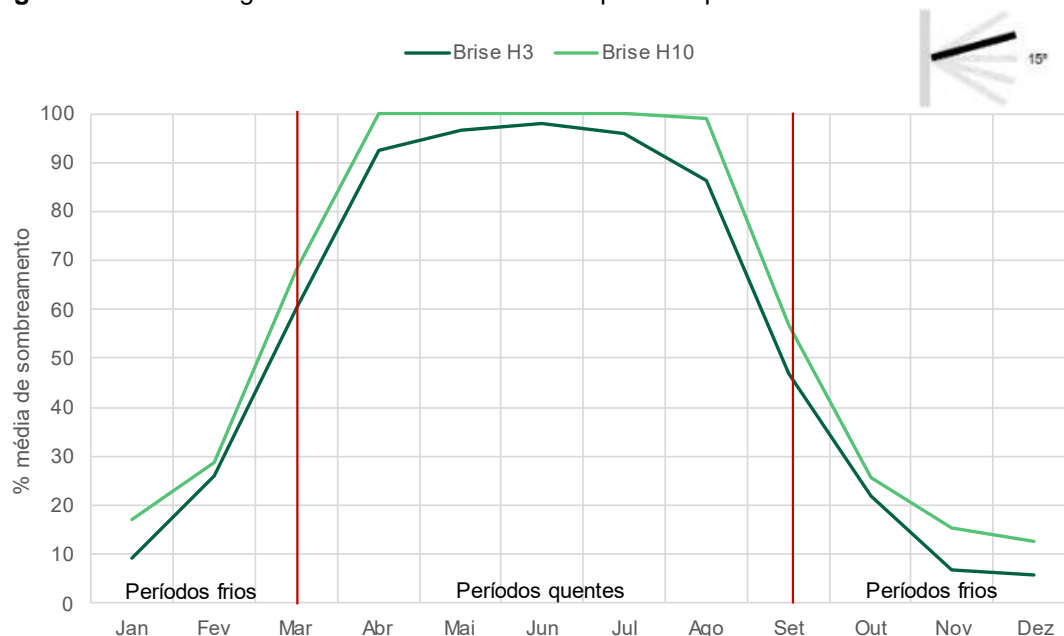
Fonte: Autor, 2024.

Os brises na angulação de -30° apresentam um sombreamento elevado nos períodos frios, com o brise H3 variando de 60% a 82% e H10 de 62% a 95%. A mesma observação é feita nos períodos quentes, onde os resultados de sombreamento são elevados, o brise H3 varia de 82% a 98% e o brise H10 de 95% a 100%.

De maneira semelhante aos brises a -15° , nota-se que para os brises a -30° nos períodos frios, o brise H3 sobrepõem até 13% menos que o H10, e nos períodos quentes os brises H10 sobrepõem em até 13% mais que os brises H3.

Em comparação com os resultados dos brises no ângulo de 0° , a porcentagem de sombreamento nos períodos frios é maior em todos os meses. A diferença do menor sombreamento a -30° comparado com 0° nos períodos frios com o brise H3 é de 37% e com o H10 de 34%. Uma vez mais, verifica-se também uma maior diferença de sombreamento entre ambas as soluções para as estações intermédias.

Figura 49 - Porcentagem média de sombreamento por mês para o Brise H3 e H10 a +15°



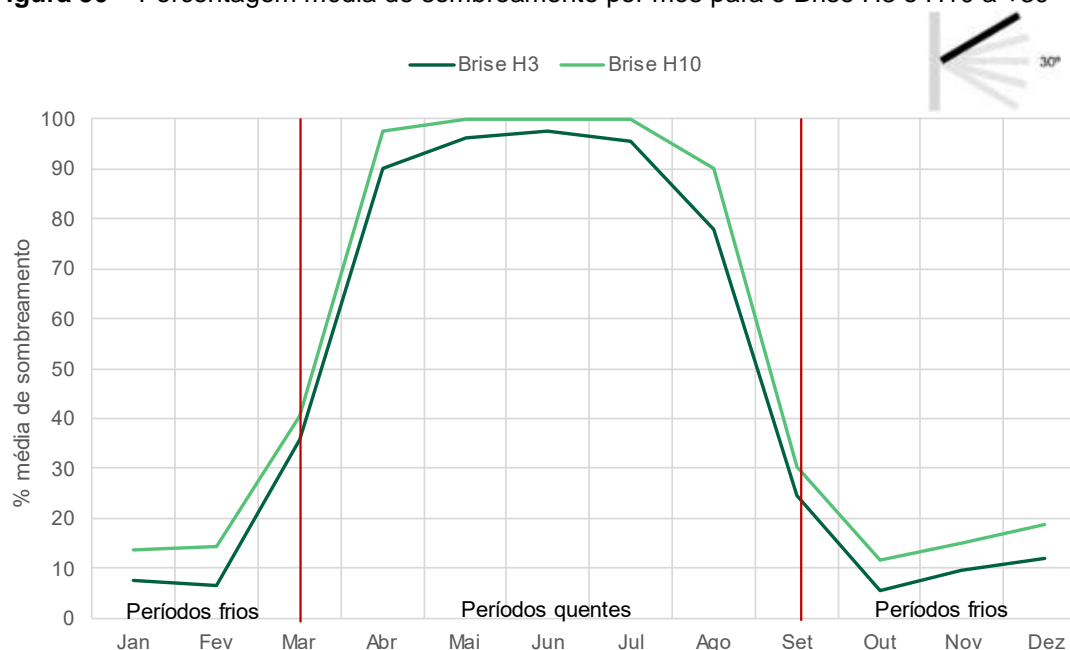
Fonte: Autor, 2024.

Nas angulações positivas, os brises a +15°, nos períodos frios podem alcançar com o brise H3 porcentagens de sombreamento que variam de 8% a 60% e de 12% a 68% com os brises H10. Nos períodos quentes, o H3 varia de 46% a 98% e H10 de 55% a 100%.

É possível observar que o ângulo +15° apresenta resultados de sombreamento menor nos períodos frios, já nos períodos quentes o intervalo é maior em comparação com o ângulo a -15°.

Quando se comparam os resultados do brise a -15° com os resultados dos brises a 0°, observa-se que, nos períodos frios, os brises a -15° sombreiam até 17% menos quando comparados com H3 e H10. Nos períodos quentes, o valor máximo de sombreamento é praticamente igual para ambos, atingindo 98% com H3 e 100% com H10. Entretanto, o valor inicial do intervalo apresenta diferenças notáveis. Com os brises a -15°, o H3 começa com 46% de sombreamento e o H10 com 55%, enquanto que com os brises a 0°, o H3 inicia com 77% e o H10 com 85%. Essas variações são importantes para entender o comportamento dos diferentes ângulos ao longo dos períodos analisados.

Figura 50 – Porcentagem média de sombreamento por mês para o Brise H3 e H10 a +30°



Fonte: Autor, 2024

O sombreamento dos brises com angulação +30° nos períodos frios variam de 8% a 38% com o H3 e com o H10 de 12% a 40%. Nos períodos quentes, os brises H3 variam de 38% a 98% e os brises H10 de 40% a 100%. Estes resultados são semelhantes aos dos brises na posição de +15°, onde a diferença está no limite máximo de sombreamento, os brises a +30° é 22% menos para o H3 e 28% menos com H10 em comparação com o ângulo +15°.

O resultado do percentual médio de sombreamento dos brises em cada um dos ângulos (Tabela 6). Nos períodos quentes, nota-se que a maior média de sombreamento é do brise H10 com 98% frente a 92% do H3, ambos a -30°. Nos períodos frios a menor média de sombreamento é do H3 com 15% e o H10 20%, ambos a +30°.

Tabela 6 – Percentual médio de sombreamento

Ângulo	Períodos Quentes		Períodos Frios	
	H3	H10	H3	H10
-30	92%	98%	73%	77%
-15	91%	97%	59%	66%
0	88%	95%	44%	50%
15	82%	90%	25%	32%
30	75%	80%	15%	20%
Legenda	Maior sombreamento		Menor sombreamento	

Fonte: Autor, 2024.

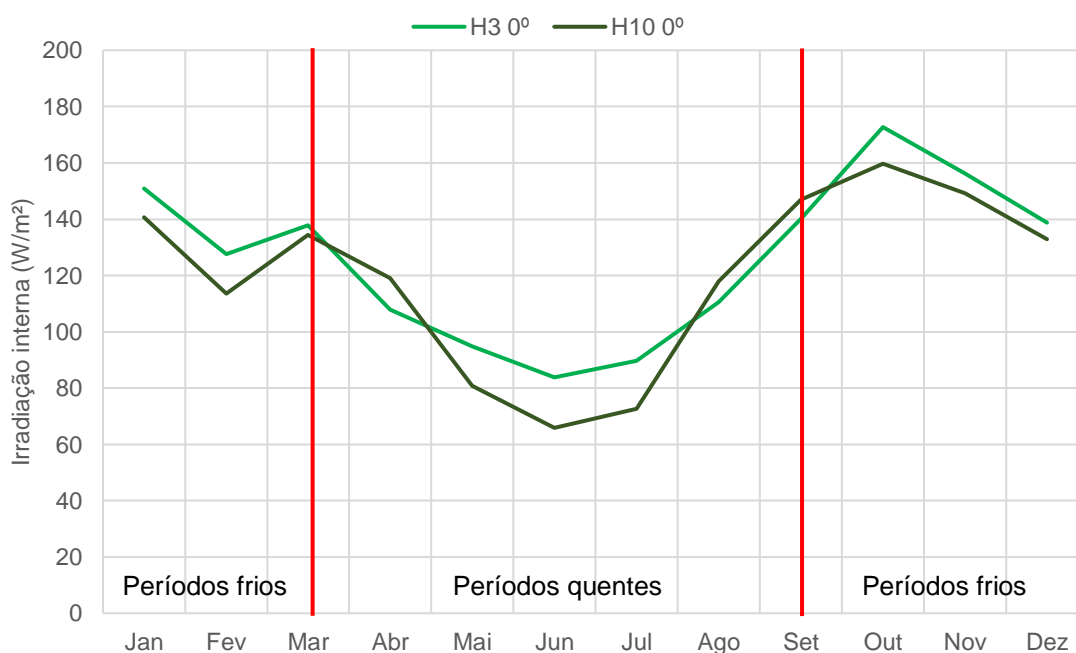
4.2 IRRADIAÇÃO SOLAR – FASE 2

Os modelos considerados para a segunda etapa foram o brise H3 e H10. Para entender melhor como cada elemento se comporta ao estimar a quantidade de irradiação, foi utilizado o ambiente superior da edificação, para então comparar os resultados da primeira etapa.

Assim como a análise dos diferentes cenários de sombreamentos, nos resultados da irradiação foi utilizado o mesmo conceito dos períodos frios e períodos quentes. O objetivo do período frio é alcançar os maiores valor de irradiação solar, já no período quente, o objetivo é o menor valor de irradiação solar.

As simulações consistiram em modelos estáticos com as angulações a 30°, -15°, 0°, +15° e +30° para o ano todo, durante o período diurno (6h00 às 18h59). A Figura 51 a Figura 55 apresentam os dados da simulação da irradiação no interior do mezanino sob influência dos brises para cada mês. Os resultados estão expressos em W/m².

Figura 51- Irradiação interna no mezanino durante o ano a 0°.

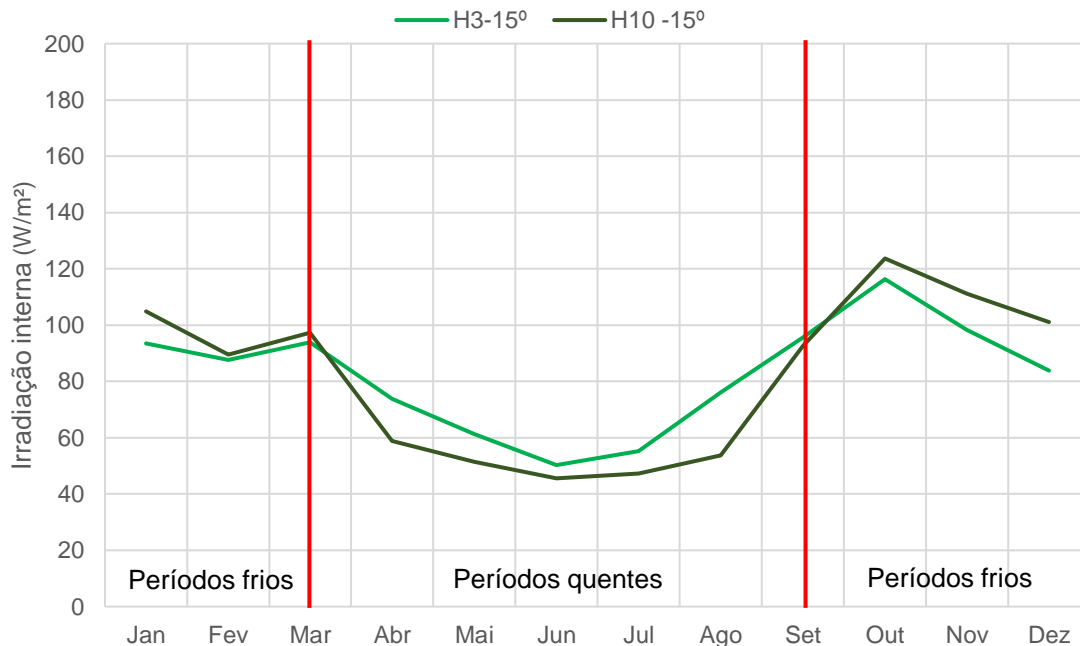


Fonte: Autor, 2024

A irradiação dos brises a 0° nos períodos frios possuem um intervalo de irradiação solar que variam de 127 W/m² a 172 W/m² para o H3 e de

113 W/m² a 160 W/m² com o H10. Nos períodos quentes, os brises H3 variam de 83 W/m² a 140 W/m² e o H10 de 65 W/m² a 146 W/m².

Figura 52 - Irradiação interna no mezanino durante o ano a -15°.



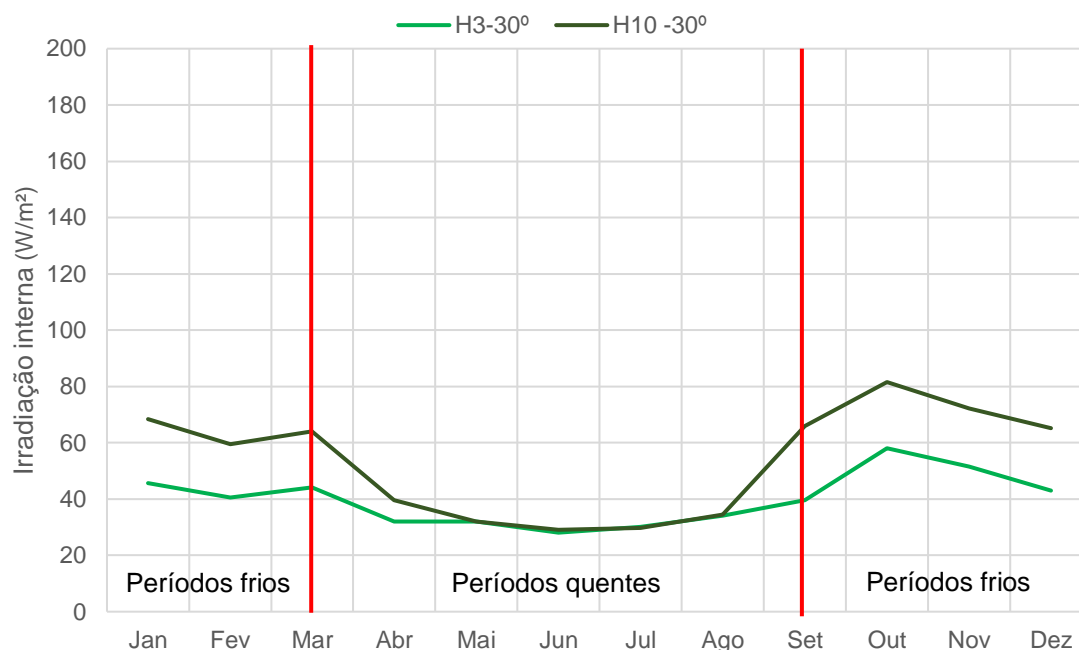
Fonte: Autor, 2024

Na angulação a -15°, os brises H3 possuem um intervalo de irradiação nos períodos frios de 83 W/m² a 116 W/m² e os brises H10 de 89 W/m² a 124 W/m². Nos períodos quentes, o H3 apresenta valores que variam de 50 W/m² a 95 W/m² e com o H10 de 45 W/m² a 92 W/m².

As diferenças entre os brises na angulação -15° são próximas, onde, nos períodos frios os valores de irradiação do H10 é 1,07 vezes maior que os brises H3 e a irradiação nos períodos quentes do H3 é 1,06 vezes maior que o H10.

Em comparação com os brises a 0° com os brises a -15°, o H3 é de 1,5 vezes maior nos períodos frios e o H10 de 1,28 vezes maior. Nos períodos quentes, o brise H3 é de 1,56 vezes maior e com o H10 de 1,52 vezes maior quando comparado aos resultados dos ângulos a 0° com os de -15°. Isso indica que há uma redução dos valores de irradiação que atinge o interior do edifício com os brises a -15° de 33,44% para o H3 e 21,98% para o H10 nos períodos frios e 34,98% com o H3 e 35,07% com o H10 nos períodos quentes.

Figura 53 - Irradiação interna no mezanino durante o ano a -30° .



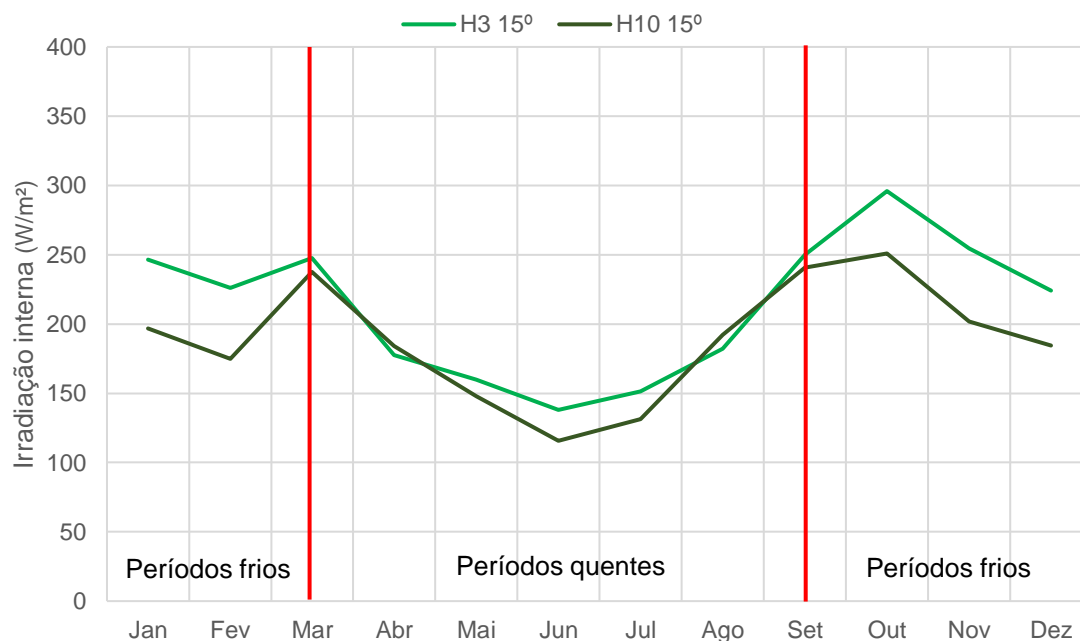
Fonte: Autor, 2024

O intervalo de irradiação dos brises H3 e H10 a -30° variam para os períodos frios de 40 W/m^2 a 58 W/m^2 com o H3 e de 59 W/m^2 a 81 W/m^2 com o H10. Nos períodos quentes, o H3 varia de 29 W/m^2 a 44 W/m^2 e o H10 de 29 W/m^2 a 65 W/m^2 .

Nota-se que o valor da irradiação para o H3 a -15° é cerca de 2,03 vezes maior nos períodos frios do que no ângulo a -30° e o H10 é 1,52 vezes maior, na mesma comparação. Nos períodos quentes, o H3 é 1,99 vezes maior e o H10 é 1,46 maior. Isso representa uma redução dos valores da irradiação que atinge o interior do edifício com os brises a -30° de 50,75% para o H3 e 34,27% para o H10 nos períodos frios, e 49,65% e 31,39% nos períodos quentes para o H3 e H10 respectivamente.

Quando comparado os resultados da irradiação com os brises na posição 0° , os brises a -30° apresentam uma redução de até 67,22% para o H3 e 48,72% com o H10 nos períodos frios e redução de 67,26% com o H3 e 55,45% para o H10 nos períodos quentes.

Figura 54 - Irradiação interna no mezanino durante o ano a +15°.



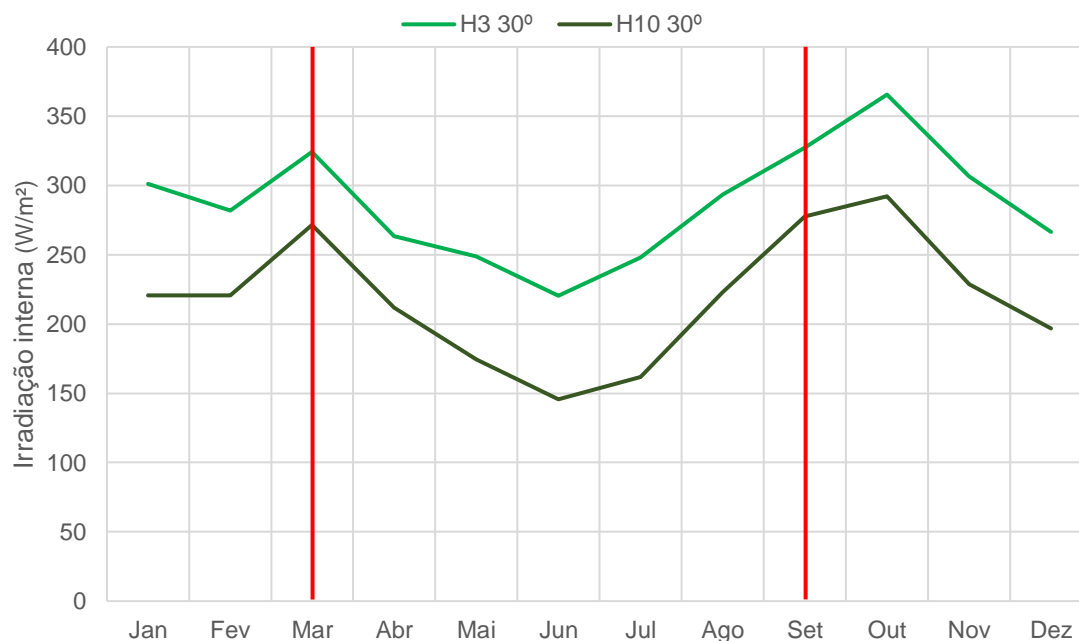
Fonte: Autor, 2024

Na angulação a -15°, os brises H3 possuem um intervalo de irradiação, para os períodos frios de 224 W/m² a 295 W/m² e os brises H10 de 176 W/m² a 250 W/m². Nos períodos quentes, os resultados da irradiação do H3 variam de 138 W/m² a 246 W/m² e os resultados do H10 de 115 W/m² a 240 W/m².

Ao comparar os resultados dos brises a +15° com os brises a 0° é possível observar que há um aumento nos valores da irradiação, o H3 aumenta cerca de 73,58% e o H10 aumenta 56,04% nos períodos frios e para os períodos quentes, o H3 aumenta 40,66% e H10 68,25%.

Não obstante, analisando os resultados dos brises a -15° em relação aos resultados dos brises com ângulo de +15°, pode-se verificar que para os períodos frios o H3 a +15° é cerca de 2,61 vezes maior que o H3 a -15° nesse período e o H10 a +15° é 1,80 vezes maior. Nos períodos quentes, o H3 é 2,94 vezes maior e o H10 1,71 vezes maior. Isso quer dizer que, nessa comparação, os brises a +15° aumentam 160,80% a irradiação com o H3 e 80,28% com o H10, nos períodos frios e 193,79% com o H3 e 71,53% com o H10 nos períodos quentes.

Figura 55 - Irradiação interna no mezanino durante o ano a +30°.



Fonte: Autor, 2024

Os resultados da irradiação dos brises na angulação -30° indicam uma variação de 266 W/m² a 365 W/m² com o H3 e 196 W/m² a 292 W/m² com o H10 nos períodos frios e nos períodos quentes, o H3 varia de 220 W/m² a 327 W/m² e o H10 de 145 W/m² a 277 W/m².

Quando se compara os resultados da irradiação dos brises a -30° com os resultados a +30° verifica-se que para os períodos frios a irradiação do brise H3 a +30° é cerca de 6,44 vezes maior e o H10 é 3,49 vezes, ambos para os períodos frios. Já nos períodos quentes, o H3 é 7,49 vezes maior e o H10 4,49 vezes.

É possível observar que há uma relação entre a irradiação solar com os ângulos dos brises, ou seja, durante todos os meses os ângulos negativos são os que apresentam os menores valores de irradiação correspondentemente, e os ângulos positivos possuem os maiores valores de irradiação.

A Tabela 7 apresenta o resultado médio da irradiação dos brises para cada ângulo. Nos períodos quentes, nota-se que a menor média é do brise H3 com 34,31 W/m² contra 42,11 W/m² do H10 ambos a -30°, e nos períodos

frios, a maior média é do brise H3 com 317,75 W/m² e o H10 251,98 W/m², ambos a +30°.

Tabela 7 – Irradiação média solar nos brises H3 e H10

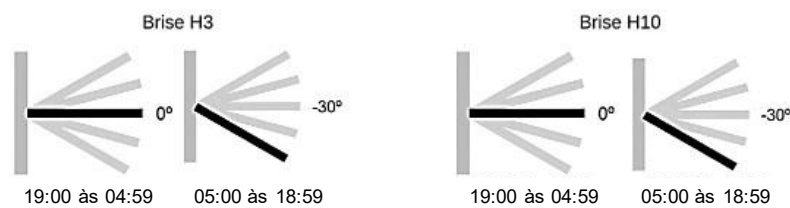
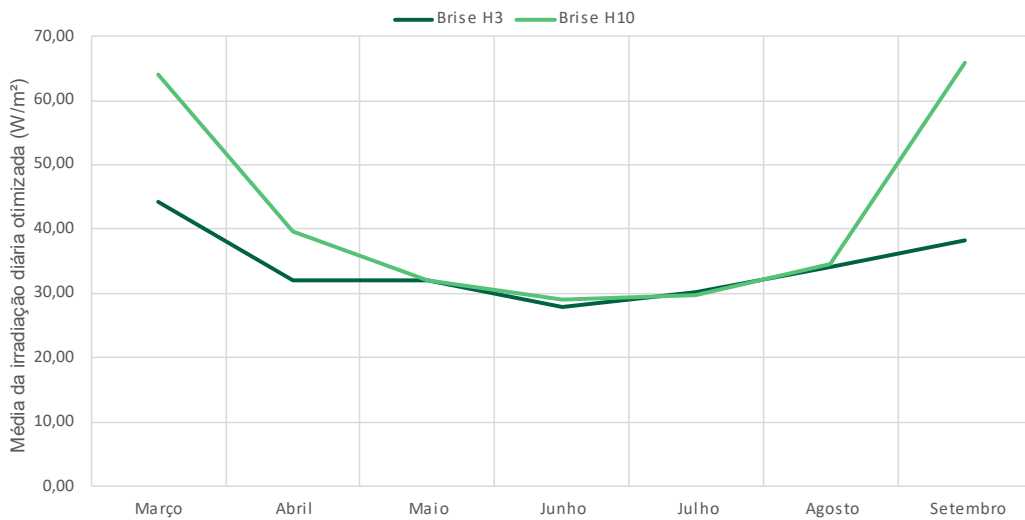
Ângulo	Períodos quentes		Períodos frios	
	H3 W/m ²	H10 W/m ²	H3 W/m ²	H10 W/m ²
-30	34,31	42,11	46,57	68,58
-15	72,31	63,80	97,52	112,94
0	109,23	105,38	147,56	140,76
+15	186,68	175,50	253,45	217,05
+30	275,10	209,46	317,75	251,98
Legenda	maior irradiação		menor irradiação	

Fonte: Autor, 2024.

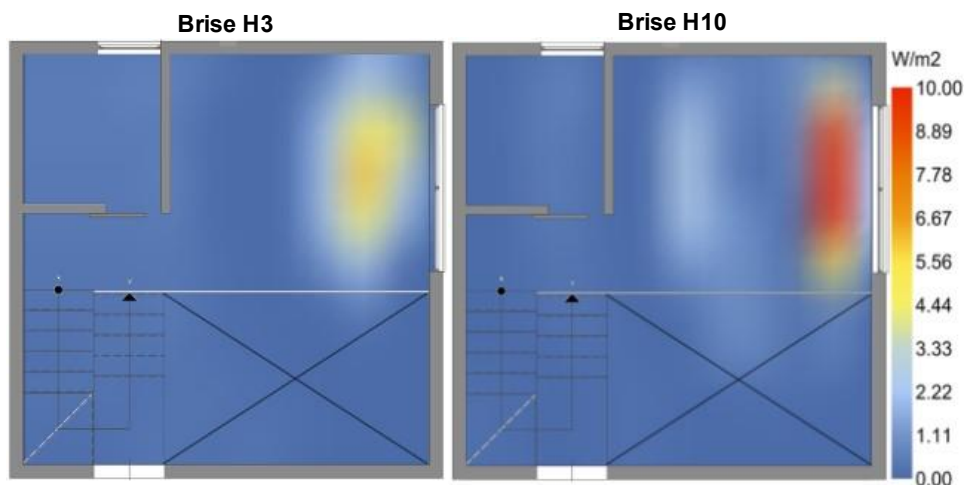
4.2.1 Otimização com algoritmo evolutivo uni-critério

Com o entendimento de como os elementos de sombreamento se comportaram em diferentes angulações, a utilização do algoritmo evolutivo unicritério visa sintetizar uma análise de otimização que identifica quais são os intervalos angulares mais eficazes para o movimento dos elementos de sombreamento durante todas as horas de sol ao longo do ano. Essa análise considerou tanto os períodos da manhã, das 6h às 12h59, quanto os períodos da tarde, das 13h às 18h59, garantindo uma cobertura abrangente das variações diurnas. O intervalo analisado foi de grau em grau, variando de -30° até +30°, permitindo uma precisão detalhada na identificação das melhores angulações. É necessário estipular quais são os intervalos ideais para que a função objetivo possa maximizar ou minimizar os resultados desejados. Para os períodos quentes, o algoritmo buscou minimizar a irradiação solar no interior da célula teste (Figura 56) enquanto para os períodos frios, a função objetivo foi maximizar a irradiação solar (Figura 57). As figuras a seguir ilustram claramente as angulações que o elemento da fachada deve adotar para se manter sempre otimizado, do ponto de vista da irradiação solar, e a energia solar incidente dentro do ambiente superior da célula teste, oferecendo uma visão detalhada dos padrões de desempenho ao longo do ano.

Figura 56 – Ângulos dos brises H3 e H10 otimizados – períodos quentes



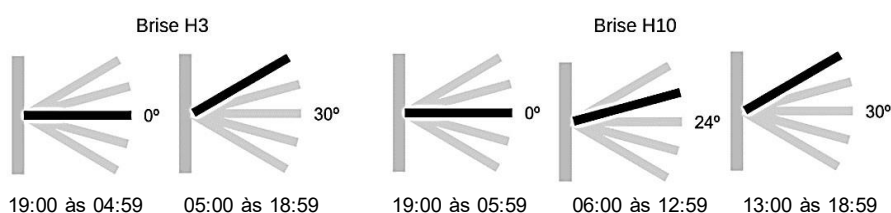
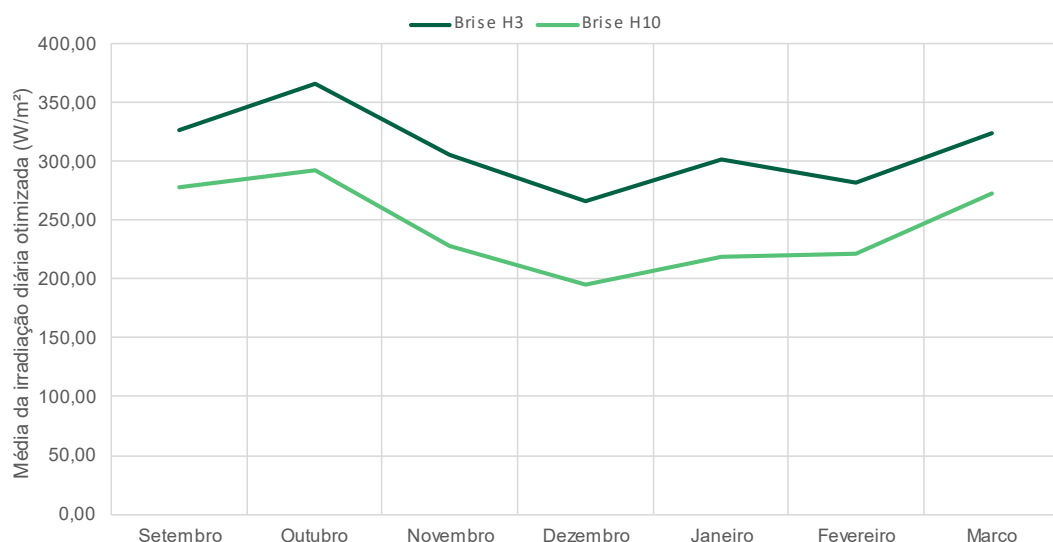
Irradiação média no interior do ambiente



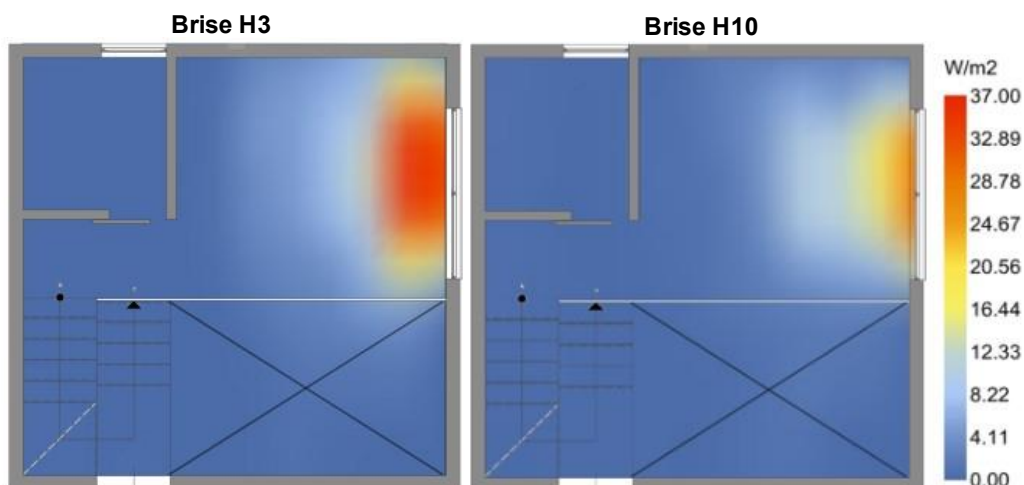
Fonte: Autor, 2024.

De acordo com o que é apresentado na Figura 56 os brises possuem resultados próximos durante os meses de maio a agosto, sendo basicamente iguais quando se tem o objetivo de minimizar a irradiação. Pode-se ver que no início e final do período o brise H3 apresenta resultados mais interessantes que o H10, ou seja, permite menos irradiação solar no ambiente. Ambos os brises durante todo o intervalo estão otimizados com ângulo de -30° .

Figura 57 - Ângulos dos brises H3 e H10 otimizados –períodos frios.



Irradiação média no interior do ambiente



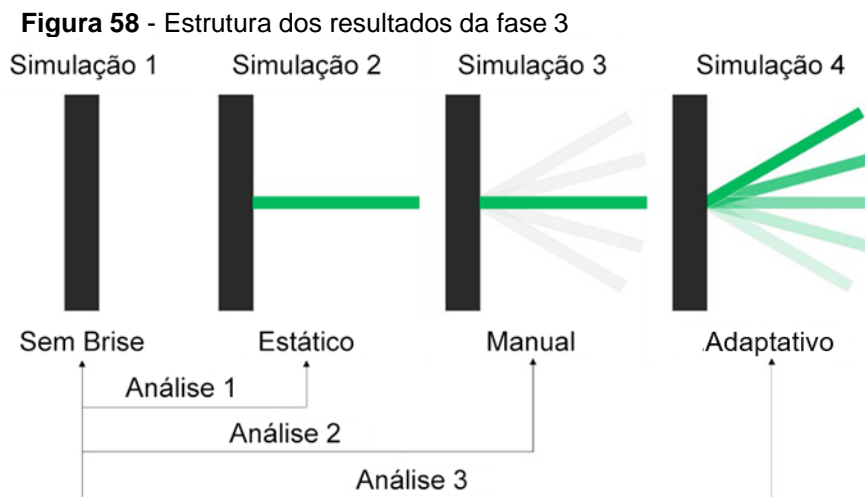
Fonte: Autor, 2024.

É possível observar que ao longo do dia, o brise H10 adota angulações diferentes (24° e 30°), onde é obtido o resultado mais otimizado. Diferente do que observado na figura anterior, o brise H3 permite maior irradiação do que o brise H10. Os resultados sugerem que os extremos das angulações nem sempre representam as configurações ideais. No entanto, não foram observadas diferenças significativas entre os ângulos, como por exemplo, entre 24° e 30°. Contudo, em termos de otimização e potencial automação, essa

análise por hora é valiosa para ajustar os elementos adaptativos. Não obstante, o uso do algoritmo evolutivo reforçou a observação que para essa pesquisa, ângulos negativos são mais ideais para as estações mais quentes e os ângulos positivos são mais ideais para as estações mais frias, quando se estuda a irradiação solar considerando as circunstâncias dessa pesquisa.

4.3 SIMULAÇÃO TERMOENERGÉTICA – FASE 3

Como observado nos resultados anteriores, será verificado se no conforto térmico há a relação entre os ângulos. Foram realizadas 3 análises (Figura 58), todas são uma comparação sem o sistema de sombreamento com a adoção dos brises, sendo a primeira análise com os brises na posição inicial (0°), a segunda nos ângulos -30° , -15° , $+15^\circ$ e $+30^\circ$ e a terceira utilizando o algoritmo evolutivo com a angulação variando de grau em grau, de hora em hora.



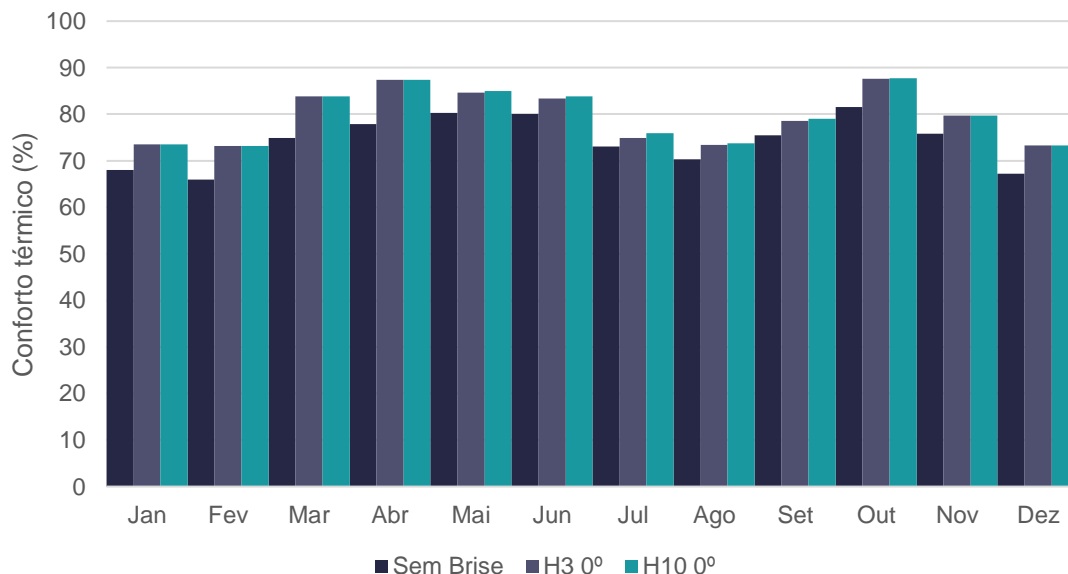
Fonte: Autor, 2024.

4.3.1 Análise 1: Sem brises x Brises H3 e H10 na posição inicial

As primeiras simulações (simulação 1 e 2) são para comparar quais são as mudanças no conforto térmico e na demanda de energia de aquecimento e resfriamento ao adotar o sistema de brises. A Figura 59, a seguir ilustra a comparação da porcentagem de conforto térmico (calculada a partir da quantidade de horas que a temperatura operativa permanece no intervalo de

20°C a 26°C) do ambiente superior sem o sistema de brises e com o brise H3 e H10 na posição inicial (de forma estática).

Figura 59 – Conforto Térmico sem Brise e com Brises H3 e H10 a 0°



Fonte: Autor, 2024.

Os brises a 0° apresentaram um aumento de conforto térmico em todos os meses do ano em comparação com os resultados sem o sistema de sombreamento. Os resultados dos brises H3 e H10 são próximos entre si e em alguns casos apresentam os mesmos ganhos. A Tabela 8 apresenta os ganhos de porcentagem do conforto térmico dos brises H3 e H10 a 0°.

Tabela 8 - Comparação no aumento de conforto térmico dos Brises H3 e H10 a 0°

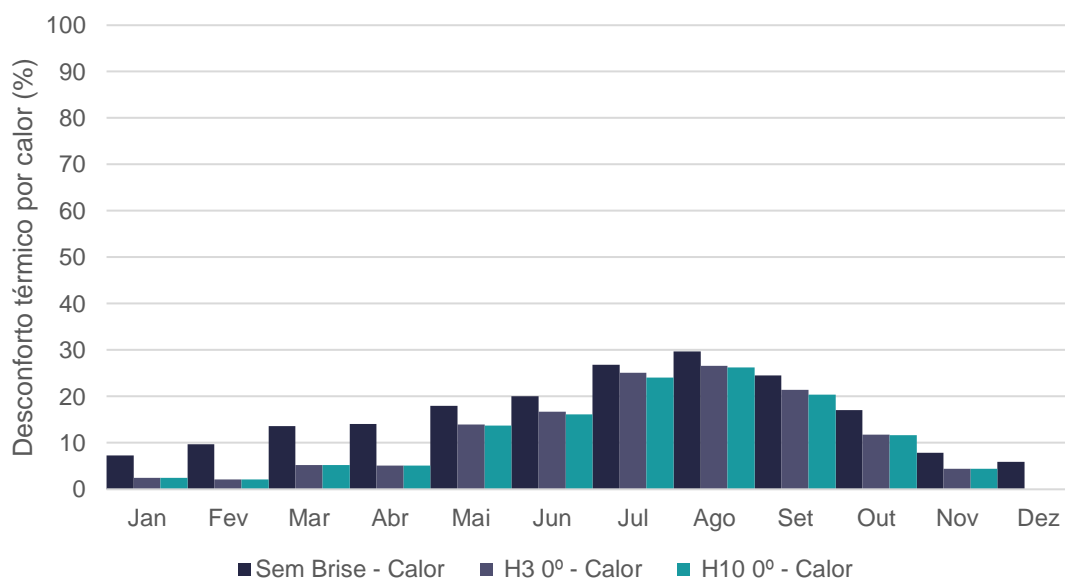
Meses	H3	H10
Jan	+5,51%	+5,51%
Fev	+7,29%	+7,29%
Mar	+9,01%	+9,01%
Abr	+9,45%	+9,45%
Mai	+4,44%	+4,70%
Jun	+3,33%	+3,89%
Jul	+1,75%	+2,82%
Ago	+3,10%	+3,50%
Set	+3,19%	+3,61%
Out	+6,05%	+6,19%
Nov	+3,89%	+3,89%
Dez	+6,05%	+6,05%
Média	+5,26%	+5,49%

Fonte: Autor, 2024.

O mês de abril apresentou o maior aumento, de 9,45% para ambos os brises e o mês de julho, o menor aumento, de 1,75% para o H3 e 2,82% para o H10

O desconforto térmico por calor foi obtido pelos dados do número de horas em que a temperatura operativa se encontra acima do limite de conforto, que para a pesquisa foi para valores acima de 26°C. O gráfico da Figura 60 apresenta os níveis de desconforto térmico por calor da edificação sem os brises e com os brises a 0°. É possível verificar que há reduções em todos os meses no mezanino da célula teste ao comparar os resultados do sistema sem sombreamento.

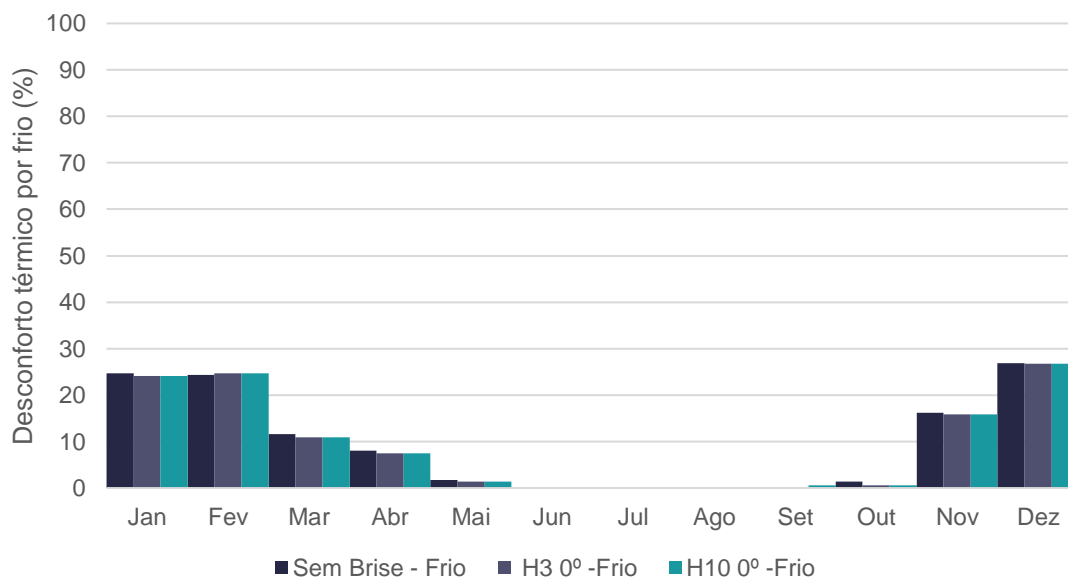
Figura 60 – Desconforto térmico por calor, sem brise e com os brises H3 e H10 a 0°



Fonte: Autor, 2024.

Embora os brises sejam dimensionados para controle de sobreaquecimento, foi também avaliada a sua influência no conforto térmico para a estação de aquecimento. Nesta, verificou-se que há desconforto térmico por frio maior nos meses de janeiro, fevereiro, novembro e dezembro. Assim como o desconforto por calor, o desconforto por frio é contabilizado para a quantidade de horas em que a temperatura operativa se encontra abaixo do limite de conforto, isto é, abaixo de 20°C. As reduções do desconforto térmico por frio pouco expressivas ao adotar os brises H3 e H10 a 0°. A Figura 61 apresenta as porcentagens de desconforto por frio longo do ano.

Figura 61 - Desconforto térmico por frio, sem brise e com os brise H3 e H10 a 0°



Fonte: Autor, 2024.

As diferenças no desconforto térmico por calor e frio comparados com o cenário sem brise estão dispostas na Tabela 9. Onde os valores negativos representam uma redução no desconforto térmico e valores positivos um aumento. Percebe-se que predominou a redução do desconforto térmico em praticamente todos os casos, e que os casos com aumentos foram pouco significativos (inferiores a 1%)

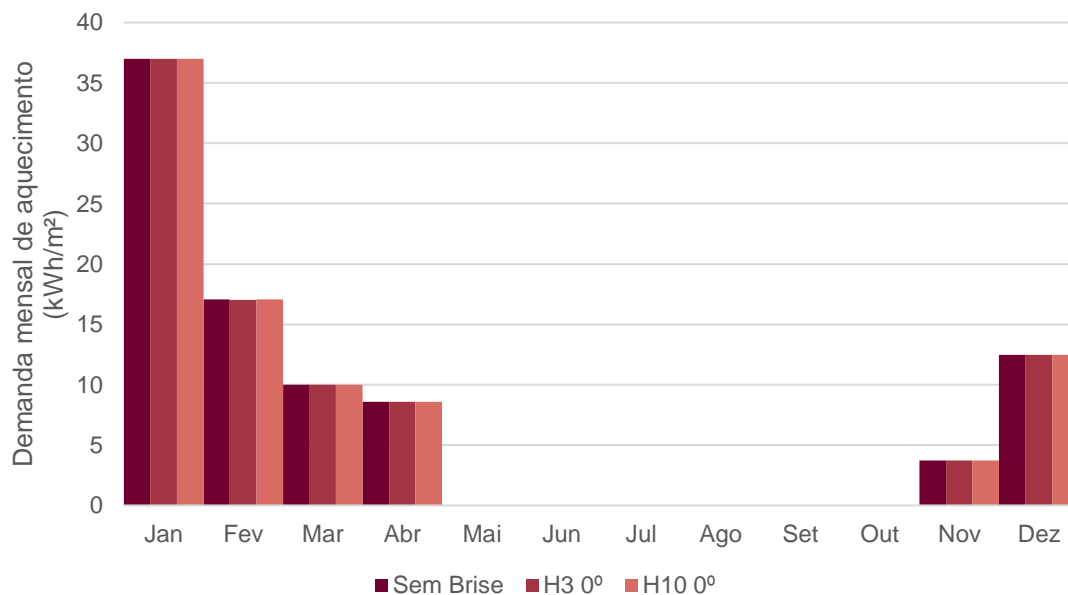
Tabela 9 - Diferença no desconforto térmico por calor e frio dos Brises H3 e H10 a 0°

Meses	Por calor		Por frio	
	H3	H10	H3	H10
Jan	-4,84%	-4,84%	-0,67%	-0,67%
Fev	-7,62%	-7,61%	0,33%	0,32%
Mar	-8,33%	-8,33%	-0,68%	-0,68%
Abr	-8,89%	-8,89%	-0,56%	-0,56%
Mai	-4,02%	-4,30%	-0,42%	-0,40%
Jun	-3,33%	-3,89%	-	-
Jul	-1,75%	-2,82%	-	-
Ago	-3,10%	-3,50%	-	-
Set	-3,19%	-4,21%	-	0,60%
Out	-5,24%	-5,38%	-0,81%	-0,81%
Nov	-3,48%	-3,48%	-0,41%	-0,41%
Dez	-5,91%	-5,91%	-0,14%	-0,14%
Média	-4,98%	-5,26%	-0,28%	-0,23%

Fonte: Autor, 2024.

Na demanda de energia para aquecimento (Figura 62) é observado que não há diferenças significativas entre o uso dos brises para a redução da demanda de energia de aquecimento, mas, houve melhora no conforto térmico.

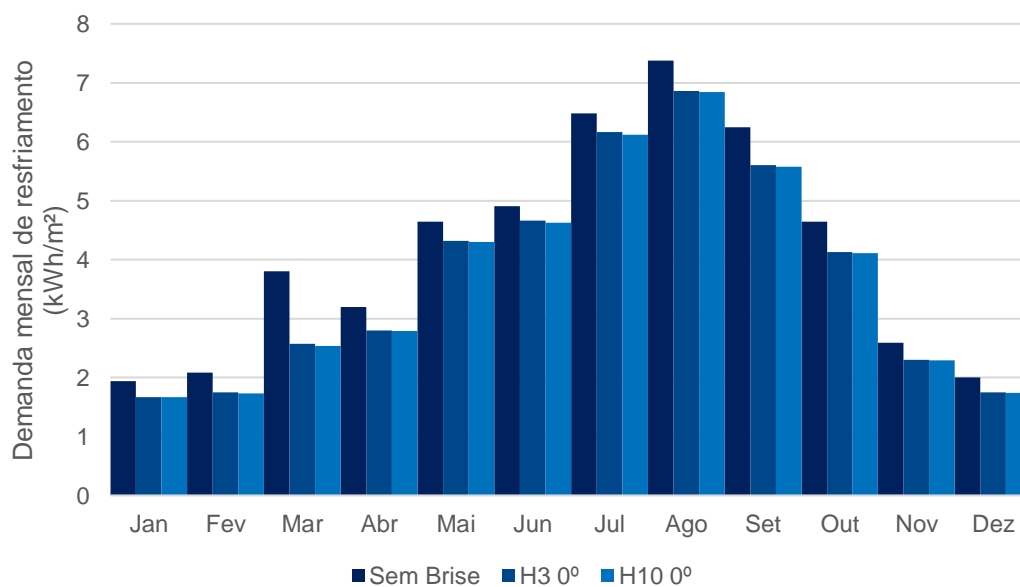
Figura 62 - Energia de aquecimento necessária mensal - sem brise e brises H3 e H10 a 0°



Fonte: Autor, 2024.

Na demanda de energia para resfriamento (Figura 63) é possível observar que houve uma diminuição na demanda ao utilizar um sistema de sombreamento.

Figura 63 - Energia de resfriamento necessária mensal – Sem brise e brises H3 e H10 a 0°



Fonte: Autor, 2024.

A Tabela 10 apresenta os resultados de aquecimento e resfriamento dos brises H3 e H10 a 0°, comparados com os resultados obtidos sem o sistema de sombreamento. Os resultados positivos representam um aumento na demanda e os resultados negativos uma redução na demanda. Ao analisar a tabela, não houve resultados com alterações consideráveis para o aquecimento, os brises não afetaram a demanda, resultado que já esperado. Para o resfriamento, os brises permitiram uma redução considerável na demanda em todos os meses do ano entre 4,94% e 33,16%, com redução média anual de 11,98% para o Brise H3 e de 12,45% para o Brise H10. Ou seja, no quesito resfriamento, o sistema de sombreamento tem alguma influência significativa na redução da demanda de energia.

Tabela 10 - Comparação na demanda de energia brise H3 e H10 a 0°

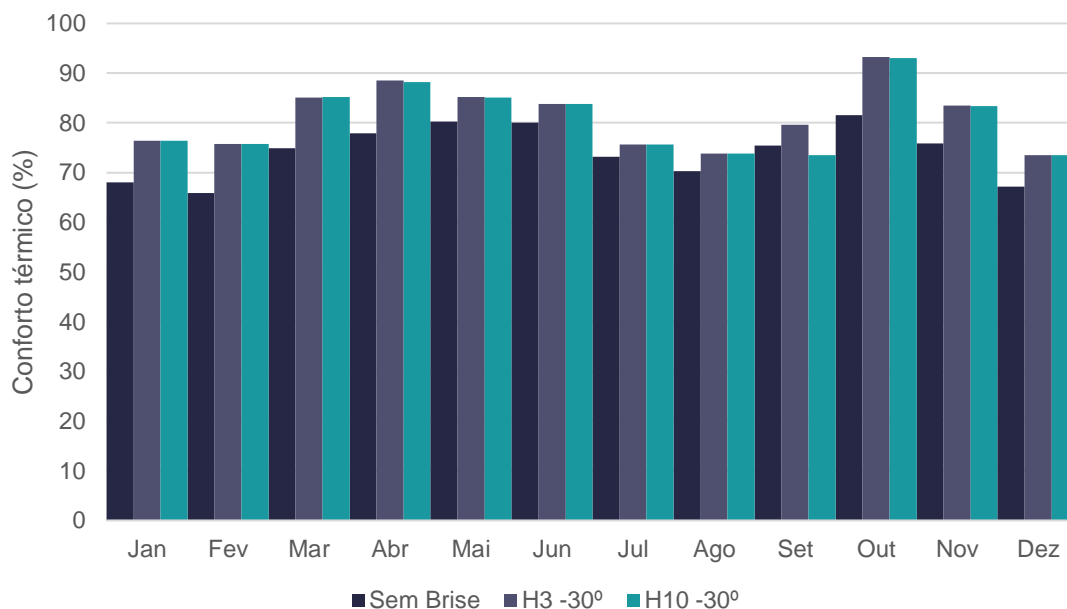
Meses	Aquecimento		Resfriamento	
	H3	H10	H3	H10
Jan	-	-	-13,92%	-13,92%
Fev	-0,06%	-	-15,87%	-16,83%
Mar	-	-	-32,37%	-33,16%
Abr	-	-	-12,50%	-12,81%
Mai	-	-	-6,90%	-7,33%
Jun	-	-	-5,09%	-5,70%
Jul	-	-	-4,94%	-5,56%
Ago	-	-	-7,05%	-7,32%
Set	-	-	-10,40%	-10,72%
Out	-	-	-10,99%	-11,42%
Nov	-	-	-11,20%	-11,58%
Dez	-	-	-12,50%	-13,00%
Média	-0,01%	-	-11,98%	-12,45%

Fonte: Autor, 2024.

4.3.2 Análise 2: Sem brises x Brises H3 e H10 a -30°, -15°, +15° e +30°.

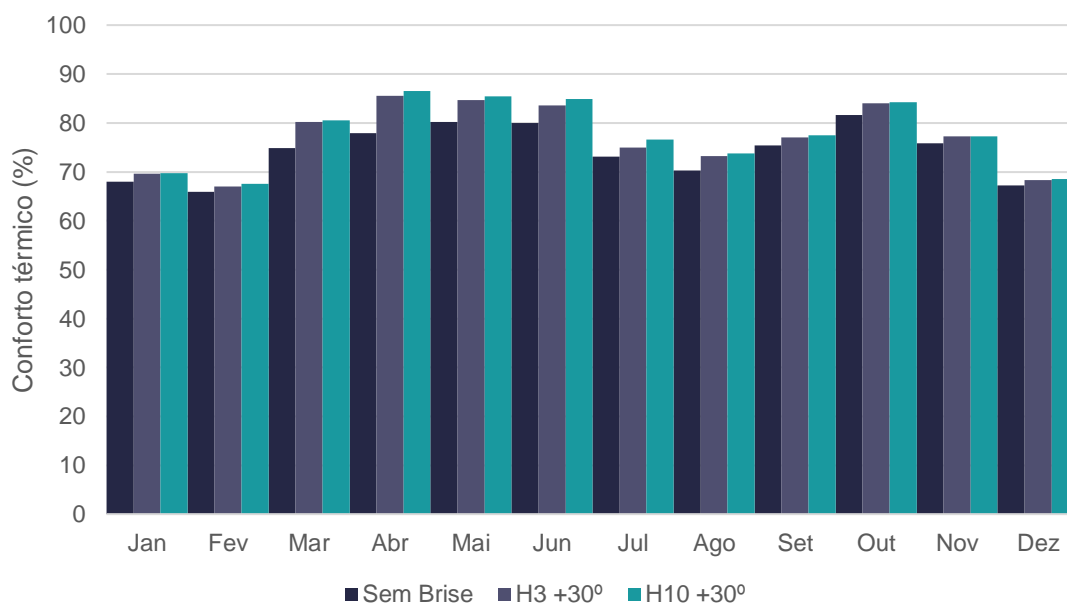
Os próximos resultados são das simulações 1 e 3 (Figura 58), considerando os brises H3 e H10 em angulações estáticas (-30° a +30°, variando a cada 15°). Nessa análise será verificado se também há uma relação entre os ângulos e o conforto térmico. A Figura 64, apresenta os resultados nos ângulos -30° e a Figura 65 o ângulo de +30°.

Figura 64 - Conforto Térmico sem Brise e com os Brises H3 e H10 na angulação -30°



Fonte: Autor, 2024.

Figura 65 - Conforto Térmico sem Brise e com os Brises H3 e H10 na angulação $+30^\circ$



Fonte: Autor, 2024.

Ao adotar os brises nas angulações de -30° e $+30^\circ$, observa-se um aumento no conforto térmico ao longo do ano. Também é observado que para o conforto térmico, não há relação de angulação para os períodos frios e quentes como observado nas fases anteriores de sombreamento e irradiação.

Os brises a -30° apresentam os maiores aumentos de conforto do que os brises a $+30^\circ$, pois, durante os períodos frios (setembro a março), o

aumento médio nesse período é de 8,31% com o brise H3 a -30° e H10 é de 7,40%, para o ângulo $+30^\circ$, o aumento do H3 é de 2,08% e H10 de 2,36%. Nos períodos quentes (março a setembro) o conforto térmico com o H3 a -30° aumenta 5,67% e 4,75% com o H10, na angulação $+30^\circ$, o aumento é de 3,17% para o H3 e 4,77% para o H10.

Analisando os resultados da Tabela 11, é possível verificar que ambos os brises apresentando praticamente os mesmos resultados.

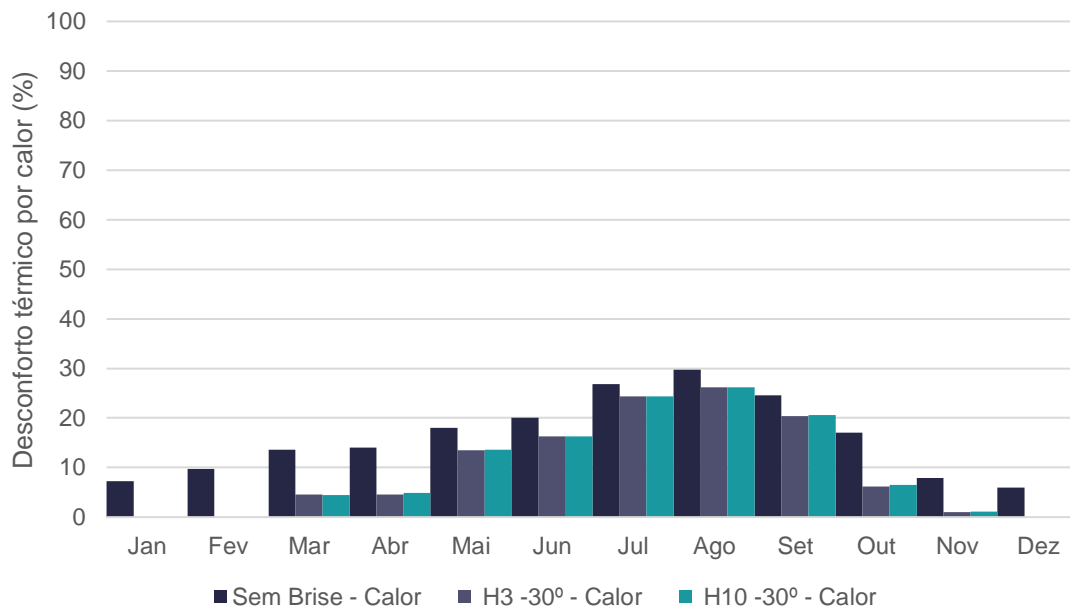
Tabela 11 - Comparação no aumento de conforto térmico do Brise H3 e H10 a -30° e $+30^\circ$.

Meses	Conforto térmico			
	Angulação: -30°		Angulação: $+30^\circ$	
	H3	H10	H3	H10
Jan	+8,33%	+8,33%	+1,61%	+1,75%
Fev	+9,82%	+9,82%	+1,04%	+1,64%
Mar	+10,22%	+10,36%	+5,38%	+5,65%
Abr	+10,56%	+10,28%	+7,65%	+8,62%
Mai	+4,97%	+4,84%	+4,44%	+5,24%
Jun	+3,75%	+3,75%	+3,61%	+4,86%
Jul	+2,55%	+2,55%	+1,88%	+3,49%
Ago	+3,50%	+3,50%	+2,96%	+3,50%
Set	+4,16%	-1,98%	+1,66%	+2,08%
Out	+11,70%	+11,43%	+2,42%	+2,69%
Nov	+7,64%	+7,50%	+1,39%	+1,39%
Dez	+6,32%	+6,32%	+1,08%	+1,35%
Média	+6,96%	+6,39%	+2,93%	+3,52%

Fonte: Autor, 2024.

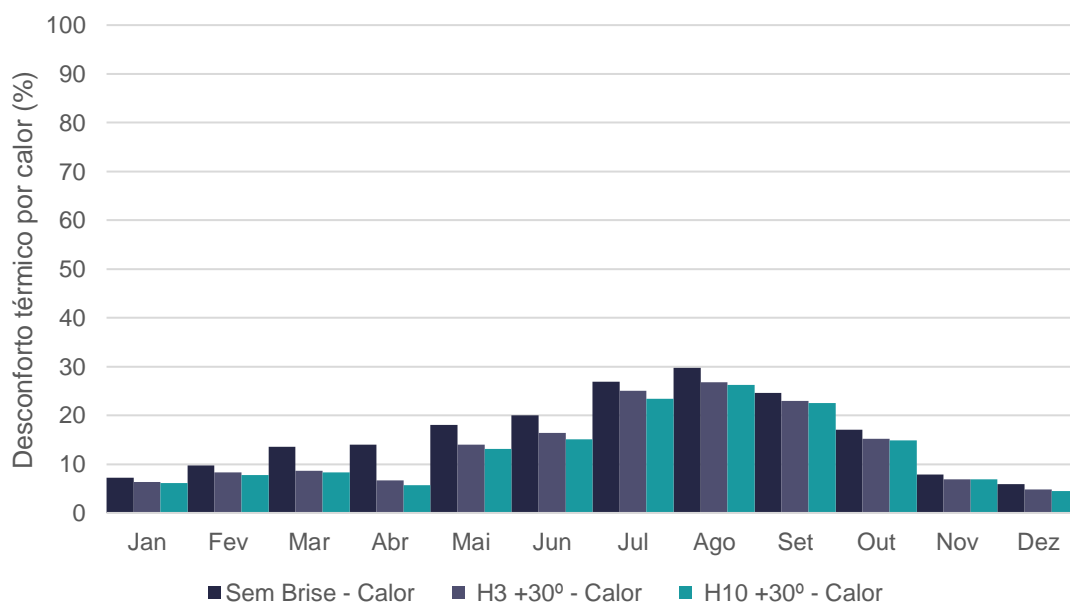
O desconforto térmico por calor está representado nos gráficos da Figura 66 e Figura 67. É possível notar que, nos meses de janeiro, fevereiro, outubro e dezembro, os brises a -30° apresentam uma redução de 3,4% dos valores obtidos com os brises a 0° . Nos meses restantes, as reduções são mais amenas, com um intervalo de redução de 0,62%. Já para os brises a $+30^\circ$, não houve redução em comparação com os brises a 0° , sendo os brises nessa posição mais eficazes que o ângulo positivo em questão. Os brises a $+30^\circ$ reduziram em média 3,03% do desconforto térmico por calor comparado aos resultados sem o sistema de sombreamento e os brises a 0° reduziram em 5,12%.

Figura 66 - Desconforto térmico por calor, sem brise e com os brises H3 e H10 a -30°



Fonte: Autor, 2024

Figura 67 - Desconforto térmico por calor, sem brise e com os brises H3 e H10 a +30°

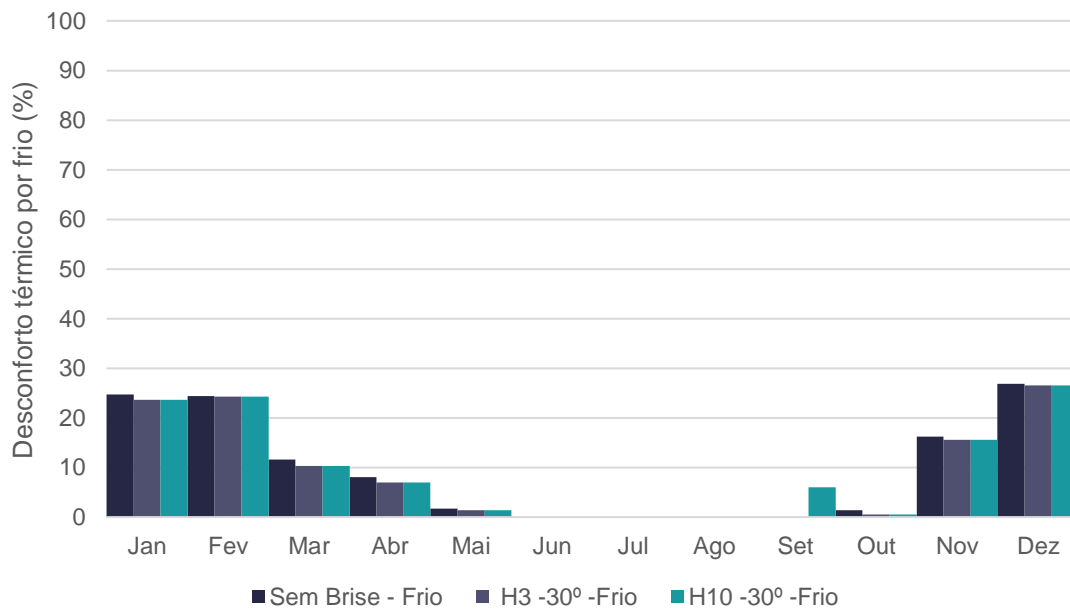


Fonte: Autor, 2024.

Pode-se observar um aumento no desconforto por calor nos meses de outubro a março com os Brises a +30. Como visto nos resultados das fases anteriores, essa angulação permite uma irradiação maior, porém, resulta num aumento na temperatura interna, que conseqüentemente aumenta a porcentagem de desconforto térmico por calor. Por isso, os Brises negativos apresentam resultados superiores

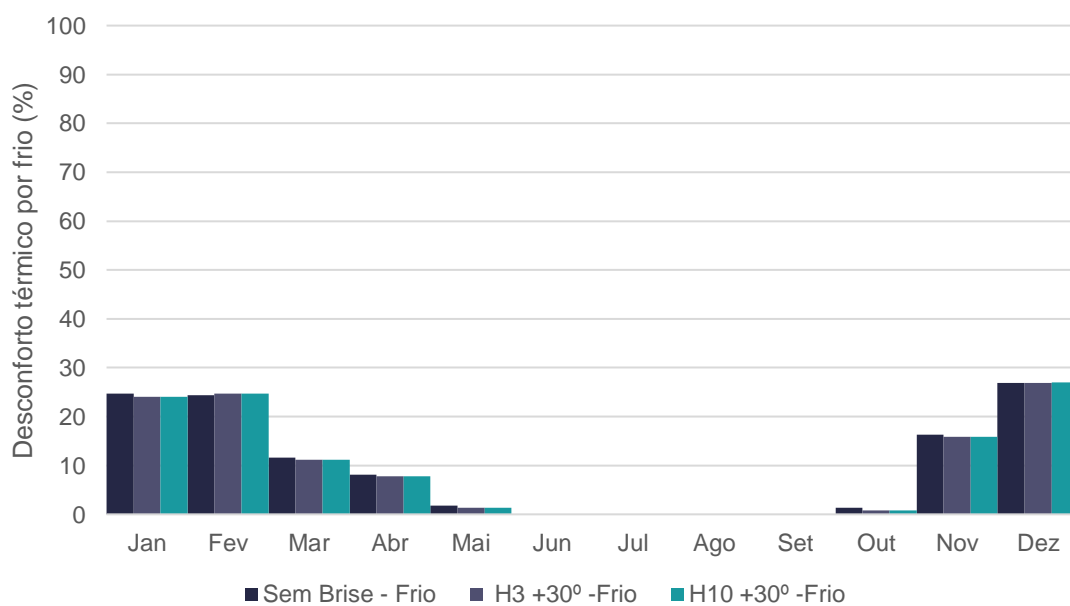
O desconforto térmico por frio pode ser visto na Figura 68 e Figura 69. Mesmo com o sistema de sombreamento, a redução no desconforto térmico por frio não é significativa como a redução no desconforto térmico por calor, como esperado. Assim como os brises a 0°, os brises não têm uma influência direta na redução do desconforto térmico por frio.

Figura 68 - Desconforto térmico por frio, sem brise e com os brises H3 e H10 a -30°



Fonte: Autor, 2024

Figura 69 - Desconforto térmico por frio, sem brise e com os brises H3 e H10 a +30°



Fonte: Autor, 2024.

Os brises a -30° reduziram em média o desconforto por calor em relação ao sistema sem sombreamento em até 6,47%, e na angulação $+30^\circ$ a redução foi até 3,33%. Como observado nos resultados anteriores, o desconforto por frio não é diretamente afetado pelos brises, com reduções baixas de conforto, conforme Tabela 12, que apresenta as diferenças no desconforto térmico por calor e frio nos ângulos -30° e $+30^\circ$.

Valores negativos representam uma redução no desconforto térmico e valores positivos um aumento. No caso do desconforto térmico por frio e calor, o resultado desejado é garantir que não haja um aumento no desconforto nem na demanda de energia.

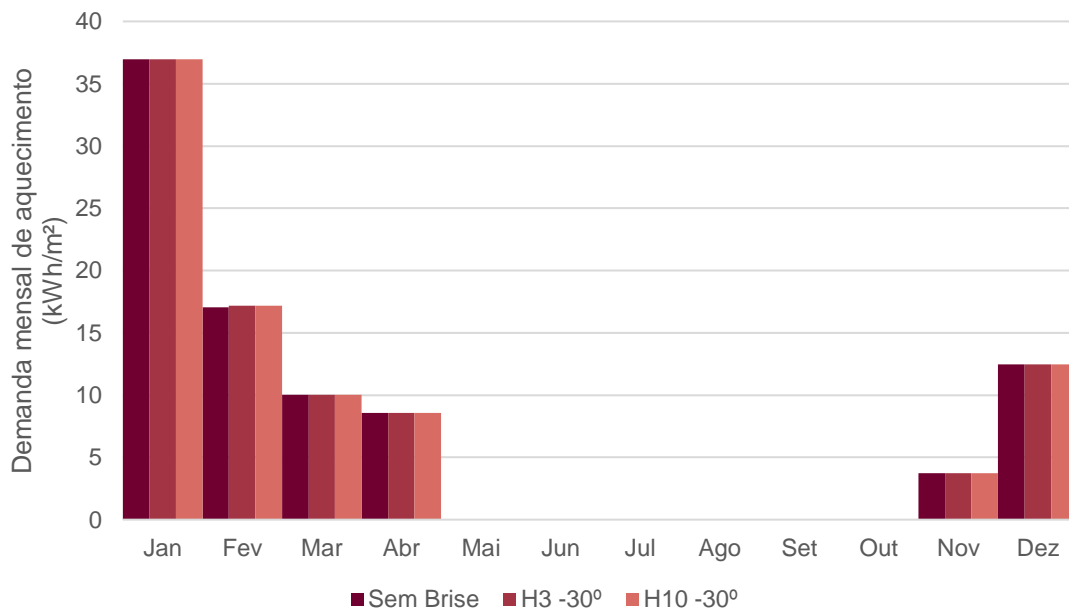
Tabela 12 - Diferença no desconforto térmico por calor e frio dos Brises H3 e H10 a -30° e $+30^\circ$

Meses	Por calor				Por Frio			
	Angulação: -30°		Angulação: $+30^\circ$		Angulação: -30°		Angulação: $+30^\circ$	
	H3	H10	H3	H10	H3	H10	H3	H10
Jan	-7,26%	-7,26%	-0,94%	-1,08%	-1,07%	-1,07%	-0,67%	-0,67%
Fev	-9,70%	-9,70%	-1,37%	-1,96%	-0,12%	-0,12%	0,33%	0,32%
Mar	-9,00%	-9,13%	-4,97%	-5,24%	-1,22%	-1,23%	-0,41%	-0,41%
Abr	-9,45%	-9,17%	-7,36%	-8,34%	-1,11%	-1,11%	-0,29%	-0,28%
Mai	-4,57%	-4,43%	-4,03%	-4,84%	-0,40%	-0,41%	-0,41%	-0,40%
Jun	-3,75%	-3,75%	-3,61%	-4,86%	-	-	-	-
Jul	-2,55%	-2,55%	-1,88%	-3,49%	-	-	-	-
Ago	-3,50%	-3,50%	-2,96%	-3,50%	-	-	-	-
Set	-4,16%	-4,03%	-1,66%	-2,08%	-	+6,01%	-	-
Out	-10,89%	-10,62%	-1,88%	-2,15%	-0,81%	-0,81%	-0,54%	-0,54%
Nov	-6,95%	-6,81%	-0,98%	-0,98%	-0,69%	-0,69%	-0,41%	-0,41%
Dez	-5,91%	-5,91%	-1,07%	-1,47%	-0,41%	-0,41%	-0,01%	0,12%
Média	-6,47%	-6,41%	-2,73%	-3,33%	-0,49%	+0,01%	-0,20%	-0,19%

Fonte: Autor, 2024.

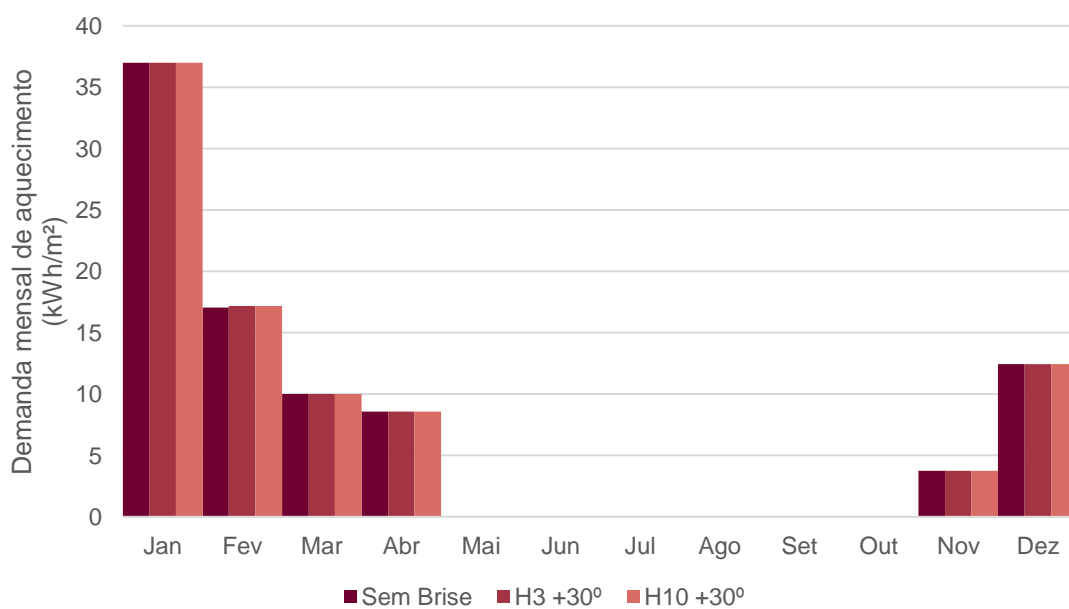
Quando analisado os resultados da energia necessária para aquecimento (Figura 70 e Figura 71) observa-se que a demanda de energia é semelhante aos resultados dos brises a 0° , os brises a -30° e $+30^\circ$ não afetam a demanda por aquecimento. No entanto, houve uma melhora no conforto térmico, mantendo-se praticamente o nível da demanda de energia da edificação sem o sistema de sombreamento.

Figura 70 - Energia de aquecimento necessária mensal – Sem brise e brises H3 e H10 a -30°



Fonte: Autor, 2024

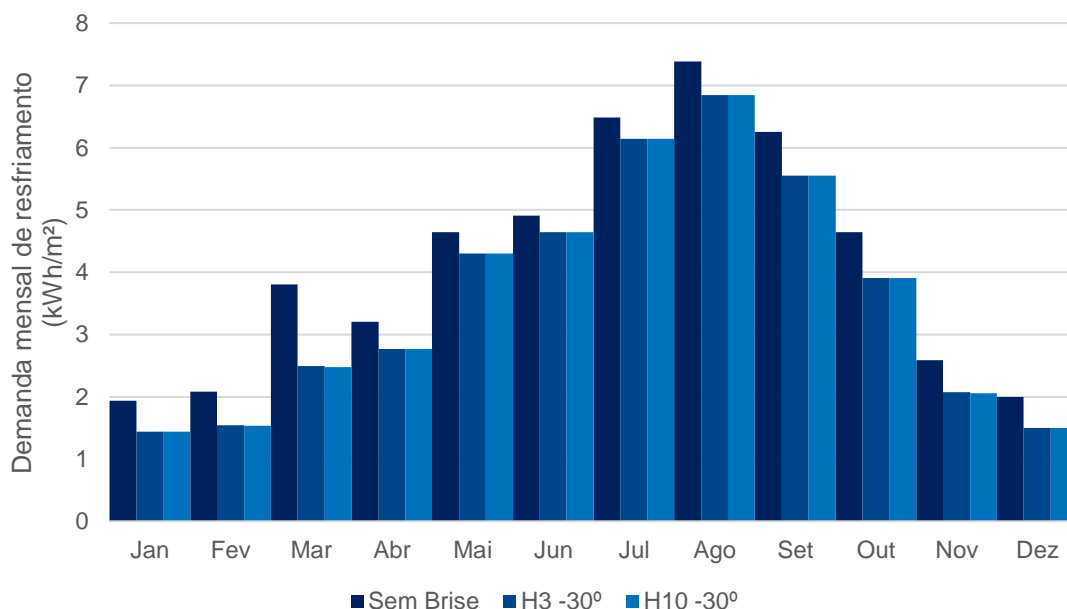
Figura 71 - Energia de aquecimento necessária mensal – Sem brise e brises H3 e H10 a +30°



Fonte: Autor, 2024

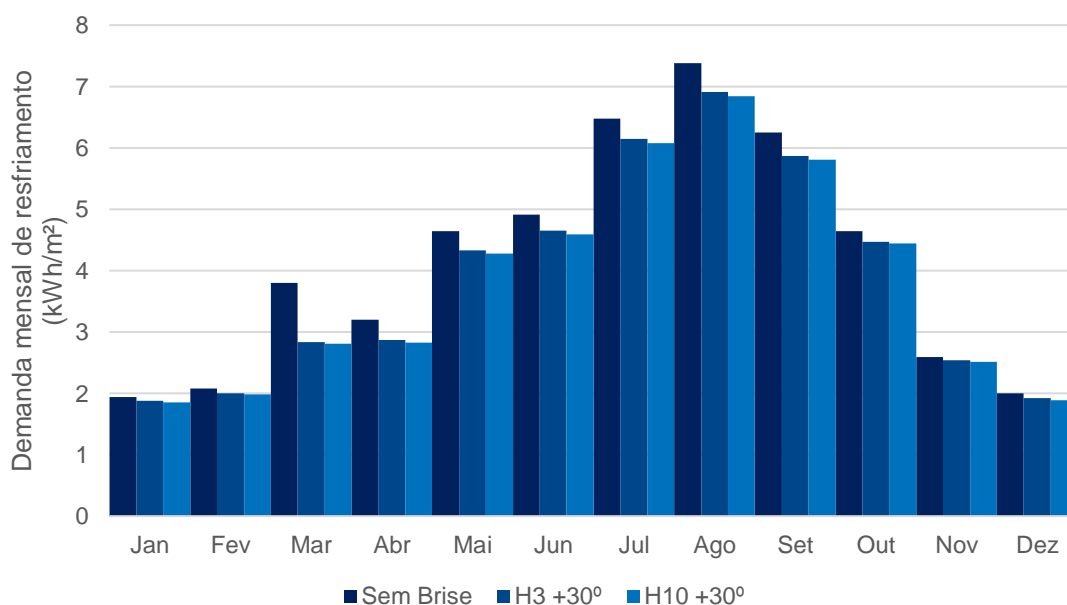
Na demanda de energia para resfriamento (Figura 72 e Figura 73) observa-se que houve uma diminuição ao utilizar um sistema de sombreamento, principalmente nos períodos frios, com reduções de até 34% ou seja, os brises auxiliam na diminuição de um eventual sobreaquecimento da edificação que ocorre nesses meses.

Figura 72 - Energia de resfriamento necessária mensal – Sem brise e brises H3 e H10 a -30°



Fonte: Autor, 2024.

Figura 73 - Energia de resfriamento necessária mensal – Sem brise e brises H3 e H10 a $+30^\circ$



Fonte: Autor, 2024.

A Tabela 13 apresenta os resultados de aquecimento e resfriamento dos brises H3 e H10 a -30° e $+30^\circ$, em comparação sem os brises. Como citado anteriormente os resultados positivos indicam um aumento na demanda, e resultados negativos representam uma redução. Os brises mostram uma redução na demanda de energia para resfriamento em todos os meses do ano.

Tabela 13 - Comparação na demanda de energia brise H3 e H10 a -30° e $+30^\circ$

Meses	Aquecimento				Resfriamento			
	Angulação: -30°		Angulação: $+30^\circ$		Angulação: -30°		Angulação: $+30^\circ$	
	H3	H10	H3	H10	H3	H10	H3	H10
Jan	-	-	-	-	-25,77%	-25,77%	-3,09%	-4,64%
Fev	0,76%	0,76%	0,76%	0,76%	-25,96%	-26,44%	-3,85%	-4,81%
Mar	-	-	-	-	-34,47%	-34,74%	-25,26%	-26,05%
Abr	-	-	-	-	-13,44%	-13,44%	-10,31%	-11,56%
Mai	-	-	-	-	-7,33%	-7,33%	-6,68%	-7,76%
Jun	-	-	-	-	-5,50%	-5,50%	-5,30%	-6,52%
Jul	-	-	-	-	-5,25%	-5,25%	-5,09%	-6,17%
Ago	-	-	-	-	-7,32%	-7,32%	-6,37%	-7,32%
Set	-	-	-	-	-11,20%	-11,20%	-6,08%	-7,04%
Out	-	-	-	-	-15,73%	-15,73%	-3,66%	-4,31%
Nov	0,27%	-	-	-	-20,08%	-20,46%	-1,93%	-3,09%
Dez	-	-	-	-	-25,00%	-25,00%	-4,00%	-5,50%
Média	0,17%	0,13%	0,13%	0,13%	-16,42%	-16,51%	-6,80%	7,90%

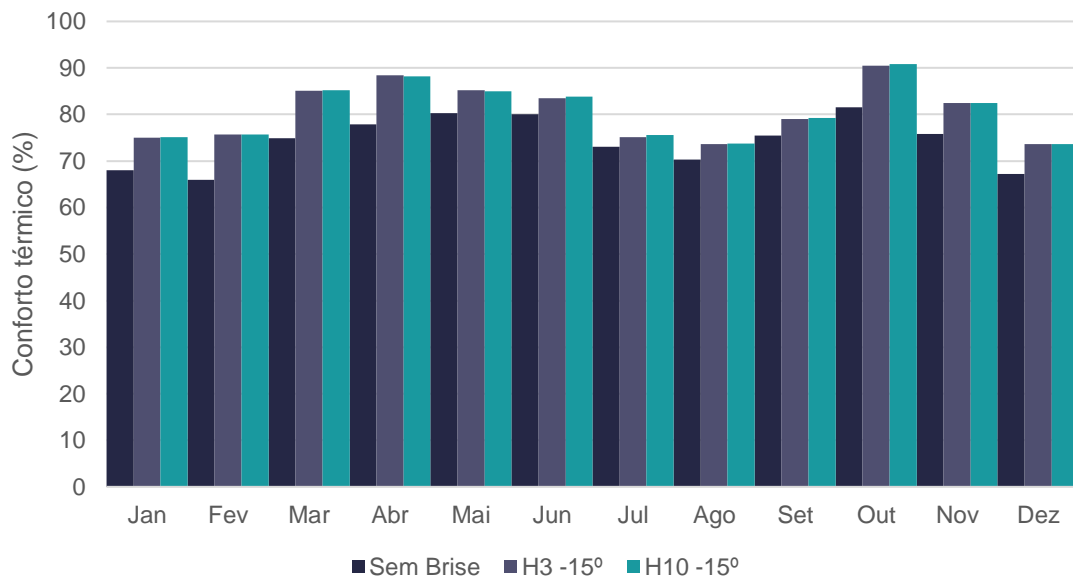
Fonte: Autor, 2024.

Esses resultados na demanda de energia para aquecimento e resfriamento também são influenciados pelas características construtivas da edificação. Os brises permitem o controle solar, auxiliando na regulação da temperatura interna em resposta às condições climáticas externas.

É possível observar também que os ângulos negativos são os que apresentam os melhores resultados, tanto nos resultados de conforto e desconforto térmico, quanto os de demanda energética. Não seguindo a mesma relação de angulação observada nos resultados de sombreamento e irradiação. Os próximos resultados são referentes às simulações considerando os brises H3 e H10 nos ângulos -15° e $+15^\circ$. Foi também verificado se há ou não uma relação entre os ângulos positivos e negativos para os períodos frios e quentes.

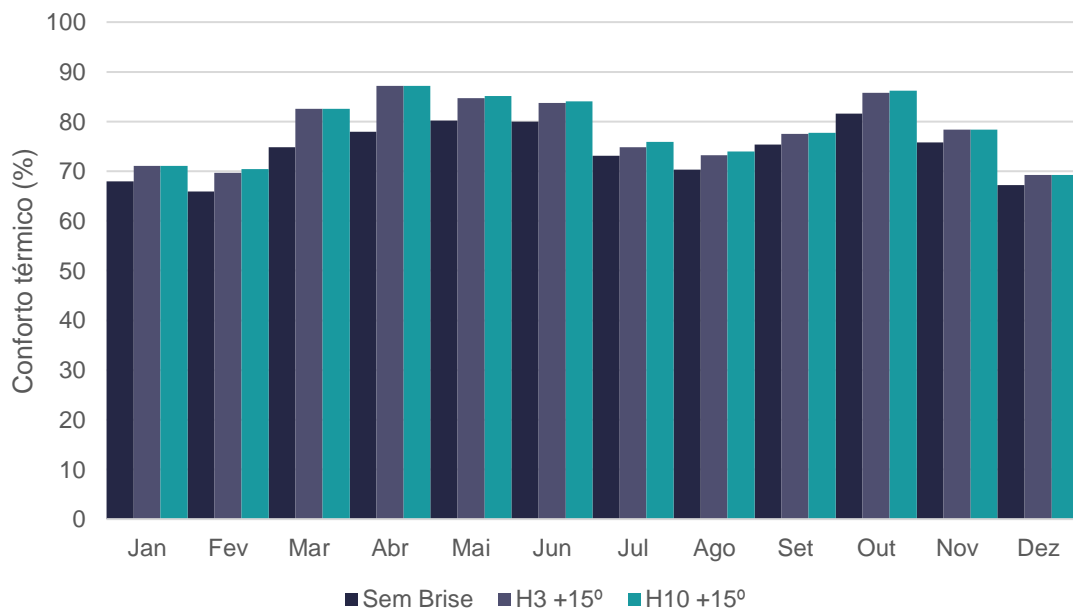
A Figura 74 apresenta o gráfico da porcentagem de conforto térmico ao longo do ano comparando a edificação sem os brises e com os brises na angulação -15° e a Figura 75 com ângulo $+15^\circ$.

Figura 74 - Conforto Térmico sem Brise e com os Brises H3 e H10 na angulação -15°



Fonte: Autor, 2024.

Figura 75 - Conforto Térmico sem Brise e com os Brises H3 e H10 na angulação +15°



Fonte: Autor, 2024.

Os níveis de conforto térmico ao adotar os brises nas angulações -15° e +15° apresentam também um aumento no conforto térmico em todo o ano. Os brises na angulação negativa apresentam resultados melhores do que os positivos, durante os períodos frios. Os resultados para os brises a -15° são cerca de 5,00% melhores que os brises a +15°. Nos períodos quentes, os brises são 0,68% melhores a -15° do que o ângulo positivo.

Analisando a Tabela 14, que apresenta a comparação dos resultados de conforto térmico dos brises H3 e H10 a -15° e $+15^\circ$ em comparação aos resultados sem o sistema de sombreamento. Observa-se que os ganhos de conforto possuem resultados próximos para os ângulos negativos e positivos.

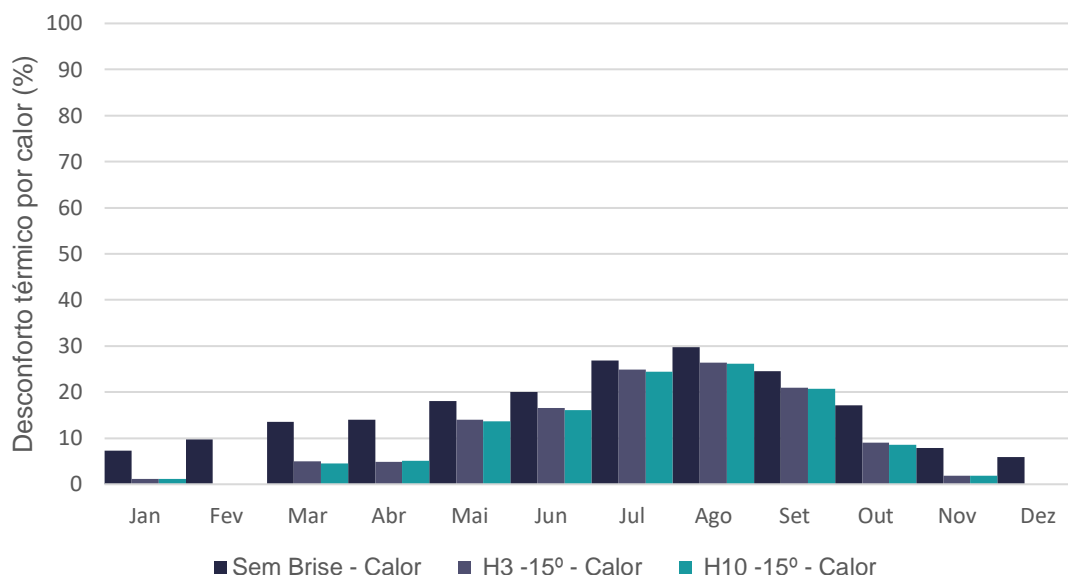
Tabela 14 - Comparação no aumento de conforto térmico do Brise H3 e H10 a -15° e $+15^\circ$.

Meses	Conforto térmico			
	Angulação: -15°		Angulação: $+15^\circ$	
	H3	H10	H3	H10
Jan	+6,99%	+7,12%	+3,09%	+3,09%
Fev	+9,82%	+9,82%	+3,72%	+4,47%
Mar	+10,22%	+10,36%	+7,67%	+7,67%
Abr	+10,56%	+10,28%	+9,31%	+9,31%
Mai	+4,97%	+4,71%	+4,44%	+4,84%
Jun	+3,47%	+3,89%	+3,75%	+4,03%
Jul	+2,01%	+2,42%	+1,75%	+2,82%
Ago	+3,37%	+3,50%	+2,96%	+3,63%
Set	+3,61%	+3,89%	+2,08%	+2,36%
Out	+8,88%	+9,28%	+4,17%	+4,58%
Nov	+6,67%	+6,67%	+2,50%	+2,50%
Dez	+6,46%	+6,46%	+2,02%	+2,02%
Média	+6,42%	+6,53%	+3,96%	+4,28%

Fonte: Autor, 2024.

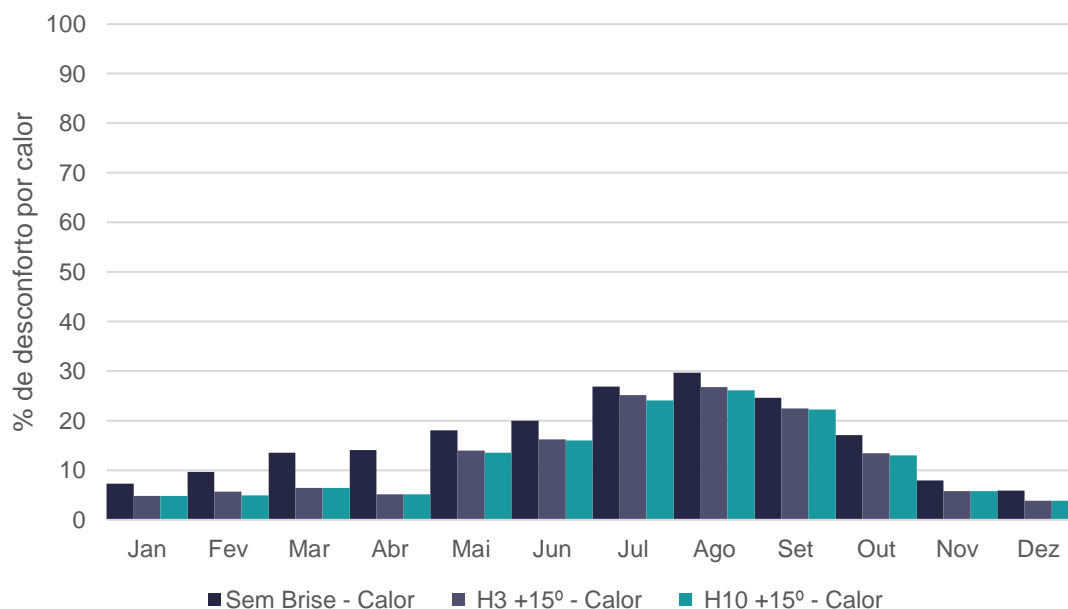
O desconforto térmico por calor está representado nos gráficos da Figura 76 e Figura 77. As reduções nos resultados do desconforto por calor, observadas para os ângulos a -15° , apresentam uma média de 5,93%, enquanto que, para os brises a -30° , essa redução é ligeiramente maior, atingindo 6,44%. Por outro lado, para os brises a $+15^\circ$, a redução média no desconforto térmico é de 3,89%, e para os brises a $+30^\circ$, essa redução é um pouco menor, com uma média de 3,03%. Esses dados indicam que os ângulos negativos, especialmente em -30° , tendem a ser mais eficazes na mitigação do desconforto térmico por calor em comparação com os ângulos positivos.

Figura 76 - Desconforto térmico por calor, sem brise e com os brises H3 e H10 a -15°



Fonte: Autor, 2024.

Figura 77 - Desconforto térmico por calor, sem brise e com os brises H3 e H10 a +15°



Fonte: Autor, 2024.

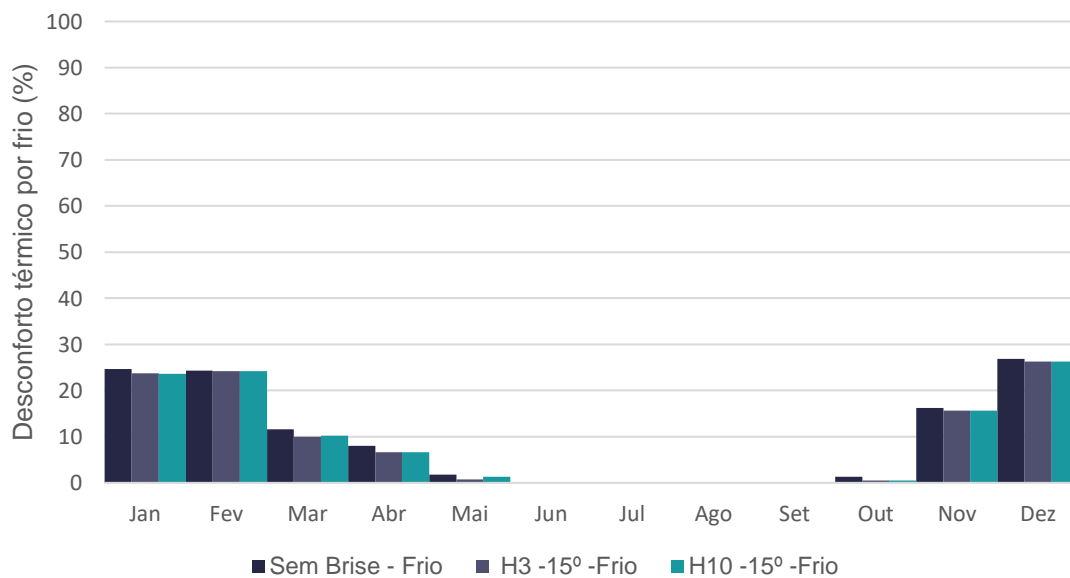
Como observado, os brises a +15° apresentam resultados superiores na redução do desconforto térmico por calor do que os brises a +30°, ainda sim, seu resultado não é superior aos dos brises a 0°, que apresentam uma redução média de 5,12%.

Os ângulos positivos a +15° apresentam um maior desconforto térmico por calor nos meses de novembro a março. Dessa forma, também não

se confirma a relação dos ângulos como observado nas fases de sombreamento e irradiação.

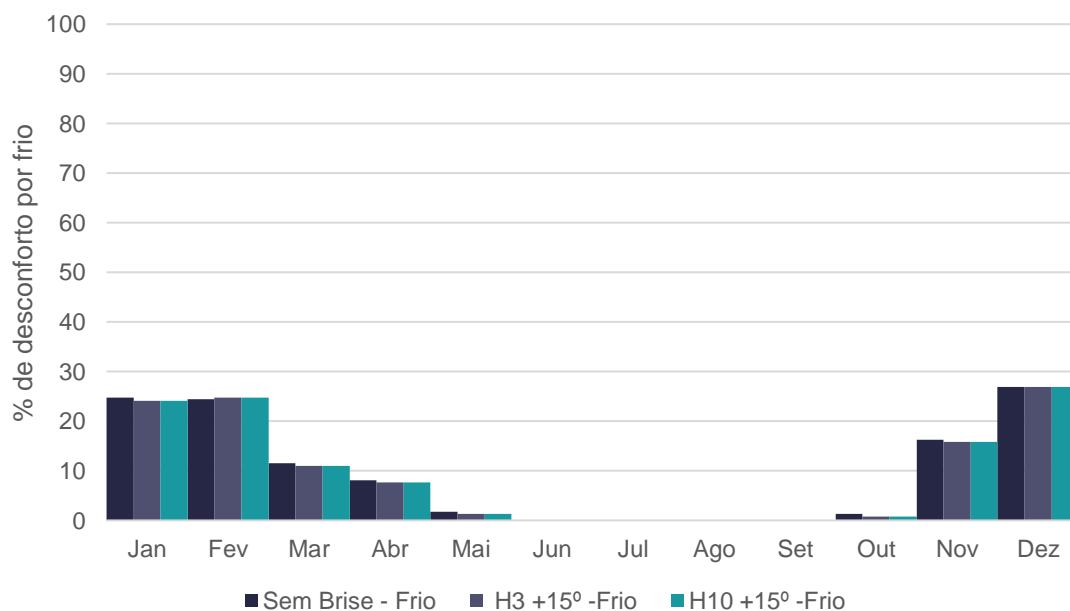
O desconforto térmico por frio pode ser visto na Figura 78 e Figura 79, os resultados do desconforto térmico pelo frio não tem reduções significativas em comparação com a redução no desconforto térmico por calor, assim como nos brises a 0°, os brises não tem uma influência direta para a redução do desconforto térmico por frio.

Figura 78 - Desconforto térmico por frio, sem brise e com os brises H3 e H10 a -15°



Fonte: Autor, 2024.

Figura 79 - Desconforto térmico por frio, sem brise e com os brises H3 e H10 a +15°



Fonte: Autor, 2024.

A Tabela 15 apresenta a comparação dos resultados no desconforto térmico por calor e frio nos ângulos -15° e $+15^\circ$ comparados com os resultados sem o sistema de brises. Os valores negativos representam uma redução do desconforto e valores positivos um aumento no desconforto.

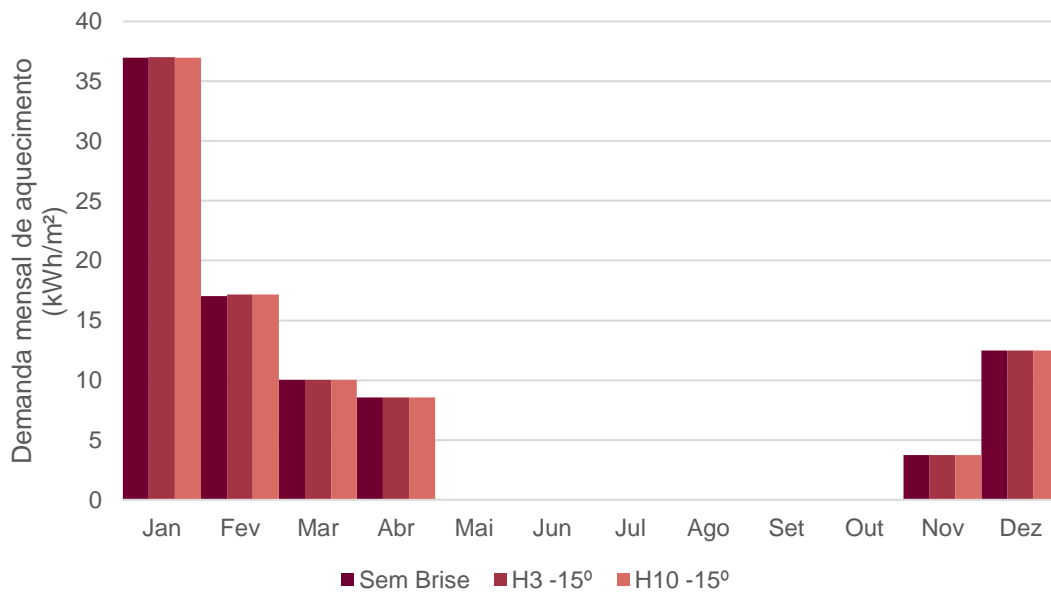
Tabela 15 - Diferença no desconforto térmico por calor e frio dos Brises H3 e H10 a -15° e $+15^\circ$

MESES	Por calor				Por Frio			
	Angulação: -15°		Angulação: $+15^\circ$		Angulação: -15°		Angulação: $+15^\circ$	
	H3	H10	H3	H10	H3	H10	H3	H10
Jan	-6,05%	-6,05%	-2,42%	-2,42%	-0,94%	-1,07%	-0,67%	-0,67%
Fev	-9,70%	-9,70%	-4,05%	-4,79%	-0,12%	-0,12%	0,33%	0,32%
Mar	-8,60%	-9,00%	-7,12%	-7,12%	-1,62%	-1,36%	-0,55%	-0,55%
Abr	-9,17%	-8,89%	-8,89%	-8,89%	-1,39%	-1,39%	-0,42%	-0,42%
Mai	-4,02%	-4,30%	-4,03%	-4,43%	-0,95%	-0,41%	-0,41%	-0,41%
Jun	-3,47%	-3,89%	-3,75%	-4,03%	-	-	-	-
Jul	-2,01%	-2,42%	-1,75%	-2,82%	-	-	-	-
Ago	-3,37%	-3,50%	-2,96%	-3,63%	-	-	-	-
Set	-3,61%	-3,89%	-2,08%	-2,36%	-	-	-	-
Out	-8,07%	-8,47%	-3,63%	-4,03%	-0,81%	-0,81%	-0,54%	-0,55%
Nov	-6,11%	-6,11%	-2,09%	-2,09%	-0,56%	-0,56%	-0,41%	-0,41%
Dez	-5,91%	-5,91%	-2,01%	-2,01%	-0,55%	-0,55%	-0,01%	-0,01%
Média	-5,84%	-6,01%	-3,73%	-4,05%	-0,58%	-0,52%	-0,22%	-0,22%

Fonte: Autor, 2024.

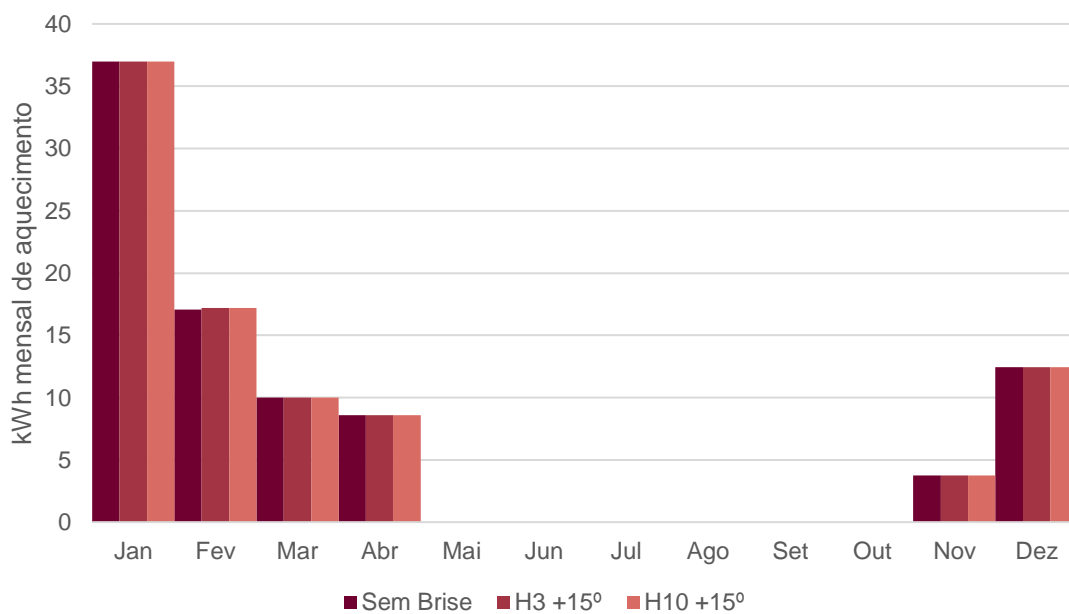
Ao analisar os resultados sobre a energia necessária para aquecimento, apresentados na Figura 80 e Figura 81 observa-se pouca variação na demanda ao comparar as situações com e sem o sistema de sombreamento. No entanto, houve uma melhora perceptível no conforto térmico, com a demanda de energia mantendo-se praticamente igual à da edificação sem o sistema de sombreamento. Essa constatação sugere que, embora o sistema de sombreamento não tenha um impacto significativo na redução do consumo de energia para aquecimento, ele contribui positivamente para a qualidade ambiental interna. Além disso, essa manutenção da demanda energética indica que o sistema pode ser implementado sem comprometer a eficiência energética do edifício. Assim, a adoção desse recurso pode ser vantajosa em projetos que busquem melhorar o conforto dos ocupantes sem alterar substancialmente os custos operacionais.

Figura 80 - Energia de aquecimento necessária mensal - Sem brise e brises H3 e H10 a -15°



Fonte: Autor, 2024.

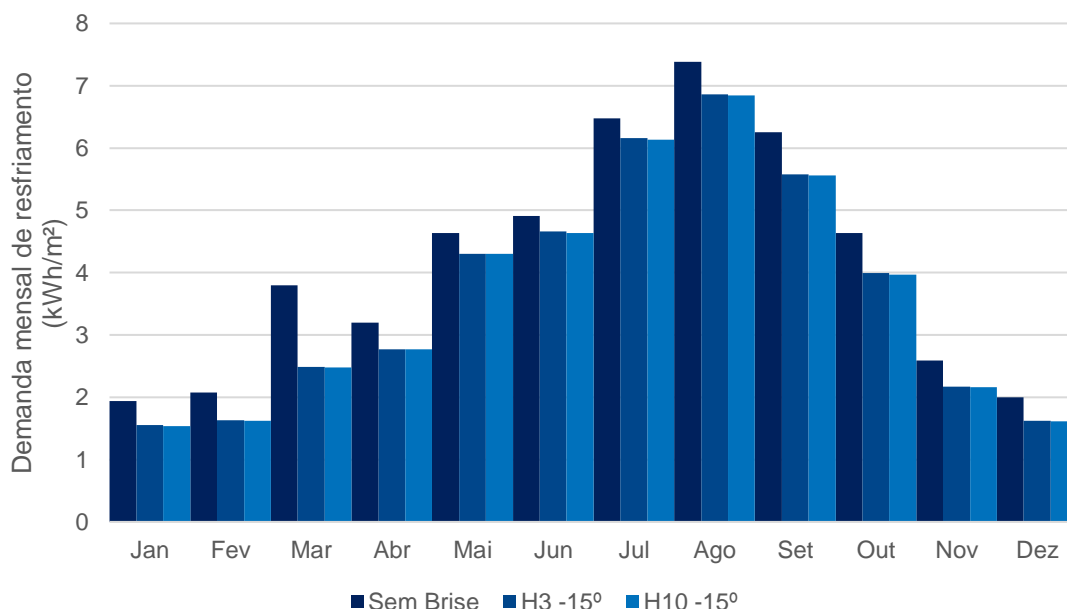
Figura 81 – Energia de aquecimento necessária mensal - Sem brise e brises H3 e H10 a $+15^\circ$



Fonte: Autor, 2024.

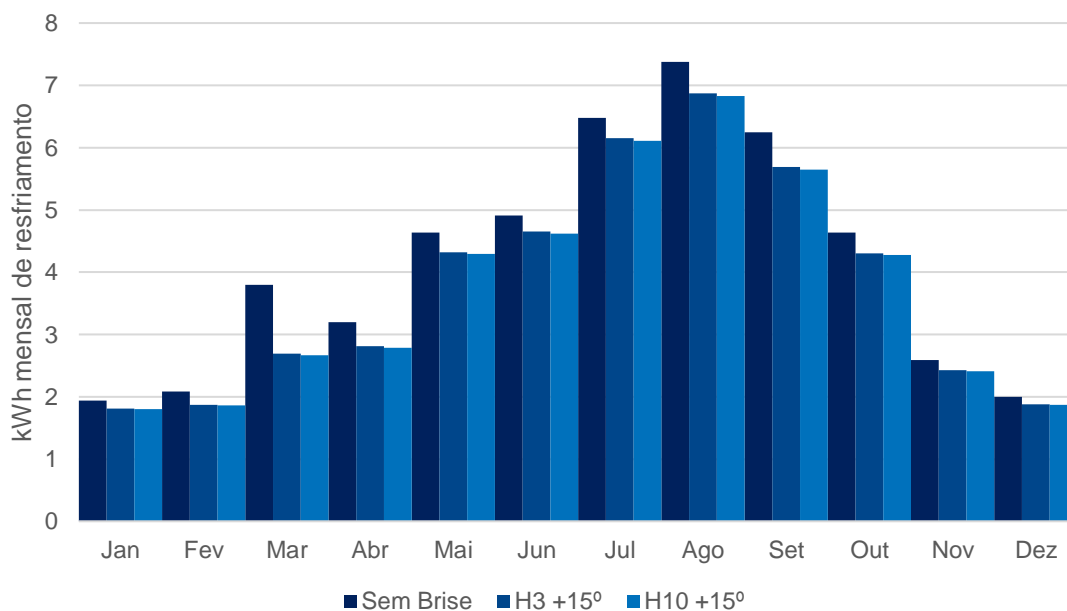
Na demanda de energia para resfriamento (Figura 82 e Figura 83) é possível observar que houve uma diminuição na demanda ao utilizar um sistema de sombreamento. De forma semelhante aos brises ajustados a -30° , as maiores reduções no sobreaquecimento ocorreram durante os períodos frios. Nesses casos, os brises posicionados a -15° e $+15^\circ$ foram mais eficazes em minimizar o sobreaquecimento em comparação com a ausência de elementos de sombreamento.

Figura 82 - Energia de resfriamento necessária mensal - Sem brise e brises H3 e H10 a -15°



Fonte: Autor, 2024.

Figura 83 - Energia de resfriamento necessária mensal - Sem brise e brises H3 e H10 a $+15^\circ$



Fonte: Autor, 2024.

A Tabela 16 apresenta os resultados de aquecimento e resfriamento para os brises H3 e H10 em ângulos de -15° e $+15^\circ$, comparados com os resultados sem os brises. Semelhante aos demais ângulos, o uso dos brises a -15° e $+15^\circ$ não afetam a demanda de energia para aquecimento. Para o resfriamento, no entanto, ambos os brises contribuem para uma redução na demanda de energia ao longo do ano, quando comparados à ausência dos brises.

Tabela 16 - Comparação na demanda de energia brise H3 e H10 a -15° e +15°

MESES	AQUECIMENTO				RESFRIAMENTO			
	Angulação: -15°		Angulação: +15°		Angulação: -15°		Angulação: +15°	
	H3	H10	H3	H10	H3	H10	H3	H10
Jan	0,03%	-	-	-	-20,10%	-20,62%	-6,70%	-7,22%
Fev	0,76%	0,76%	0,76%	0,76%	-21,63%	-22,12%	-10,10%	-10,58%
Mar	-	-	-	-	-34,47%	-34,74%	-29,21%	-29,74%
Abr	-	-	-	-	-13,44%	-13,44%	-12,19%	-12,81%
Mai	-	-	-	-	-7,33%	-7,33%	-6,90%	-7,54%
Jun	-	-	-	-	-5,09%	-5,50%	-5,30%	-5,91%
Jul	-	-	-	-	-4,94%	-5,40%	-5,09%	-5,71%
Ago	-	-	-	-	-7,05%	-7,32%	-6,91%	-7,45%
Set	-	-	-	-	-10,72%	-11,04%	-8,96%	-9,60%
Out	-	-	-	-	-14,01%	-14,44%	-7,33%	-7,76%
Nov	-	-	-	-	-16,22%	-16,60%	-6,18%	-6,95%
Dez	-	-	-	-	-19,00%	-19,50%	-6,00%	-6,50%
Média	0,13%	0,13%	0,13%	0,13%	-14,50%	-14,84%	-9,24%	-9,81%

Fonte: Autor, 2024.

Os resultados das simulações indicam que os ângulos positivos apresentam um desempenho inferior em termos de conforto térmico e demanda de energia para resfriamento, especialmente quando comparados aos ângulos negativos. De acordo com as simulações realizadas, os brises com angulações positivas ultrapassam com maior frequência a faixa de temperatura operativa considerada ideal para o conforto térmico, que está estabelecida entre 20°C e 26°C. Por outro lado, os ângulos negativos demonstraram resultados significativamente mais satisfatórios tanto no quesito de conforto térmico quanto na demanda de energia para aquecimento e resfriamento. Essa observação difere das fases anteriores, onde os ângulos positivos mostraram um desempenho superior no que diz respeito ao sombreamento e à maximização da irradiação solar, enquanto os ângulos negativos se destacaram na minimização da irradiação.

Por fim, a Tabela 17 apresenta uma síntese com as melhores angulações de conforto térmico e demanda de energia para cada mês utilizando o Brise H3, enquanto a Tabela faz o mesmo para o Brise H10.

Tabela 17 - Síntese dos melhores resultados para o Brise H3

Brise H3				
Meses	Ângulo	Conforto Térmico (%)	Aquecimento (kWh/m²)	Resfriamento (kWh/m²)
Jan	-30°	76,3	36,98	1,44
Fev	-30°	75,7	17,18	1,54
Mar	-30°	85,1	10,02	2,49
Abr	-15°	88,5	8,57	2,77
Mai	-15°	85,2	-	4,30
Jun	-30°	83,8	-	4,64
Jul	-30°	75,7	-	6,14
Ago	-30°	73,8	-	6,84
Set	-30°	79,6	-	5,55
Out	-30°	93,3	-	3,91
Nov	-30°	83,5	3,74	2,07
Dez	-30°	73,5	12,46	1,50

Fonte: Autor, 2024.

Tabela 18 – Síntese dos melhores resultados para o Brise H10

Brise H10				
Meses	Ângulo	Conforto Térmico (%)	Aquecimento (kWh/m²)	Resfriamento (kWh/m²)
Jan	-30°	76,3	36,98	1,44
Fev	-30°	75,7	17,18	1,53
Mar	-15°	85,2	10,02	2,48
Abr	-15°	88,2	8,57	2,77
Mai	-30°	85,1	-	4,29
Jun	-30°	83,8	-	4,62
Jul	-30°	75,7	-	6,11
Ago	-30°	73,8	-	6,83
Set	-15°	79,3	-	5,56
Out	-30°	93,0	-	3,91
Nov	-30°	83,3	3,74	2,06
Dez	-30°	73,5	12,46	1,50

Fonte: Autor, 2024.

As tabelas indicam que para o brise H3 e H10, os ângulos -30° e -15° são os mais indicados para o conforto térmico e redução no demanda de energia para resfriamento sem afetar o demanda de energia para aquecimento. O aumento no conforto térmico médio para o brise móvel H3 é de 6,97% e o para o H10 de 6,88% comparado com os resultados sem a utilização de brises. Para

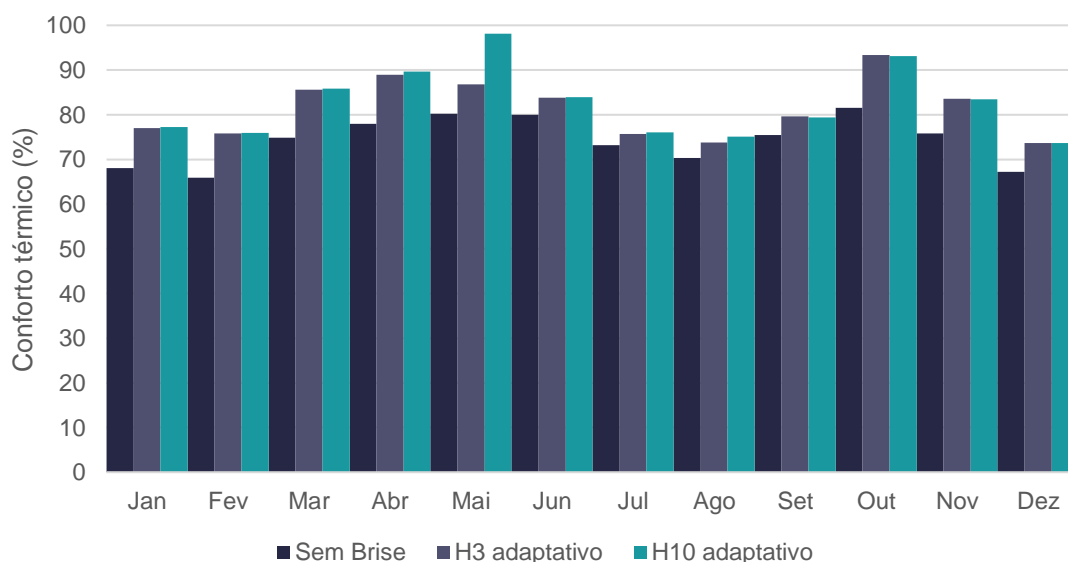
a demanda de energia de refrigeração, a redução é de 16,42% para o H3 e 16,60% para o H10.

4.3.3 Análise 3: Sem brises em comparação com Brises H3 e H10 com utilização de algoritmo evolutivo.

Este capítulo apresenta os resultados do conforto térmico com os brises adaptativos. Assim como o algoritmo da fase 2, é necessário estabelecer qual será o critério de otimização, para o conforto térmico, com a função objetivo de maximizar os resultados, a fim de verificar se no intervalo de -30° a $+30^{\circ}$ (variando de grau em grau para cada hora) podem proporcionar melhorias mais significativas em comparação com os resultados obtidos sem o sistema de brises, brises fixos e os brises manuais.

A Figura 84 apresenta o resultado da porcentagem de conforto térmico dos brises H3 e H10 adaptativo.

Figura 84 - Conforto Térmico sem Brise e com os Brises H3 e H10 adaptativo.



Fonte: Autor, 2024.

Os brises adaptativos resultaram em um aumento no conforto térmico ao longo do ano. Conforme indicado na Tabela 19, os brises adaptativos permitem um maior aumento no conforto em comparação sem os brises, com um aumento de até 8,41%. Quando comparado aos brises a 0° , os brises adaptativos aumentam o conforto térmico em 2,92% e nos brises móveis 1,53%.

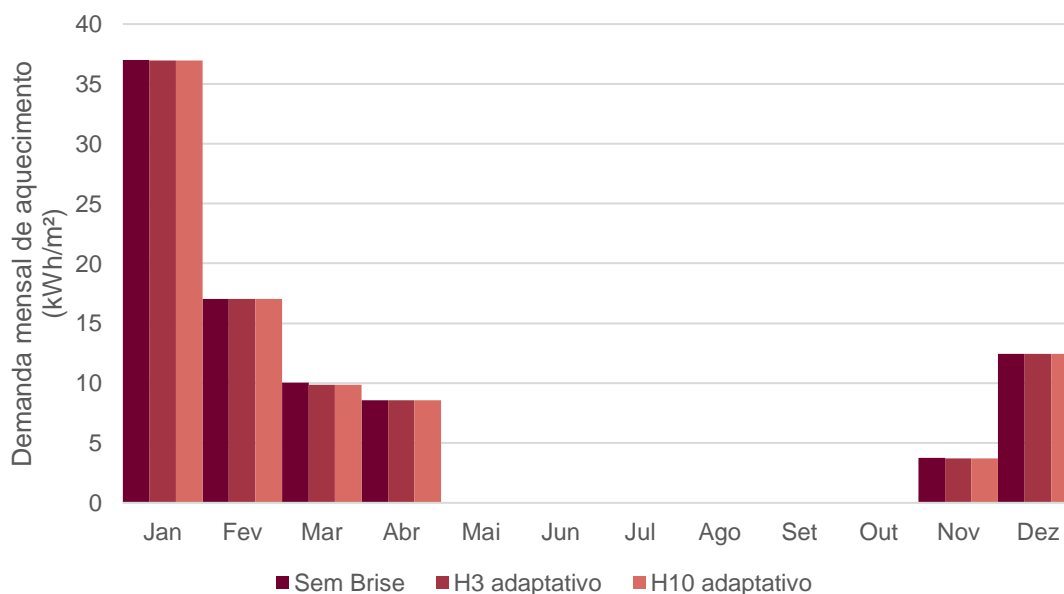
Tabela 19 – Comparação do aumento de conforto térmico do Brise H3 e H10 adaptativos

MESES	Brises adaptativos	
	H3	H10
Jan	+8,93%	+9,18%
Fev	+9,88%	+10,06%
Mar	+10,68%	+10,95%
Abr	+11,01%	+11,73%
Mai	+6,53%	+17,85%
Jun	+3,75%	+3,89%
Jul	+2,55%	+2,96%
Ago	+3,50%	+4,75%
Set	+4,16%	+4,02%
Out	+11,79%	+11,49%
Nov	+7,70%	+7,56%
Dez	+6,46%	+6,46%
Média	+7,25%	+8,41%

Fonte: Autor, 2024.

Ao analisar os resultados de energia para aquecimento (Figura 85) os brises adaptativos não afetaram a demanda energético durante esses períodos.

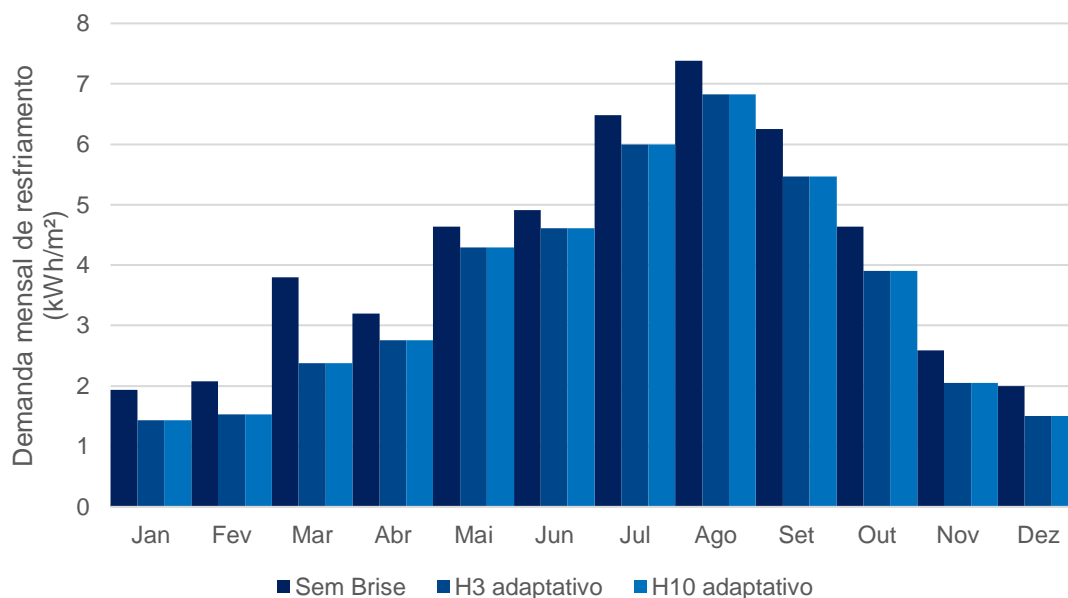
Figura 85 - Energia de aquecimento necessária mensal - Sem brise, H3 e H10 adaptativos



Fonte: Autor, 2024.

Na demanda de energia para resfriamento (Figura 86) é possível observar uma redução considerável na demanda de energia ao adotar os brises com angulações adaptativas.

Figura 86 - Energia de resfriamento necessária mensal - Sem brise, H3 e H10 adaptativos



Fonte: Autor, 2024.

A Tabela 20 apresenta resultados de aquecimento e resfriamento dos brises H3 e H10 adaptativos em comparação sem os brises. A redução na demanda de energia para aquecimento obteve o melhor resultado em março, com 1,80% de redução para ambos os brises. Para o resfriamento, houve redução em todo o ano, com variação entre -0,03% e -37,37%, com os melhores resultados nos meses de janeiro a abril e novembro e dezembro.

Tabela 20 - Comparação na demanda de energia H3 e H10 adaptativos

Meses	Aquecimento		Resfriamento	
	H3	H10	H3	H10
Jan	-0,03%	-0,03%	-26,29%	-26,29%
Fev	-0,06%	-0,06%	-26,44%	-26,44%
Mar	-1,80%	-1,80%	-37,37%	-37,37%
Abr	0,12%	0,12%	-13,75%	-13,75%
Mai	-	-	-7,54%	-7,54%
Jun	-	-	-6,11%	-6,11%
Jul	-	-	-7,41%	-7,41%
Ago	-	-	-7,45%	-7,45%
Set	-	-	-12,48%	-12,48%
Out	-	-	-15,95%	-15,95%
Nov	-0,27%	-0,27%	-20,85%	-20,85%
Dez	-0,08%	-0,08%	-25,00%	-25,00%
Média	-0,35%	-0,35%	-17,22%	-17,22%

Fonte: Autor ,2024.

Comparando as reduções da demanda de energia para resfriamento dos brises adaptativos com os resultados dos brises fixos e móveis, pode-se verificar que os brises adaptativos são 4,77% mais eficazes que os brises fixos e 0,62% do que os brises móveis.

Por fim, ao adotar brises com ângulos adaptativos, observa-se uma clara otimização nos resultados obtidos. Essa otimização foi alcançada mediante a adoção de diferentes ângulos específicos para cada horário ao longo do dia. Com a função objetivo definida para maximizar os níveis de conforto térmico, os resultados confirmaram uma observação previamente realizada nas demais simulações estáticas: os ângulos negativos são consistentemente mais eficazes para promover o conforto térmico em comparação com as angulações positivas. O algoritmo de otimização selecionou, para todos os horários analisados, um intervalo de ângulos variando de 0° a -30° para ambos os brises, confirmando a superioridade dos ângulos negativos na promoção de um ambiente interno mais confortável.

A Tabela 21 apresenta os ângulos mais eficientes para cada hora do dia ao longo do ano do brise H3 e a Tabela 22 do brise H10.

Tabela 21 - Ângulos otimizados para os brises H3

Horário	Ângulos otimizados H3											
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
00:00-07:00	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°
08:00	0°	-9°	-9°	0°	-25°	0°	0°	0°	-30°	-25°	-20°	-20°
09:00	-30°	-30°	-9°	-20°	-30°	-30°	-15°	-30°	-30°	-30°	-30°	-26°
10:00	-24°	-30°	-30°	0°	-30°	-24°	-30°	-30°	-15°	-25°	-30°	-30°
11:00	-30°	-30°	-30°	-30°	-30°	0°	0°	0°	-24°	-30°	-30°	-24°
12:00	-21°	-24°	-20°	-9°	-30°	0°	0°	-30°	-15°	-22°	-30°	-26°
13:00	-18°	0°	-5°	0°	0°	0°	-30°	-15°	-20°	0°	-30°	0°
14:00	0°	0°	0°	0°	0°	0°	-30°	0°	-7°	-30°	0°	0°
15:00	0°	0°	0°	0°	0°	0°	-30°	0°	-5°	-30°	0°	0°
16:00	0°	0°	-10°	0°	0°	-20°	-5°	-9°	0°	0°	0°	0°
17:00	0°	0°	0°	0°	0°	0°	-30°	0°	0°	0°	0°	0°
18:00-23:00	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°

Fonte: Autor, 2024

Tabela 22 - Ângulos otimizados para os brises H10.

Ângulos otimizados H10												
Horário	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
00:00-05:00	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°
06:00	0°	0°	-9°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	-30°	0°
07:00	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°
08:00	0°	-30°	0°	-9°	0°	0°	0°	0°	0°	-30°	-20°	-20°
09:00	-30°	-20°	-30°	0°	-5°	0	0	-5°	-20°	-30°	-25°	-30°
10:00	-24°	-30°	-20°	0°	-30°	-15°	-20°	0°	0°	-20°	-30°	-30°
11:00	-24°	-20°	-30°	-15°	0°	0°	0°	0°	-10°	-30°	-30°	-25°
12:00	-30°	-30°	-20°	-20°	0°	-5°	-5°	0°	-15°	-30°	-30°	-20°
13:00	-24°	-24°	-24°	-30°	-15°	0°	0°	0°	0°	-30°	-30°	-30°
14:00	-20°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	-5°	-5°	-30°	-30°	0°
15:00	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	-5°	0°	-25°	0°	0°
16:00	0°	0°	-9°	0°	0°	0°	-5°	0°	0°	0°	0°	0°
17:00	0°	0°	-9°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	-5°
18:00	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	-5°	0°	0°	0°	-9°
19:00-23:00	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°

Fonte: Autor, 2024.

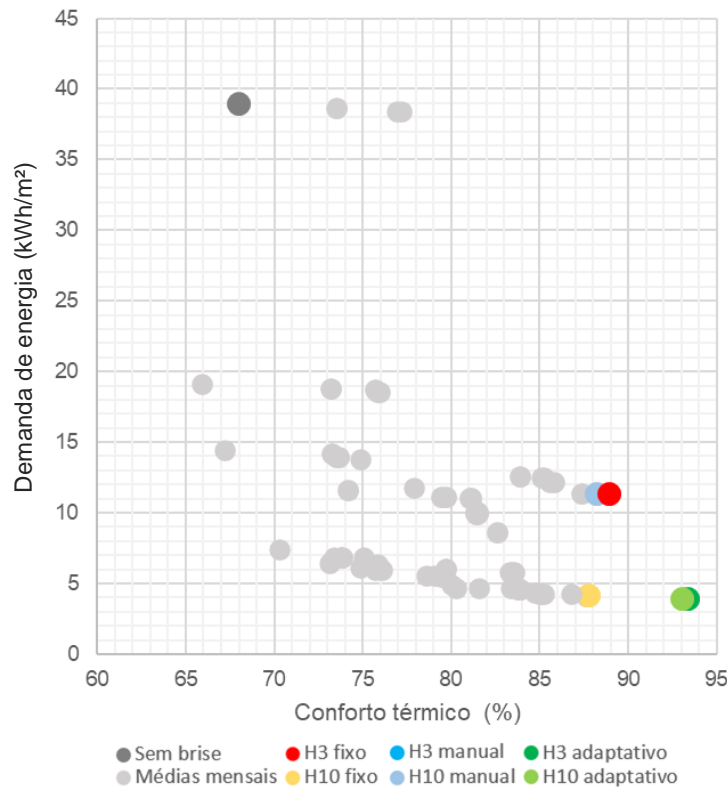
Como visto nos resultados anteriores, os brises com ângulos estáticos positivos não foram tão eficazes quanto os ângulos negativos para o conforto térmico e demanda de energia. Com os brises adaptativos, essa observação também se confirma, com o algoritmo otimizando consistentemente os ângulos entre 0° e -30°.

4.3.4 Síntese dos resultados

Este item tem como objetivo fornecer uma breve síntese dos resultados apresentados nos itens 4.3.1, 4.3.2 e 4.3.3. Através dessa síntese, pretende-se facilitar a compreensão dos resultados e oferecer uma visão geral e integrada das informações discutidas nas seções mencionadas.

A Figura 87 a seguir apresenta a evolução do conforto térmico de todos os elementos simulados, sendo o eixo “x” a porcentagem de conforto térmico e “y” a demanda de energia total de condicionamento térmico (aquecimento e resfriamento). Se comparado com os demais sistemas estudados, é possível observar que os brises adaptativos possuem o melhor valor de conforto térmico.

Figura 87 - Relação entre demanda de energia e o conforto térmico



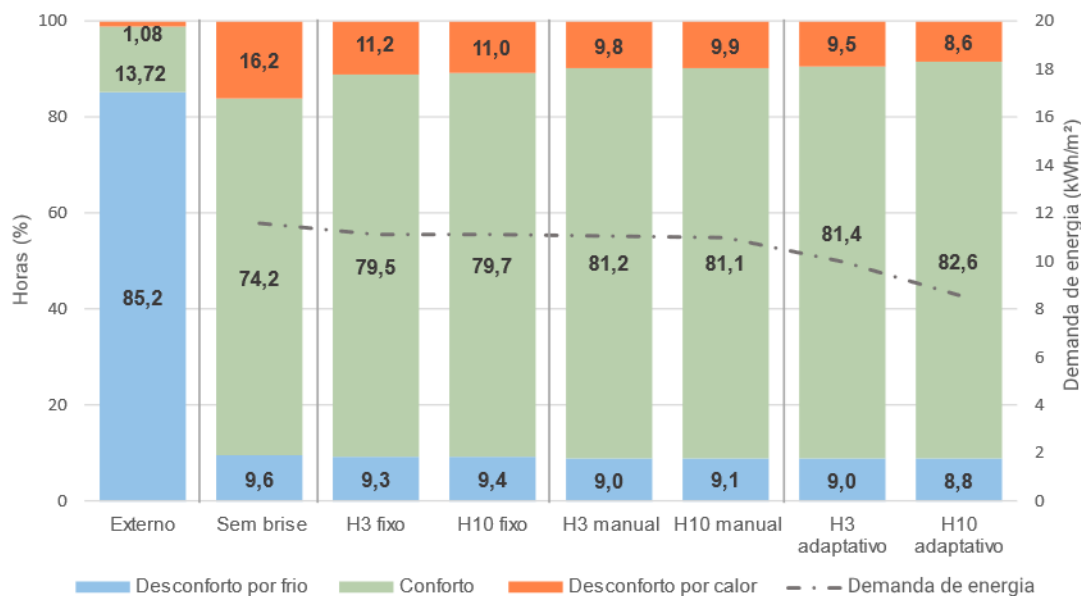
*cinza claro são valores médios mensais e em cores são os melhores valores de cada brise

Fonte: Autor, 2024

A Figura 88 e a Tabela 23 apresentam uma comparação anual do conforto térmico, desconforto térmico por calor e frio, e a demanda de energia entre cada um dos tipos de brise estudados e sem brise. Além disso, a Figura 93 faz uma comparação adicional com o ambiente externo.

Os resultados mostram que, no ambiente externo sem estratégias de sombreamento ou controle adaptativo, há 85,2% das horas com desconforto por frio, 13,72% com conforto e 1,08% com desconforto por calor. Observa-se uma redução no desconforto por frio e um aumento no conforto ao adotar os sistemas de sombreamento. Apenas com as características da edificação, o conforto térmico é de 74,2%, enquanto H3 fixo e H10 fixo apresentam cerca de 79,5% e 79,7% de conforto, respectivamente. As estratégias manuais H3 e H10 aumentam o conforto para 81,2% e 81,1%, respectivamente, com uma leve redução no consumo de energia. Os brises adaptativas H3 e H10 apresentam os melhores resultados, com 81,4% e 82,6% de conforto, respectivamente, e o menor consumo de energia.

Figura 88 – Comparativo dos brises no conforto térmico e na demanda de energia durante o ano



Fonte: Autor, 2024.

Tabela 23 - Síntese dos resultados




Resultados	Fixo		Manual		Adaptativo	
	Sem brise	H3	H3	H10	H3	H10
Conforto Térmico (%)	74,20	79,50	81,17	81,10	81,40	82,60
Desconforto Frio (%)	9,60	9,30	9,00	9,10	9,00	8,80
Desconforto Calor (%)	16,20	11,25	9,80	9,90	9,50	8,60
Resfriamento (kWh/m²)	4,16	3,71	3,60	3,59	3,56	3,56
Aquecimento (kWh/m²)	7,40	7,40	7,40	7,40	7,40	7,38

Legenda: melhor resultado

Fonte: Autor, 2024

A Tabela 24 demonstra os resultados em termos percentuais, comparando cada sistema de sombreamento com a situação sem sombreamento. Essa abordagem facilita a visualização das melhorias proporcionadas por cada método de controle de sombreamento, destacando a eficácia de cada estratégia na redução do desconforto térmico e no aumento das horas de conforto.

Tabela 24 - Síntese dos resultados - comparação entre os brises

Resultados	 Fixo		 Manual		 Adaptativo	
	H3	H10	H3	H10	H3	H10
Conforto Térmico (%)	7,09%	7,29%	9,41%	9,29%	9,79%	11,35%
Desconforto Frio (%)	-2,21%	-1,68%	-5,05%	-4,73%	-5,05%	-7,47%
Desconforto Calor (%)	-30,64%	-32,43%	-39,58%	-39,21%	-32,49%	-46,98%
Resfriamento (kWh/m ²)	-10,82%	-11,06%	-13,46%	-13,70%	-14,42%	-14,42%
Aquecimento (kWh/m ²)	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	-0,27%	-0,27%
Legenda:	Melhor resultado					

Fonte: Autor, 2024.

Em comparação com a edificação sem brise, observa-se com a Tabela 24, que a utilização de brise no caso em estudo, aumentou o conforto térmico entre 7,09 e 11,35%, ao mesmo tempo que reduziu o desconforto por calor entre 30,64% e 46,98%. A demanda energética com condicionamento térmico do ambiente também apresentou uma diminuição considerável, especialmente no resfriamento, entre 10,82 e 14,42%. Entre os casos analisados, os brises adaptativos possuem destaque com os melhores resultados. O brise adaptativo (H10) possui um aumento no conforto térmico em 11,35% e redução significativa do desconforto por calor em 46,98%. Além disso, o brise adaptativo reduz o resfriamento em 14,42% e o aquecimento em 0,27%. O brise manual também melhora o conforto térmico e reduz o desconforto por calor, mas de forma menos eficaz que o adaptativo. O brise fixo (0°) tem desempenho intermediário, com melhorias mais modestas no conforto térmico e reduções menores no desconforto por calor.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Na última década a eficiência energética tornou-se uma demanda crucial. É primordial criar ambientes que proporcionem conforto térmico, pois a qualidade de vida e bem-estar dos indivíduos é de elevada importância. Nas simulações, foram analisadas duas tipologias de brises horizontais, um com três lâminas (denominado H3) e outro com dez lâminas (denominado H10).

As fachadas adaptativas são soluções promissoras para otimizar o desempenho construtivo. Através das simulações numéricas, cujo objetivo era estudar o comportamento da irradiação solar incidente sobre uma superfície envidraçada de uma célula de teste, observou-se que determinados ângulos dos brises influenciam diretamente a eficácia do controle solar. Utilizando algoritmos unicritério, verificou-se que há angulações horárias dos brises onde a incidência solar é mais eficiente. Portanto, os brises adaptativos representam uma abordagem inteligente para explorar o potencial do sistema de sombreamento. Os resultados mostraram que o brise H10 é particularmente mais eficaz, com ângulos negativos recomendados para reduzir a irradiação e os positivos para aumentar a exposição solar no interior de um edifício.

Nas simulações de conforto térmico (20°C a 26°C), o sistema de brises demonstrou melhorias em comparação à célula teste sem sombreamento. Brises estáticos melhoraram o desempenho em relação à célula teste sem sombreamento, e as tipologias H3 e H10 apresentaram ganhos semelhantes, com ângulos negativos sendo mais eficazes em todos os meses. Brises a -30°, -15° e 0° foram os mais eficazes. Em termos de eficiência energética, os brises aumentaram o conforto térmico sem afetar a demanda de aquecimento, mas reduziram a demanda de resfriamento, conforme esperado. Simulações adaptativas com algoritmo unicritério mostraram potencial para otimizar ainda mais o conforto térmico e a eficiência energética, sem diferenças significativas entre as tipologias H3 e H10.

Comparando-se a adoção da célula teste sem brises, com brises fixos, com brise manual e com brise adaptativo, o percentual de conforto

aumenta com a adoção do brise adaptativo, cerca de 11,35% em relação com os resultados obtidos sem os brises, 7,29% em relação ao brise fixo e 9,41% em relação ao brise manual. Da mesma forma, a demanda energética para resfriamento é reduzido em 14,42% com o uso de brise adaptativo, comparado aos 11,06% dos brises fixos e 13,70% com brises manuais. Para a energia de aquecimento, os brises adaptativos mantiveram praticamente a demanda, como os demais brises, não afetaram a demanda de aquecimento. Assim, é possível concluir que a adoção de uma fachada adaptativa apresenta benefícios energéticos, uma vez que tem o potencial de melhorar o conforto térmico e reduzir significativamente a demanda de energia de resfriamento, proporcionando um ambiente interno mais sustentável e eficiente.

O presente trabalho contribui para a compreensão dos benefícios das fachadas adaptativas, com ênfase na adoção de brises adaptativos para o desempenho energético de edifícios. Além de incentivar a adoção de soluções arquitetônicas mais eficientes, a pesquisa apresenta um panorama das metodologias de fachadas adaptativas e das ferramentas computacionais utilizadas para a avaliação e otimização desses elementos.

5.1 RECOMENDAÇÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Com base na experiência adquirida durante o desenvolvimento deste trabalho e na análise dos resultados obtidos, sugere-se, para futuras pesquisas e aprimoramentos, o seguinte:

- Estudar a adoção dos brises adaptativos em diferentes regiões;
- Realizar um estudo de viabilidade econômica para implementação dos brises adaptativos;
- Avaliar o conforto luminoso dos elementos de sombreamento estudados;
- Integrar elementos de inteligência artificial para analisar os resultados e otimizar, em tempo real, a eficiência energética e o conforto térmico.

6 REFERÊNCIAS

AELENEI, D.; AELENEI, L.; VIEIRA, C. P. **Adaptive Façade: Concept, Applications, Research Questions**. Energy Procedia, [s. l.], v. 91, p. 269–275, 2016.

BALVEDI, B. F.; GHISI, E.; LAMBERTS, R. **A review of occupant behaviour in residential buildings**. [S. l.]: Elsevier Ltd, 2018.

BLOCO ARQUITETOS. **Casa Cavalcante** / BLOCO Arquitetos. *In*: 2020. Disponível em: <https://www.archdaily.com.br/br/948462/casa-cavalcante-bloco-arquitetos>. Acesso em: 20 jan. 2023.

BOERI STUDIO. **Edifício Bosco Verticale** / Boeri Studio. *In*: 2015. Disponível em: <https://www.archdaily.com.br/br/778367/edificio-bosco-verticale-boeri-studio>. Acesso em: 20 jan. 2023.

CAMPANHONI, A. **Implantação dos edifícios em Águas Claras-DF: influência no desempenho térmico ambiental dos espaços abertos**. Dissertação (Mestrado Urbanismo, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de Brasília, Brasília, 2011.

CAÑAS, I.; MARTÍN, S. **Recovery of Spanish vernacular construction as a model of bioclimatic architecture**. Building and Environment, [s. l.], v. 39, n. 12, p. 1477–1495, 2004.

CELANI, M. G.; VAZ, C. E. **Scripts em CAD e ambientes de programação visual para modelagem paramétrica: uma comparação do ponto de vista pedagógico**. 2011. - Faculdade de Engenharia Civil e Arquitetura e Urbanismo, UNICAMP., São Paulo (SP), 2011.

DESIGNING BUILDINGS, T. C. W. **Dynamic façade**. United Kingdom: [s. n.], 2020.

DOBZHANSKY, T. On **Some Fundamental Concepts of Darwinian Biology**. *In*: DOBZHANSKY, T.; HECHT, M. K.; STEERE, W. C. (org.). Evolutionary Biology. Boston, MA: Springer US, 1968. p. 1–34. Disponível em: http://link.springer.com/10.1007/978-1-4684-8094-8_1. Acesso em: 13 jan. 2023.

DOE, U. S. D. of E. **EnergyPlus**. *In*: 2022. Disponível em: <https://energyplus.net/>>. Acesso em: 28 fev. 2023.

EIZENBERG, K. **Children’s Museum of Pittsburgh**. *In*: 2005. Disponível em: <https://archello.com/project/childrens-museum-of-pittsburgh>.

FATHY, H. **Natural energy and vernacular architecture: principles and examples with reference to hot arid climates**. Chicago: University of Chicago Press, 1986.

FAVERO, M. **Homem faz casa giratória para garantir chimarrão à sombra em Ituporanga.** *In:* 2016. Disponível em: <https://gauchazh.clicrbs.com.br/geral/noticia/2016/02/homem-faz-casa-giratoria-para-garantir-chimarrao-a-sombra-em-ituporanga-4973925.html>. Acesso em: 21 fev. 2023.

FIGUEIREDO, A.; KÄMPF, J.; VICENTE, R. **Passive house optimization for Portugal: Overheating evaluation and energy performance.** *Energy and Buildings*, [s. l.], v. 118, p. 181–196, 2016.

FIUZA, J. M. **Influência De Elementos De Proteção Solar Horizontais Aplicados A Aberturas Laterais, Na Admissão E Distribuição Da Luz Natural.** 2008. 184 f. - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil, 2008.

FROTA, A. B.; SCHIFFER, S. R. **Manual de conforto termico.** 7. eded. São Paulo (SP): Nobel, 2006.

GAITANI, N.; MIHALAKAKOU, G.; SANTAMOURIS, M. **On the use of bioclimatic architecture principles in order to improve thermal comfort conditions in outdoor spaces.** *Building and Environment*, [s. l.], v. 42, n. 1, p. 317–324, 2007.

GANESH, G. A. *et al.* **Investigation of indoor environment quality and factors affecting human comfort: A critical review.** [S. l.]: Elsevier Ltd, 2021.

GONÇALVES, J. C. S.; DUARTE, D. H. S. **Arquitetura sustentável: uma integração entre ambiente, projeto e tecnologia em experiências de pesquisa, prática e ensino.** *Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído*, [s. l.], v. 6, p. 51–81, 2016.

GOODWIN, P. L. **Brazil Builds: Architecture new and old 1652-1942.** [S. l.]: The Museum of Modern Art, 1943.

HEIDARI MATIN, N.; EYDGAHI, A. **Technologies used in responsive facade systems: a comparative study.** *Intelligent Buildings International*, [s. l.], v. 14, n. 1, p. 54–73, 2022.

HERZOG, T.; KRIPPNER, R.; LANG, W. **Facade Construction Manual.** 1. ed. Munich Technical University: Institute for Design and Building Technology, 2004. Disponível em: https://books.google.com.br/books?id=OTrTAAAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=pt-BR&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=true.

HOSSEINI, S. M. *et al.* **A morphological approach for kinetic façade design process to improve visual and thermal comfort: Review.** *Building and Environment*, [s. l.], v. 153, n. March 2019, p. 186–204, 2019.

HOSSEINI, S. M.; MOHAMMADI, M.; GUERRA-SANTIN, O. **Interactive kinetic façade: Improving visual comfort based on dynamic daylight and**

occupant's positions by 2D and 3D shape changes. Building and Environment, [s. l.], v. 165, p. 106396, 2019.

IEA, I. E. A. Buildings. *In*: IEA. 2024. Disponível em: <https://www.iea.org/energy-system/buildings>. Acesso em: 1 abr. 2024.

IEA, I. E. A. **Latin America Energy Outlook: Brazil Energy Profile.** *In*: 2023. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/brazil-energy-profile#overview>. Acesso em: 1 abr. 2024.

KARPOUZAS, H. **A Casa Moderna Ocidental e o Japão:** 2003. 145 f. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

KEARCH. **Children's Museum of Pittsburgh.** *In*: 2005. Disponível em: <https://www.kearch.com/childrens-museum-of-pittsburgh>. Acesso em: 19 jan. 2023.

KREMER, A. **A Influência de elementos de obstrução solar no nível e na distribuição interna de iluminação natural: Estudo de caso em protótipo escolar de Florianópolis.** 2002. 209 f. - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil, 2002.

LAMBERTS, R. *et al.* **Desempenho térmico de edificações.** 7. ed. Florianópolis, Brasil: Universidade Federal de Santa Catarina, 2016. v. 1

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. O. R. Eficiência Energética na Arquitetura. [s. l.], v. 3, p. 366, 2014.

LANGNER, M. **Design Generativo Para Criação De Elementos De Controle Solar Para A Arquitetura.** Dissertação de Mestrado, [s. l.], p. 146, 2020.

LOONEN, R. C. G. M. *et al.* **Review of current status, requirements and opportunities for building performance simulation of adaptive facades†.** Journal of Building Performance Simulation, [s. l.], v. 10, n. 2, p. 205–223, 2017.

MAKSOUUD, A. *et al.* **Self-learning Buildings: integrating Artificial Intelligence to create a building that can adapt to future challenges.** IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, [s. l.], v. 1019, n. 1, p. 012047, 2022.

MALLASI, Z. **Using parametric BIM integration for prototyping future responsive facades.** Journal of Facade Design and Engineering, [s. l.], p. 89-100 Pages, 2018.

MANGKUTO, R. A. *et al.* **Design Optimisation of Fixed and Adaptive Shading Devices on Four Façade Orientations of a High-Rise Office Building in the Tropics.** Buildings, [s. l.], v. 12, n. 1, p. 25, 2021.

MANZANO-AGUGLIARO, F. *et al.* **Review of bioclimatic architecture strategies for achieving thermal comfort.** *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, [s. l.], v. 49, p. 736–755, 2015.

MARAGNO, G. V. **Eficiência e forma do brise-soleil na arquitetura de campo grande - MS.** 2000. - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.

MATOS, J. C. da S. F.; SCARAZZATO, P. S. **A iluminação natural no projeto de arquitetura: revisão sistemática da literatura.** *PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção*, [s. l.], v. 8, n. 4, p. 249–256, 2017.

MEGAHED, N. A. **Understanding kinetic architecture: typology, classification, and design strategy.** *Architectural Engineering and Design Management*, [s. l.], v. 13, n. 2, p. 130–146, 2017.

MELANIE, M. **An Introduction to Genetic Algorithms.** 5. ed. Cambridge, Massachusetts: MIT Press, 1999.

MICKPEARCE. **Council House 2 Melbourne.** *In:* 2016. Disponível em: <https://www.mickpearce.com/CH2.html>. Acesso em: 19 jan. 2023.

MINDLIN, H. E. **Arquitetura Moderna no Brasil. Rio de Janeiro: Aeroplano, 2000.** 2. ed. Rio de Janeiro: Aeroplano, Iphan, Ministério da Cultura, 2000.

MÖLIER, E.; NAUNGESSER, H. **Adaptable Architecture by Frei Otto – a case study on the future viability of his visions and some forward ideas.** *International Association for Shell and Spatial Structures (IASS)*, [s. l.], n. Proceedings of IASS Annual Symposia, IASS 2015 Amsterdam Symposium: Future Visions – Historical Spatial Structures, p. 1-12(12), 2015. Disponível em: <https://www.ingentaconnect.com/content/iass/piass/2015/00002015/00000018/art00009?crawler=true>.

MORILLÓN-GÁLVEZ, D.; SALDAÑA-FLORES, R.; TEJEDA-MARTÍNEZ, A. **Human bioclimatic atlas for Mexico.** *Solar Energy*, [s. l.], v. 76, n. 6, p. 781–792, 2004.

NALCACI, G; NALCACI, G. **Modeling and Implementation of an Adaptive Facade Design for Energy Efficiently Buildings Based Biomimicry.** *In:* 2020 8TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON SMART GRID (ICSMARTGRID), 2020, Paris, France. 2020 8th International Conference on Smart Grid (icSmartGrid). Paris, France: IEEE, 2020. p. 140–145. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9144954/>. Acesso em: 27 nov. 2022.

NARDELLI, E. S. **Arquitetura e projeto na era digital.** *Arquitetura Revista*, [s. l.], v. 3, p. 10, 2007.

NOVAIS, J. W. Z. *et al.* **Conforto térmico de um laboratório da universidade de cuiabá-unic.** *Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental*, [s. l.], 2015.

NREL, N. L. of the U. S. D. of E. **OpenStudio**. *In*: 2022. Disponível em: <https://energyplus.net/>>. Acesso em: 28 fev. 2023.

OBRA DO BERÇO. **Obra do Berço: As Linhas do Jovem Niemeyer**. *In*: OBRA DO BERÇO. 2020. Disponível em: <https://aobradobercorj.org.br/niemeyer/>. Acesso em: 26 fev. 2023.

PARENTE, J. M. N. *et al.* **Algoritmos Evolutivos Integrados à Simulação Termo-Energética em Arquitetura: Uma Análise de 20 Anos de Publicações**. *In*: , 2018, Universidade do Porto. Construção 2018 - Reabilitar e Construir de Forma Sustentável. Universidade do Porto: [s. n.], 2018. Disponível em: <https://hdl.handle.net/10216/117102>.

PERROS, H. **Computer Simulation Techniques: The definitive introduction!** NC State University: Computer Science Department, 2009.

PICCOLI, M. L. **Por dentro do famoso prédio giratório de Curitiba; que gira de verdade**. *In*: 2018. Disponível em: <https://www.gazetadopovo.com.br/haus/imoveis/suite-vollard-por-dentro-do-famoso-predio-giratorio-de-curitiba/>. Acesso em: 20 fev. 2023.

POPESCU, D. *et al.* **Impact of energy efficiency measures on the economic value of buildings**. *Applied Energy*, [s. l.], v. 89, n. 1, p. 454–463, 2012.

RAFSANJANI, H. N.; NABIZADEH, A. H. **Towards digital architecture, engineering, and construction (AEC) industry through virtual design and construction (VDC) and digital twin**. *Energy and Built Environment*, [s. l.], p. S266612332100060X, 2021.

RICCI, A. *et al.* **Development of a self-sufficient dynamic façade within the context of climate change**. *Architectural Science Review*, [s. l.], v. 64, n. 1–2, p. 87–97, 2021.

RIZI, R. A.; ELTAWHEEL, A. **A user detective adaptive facade towards improving visual and thermal comfort**. *Journal of Building Engineering*, [s. l.], v. 33, p. 101554, 2021.

ROMANO, R. *et al.* **What is an adaptive façade? Analysis of Recent Terms and definitions from an international perspective**. *Journal of Facade Design and Engineering*, [s. l.], p. 65-76 Pages, 2018.

ROUDSARI, M. S.; PAK, M. **Ladybug: A parametric environmental plugin for grasshopper to help designers create an environmentally-conscious design**. *Proceedings of BS 2013: 13th Conference of the International Building Performance Simulation Association*, [s. l.], n. December, p. 3128–3135, 2013.

RUTTEN, D. **Evolutionary Principles applied to Problem Solving**. *In*: 2010. Disponível em: <https://www.grasshopper3d.com/profiles/blogs/evolutionary-principles>. Acesso em: 5 mar. 2023.

SCHUMACHER, M.; VOGT, M.; KRUMME, L. A. **New MOVE. Architecture in Motion - New Dynamic.** *In*: [S. l.]: Birkauer Architecture, 2019. v. 1, p. 202.

SHAFAGHAT, A.; KEYVANFAR, A. **Dynamic façades design typologies, technologies, measurement techniques, and physical performances across thermal, optical, ventilation, and electricity generation outlooks.** *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, [s. l.], v. 167, p. 112647, 2022.

TABADKANI, A. *et al.* **Design approaches and typologies of adaptive facades: A review.** *Automation in Construction*, [s. l.], v. 121, n. November 2020, p. 103450, 2021a.

TABADKANI, A. *et al.* **Design approaches and typologies of adaptive facades: A review.** *Automation in Construction*, [s. l.], v. 121, p. 103450, 2021b.

TRAMONTANO, M. **Quando pesquisa e ensino se conectam: design paramétrico, fabricação digital e projeto de arquitetura.** *In*: XIX CONGRESSO DA SOCIEDADE IBERO-AMERICANA DE GRÁFICA DIGITAL 2015, 2015, Florianópolis, Brasil. *Anais do XIX Congresso da Sociedade Ibero-americana de Gráfica Digital 2015*. Florianópolis, Brasil: Editora Edgard Blücher, 2015. p. 544–550. Disponível em: <http://www.proceedings.blucher.com.br/article-details/22364>. Acesso em: 15 dez. 2022.

VELASCO, R.; BRAKKE, A. P.; CHAVARRO, D. **Dynamic façades and computation: Towards an inclusive categorization of high performance kinetic façade systems.** *Communications in Computer and Information Science*, [s. l.], v. 527, p. 172–191, 2015.

VETTORAZZI, E; SACTH, H, M; PUNHAGUI, K, R. G.; TEIXEIRA, P, S. **Contribuições da arquitetura árabe para os elementos de controle solar da arquitetura brasileira.** *Arquitextos*, São Paulo, ano 23, n. 271.00, Vitruvius,dez.2022
<<https://vitruvius.com.br/revistas/read/arquitextos/23.271/8681>>.

VETTORAZZI, E. **Contribuições das estratégias do conceito Passive House para edificações energeticamente mais eficientes na Região Sul-Brasileira.** 2019. - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/200563/001103299.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.

WINSTANLEY, T. **AD Classics: Institut du Monde Arabe / Enrique Jan + Jean Nouvel + Architecture-Studio.** *In*: ARCHDAILY. 2 out. 2011. Disponível em: <https://www.archdaily.com/162101/ad-classics-institut-du-monde-arabe-jean-nouvel>.

YAO, R.; LI, B.; LIU, J. **A theoretical adaptive model of thermal comfort - Adaptive Predicted Mean Vote (aPMV).** *Building and Environment*, [s. l.], v. 44, n. 10, p. 2089–2096, 2009.

YU, W. *et al.* **Application of multi-objective genetic algorithm to optimize energy efficiency and thermal comfort in building design.** *Energy and Buildings*, [s. l.], v. 88, p. 135–143, 2015.

ZARDO, P.; SILVA, J. L.; MUSSI, A. Q. **Dynamo e Grasshopper: Difusão científica e popularidade entre usuários.** 2016. Artigo de mestrado do - Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo IMED, Rio Grande do Sul, 2016.

APÊNDICE A

Tabela A.1 - Artigos utilizados para categorização das publicações.

ARTIGO	AUTORES	DATA	CITAÇÃO (dez/2023)
The Sustainability of Adaptive Envelopes: Developments of Kinetic Architecture	Barozzi, M., Lienhard, J., et al	2016	87
Plant-inspired adaptive structures and materials for morphing and actuation: A review	Li, S., Wang, K.W.	2017	85
Interactive kinetic façade: Improving visual comfort based on dynamic daylight and occupant's positions by 2D and 3D shape changes	Hosseini, S.M., Mohammadi, M., Guerra-Santin, O.	2019	64
The evolution of building energy retrofit via double-skin and responsive façades: A review	Ascione, F., Bianco, N., et al	2021	53
Passive cooling & climate responsive façade design exploring the limits of passive cooling strategies to improve the performance of commercial buildings in warm climates	Prieto, A., Knaack, U., Auer, T., Klein, T.	2018	50
Kinetic systems in architecture: New approach for environmental control systems and context-sensitive buildings	Ramzy, N., Fayed, H.	2011	42
Obtaining Reversible, High Contrast Electrochromism, Electrofluorochromism, and Photochromism in an Aqueous Hydrogel Device Using Chromogenic Thiazolothiazoles	Adams, T.J., Brotherton, A.R., et al.	2021	39
Adaptive building envelopes of multistory buildings as an example of high performance building skins	Shahin, H.S.M.	2019	35
Computational modelling methods for pliable structures based on curved-line folding	Vergauwen, A., Laet, L.D., Temmerman, N.D.	2017	28
Integrating interactive kinetic façade design with colored glass to improve daylight performance based on occupants' position	Hosseini, S.M., Mohammadi, M., et al.	2020	26
Development of a performance-based design framework for multifunctional climate-responsive façades	Soudian, S., Berardi, U.	2021	24
Performative design environment for kinetic photovoltaic architecture	Jayathissa, P., Caranovic, et al	2018	24
SMP Prototype Design and Fabrication for Thermo-responsive Façade Elements	Yoon, J.	2019	23
Scenario-based design: New applications in metamorphic architecture	Eilouti, B.	2018	21
Self-shaping building skin: Comparative environmental performance investigation of shape-memory-alloy (SMA) response and artificial-intelligence (AI) kinetic control	Yi, H., Kim, Y.	2021	18

Continuação **Tabela A.1**

ARTIGO	AUTORES	DATA	CITAÇÃO (dez/2023)
Understanding kinetic architecture: typology, classification, and design strategy	Megahed, N.A.	2017	17
Integrating illuminance and energy evaluations of cellular automata controlled dynamic shading system using new hourly-based metrics	Ayoub, M.	2018	16
Technologies used in responsive facade systems: a comparative study	Heidari Matin, N., Eydgahi, A.	2022	12
Comparative analysis of technologies used in responsive building facades	Matin, N.H., Eydgahi, A., Shyu, S.	2017	12
Performance evaluation and design of thermo-responsive SMP shading prototypes	Yoon, J., Bae, S.	2020	11
4D printing of wooden actuators: encoding FDM wooden filaments for architectural responsive skins	El-Dabaa, R., Salem, I.	2021	10
A data-driven optimized daylight pattern for responsive facades design	Heidari Matin, N., Eydgahi, A.	2022	9
Characterizing smart environments as interactive and collective platforms: A review of the key behaviors of responsive architecture	Lee, J.H., Ostwald, M.J., Kim, A.M.J.	2021	9
Experimental performance evaluation of a climate-responsive ventilated building façade	Soudian, S., Berardi, U.	2022	8
Design optimum responsive façade based on visual comfort and energy performance	Valitabar, M., Moghimi, M., Mahdavinejad, M., Pilechiha, P.	2018	8
4D-printed parametric façade in architecture: prototyping a self-shaping skin using programmable two-way shape memory composite (TWSMC)	Yi, H.	2022	7
Energy modelling and saving potential of polymeric solar-responsive thermochromic window films	Khaled, K., Berardi, U.	2022	7
The adaptive power of ammophila arenaria: Biomimetic study, systematic observation, parametric design, and experimental tests with bimetal	de Andrade, T.A.B., Beirão, J.N.D.C., et al	2021	7
Embedding intelligence to control adaptive building envelopes	Favoino, F., Baracani, M., et al	2021	6
Analysis and applications of theo jansen's linkage Mechanism: Theo Jansen's linkage mechanism on kinetic architecture	Wang, C.-Y., Hou, J.-H.	2018	5

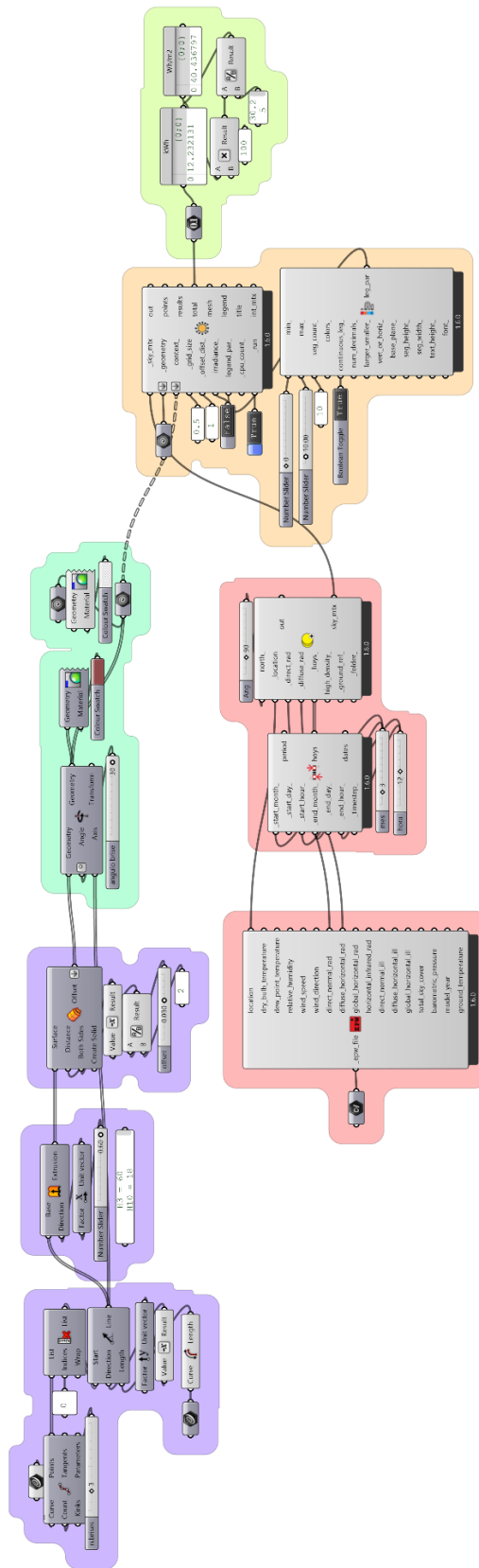
Continuação **Tabela A.1**

ARTIGO	AUTORES	DATA	CITAÇÃO (dez/2023)
Building performance simulation of a photovoltaic façade enhanced with latent heat storage: Model validation and power generation prediction	Čurpek, J., Čekon, M.	2022	4
Assisting the development of innovative responsive façade elements using building performance simulation	Klijn-Chevalerias, M.L., Loonen, R.C.G.M., et al	2017	4
Visual Comfort Assessment of Hospital Patient Rooms with Climate Responsive Facades	Toodekharman, H., Abravesh, M., Heidari, S.	2023	3
Reasons for Implementing Movement in Kinetic Architecture	Cudzik, J., Nyka, L.	2017	3
Using parametric BIM integration for prototyping future responsive façades	Mallasi, Z.	2018	3
Evaluating visual comfort metrics of responsive facade systems as educational activities	Matin, N.H., Eydgahi, A., Shyu, S., Matin, P.	2018	3
The Influence of Using Responsive Façade as a Tool for Improving the Built Environment: Case study: Attaba - Opera square	Eltanboly, M.F., Afify, M.M.	2022	2
Exploring the Impact of Geometry and Fibre Arrangements on Daylight Control in Bistable Kinetic Shades	Vazquez, E., Duarte, J.	2022	2
Design, fabrication and computational simulation of a bio-kinetic façade inspired by the mechanism of the Lupinus Succulentus plant for daylight and energy efficiency	Anzaniyan, E., Alaghmandan, M., Montaser Koohsari, A.	2022	2
Magnetic actuation of bistable flaps for kinetic building shades	Vazquez, E., Ounaies, Z., Iatesta, E., Duarte, J.	2023	2
A Comparative Study on Smart Windows Focusing on Climate-Based Energy Performance and Users' Comfort Attributes	Rashidzadeh, Z., Heidari Matin, N.	2023	2
Multi-performative façade systems: The case of real-time adaptive BIPV shading systems to enhance energy generation potential and visual comfort	Biloria, N., Makki, M., Abdollahzadeh, N.	2023	2
Kinetic Shades: Designing a Shape-Morphing Device with Bistable Laminates and Shape Memory Actuators	Vazquez, E., Diarte, J., Duarte, J.	2023	1
A design framework for a kinetic shading device system for building envelopes	Tavares da Silva, F., Cruz Gaspari Veras, J.	2023	1

Fonte: Autor, 2024.

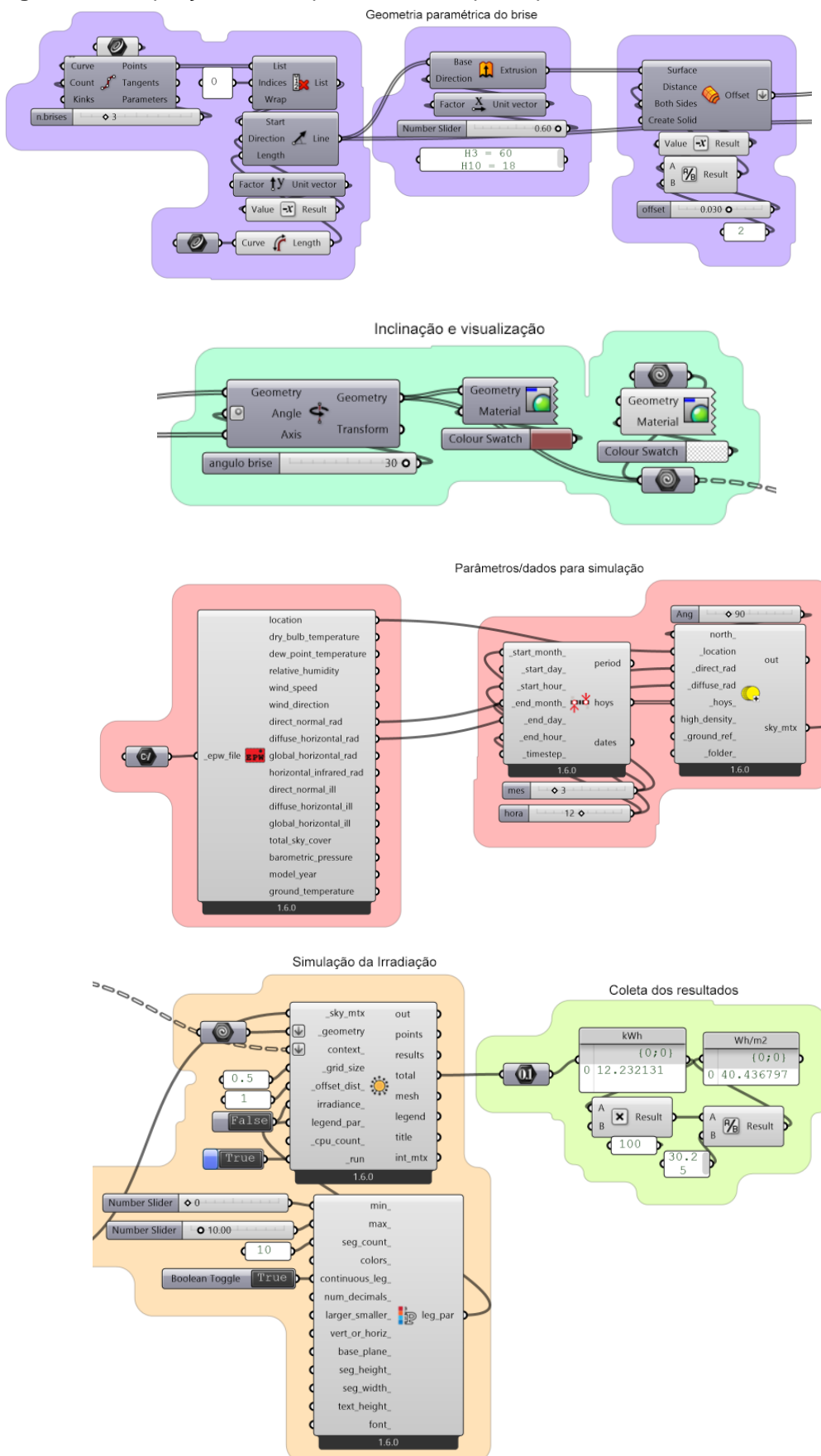
APÊNDICE B

Figura B1 - Script de simulação irradiação (fase 2)



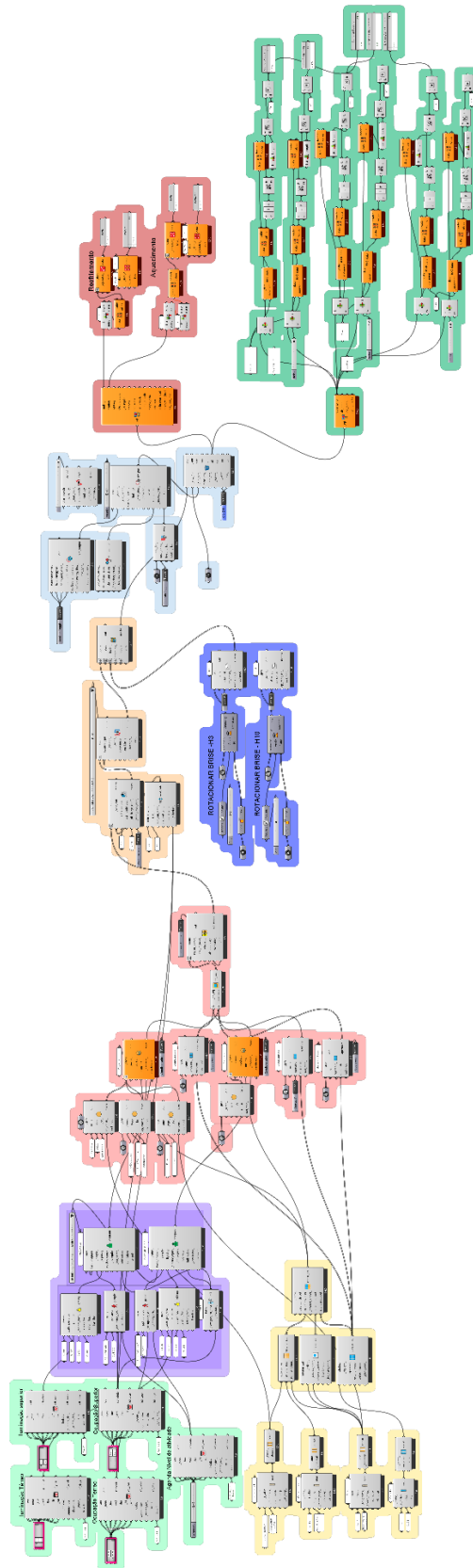
Fonte: Autor, 2024.

Figura B2 - Ampliação dos componentes do script Script



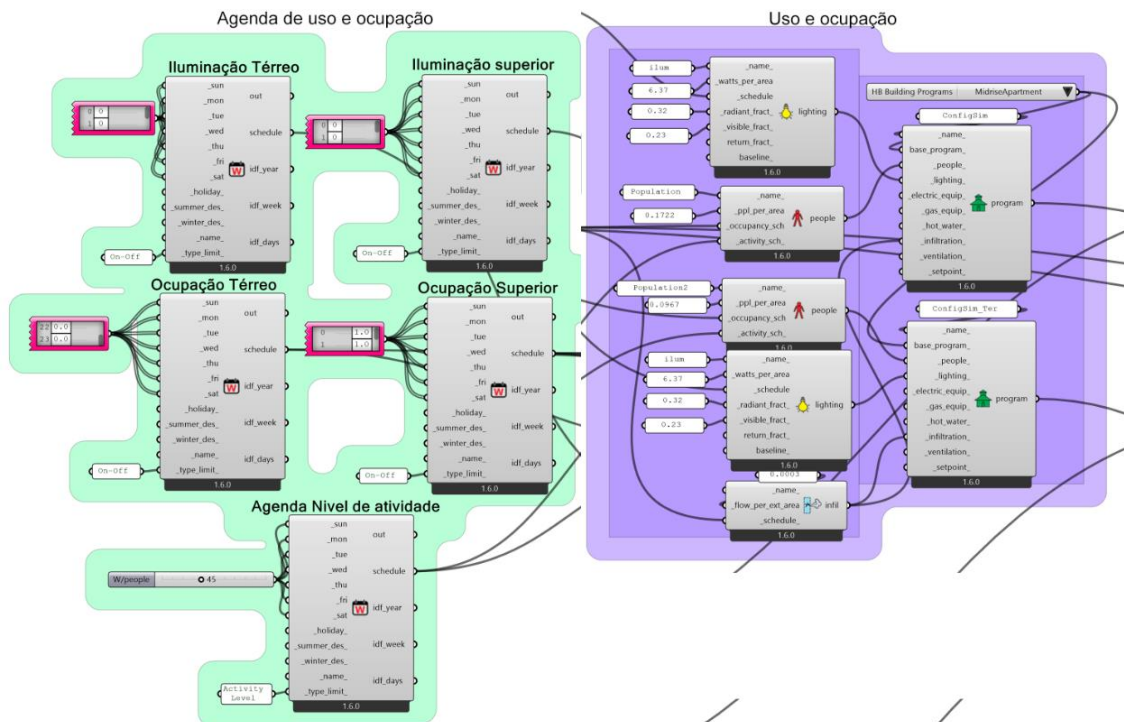
Fonte: Autor, 2024

Figura B3 - Script de simulação termoenergética (fase 3)



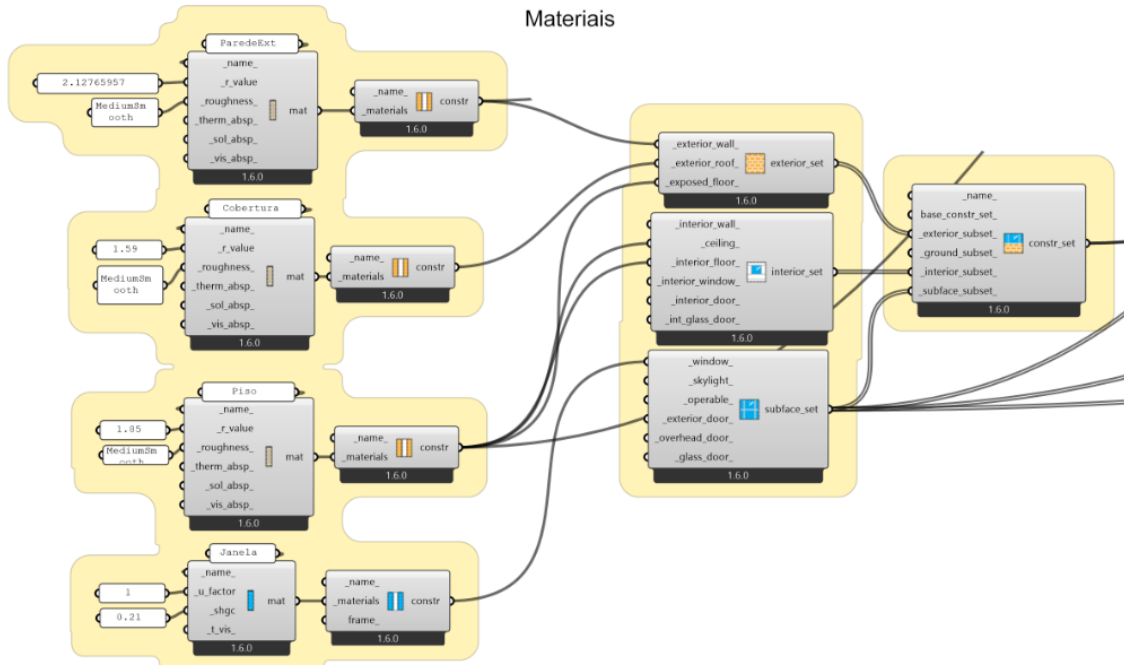
Fonte: Autor, 2024.

Figura B4 - Script agendas, uso e ocupação



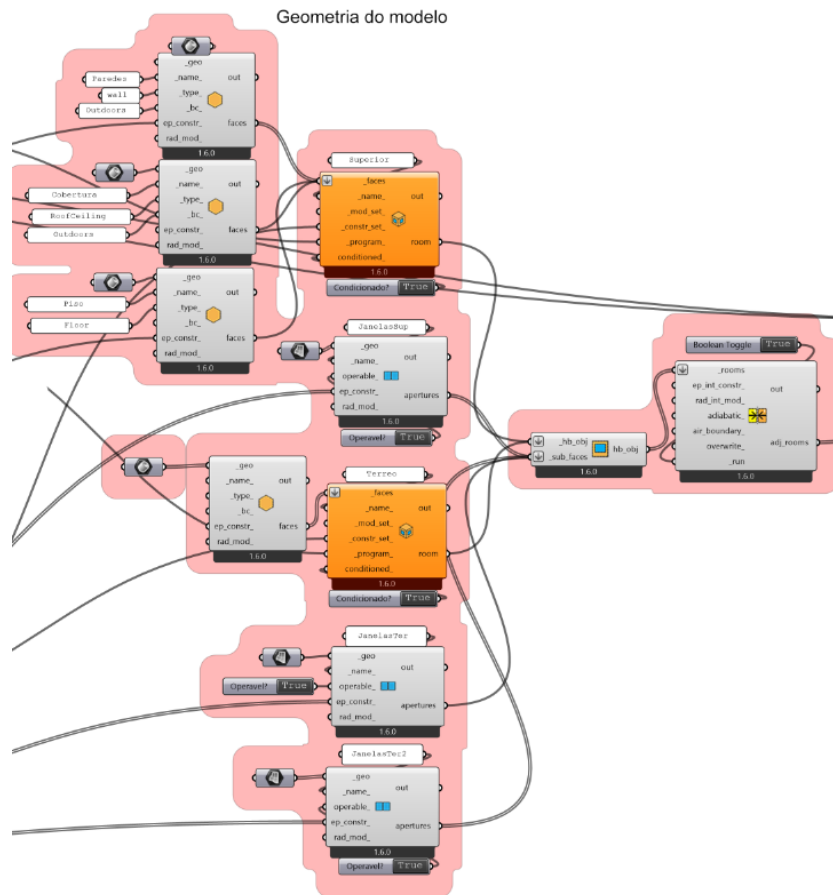
Fonte: Autor, 2024

Figura B5 - Script materiais



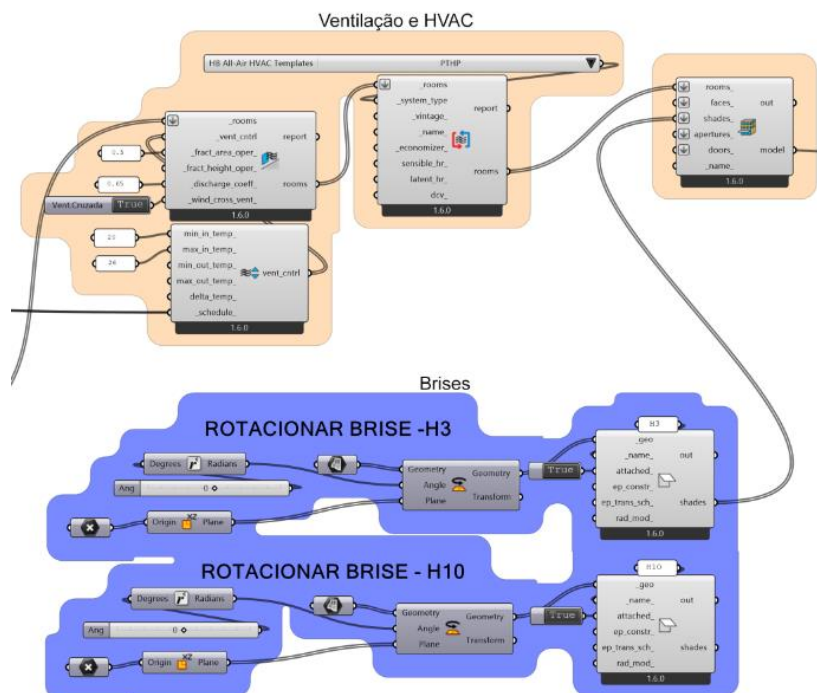
Fonte: Autor, 2024

Figura B6 - Script modelo de simulação



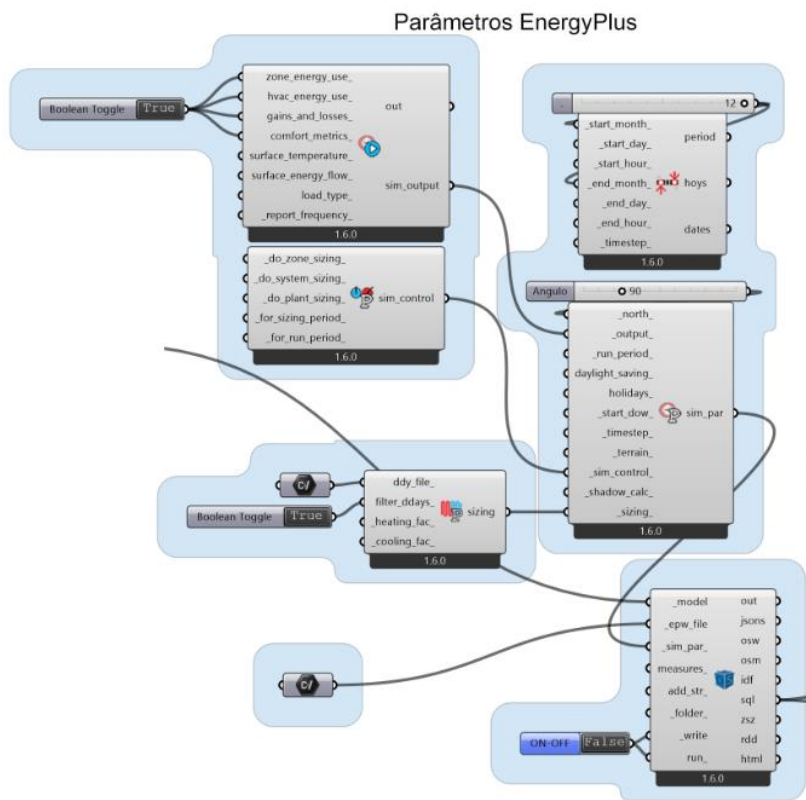
Fonte: Autor, 2024

Figura B7 - Script ventilação e brises



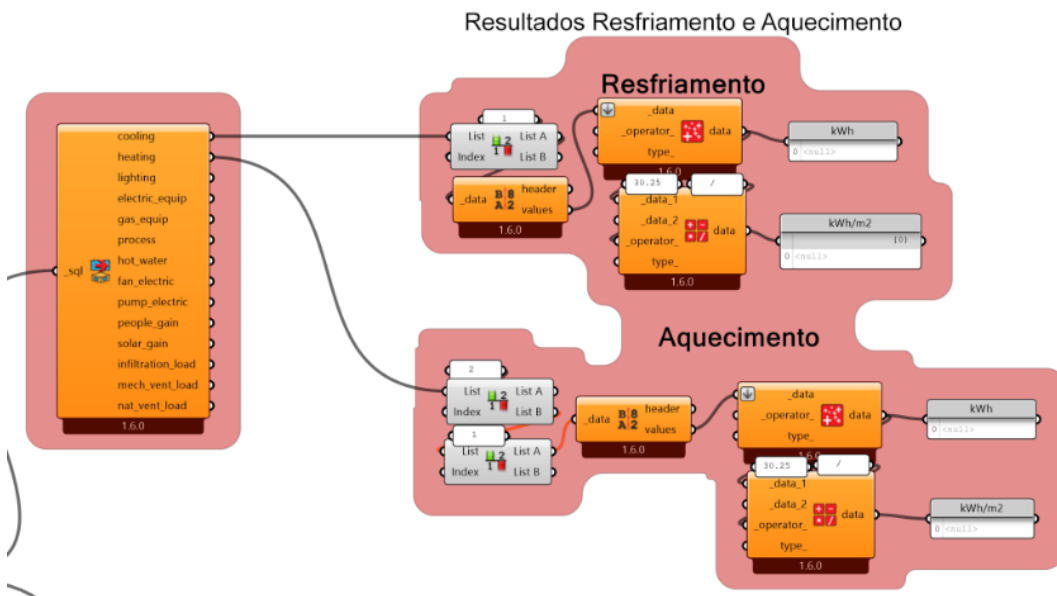
Fonte: Autor, 2024

Figura B8 - Script parâmetros EnergyPlus



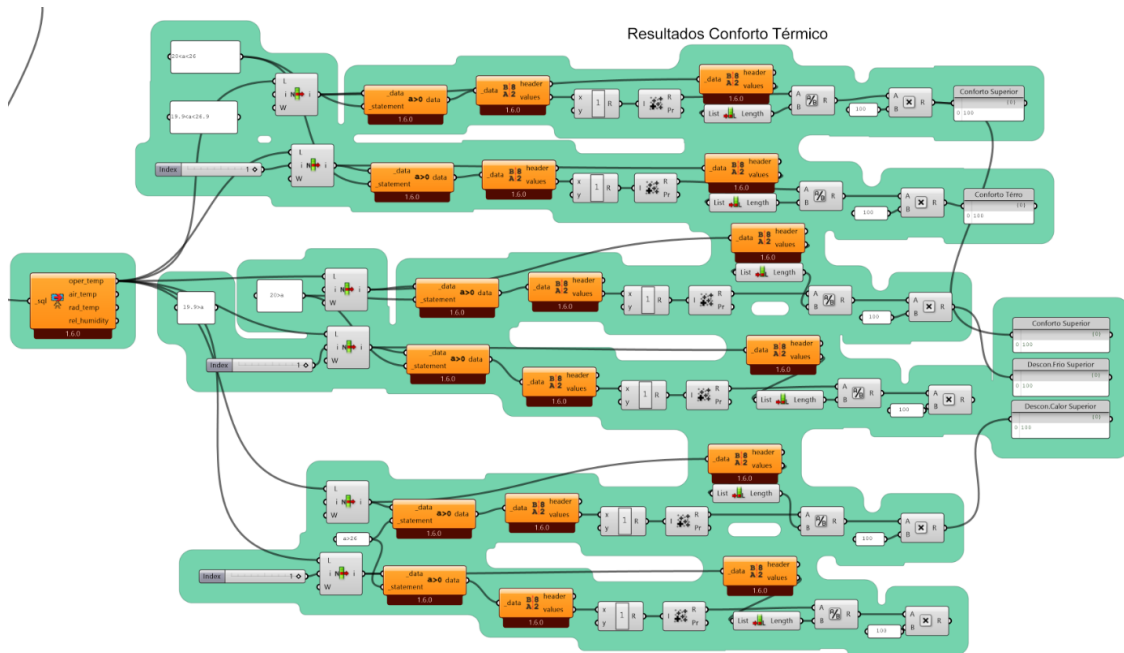
Fonte: Autor, 2024

Figura B9 - Script coleta dos resultados de aquecimento e resfriamento



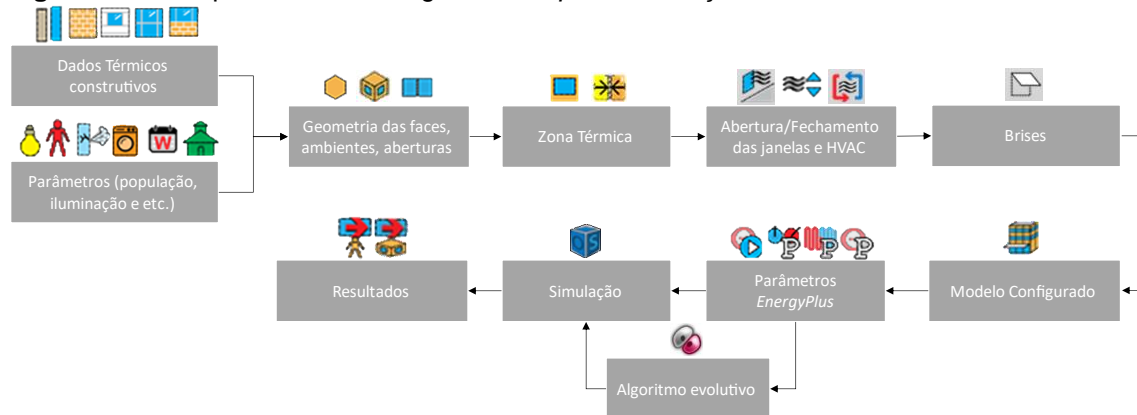
Fonte: Autor, 2024

Figura B10 - Script coleta de resultados de conforto e desconforto térmico




















Fonte: Autor, 2024.

Figura B11 - Sequencial de montagem do script de simulação



Fonte: Autor, 2024

Tabela B 1 - Componentes utilizados no algoritmo de simulação

ÍCONE	COMPONENTE	FUNCIONALIDADE DO COMPONENTE
	HB Face	Usado para criar uma superfície térmica pelo HoneyBee que pode ser utilizado na zona térmica
	HB Room	Usado para criar uma ambiente térmico a partir das faces térmicas
	HB Aperture	Usado para criar as janelas do modelo. Que pode ser usado na zona térmica
	HB add Surface	Usado para vincular as aberturas no ambiente térmico
	HB Solve Adjacencies	Usado para resolver adjacências entre zonas
	HB Model	Usado para criar o modelo a ser enviado para simulação (mantém os dados do modelo)
	HB Shade	Usado para criar o sombreamento
	HB Opaque Material no Mass	Usado para adicionar os dados térmicos de um material construtivo a partir com a resistência térmica
	HB Window Material	Usado para adicionar os dados térmicos das janelas
	HB Exterior Construction	Usado para vincular os materiais construtivos externos
	HB Interior Construction	Usado para vincular os materiais construtivos internos
	HB Subface Subset	Usado para vincular os materiais construtivos de janelas e portas
	HB Construction Set	Usado para criar os dados térmicos de todos os materiais construtivos
	HB Lighting	Usado para informar os parâmetros de iluminação para a simulação
	HB People	Usado para informar os parâmetros da população para a simulação
	HB Infiltration	Usado para informar os parâmetros da infiltração para a simulação
	HB Equipment	Usado para informar os parâmetros de equipamentos para a simulação

Continuação **Tabela B1**

	HB Weekly Schedule	Usado para criar agendas semanais para os parâmetros de iluminação, ocupação e etc.
	HB Program	Usado para vincular todos os componentes dos parâmetros para simulação
	HB Window Opening	Usado para informar quais os parâmetros de abertura e fechamento das janelas
	HB Ventilation Control	Usado para informar a temperatura de abertura e fechamento vinculado ao HB Window Opening
	HB All-Air HVAC	Usado para o dimensionamento do sistema de ar-condicionado.
	HB Simulation Output	Objeto de saída de simulação selecionando conjuntos de variáveis de saída comumente solicitadas.
	HB Simulation Control	Controles de simulação com instruções para quais tipos de EnergyPlus cálculos a serem executados.
	HB Sizing Parameter	Criar parâmetros com critérios para dimensionamento do sistema de aquecimento e refrigeração.
	HB Simulation Parameter	Criar um objeto de parâmetro de simulação que contenha um conjunto completo para o EnergyPlus
	Galapagos	Utilizado para criar algoritmos evolutivos
	HB Model to OSM	Modelo do Honeybee em um arquivo OSM (modelo OpenStudio) e executado através do EnergyPlus.
	HB Read Comfort Result	Analisa todos os resultados comuns relacionados ao conforto que foi gerado a partir de uma simulação
	HB Read Energy Result	Analisa todos os resultados comuns relacionados ao consumo de energia que foi gerado a partir de uma simulação

Fonte: Autor, 2024.