

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO DE ARTES – PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ARQUITETURA E URBANISMO

TIAGO DEL PUPPO FAVILLA LOBO

**SISTEMA GENERATIVO EVOLUTIVO MULTIOBJETIVO PARA
PROTEÇÕES SOLARES HORIZONTAIS EM EDIFICAÇÕES**

VITÓRIA
2024

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO DE ARTES – PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ARQUITETURA E URBANISMO

TIAGO DEL PUPPO FAVILLA LOBO

**SISTEMA GENERATIVO EVOLUTIVO MULTIOBJETIVO PARA
PROTEÇÕES SOLARES HORIZONTAIS EM EDIFICAÇÕES**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito para obtenção do grau de Mestre em Arquitetura e Urbanismo.

Orientador:
Prof. Dr. Jarryer Andrade de Martino

VITÓRIA

2024

Ficha catalográfica disponibilizada pelo Sistema Integrado de
Bibliotecas - SIBI/UFES e elaborada pelo autor

L799s Lobo, Tiago Del Puppo Favilla, 1990-
Sistema generativo evolutivo multiobjetivo para proteções
solares horizontais em edificações / Tiago Del Puppo Favilla
Lobo. - 2024.
142 f. : il.

Orientador: Jarryer Andrade de Martino.
Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) -
Universidade Federal do Espírito Santo, Centro de Artes.

1. Proteção solar na arquitetura. 2. Algoritmos genéticos. 3.
Conforto humano. 4. Iluminação. 5. Desempenho. I. Martino,
Jarryer Andrade de. II. Universidade Federal do Espírito Santo.
Centro de Artes. III. Título.

CDU: 72

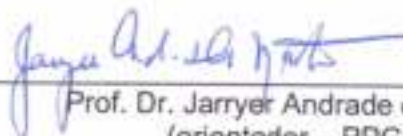
TIAGO DEL PUPPO FAVILLA LOBO

**"SISTEMA GENERATIVO EVOLUTIVO MULTIOBJETIVO PARA
PROTEÇÕES SOLARES HORIZONTAIS EM EDIFICAÇÕES"**

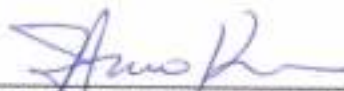
Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em
Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal do Espírito
Santo, como requisito final para a obtenção do grau de Mestre em
Arquitetura e Urbanismo.

Aprovada em 25 de março de 2024.

Comissão Examinadora



Prof. Dr. Jarryer Andrade de Martino
(orientador – PPGAU/UFES)



Profa. Dra. Edna Aparecida Nico Rodrigues
(membro interno – PPGAU/UFES)



Profa. Dra. Cynthia Marconsini Loureiro Santos
(membro externo – UVV)

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço aos meus pais, José e Rita, por seu apoio e incentivo constantes, pois, sem eles, este trabalho não teria sido possível.

À minha companheira, Iasmim, dedico um agradecimento especial por sua compreensão, paciência e por estar ao meu lado em todos os momentos, compartilhando as alegrias e os desafios desta jornada.

Ao meu orientador Jarryer, expresso minha profunda gratidão pelo conhecimento compartilhado, paciência e orientação, fundamentais para o desenvolvimento desta pesquisa e para o meu amadurecimento como pesquisador.

Aos amigos, cujo apoio e companheirismo foram fundamentais durante toda a jornada acadêmica. Suas palavras de encorajamento, momentos de descontração e apoio incondicional foram essenciais para manter-me motivado e inspirado ao longo deste caminho.

Agradeço também aos membros da banca, Cynthia e Edna, pelas valiosas contribuições e considerações feitas à pesquisa, as quais enriqueceram significativamente este trabalho.

Aos professores virtuais que me auxiliaram no aprendizado dos *softwares* e *plugins* necessários para a realização da pesquisa, expresso minha gratidão pela dedicação e pelo conhecimento compartilhado.

À Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), em especial ao PPGAU (Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo), pela oportunidade de integrar o quadro de discentes, pelo ambiente acadêmico e pelo suporte oferecido ao longo desta jornada.

Por fim, gostaria de agradecer ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPQ) pela bolsa de estudos concedida, a qual foi fundamental para viabilizar a realização deste projeto e para o meu desenvolvimento acadêmico.

“A própria luta para chegar ao cume basta para encher o coração de um homem.”

(Albert Camus em O Mito de Sísifo)

SISTEMA GENERATIVO EVOLUTIVO MULTIOBJETIVO PARA PROTEÇÕES SOLARES HORIZONTAIS EM EDIFICAÇÕES¹

Tiago Del Puppo Favilla Lobo²

RESUMO

Em climas quentes, elementos de proteção solar horizontais, como beirais e varandas, podem auxiliar na redução da carga térmica nos ambientes internos e resultar em um menor consumo energético por sistemas de refrigeração, mas, dependendo do seu tamanho, também podem acarretar em uma menor disponibilidade de luz natural nos ambientes internos. A iluminação desempenha um papel menor na eficiência energética das edificações residenciais, mas possui uma importância psicofisiológica na saúde humana. Desta forma, esta pesquisa teve como principal objetivo desenvolver um sistema generativo que possa auxiliar no dimensionamento de proteções solares horizontais, alcançando resultados de conforto térmico satisfatórios, ao mesmo tempo em que garanta maior disponibilidade de luz natural, criando elementos de formas variadas. Para isso, em um primeiro momento, foi realizada uma revisão bibliográfica sobre varandas e outras proteções solares horizontais e os critérios ambientais para o seu dimensionamento. Em seguida, também por meio de revisão bibliográfica, foi apresentado o conceito de algoritmos genéticos com foco em análises multiobjetivo e sistemas generativos de projeto, seus tipos e exemplos de aplicação para dimensionamento de proteções solares. Em uma terceira etapa, baseada na Design Science Research, foi apresentada a metodologia para o desenvolvimento do sistema generativo e respectivas análises ambientais. Foi utilizado o software Rhyno 6 para modelagem 3D e os plugins Grasshopper para modelagem paramétrica, Honeybee para análises ambientais e Wallacei para avaliação multiobjetivo. Foram utilizados resultados de conforto adaptativo por meio de mapas de calor de Temperatura Operativa, Percentual de Conforto Térmico e Percentual de Calor. Para a avaliação do desempenho lumínico, foram utilizados resultados de DA, UDI 200-3000 lux, UDI<200 lux, UDI>3000 lux e sDA. Em uma quarta etapa foi apresentado o algoritmo do sistema generativo, assim como os resultados das análises ambientais em comparação com o edifício genérico com elementos de proteção de 0,5m e 3m. Como resultado, para o pavimento tipo da edificação, o sistema generativo apresentou índices de conforto térmico similares ao da maior proteção e desempenho lumínico superior a este último, enquanto reduziu a área construída dos elementos em 31,75% em média. Ao final, foram feitas as considerações finais como forma de contribuir para o desenvolvimento do tema.

Palavras-chave: varanda, proteções solares, conforto térmico, desempenho lumínico, sistema generativo evolutivo, análises multiobjetivo.

¹ Esta dissertação foi orientada pelo Prof. Dr. Jarryer Andrade de Martino, professor titular do Departamento de Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal do Espírito Santo, email: jarryer.martino@ufes.br

² E-mail: tiago.fav@gmail.com, mestrando do Curso Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal do Espírito Santo

MULTIOBJECTIVE EVOLUTIONARY GENERATIVE SYSTEM FOR HORIZONTAL SUNSHADES IN BUILDINGS ³

Tiago Del Puppo Favilla Lobo⁴

ABSTRACT

In hot climates, horizontal shading elements such as eaves and balconies can help reduce thermal load in indoor environments and result in lower energy consumption by cooling systems. However, depending on their size, they may also lead to reduced availability of natural light indoors. Lighting plays a lesser role in the energy efficiency of residential buildings but holds psychophysiological importance for human health. Thus, this research aimed to develop a generative system to determine the size of horizontal shading devices, achieving satisfactory thermal comfort results while ensuring greater availability of natural light, creating elements of various forms. Initially, a literature review was conducted on balconies and other horizontal shading devices and the environmental criteria for their sizing. Subsequently, through another literature review, the concept of genetic algorithms focusing on multi-objective analyses and generative design systems was presented, along with their types and examples of application for sizing shading devices. In a third stage, based on Design Science Research, the methodology for developing the generative system and respective environmental analyses was presented. Rhinoceros 6 software was used for 3D modeling, Grasshopper plugins for parametric modeling, Honeybee for environmental analyses, and Wallacei for multi-objective evaluation. Results of adaptive comfort were obtained through Operative Temperature heat maps, Thermal Comfort Percentage, and Heat Percentage. For the assessment of luminous performance, results of Daylight Autonomy, UDI 200-3000 lux, UDI<200 lux, UDI>3000 lux, and sDA were used. In a fourth stage, the algorithm of the generative system was presented, along with the results of environmental analyses compared to a generic building with shading elements of 0.5m and 3m. As a result, for the typical floor of the building, the generative system showed thermal comfort indices similar to those of the larger shading device and superior luminous performance compared to the latter, while reducing the constructed area of the elements by an average of 31.75%. Finally, concluding remarks were made to contribute to the development of the topic.

Keywords: balcony, sunshades, thermal comfort, luminous performance, evolutionary generative system, multi-objective analyses.

³ This dissertation was supervised by Prof. PhD. Jarryer Andrade de Martino, professor at the Department of Architecture and Urbanism of the Federal University of Espírito Santo. Email: jarryer.martino@ufes.br.

⁴ E-mail: tiago.fav@gmail.com, master's student in the Postgraduate Program in Architecture and Urbanism at the Federal University of Espírito Santo.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Consumo energético entre setores no Brasil em 2022.....	18
Figura 2 - Áreas de Pesquisa do PPGAU – UFES	21
Figura 3 – Estrutura e fluxograma das etapas da pesquisa.....	22
Figura 4 - Estudo de insolação de varandas de edificação em Budapeste pelos irmãos Olgyay.	25
Figura 5 - Varandas típicas de regiões árabes fechadas com muxarabis.....	26
Figura 6 - "hoards" típicos do século XI.	26
Figura 7 - Imagem de uma casa comunitária Yanomami.....	27
Figura 8 - Casa-grande e engenho de açúcar num trecho do mapa de Pernambuco pintado por Willem J. Blaeu, em 1635.	28
Figura 9 - “Uma Tarde de Verão”. Aquarela em papel por Jean-Baptiste Debret em 1826. ...	29
Figura 10 - Típica habitação urbana no período colonial.....	29
Figura 11 - Residência urbana no período eclético com varanda na lateral.....	30
Figura 12 - Casa de Gregori Warchavchik em São Paulo.....	31
Figura 13 - Edifício Pedregulho.....	32
Figura 14 - Edifício Nova Cintra.....	32
Figura 15 - Edifício Mississippi.....	33
Figura 16 - Edifício Missouri.....	33
Figura 17 - Edifício Atlântica Boavista em Ipanema-RJ.....	34
Figura 18 - Fechamento de varanda usualmente encontrado em edificações verticais nas grandes cidades.....	34
Figura 19 - À esquerda casa colonial em Tiradentes-MG, utilizando beiral.....	35
Figura 20 - À direita diversos tipos de beiral encontrados na arquitetura brasileira.....	35
Figura 21 - Casa de Vidro de Lina Bo Bardi.....	36
Figura 22 - Vila Savoye de Le Corbusier.....	36
Figura 23 - Casa da Cascata de Frank Lloyd Wright.....	37
Figura 24 - Casa das Canoas de Niemeyer.....	37

Figura 25 - Croqui com exemplo de cimalha.	37
Figura 26 – croqui com exemplos de brises.	38
Figura 27 – foto da fachada do Palácio Gustavo Capanema-RJ.....	39
Figura 28 - corte esquemático de uma prateleira de luz.	40
Figura 29 - ambiente interno no Edifício Copan.	40
Figura 30 - Fachada do edifício JFL 125.....	42
Figura 31 - Fachada do Residencial MN15.....	42
Figura 32 - Edifício Residencial Leopoldo 1201 em São Paulo.....	42
Figura 33 - Fachada do edifício Aqua Tower.....	43
Figura 34 - Visão das varandas e lajes.	43
Figura 35 - Foto parcial do bairro Praia do Canto em Vitória-ES.....	44
Figura 36 - Incidência da varanda ao longo do tempo na Praia do Canto Vitória-ES.....	45
Figura 37 - Vista da baía de Vitória e ao fundo o Bairro Praia do Canto onde é possível notar a disseminação do fechamento das varandas com vidro.	46
Figura 38 - Edifício do CREA-ES.....	47
Figura 39 - Edifício Mata da Praia Park.....	47
Figura 40 - Edifício The View.....	48
Figura 41 - Edifício Rio Tocantins.....	48
Figura 42 - Edifício Una Residence.	48
Figura 43 - Modelos de varanda e guarda-corpo.....	50
Figura 44 - Incertezas entre simulações e modelo real.....	52
Figura 45 - Cronologia dos Requisitos Técnicos de Qualidade e Instruções Normativas.	54
Figura 46 - Estrutura de consumo residencial de energia elétrica por região, de 2005 a 2019.....	55
Figura 47 - Esquema de simulação para edificações na NBR 15575/2021.....	58
Figura 48 - City Hall em Londres (1998-2002), projetado pelo escritório Foster and Partners.	67
Figura 49 - Diagrama solar para o City Hall.	67

Figura 50 - (a) método usual de projeto; b) método de projeto utilizando sistema generativo.	68
Figura 51 - Modelo da capela Guell idealizado por Gaudí.	69
Figura 52 - Estrutura do algoritmo genético.	72
Figura 53 - Algoritmo genético clássico de Holland.	73
Figura 54 - processo de criação com abordagem generativa.	76
Figura 55 - exemplo de codificação de um indivíduo em arquitetura.	77
Figura 56 - esquema de configuração do experimento.	79
Figura 57 - estruturação do código dos experimentos.	79
Figura 58 - à esquerda fluxograma do sistema generativo e à direita corte esquemático com variáveis impostas.	80
Figura 59 - estruturação do código dos experimentos a) enumeração exaustiva b) escolhendo parâmetros de tamanho c) geração do modelo d) simulação pelo ecotect e) controle de loop e algoritmo genético f) gerador de dados para o excel.	80
Figura 60 – Etapas da DSR.	82
Figura 61 - Edifício genérico.	84
Figura 62 - Modelo exemplificando a variável paramétrica.	85
Figura 63 - Localização do município de Vitória-ES.	88
Figura 64 - Proporção de meses em que há conforto e desconforto térmico.	89
Figura 65 - Carta solar para Vitória-ES.	90
Figura 66 - Umidade relativa média para Vitória-ES.	91
Figura 67 - Software de modelagem e plugins de análise e algoritmo genético.	92
Figura 68 - Componente principal do Wallacei e dados de entrada e saída.	93
Figura 69 - Fluxograma do sistema generativo.	97
Figura 70 - Estrutura geral do Sistema generativo.	101
Figura 71 - Variável paramétrica.	102
Figura 72 - Efeito de suavização de arestas. À esquerda valor=1 e direita valor=3.	102
Figura 73 - Variáveis paramétricas por orientação solar.	103
Figura 74 - Exemplo de composição de materiais para as paredes.	104

Figura 75 - Integração entre Subsets e o ConstructionSet.	104
Figura 76 - Criação do modelo Honeybee.	105
Figura 77 - Seleção do Programa da edificação.	106
Figura 78 - Configuração das aberturas.	107
Figura 79 - Correção de refletância das paredes.	107
Figura 80 - Inserção das proteções solares no modelo e definição da malha de pontos.	108
Figura 81 - Componente Honeybee para análises de desempenho lumínico.	109
Figura 82 - Componente Honeybee para sDA.	109
Figura 83 - Componentes para visualização dos dados. Exemplo para DA.	110
Figura 84 - Componentes para análises de conforto térmico adaptativo.	111
Figura 85 - Arquivos EPW/DDY e componente orientação solar.	112
Figura 86 - Componente principal do Wallacei e objetivos.	114
Figura 87 - À esquerda o Painel de Controle para modelo pavimento tipo e à direita o de oito pavimentos.	115
Figura 88 - À esquerda ranking de objetivos para o modelo pavimento tipo, e à direita para oito pavimentos.	116
Figura 89 - Interface visual do Wallacei com gráficos variados para o pavimento tipo.	117
Figura 90 – Mapas de calor da planta do pav. tipo de desempenho lumínico para 0,5m.	118
Figura 91 - Mapas de calor da temperatura operativa e conforto para elemento de 0,5m.	119
Figura 92 - Mapas de calor para desempenho lumínico do elemento de 3m.	119
Figura 93 - Mapas de calor da temperatura operativa e conforto para elemento de 3m.	120
Figura 94 – Mapas de calor de desempenho lumínico para elemento do SG.	121
Figura 95 - Mapas de calor de temperatura operativa e conforto para elemento do SG.	121
Figura 96 – Resultados da variável paramétrica para cada fachada.	122
Figura 97 – Forma resultante com e sem efeito de abaulamento de arestas.	122
Figura 98 – Imagem renderizada de edificação baseada no resultado do SG.	123
Figura 99 – Imagem renderizada com vista lateral da edificação.	123
Figura 100 - Modelo 3D da edificação com elementos 0,5m, SG e 3m.	128

Figura 101 - Modelo 3D com temperatura operativa média por pavimento.	130
Figura 102 - Modelo 3D com temperatura operativa média com materiais modificados.	132

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Critério de avaliação de desempenho térmico da envoltória quanto ao PHFTUH.	60
Quadro 2 - Níveis de iluminamento natural.	62
Quadro 3 - Fator de luz diurna para os diferentes ambientes da habitação.	62
Quadro 4 – Comparativo entre cinco técnicas de sistemas generativos.	70
Quadro 5 - DSR aplicada à pesquisa.	83
Quadro 6 - Composição dos materiais e suas propriedades.	86
Quadro 7 - Quadro de esquadrias externas.	87
Quadro 8 - Parâmetros de ocupação, humanos e de ganho térmico de equipamentos.	94
Quadro 9 - Refletâncias das superfícies internas e externas.	95

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Incidência de elementos nas fachadas das edificações analisadas.....	41
Gráfico 2 - Gráfico de conforto adaptativo da ASHRAE 55-2023.	57
Gráfico 3 - Frente de Pareto para uma análise hipotética entre soluções divergentes.....	75
Gráfico 4 - Temperatura e zona de conforto térmico em Vitória-ES.	89
Gráfico 5 - Umidade relativa média para Vitória-ES.	91
Gráfico 6 - À esquerda: gráfico de tendência do pavimento tipo; à direita: oito pavimentos.	99
Gráfico 7 - Temperaturas médias anuais por mês/hora.	112
Gráfico 8 - Conforto adaptativo médio anual por mês/hora.	113
Gráfico 9 - Comparativo entre os resultados de sDA.	124
Gráfico 10 - Comparativo entre os resultados de UDI 200-3000 lux.....	124
Gráfico 11 - Comparativo entre os resultados de conforto térmico.	125
Gráfico 12 - Comparativo entre os resultados desconforto por calor.....	125
Gráfico 13 - Comparativo entre as áreas dos elementos por fachada.....	126
Gráfico 14 - Comparativo entre a área total dos elementos.	127
Gráfico 15 - Comparativo entre os resultados de sDA.	128
Gráfico 16 - Comparativo entre os resultados de UDI 200-3000 lux.....	129
Gráfico 17 - Comparativo entre os resultados de conforto térmico.	129
Gráfico 18 - Comparativo entre a área dos elementos por pavimento na fachada Oeste.	130
Gráfico 19 - Comparativo entre os resultados desconforto por calor.....	131
Gráfico 20 - Comparativo entre a área total dos elementos.	131
Gráfico 21 - Comparativo entre modelos SG original e SG MAT (materiais modificados).	133

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ASE – Annual Sunlight Exposure

DA – Daylight Autonomy

DSR – Design Science Research

GA – Genetic Algorithm

IES – Illuminating Engineering Society

ISO – International Organization for Standardization

MOEA – Multi-Objective Evolutionary Algorithm

NBR – Normas Técnicas Brasileiras

PMV – Voto Médio Previsto

PPGAU – Programa de Pós-Graduação em Arquitetura Urbanismo

sDA – Spatial Daylight Autonomy

UDI – Useful Daylight Illuminance

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	18
1.1.	Tipo da pesquisa e inserção no Programa de Pós-Graduação	20
1.2.	Objetivos da pesquisa.....	21
1.2.1.	Geral	21
1.2.2.	Específicos.....	21
1.3.	Estrutura da dissertação e etapas da pesquisa	22
2.	REFERENCIAL TEÓRICO	24
2.1.	Extensões de fachada como elementos passivos de proteção solar	24
2.1.1.	Varandas: breve histórico	26
2.1.2.	Outras extensões de fachada em edificações.....	34
2.1.3.	Utilização em edificações contemporâneas.....	41
2.1.4.	Dimensões e materiais	48
2.2.	Desempenho ambiental no projeto de arquitetura.....	51
2.2.1.	Regulamentações no Brasil	53
2.2.2.	Desempenho térmico	55
2.2.3.	Desempenho lumínico	60
2.2.4.	Influência das varandas e beirais	63
2.3.	Projeto baseado em desempenho	66
2.3.1.	Sistemas baseados em regras: sistemas generativos.....	67
2.3.2.	Algoritmos evolutivos	71
2.3.3.	Algoritmos evolutivos multiobjetivo.....	73
2.3.4.	Sistemas generativos evolutivos.....	76
2.3.5.	Exemplos de sistemas generativos para proteções solares	78
3.	METODOLOGIA	81
3.1.	<i>Design Science Research</i> como metodologia de pesquisa.....	81
3.2.	Caracterização do objeto	83
3.3.	Variável Paramétrica	84
3.4.	Materiais da edificação	85
3.5.	Cálculo das Aberturas.....	87
3.6.	Condicionantes locais	87
3.7.	Softwares e plugins.....	92

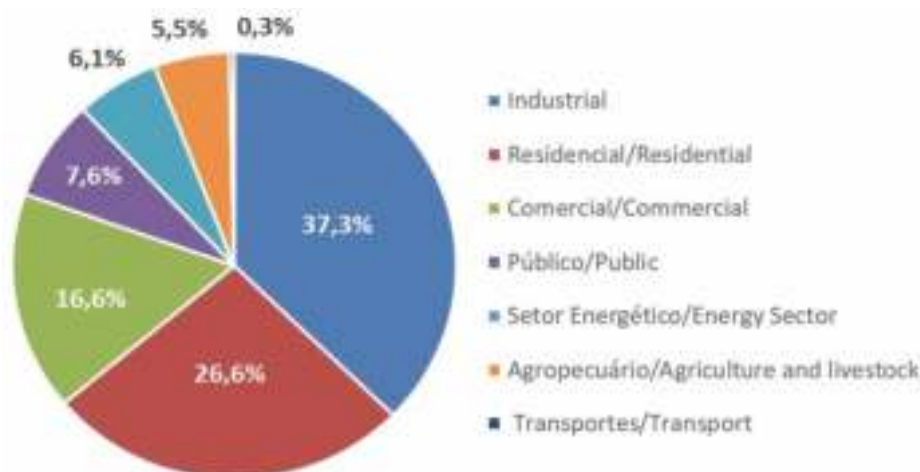
3.8.	Metodologias de análise ambiental	93
3.8.1.	Análise do conforto térmico adaptativo	94
3.8.2.	Análises do desempenho lumínico	95
3.9.	Avaliação do sistema generativo	96
3.10.	Hardware	96
3.11.	Fluxograma do sistema generativo	97
3.12.	Tamanho da população para análises multiobjetivo	98
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	100
4.1.	Estrutura geral do sistema generativo.....	100
4.1.1.	Variável paramétrica	101
4.1.2.	Materiais	103
4.1.3.	Modelo Honeybee	104
4.1.4.	Análises espaciais de desempenho lumínico	108
4.1.5.	Análises espaciais de conforto térmico adaptativo.....	110
4.1.6.	Definição do norte geográfico e arquivos EPW e DDY	111
4.1.7.	Gráficos de temperatura e conforto adaptativo externos.....	112
4.1.8.	Algoritmo evolutivo multiobjetivo.....	113
4.2.	Gerações selecionadas	115
4.3.	Análises do pavimento tipo.....	117
4.3.1.	Análises para 0,5m	117
4.3.2.	Análises para 3m	119
4.3.3.	Resultados do sistema generativo.....	120
4.3.4.	Comparativo entre soluções	124
4.4.	Análises para oito pavimentos.....	127
4.5.	Generalização e disponibilização do código.....	133
5.	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	135
	REFERÊNCIAS	137

1. INTRODUÇÃO

O setor da construção e as edificações contribuem significativamente para as mudanças climáticas globais, representando aproximadamente 21% das emissões globais de gases de efeito estufa. Em 2022, os edifícios foram responsáveis por 34% da demanda global de energia e 37% das emissões de dióxido de carbono (CO₂) relacionadas à energia e processos. Para se alinhar aos objetivos do Acordo de Paris, o consumo de energia em edifícios precisa cair em cerca de 25% e o uso de combustíveis fósseis em mais de 40% até 2030 (UNEP, 2024).

No Brasil, segundo dados da Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2023), em 2022 o setor residencial foi responsável por 26,6% do consumo energético total do país (Figura 1).

Figura 1 - Consumo energético entre setores no Brasil em 2022.



Fonte: EPE (2023).

Loche et al. (2021) destaca a necessidade de se desenvolver projetos arquitetônicos mais adequados ao clima, como estratégia para otimizar o desempenho térmico e luminoso e, por consequência, o consumo energético das edificações. Como principal estratégia pode-se elencar a utilização de estratégias passivas, com elementos que auxiliem no sombreamento e na ventilação natural.

Em edificações verticais, principalmente para climas quentes, as varandas, se adequadamente projetadas e dimensionadas, podem funcionar como elemento de proteção solar para o pavimento inferior, reduzindo a incidência de luz solar direta enquanto permitem a entrada de luz refletida e difusa, além de possibilitar o uso de grandes aberturas para ventilação (CHAN, 2015).

Em São Paulo, 23% dos edifícios de uso misto avaliados eram dotados de dispositivos de sombreamento externo, dos quais 92% eram varandas (MANOEL; NEVES, 2017). Outro estudo realizou uma análise da tipologia construtiva de 42 edifícios habitacionais multifamiliares construídos nos últimos 12 anos em quatro capitais brasileiras e identificou que 90,5% dos edifícios apresentavam em sua fachada soluções como varandas, beirais ou sacadas (CORDEIRO et al., 2021). Ainda, para o bairro Praia do Canto na cidade de Vitória-ES, Barros et al. (2018) analisaram 263 edificações com projetos aprovados entre 1962 e 2012, e identificaram que, após 2007, 100% das edificações possuíam varandas, ainda que por incentivo da legislação. Desta forma, é possível concluir que a varanda constitui um dos principais elementos de proteção solar em edificações verticais em algumas capitais brasileiras, ainda que não sejam projetadas para este fim.

No entanto, dependendo da forma e tamanho da varanda, ou outro elemento de proteção solar, pode ocorrer uma menor disponibilidade de luz natural nos ambientes internos. Desta forma, é possível concluir que um maior conforto térmico por sombreamento acarreta em uma menor disponibilidade de luz natural. Ainda que, segundo Abrahão e Souza (2021), a iluminação desempenhe um papel menor na eficiência energética de edificações residenciais (4,9% do consumo em relação a 14,4% para conforto térmico na região sudeste entre 2005 a 2019), esta também possui uma importância psicofisiológica na saúde humana, conforme relatado por Andersen (2015).

A maior parte da carga térmica é absorvida pelas aberturas, de forma que seu respectivo sombreamento tende a ser mais eficiente que o sombreamento de paredes cegas em reduzir o calor interno da edificação (como identificado nas análises realizadas nesta pesquisa). Desta forma, é possível supor que o tamanho dos elementos de proteção solar pode variar de acordo com o tamanho das aberturas da fachada, mantendo resultados de conforto térmico semelhantes aos de um elemento de sombreamento de tamanho completo, ao mesmo tempo em que aumenta a disponibilidade de luz natural e ainda reduz a quantidade de material utilizado em sua construção. Mas, para isso é necessário realizar a análises multiobjetivo, que podem ser especialmente complexas, o que torna necessária a investigação de uma metodologia específica para este caso.

Uma forma de auxiliar neste processo é utilizar processos parametrizados ou, ainda, sistemas generativos, que são técnicas utilizadas em projetos baseados em desempenho, sendo este um

método que utiliza simulações durante as fases de projeto para gerar a forma da edificação a partir do desempenho da mesma (KOLAREVIC, 2005).

Sistemas generativos consistem em uma metodologia já estabelecida e utilizada por arquitetos, cientistas e designers no desenvolvimento de projetos e soluções. O método permite facilitar a exploração de soluções alternativas em projeto, quando comparado a métodos mais tradicionais. Sua utilização tem crescido com o decorrer dos anos em decorrência dos avanços tecnológicos em desenvolvimento de projetos (KALAY, 2004).

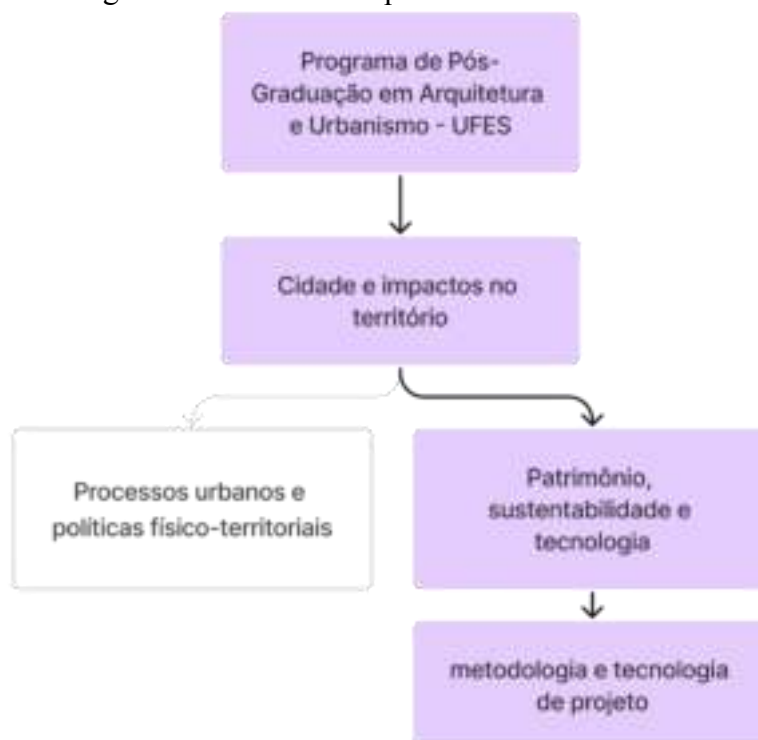
Sistemas generativos ainda podem empregar diferentes técnicas. Em casos de otimização, a técnica mais comum é a que utiliza algoritmos genéticos (ou algoritmos evolutivos), que permite buscas simultâneas de múltiplas alternativas até que a solução satisfaça os critérios definidos previamente (SINGH; GU, 2012).

Na pesquisa, em um primeiro momento, foi realizada uma revisão bibliográfica sobre as varandas e outros sistemas de proteção solar para fachadas além dos critérios ambientais para dimensionamento desses elementos em fases iniciais de projeto. Em seguida, também por meio de revisão bibliográfica, foi apresentado o conceito de sistemas generativos como metodologia de projeto baseado em desempenho, seus tipos e exemplos de sua aplicação em proteções solares. Em uma terceira etapa, foi apresentada a metodologia para o desenvolvimento de um sistema generativo para proteções solares horizontais com base no desempenho térmico e lumínico dos ambientes internos. Em uma quarta etapa, foram apresentados os resultados das análises do sistema generativo e realizados comparativos com proteções solares de 0,5 e 3m como forma de avaliação e, ao final, feitas as considerações como forma de contribuir para o desenvolvimento do tema.

1.1. Tipo da pesquisa e inserção no Programa de Pós-Graduação

Esta é uma pesquisa de natureza aplicada com objetivo exploratório e abordagem quantitativa, com procedimento operacional. O Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal do Espírito Santo (PPGAU – UFES) possui uma área de concentração denominada **Cidade e impactos no território**, que é orientada à abordagem do território, da metrópole, da cidade e da edificação, recortada por duas linhas de pesquisa: **Processos urbanos e políticas físico-territoriais** e **Patrimônio, sustentabilidade e tecnologia**, sendo que esta pesquisa está inserida na última descrita, ao abordar o tema de metodologia e tecnologia de projetos, conforme Figura 2.

Figura 2 - Áreas de Pesquisa do PPGAU – UFES



Fonte: Autor (2024).

1.2. Objetivos da pesquisa

1.2.1. Geral

Explorar o método de projeto baseado em desempenho, a partir da utilização de sistemas generativos, para o dimensionamento de proteções solares horizontais com base no desempenho térmico e lumínico da edificação.

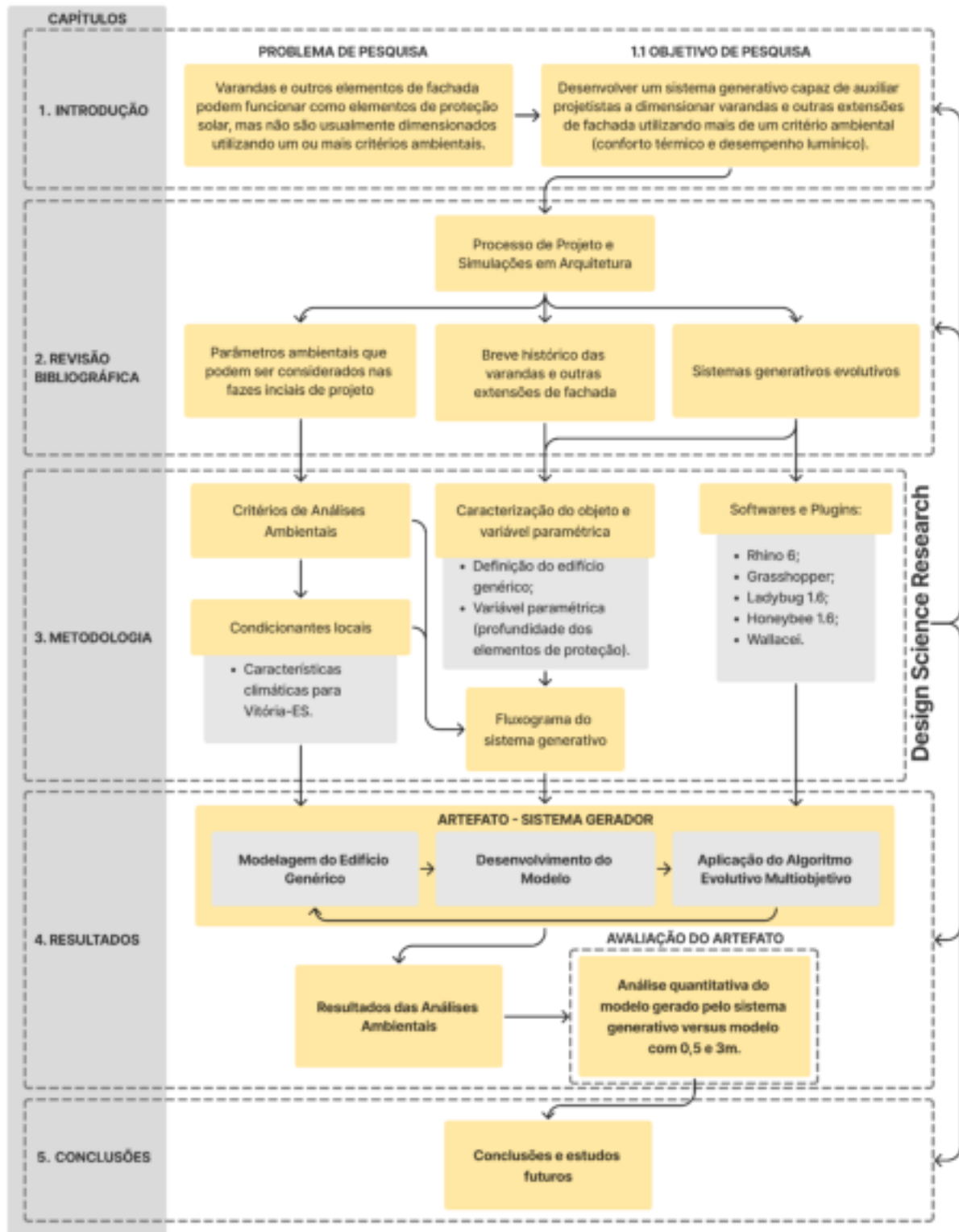
1.2.2. Específicos

- Identificar a utilização da varanda e outras extensões de fachada como proteção solar horizontal;
- Identificar as análises ambientais que podem ser utilizadas em fases iniciais de projeto para dimensionamento de varandas e outras extensões como proteção solar;
- Identificar as principais características, métodos e ferramentas para o projeto baseado em desempenho;
- Propor e avaliar, por meio de análise quantitativa dos resultados, o sistema generativo desenvolvido.

1.3. Estrutura da dissertação e etapas da pesquisa

A presente dissertação foi dividida em cinco capítulos e estruturada pela metodologia da Design Science Research (DSR). O fluxograma da pesquisa pode ser visualizado na Figura 3.

Figura 3 – Estrutura e fluxograma das etapas da pesquisa.



Após o capítulo de introdução, o segundo capítulo traz o referencial teórico, onde foi realizada uma revisão bibliográfica abordando o processo de projeto e simulações em arquitetura, parâmetros ambientais para dimensionamento de varandas e outras extensões de fachada, assim como foi apresentado o conceito de sistemas generativos, seus tipos e exemplos de aplicação em proteções solares.

No terceiro capítulo foi apresentada a metodologia para o desenvolvimento de sistema generativo de varandas e outras extensões de fachada, a ser considerado como um artefato, utilizando critérios ambientais, tendo como base os preceitos das DSR. No quarto capítulo foi apresentado o desenvolvimento do sistema generativo e os resultados obtidos pelas análises e comparativo (avaliação do artefato) com o edifício utilizando elementos genéricos de proteção e, ao final (quinto capítulo), foram feitas as considerações finais como forma de contribuir para o desenvolvimento do tema.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo será apresentado o referencial teórico, por meio de revisão bibliográfica, essencial para compreender o tema e embasar a metodologia desta pesquisa. Inicia-se com uma discussão sobre a história e utilização das varandas, além de outras extensões de fachada, com foco maior na sua aplicação como elemento de proteção solar horizontal em edificações verticais. Em seguida, explora-se o desempenho ambiental em edificações, destacando o processo de projeto, normas e legislações pertinentes e parâmetros ambientais a serem considerados em análises em fases iniciais de projeto. Por fim, discorre-se sobre o projeto de arquitetura baseado em desempenho e os sistemas generativos.

2.1. Extensões de fachada como elementos passivos de proteção solar

A arquitetura bioclimática é reconhecida como um *design* passivo, onde é possível melhorar as condições ambientais internas de uma edificação sem o uso de sistemas ambientais ativos de engenharia (sistemas de ventilação mecânica, iluminação artificial, etc.). A orientação do edifício, a escolha de materiais, aberturas e sombreamento podem oferecer acesso ideal à luz solar para iluminação e aquecimento, bem como ventilação para resfriamento (OLGYAY, 2015).

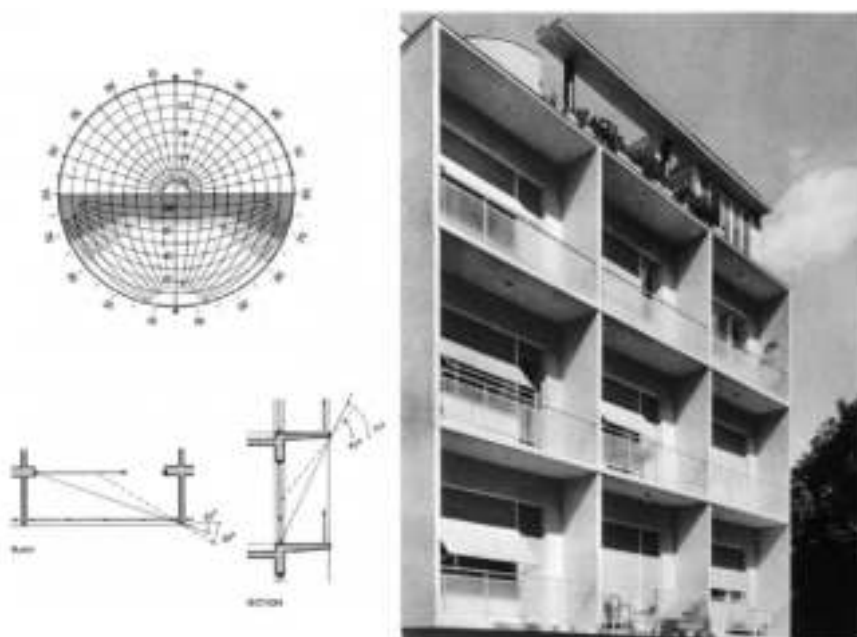
De acordo com Corbella e Corner (2011), a arquitetura bioclimática visa adaptar a construção às condições climáticas locais, a fim de proporcionar um conforto ambiental ideal para os usuários. Essencialmente, a ideia considera a envoltória do edifício como uma barreira reguladora entre o ambiente externo e interno, usada como um meio para criar um ambiente interno confortável. Para desenvolver uma envoltória eficiente, o arquiteto deve estar ciente das características do clima local e das propriedades térmicas, luminosas e acústicas dos materiais, a fim de escolher as estratégias bioclimáticas mais adequadas ao projeto. No caso de climas tropicais quentes e úmidos, as estratégias bioclimáticas recomendadas incluem: controle da radiação solar, protegendo as superfícies da construção da radiação solar direta; redução das áreas envidraçadas ao mínimo necessário para garantir uma iluminação natural satisfatória; e aproveitamento da ventilação para reduzir a umidade, promover a renovação do ar e o resfriamento do ambiente interno.

A varanda, como elemento arquitetônico e de proteção solar passiva, pode ser caracterizada como uma solução construtiva bastante recomendada, já que estabelece uma transição gradual

entre interior e exterior, e adequada para climas quentes e úmidos, por possibilitar o sombreamento e ventilação natural de forma permanente (MARAGNO, 2009).

Victor Olgyay e seu irmão apresentaram um dos primeiros estudos de utilização da varanda como elemento de proteção solar horizontal para uma edificação de apartamentos em Budapeste na Hungria, como pode ser verificado na Figura 4 (OLGYAY, 2015).

Figura 4 - Estudo de insolação de varandas de edificação em Budapeste pelos irmãos Olgyay.



Fonte: Olgyay (2015).

Ainda que tenha ocorrido um aumento na incidência de elementos ativos de arquitetura com o desenvolvimento tecnológico, como ventilação mecânica, persianas e brises automatizados, sua utilização acaba se dando, muitas vezes, a um elevado custo financeiro e energético. Desta forma, elementos de arquitetura passiva continuam sendo uma boa estratégia para garantir um melhor conforto ambiental, podendo ainda ser associados aos elementos ativos.

O dimensionamento das varandas e determinadas extensões de fachada (sacadas, beirais, ornatos, etc.) como proteção solar não é atual, mas análises (utilizando critérios ambientais) por projetistas em fases iniciais de projeto, ainda são incipientes. A utilização destes elementos durante a história teve como base outros critérios, muitas vezes estéticos ou de utilidade espacial no caso das varandas. Desta forma, o presente capítulo visa investigar o uso das varandas e outras extensões de fachada durante a história, seu uso como elemento de proteção solar horizontal, e quais os principais critérios de desempenho e exemplos de sistemas generativos utilizados para auxiliar no processo de dimensionamento em fases iniciais de projeto.

2.1.1. Varandas: breve histórico

Segundo o dicionário de etimologia (ETIMOLOGY DICTIONARY, 2023), a varanda (em inglês balcony) pode ser descrita como uma plataforma que se projeta de uma parede de um edifício cercada por uma parede ou grade. Segundo Brandão e Martins (2007a), a varanda aparece na bibliografia brasileira com diferentes terminologias, sendo frequentemente usados como sinônimos de varanda os termos alpendre, latada, sacada, balcão, galeria, corredor, terraço, eirado e até sala de jantar.

Na antiguidade egípcia, a varanda dos palácios era concebida como um ambiente teatral para que os líderes se apresentassem diante de seus súditos. Enquanto isso, na Roma antiga, constituía-se em uma plataforma ao ar livre onde os imperadores e senadores assistiam aos gladiadores, ao mesmo tempo em que permaneciam visíveis ao público (WELCH, 2007 apud EMEKCI, 2021). Nas regiões do mundo árabe, foram construídas elaboradas varandas (Figura 5) fechadas com treliças (muxarabis) com o propósito de permitir ventilação e privacidade aos moradores (LEWIS, 1992 apud EMEKCI, 2021).

Figura 5 - Varandas típicas de regiões árabes fechadas com muxarabis.



Fonte: Phileon (2007). Disponível em: https://en.wikipedia.org/wiki/Mashrabiya#/media/File:Moucharabier_-_panoramio.jpg. Acesso em: 10 abril, 2023.

Figura 6 - "hoards" típicos do século XI.



Fonte: Jebulon (2011). Disponível em: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Hoursds_Castelnaud.jpg. Acesso em: 10 abril, 2023.

Segundo Eugène Viollet-le-Duc, o objetivo principal das varandas salientes (chamadas de "hoards") - no século XI era alcançar soldados e/ou defendê-los de atacantes, o que sugere que elas eram usadas principalmente para fins militares (Figura 6). As varandas deixaram de ser utilizadas apenas para fins militares a partir do século XIV e esse elemento se tornou um tipo de local para anúncios e leitura de documentos oficiais, proclamações e sentenças judiciais (EMEKCI, 2021).

No século XIX, as varandas, que inspiraram muitos escritores (como Shakespeare em Romeu e Julieta), poetas e artistas, tornaram-se símbolos do estilo de vida metropolitano no século XX. Com o surgimento do modernismo no início do século XX, a tipologia de construção se adaptou em resposta a mudanças em larga escala tanto na tecnologia quanto na sociedade. Essa adaptação trouxe consigo a introdução de novos materiais e equipamentos. Isso tornou mais fácil a aparência de varandas nas fachadas residenciais e seu uso como elemento funcional de conexão entre espaços internos e externos (MARAGNO, 2010).

No Brasil, a varanda esteve presente em todas as épocas e fases da arquitetura no país, sobrevivendo a todas as transformações culturais. Em algumas aldeias indígenas os espaços de convivência diária eram completamente abertos como uma varanda, como é o exemplo da casa comunitária dos Yanomamis chamada de "shabono" (Figura 7). Sua forma é circular e fechada para o exterior, mas totalmente aberta para um pátio interior, como uma grande galeria ao redor de um pátio. O espaço coberto, aberto e sombreado é abundante (MARAGNO, 2010).

Figura 7 - Imagem de uma casa comunitária Yanomami.



Fonte: Zacquini (1994). Disponível em: <https://pib.socioambiental.org/pt/Povo:Yanomami>. Acesso em: 12 abril 2023

Segundo Maragno (2010), o primeiro relato da construção de varandas no Brasil foi em uma carta escrita pelo terceiro governador-geral, Mem de Sá, ao rei de Portugal em 1567. O documento relata as construções na cidade recém-fundada e destaca as condições diferentes que os portugueses encontraram em relação ao clima temperado de sua terra natal. O calor tropical,

com altas temperaturas ao meio-dia, era uma característica que encontrava na varanda a solução ideal. A varanda não só protegia da chuva, mas também permitia uma boa ventilação, possibilitando a ocupação do espaço e a entrada de ar fresco durante as fortes chuvas.

A habitação do senhor de engenho e sua família, conhecida como casa-grande (Figura 8), era composta por vários cômodos, incluindo varandas, salas, quartos, uma capela e enormes cozinhas. As varandas eram amplamente utilizadas, não apenas para se proteger do clima, mas também como uma espécie de filtro entre o interior da casa e o mundo exterior. Além disso, as varandas eram frequentemente usadas para o lazer e refeições, ou ainda, como uma área de transição para limitar o contato com o mundo externo e servir como um ponto de observação para a fazenda (VERÍSSIMO; BITTAR, 1999).

Figura 8 - Casa-grande e engenho de açúcar num trecho do mapa de Pernambuco pintado por Willem J. Blaeu, em 1635.



Fonte: <http://people.ufpr.br/~lgeraldo/imagensengenhos.html>. Acesso em 14 abril 2023.

Jean-Baptiste Debret, artista francês, descreveu em seus relatos a vida e a história do Brasil durante o período colonial, incluindo o uso da varanda. Ele observou que o clima tropical, com temperaturas que chegam a 45°C e um sol escaldante durante seis a oito meses do ano, tornava natural o uso da varanda nas construções brasileiras (Figura 9). Mesmo nas habitações mais simples, a presença da varanda era encontrada, embora de maneira mais modesta (BANDEIRA; LAGO, 2008).

Figura 9 - “Uma Tarde de Verão”. Aquarela em papel por Jean-Baptiste Debret em 1826.



Fonte: Bandeira e Lago (2008).

Durante o período colonial, embora a varanda fosse um elemento constante nas habitações rurais, o mesmo não ocorria nas áreas urbanas. Nessas moradias, a varanda, comumente voltada para o quintal, constituía uma área de convívio familiar. As casas populares urbanas geralmente eram construídas em série e seguiam a linha do terreno (formato charuto), apresentando cômodos em sequência e quintal na parte posterior do lote (Figura 10). A parte frontal da construção, por sua vez, destinava-se à recepção, oficina ou comércio. Na parte central, os dormitórios eram distribuídos ao longo de um corredor lateral, enquanto que nos fundos situavam-se a cozinha, a varanda e o quintal, no qual encontrava-se um precário sistema sanitário (LEMOS, 1996).

Figura 10 - Típica habitação urbana no período colonial.



Fonte: Lemos (1996).

Após o período colonial, as residências neoclássicas reduziram a frequência da utilização da varanda. Quando presente, era vista de forma limitada, como um pátio colunado, similar a um claustro. Com a influência do romantismo e a maior aproximação com a Europa, a varanda se consolidou definitivamente na arquitetura brasileira, sendo associada ao estilo de jardim inglês. Nesse período, com a independência e o crescimento da cultura do café, houve uma lenta abertura dos espaços familiares e de suas moradias para o público externo. As residências geralmente utilizavam o corredor-alpendre, que combinava a função de passagem com a de varanda, tornando visíveis espaços que antes eram reservados para a família (VERÍSSIMO; BITTAR, 1999).

Sob a influência do ecletismo, as primeiras residências urbanas foram desenvolvidas com um novo esquema de implantação, que rompeu com as tradições coloniais e exigiu alterações nas tipologias de lotes e construções. Essas novas moradias foram construídas afastadas dos vizinhos e apresentavam jardins laterais, introduzindo um elemento paisagístico na arquitetura residencial. Nessa nova forma de projetar a habitação (Figura 11), a interação com os jardins laterais era garantida pela presença de varandas comuns, apoiadas em colunas de ferro e utilizadas também como corredores de acesso. (REIS FILHO, 2000).

Figura 11 - Residência urbana no período eclético com varanda na lateral.

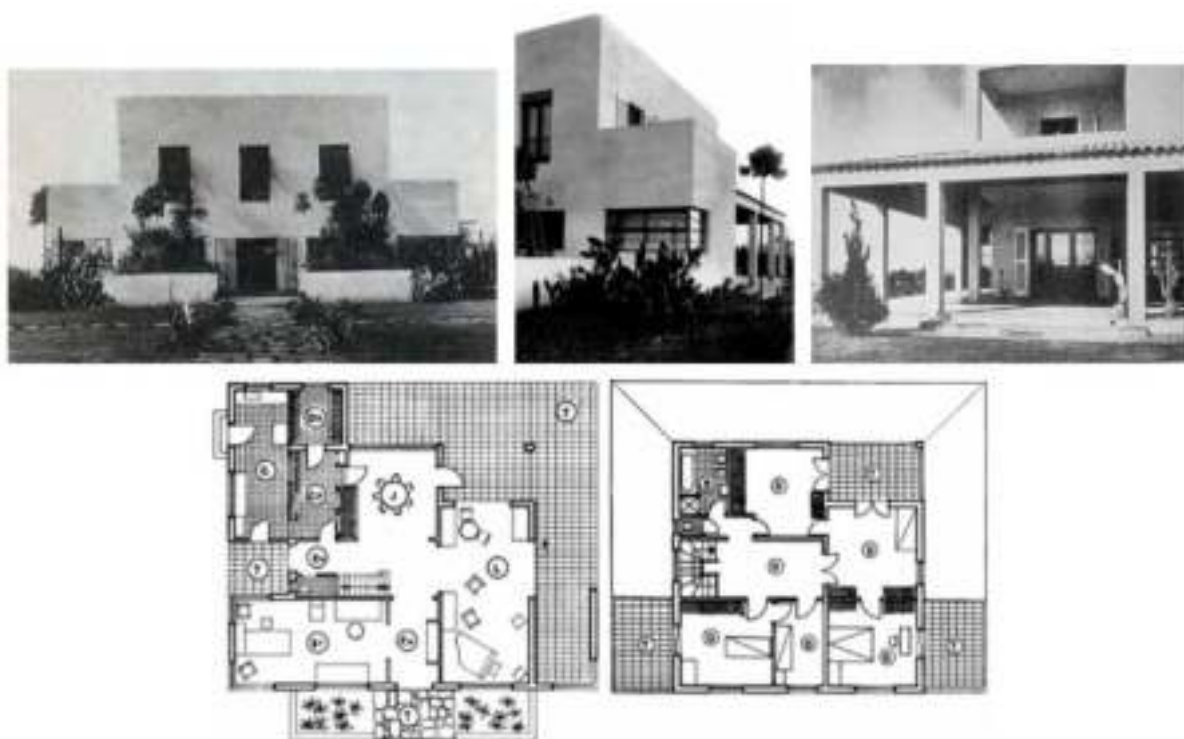


Fonte: Reis Filho (2000).

O movimento eclético, a partir de 1930, começa a enfrentar uma crise. Neste cenário, emerge na sociedade brasileira uma necessidade em relação à escolha de uma nova estética para suas residências, enquanto rejeita o radicalismo do movimento modernista. Em meio a essa crise de identidade, o nacionalismo proposto pelo neocolonialismo é estabelecido como um refúgio seguro para a arquitetura brasileira. Nas novas soluções formais propostas por este estilo, a varanda é considerada um elemento versátil, capaz de se adequar perfeitamente à disposição geral da residência, estando presente tanto em mansões de novos bairros quanto em casas mais modestas dos subúrbios ou vilas (VERÍSSIMO; BITTAR, 1999).

Em 1928, simultaneamente ao domínio do neocolonialismo, a primeira residência moderna foi erguida no Brasil. A casa, erguida em São Paulo, pertencia ao arquiteto russo Gregori Warchavchik (Figura 12). Ela possuía inspiração cubista, com volumes simples e assimétricos pintados de branco. Porém, algumas concessões foram feitas aos princípios básicos da arquitetura tropical, de forma que a fachada principal não possuía elementos de proteção contra sol ou chuva e contrastava com a espaçosa varanda coberta, com a tradicional telha-canal deixada à vista, que foi projetada pelo arquiteto na face posterior (BRUAND, 2010).

Figura 12 - Casa de Gregori Warchavchik em São Paulo.



Fonte: Bruand (2010).

Durante o desenvolvimento da Arquitetura Moderna no Brasil, observou-se em determinados momentos a aplicação dos princípios da Arquitetura Bioclimática e da adequação ao clima

local. Além dos cinco pontos principais do estilo internacional propostos por Le Corbusier, os arquitetos brasileiros também buscaram incorporar outros elementos, como cobogós, marquises, varandas, venezianas e treliças de madeira, com o objetivo de garantir uma adaptação adequada ao clima tropical (SILVEIRA; CRAVEIRO; TALITA, 2009).

Entre as edificações habitacionais verticais do modernismo que fizeram uso das varandas, destaca-se o Conjunto Residencial Prefeito Mendes de Moraes, conhecido como Pedregulho (Figura 13). O complexo no Rio de Janeiro foi concebido por Affonso Eduardo Reidy em 1946 e é tido como uma síntese dos elementos tradicionais da arquitetura brasileira. No entanto, o mais significativo em termos de utilização da varanda e adequação climática é o conjunto formado pelos Edifícios Nova Cintra, Bristol e Caledônia (Figura 14), localizado em Laranjeiras-RJ e projetado por Lúcio Costa em 1948 (BRANDÃO; MARTINS, 2007b).

Figura 13 - Edifício Pedregulho.



Fonte: Brandão e Martins (2007a).

Figura 14 - Edifício Nova Cintra.



Fonte: Brandão e Martins (2007b).

Ao longo dos anos, a varanda foi perdendo frequência na arquitetura moderna, apesar de ter sido usada por arquitetos que visavam sua função pragmática de proteção climática ao edifício. Nas arquiteturas modernas cariocas da segunda metade do século XX, como pode ser observado na Figura 15 e Figura 16, a varanda estava ausente nos edifícios de apartamento devido à adoção da linguagem universalista da arquitetura modernista por muitos arquitetos. Esse estilo, intensificado a partir da década de 1930 com a criação do estilo internacional, foi o responsável por essa mudança (BRANDÃO; MARTINS, 2007b).

Figura 15 - Edifício Mississipi.



Figura 16 - Edifício Missouri.



Fonte: Brandão e Martins (2007b).

De acordo com Brandão e Martins (2007b), a década de 50 do século XX é caracterizada por uma crítica ao movimento moderno, que havia sido enaltecido com a criação do estilo internacional cerca de 20 anos antes. Essa crítica estava relacionada, principalmente, à sua natureza universalista, crença positivista, determinismo histórico e visão unifuncionalista. No contexto da arquitetura da cidade do Rio de Janeiro, elementos da tradição construtiva brasileira, que estiveram ausentes nos edifícios de apartamentos (como a varanda), começaram a ser novamente notados, como é o caso do Edifício Atlântica Boavista (Figura 17) em Ipanema-RJ. Esse movimento também pode ser observado em outras capitais brasileiras.

Atualmente, pode-se dizer que a varanda está novamente sendo eliminada dos edifícios residenciais, por meio dos fechamentos de vidro e sua anexação a ambientes de alta permanência, devido principalmente à poluição presente nas grandes cidades (PAGEL; ALVAREZ; REIS JÚNIOR, 2018).

Além de cômodos anexos diminutos, as construtoras e condôminos acabam utilizando de subterfúgios na lei para deturpar a função da varanda que pode muitas vezes ocupar o afastamento frontal ou não ser computado no coeficiente de aproveitamento (CA). Os exemplos de fechamento de varanda com vidro (Figura 18) e sua integração aos ambientes anexos são vários e ocorrem com frequência nas grandes cidades do Brasil (CADERMAN; CADERMAN, 2022).

Figura 17 - Edifício Atlântica Boavista em Ipanema-RJ.



Fonte: Brandão e Martins (2007b).

Figura 18 - Fechamento de varanda usualmente encontrado em edificações verticais nas grandes cidades.



Fonte: Caderman e Caderman (2022).

Apesar da atual descaracterização, a varanda voltou a ganhar notoriedade como elemento arquitetônico, principalmente durante a pandemia da COVID-19. Peters e Halleran (2020) evidenciaram as vantagens da varanda na sensação de bem-estar dos usuários durante a pandemia, ressaltando a importância desse elemento durante os períodos de confinamento global. Wågø, Hauge e Støa (2016), realizaram estudos de avaliação pós-ocupação na Suécia, mostrando que os usuários associam a varanda à promoção do bem-estar físico e mental. Segundos os autores, a varanda possibilita a expansão da visão para o exterior e aumento do tamanho das aberturas, o que permite a criação de um espaço de conexão com o ambiente externo.

2.1.2. Outras extensões de fachada em edificações

Extensões de fachada, além das varandas, podem ser utilizadas para diferentes propósitos e sob diferentes formas em edificações verticais, utilizando a própria laje do pavimento, lajes intermediárias ou de cobertura, sistemas metálicos, etc. Podem ser elementos como: beirais, cimalthas, brises, prateleira de luz, etc. Possuindo função estética, de proteção solar ou contra outras intempéries, como a chuva.

A adoção desses elementos varia de acordo com tipologia construtiva e uso da edificação, mas estes têm se tornado mais presente em edificações onde a varanda tem sido eliminada, ou de área técnica para condensadoras de ar condicionado, formando sacadas fechadas muitas vezes

por venezianas para permitir ventilação das máquinas, o que é irônico, pois as venezianas poderiam ser utilizadas também para criar brises horizontais acima das aberturas, reduzindo a radiação solar direta e, conseqüentemente, o consumo energético dos condicionadores de ar. Nestes casos, percebe-se uma sobrevalorização da estética em detrimento do desempenho energético.

- Beiral

Segundo Albernaz e Lima (1998), beiral é a parte do telhado que se prolonga para além da prumada das paredes externas da edificação. Em geral é executado em balanço, mas também pode ser estruturado com mãos-francesas. De acordo com Mendes, Veríssimo e Bittar (2011), historicamente, diante do elevado índice pluviométrico das regiões tropicais, era imprescindível a proteção das paredes, quase todas compostas de barro em sua execução, material perecível quando exposto diretamente às chuvas. Recorrendo a práticas já desenvolvidas tanto nas possessões na Índia ou Extremo Oriente, o português fez uso recorrente deste elemento que se tornou um referencial na arquitetura colonial: beirais alongados, e muitas vezes com acabamentos diferenciados.

Apesar de também atribuir-se ao beiral a função de elemento de proteção solar, este é prioritariamente destinado a proteger os panos verticais da construção da chuva e seus efeitos deletérios. Usualmente eram executados em madeira, pedra ou argamassa, aplicados como arremates entre a parede e a projeção das últimas fiadas de telha. Podiam apresentar formas diferenciadas (Figura 22 e 23), ainda que permanecendo com a sua função principal inalterada. Entre os tipos de beiral pode-se citar: cachorros, cimalthas ou sancas (MENDES, VERÍSSIMO, BITTAR, 2011).

Figura 19 - À esquerda casa colonial em Tiradentes-MG, utilizando beiral.



Fonte: Mendes, Veríssimo e Bittar (2011).

Figura 20 - À direita diversos tipos de beiral encontrados na arquitetura brasileira.



Fonte: Albernaz e Lima (1998).

Assim como é o caso das varandas, é possível perceber a utilização desse elemento em praticamente todos os estilos e épocas. Sua aplicação decaiu durante o movimento modernista e mesmo contemporâneo com uma maior utilização de telhados embutidos e lajes impermeabilizadas, possibilidade que se deu principalmente pela troca do barro pelo cimento na composição na argamassa das paredes, deixando-as mais resistentes à umidade. Como exemplo da exclusão do beiral, têm-se parte da casa de Gregori Warchavchik, a Casa de Vidro de Lina Bo Bardi 1951 (Figura 21), ou ainda a Villa Savoye de Le Corbusier em 1928 (Figura 22) como exemplo internacional.

Figura 21 - Casa de Vidro de Lina Bo Bardi.



Fonte Figura 24: Peter Cheier (1951). Disponível em: <https://portal.institutobardi.org/a-casa-de-vidro/a-casa-dos-bardi/>. Acesso em: 25 abril 2023.

Figura 22 - Vila Savoye de Le Corbusier.



Fonte: Monceau (2012). Disponível em: <https://www.flickr.com/photos/monceau/7645286832/in/photostream/>. Acesso em: 25 abril 2023.

Durante o modernismo ainda era possível perceber a utilização do beiral, principalmente em habitações residenciais unifamiliares, como na Casa da Cascata de Frank Lloyd Wright em 1938 (Figura 23) e a casa das canoas Niemeyer em 1954 (Figura 24), as duas utilizando lajes em balanço. Edificações verticais usualmente não possuem beirais, mesmo na cobertura (com exceção da cobertura das varandas no último pavimento), mas é importante destacar que, mesmo na ausência do beiral, é comum a utilização de uma peça de arremate, usualmente chamada de “cimalha” e feito em pedra ou metal, contando ainda com um sulco ou dobra na ponta chamado “pingadeira” para evitar que água escorra pela fachada e ocasione em manchas e infiltrações (ALBERNAZ; LIMA, 1998).

Figura 23 - Casa da Cascata de Frank Lloyd Wright.



Fonte: Parchim B. (2013). Disponível em:
<https://www.flickr.com/photos/8963616@N08/8639486340/>.
 Acesso em: 25 abril 2023.

Figura 24 - Casa das Canoas de Niemeyer.



Fonte: Di Polto (2006). Disponível em:
<https://portal.institutobardi.org/a-casa-de-vidro/a-casa-dos-bardi/>. Acesso em: 25 abril 2023.

- Cimalha

Cimalhas são arremates emoldurados que se projetam para fora da superfície de uma parede (Figura 25). Geralmente estão localizadas no topo das paredes externas, criando uma saliência contínua ao longo de toda a fachada ou sobre as molduras de portas e janelas, criando uma saliência interrompida. No topo das paredes externas, encontra-se abaixo do beiral do telhado, fornecendo suporte para este ou situando-se sob a platibanda. Essa estrutura é comumente construída com massa, pedra ou madeira e pode apresentar ornamentos e molduras. Pode ser chamada de cimalha em redondo quando presente em todas as paredes externas do edifício. Quando posicionada sobre portas e janelas, também é chamada de cimalha de sobreverga ou cimalha real quando situada no topo das paredes ou, ainda, cornija. (ALBERNAZ; LIMA, 1998).

Figura 25 - Croqui com exemplo de cimalha.

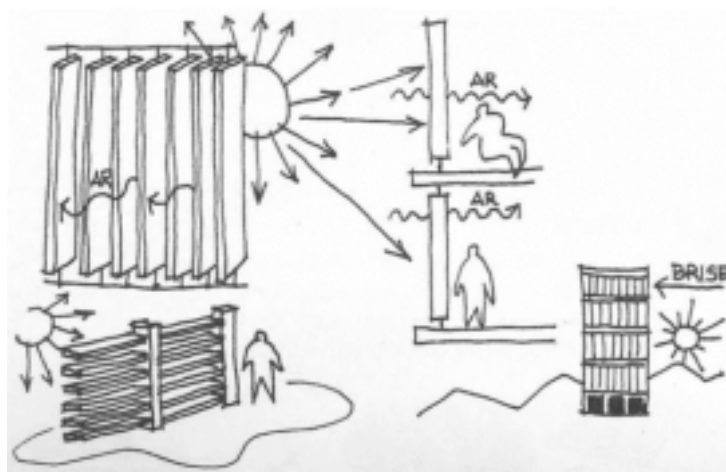


Fonte: Albernaz e Lima (1998).

- Brises

Brise, ou brise-soleil (Figura 26), é uma estrutura composta por várias peças, normalmente placas estreitas e compridas, instaladas nas fachadas de edifícios para reduzir a incidência direta do sol. Essas peças podem ser fixas ou móveis e podem ser posicionadas tanto na horizontal quanto na vertical. Quando adequadamente instalado, o dispositivo protege o interior do prédio do excesso de luz solar, ao mesmo tempo em que permite a visão para o exterior. É particularmente útil em edifícios localizados em regiões de clima quente. Geralmente, não é necessário na face sul do edifício e pode ser parcialmente dispensado na face leste, mas é indispensável nas faces norte e oeste. Recomenda-se ainda o uso de brises horizontais na face norte e verticais na face oeste (ALBERNAZ; LIMA, 1998).

Figura 26 – croqui com exemplos de brises.



Fonte: Albernaz e Lima (1998).

Ainda segundo Albernaz e Lima (1998), o brise é uma estrutura que pode ser móvel ou fixa, sendo que o móvel é regulável e requer maior manutenção, enquanto o brise fixo é mais econômico e indicado para fachadas voltadas para o norte ou nordeste. Além de sua utilidade, o brise também possui um efeito decorativo e foi um elemento marcante nos edifícios projetados durante o movimento modernista brasileiro, como pode ser visto no Ministério da Educação e Cultura, hoje Palácio Gustavo Capanema, no Rio de Janeiro (Figura 27).

Figura 27 – foto da fachada do Palácio Gustavo Capanema-RJ.

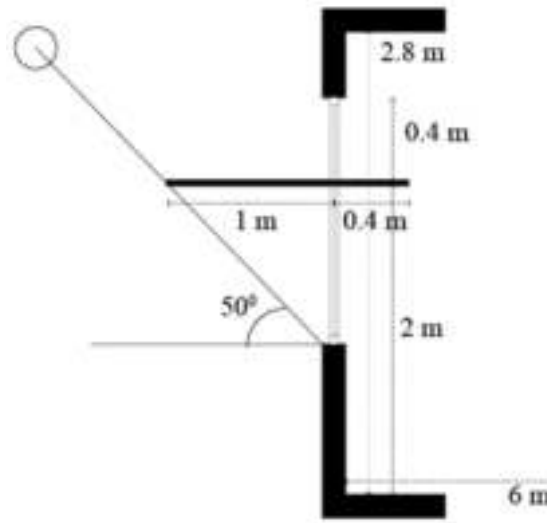


Fonte: AMB (2004). Disponível em: <https://pt.wikipedia.org/wiki/Brise-soleil#/media/Ficheiro:MESP1.JPG>. Acesso em: 15 jun 2023.

- Prateleiras de Luz

As prateleiras de luz (Figura 28) consistem em superfícies horizontais ou inclinadas colocadas acima do nível dos olhos em janelas, interna ou externamente. Sua função é controlar e redistribuir a luz natural refletindo-a em suas superfícies superiores e consequentemente para o teto, distribuindo a luz mais profundamente no espaço interno. Devido à sua posição, elas dividem a janela em duas partes: uma área superior que fornece luz natural (como uma claraboia) e uma inferior para visualização. Essas prateleiras também podem atuar como dispositivos de sombreamento, bloqueando o excesso de luz solar que incide sobre áreas de trabalho. As prateleiras de luz são amplamente adotadas em construções modernas, frequentemente citadas na literatura como dispositivos eficazes para melhorar a qualidade da iluminação e economizar energia, especialmente quando combinadas com controles de luz natural (KONTADAKIS et al., 2017).

Figura 28 - corte esquemático de uma prateleira de luz.



Fonte: Kontadakis et al. (2017).

Talvez o exemplo mais famoso do uso da prateleira de luz em uma edificação no Brasil é no Edifício Copan em São Paulo, projetado por Oscar Niemeyer, que combina brises horizontais, onde os dois brises intermediários acabam atuando como prateleiras de luz, refletindo de forma difusa a luz solar para os ambientes internos (Figura 29).

Figura 29 - ambiente interno no Edifício Copan.



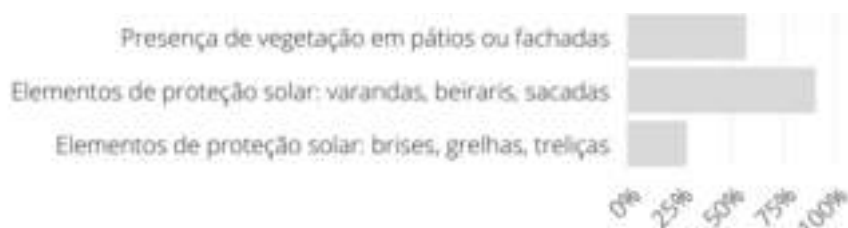
Fonte: Scarpa (2020). Disponível em: https://www.archdaily.com.br/br/972274/apartamento-copan-andre-scarpa-plus-rosario-pinho?ad_medium=gallery. Acesso em: 15 jun 2023.

2.1.3. Utilização em edificações contemporâneas

Maragno e Coch (2011) realizaram um estudo da prevalência da varanda na arquitetura brasileira, onde foram analisadas as principais revistas de arquitetura em circulação na época (período de 2008-2009). Foi identificado que 77% dos edifícios de apartamento e 92% das casas possuíam varanda. Os autores encontraram resultados similares para livros publicados de arquitetura contemporânea e moderna, o que coloca a varanda como um dos elementos de proteção solar passiva mais utilizados.

Cordeiro et al. (2021) realizaram análises da tipologia construtiva de 42 edifícios habitacionais multifamiliares construídos nos últimos 12 anos em quatro capitais brasileiras (São Paulo, Rio de Janeiro, Porto Alegre e Belo Horizonte). Observou-se que 85,7% dos modelos analisados possuíam varandas possíveis de serem agregadas ao espaço interno em suas unidades. Ainda, identificou-se que 90,5% dos edifícios apresentavam em sua fachada soluções como: varandas, sacadas, beirais, brises, grelhas, treliças e ainda a presença de vegetação em pátios ou fachadas. O Gráfico 1 demonstra o tipo de elemento e sua incidência nas edificações analisadas.

Gráfico 1 - Incidência de elementos nas fachadas das edificações analisadas.



Fonte: Cordeiro et al. (2021).

Entre os inúmeros projetos contemporâneos em São Paulo que utilizam varandas, pode-se destacar alguns que têm utilizado o elemento para dar movimento à fachada, como é o caso do JFL 125 (Figura 30), assinado pelo escritório Aflalo/Gasperini Arquitetos, e do Residencial MN15 (Figura 31), assinado pelo escritório Königsberger Vannucchi Arquitetos Associados. Ambas as edificações criaram padrões de varanda intercalados dando a sensação de movimento e aleatoriedade. As lajes em balanço que formam as varandas, nos exemplos citados, se apresentam como uma solução passível de ter sua forma adaptada a diferentes soluções estéticas por terem suas extremidades livres de apoios.

Figura 30 - Fachada do edifício JFL 125.



Fonte: Ducci (2023). Disponível em: <https://www.archdaily.com.br/br/1004673/edificio-jfl-125-aflalo-gasperini-arquitetos>. Acesso em: 10 janeiro 2024.

Figura 31 - Fachada do Residencial MN15.



Fonte: Vannucchi (2020). Disponível em: <https://www.archdaily.com.br/br/960894/edificio-residencial-mn15-konigsberger-vannucchi-arquitetos-associados>. Acesso em: 10 janeiro 2024.

O Edifício Residencial Leopoldo 1201 em São Paulo (Figura 32), também com projeto assinado pelo escritório Aflalo/Gasperini Arquitetos, mesclou varandas e sacadas ao longo da fachada para criar efeito de sombreamento e interseção entre os pavimentos, também com jogo de movimento nas varandas para a fachada principal.

Figura 32 - Edifício Residencial Leopoldo 1201 em São Paulo.



Fonte: Archdaily (2022). Disponível em: https://www.archdaily.com.br/br/962405/edificio-residencial-leopoldo-1201-aflalo-gasperini-arquitetos?ad_medium=gallery. Acesso em: 28 abril 2023.

Cimalhas planas têm aparecido em projetos de edifícios contemporâneos como ornatos (elemento ornamental), com função de interromper longos panos de vidro ou criar o efeito de profundidade em fachadas planas, como é o caso do edifício Aqua Tower (Figura 33 e Figura 34), do escritório Studio Gang em Nova Iorque, onde cimalhas foram associadas com varandas e brises horizontais por meio de lajes com desenho orgânico. Quando sua utilização passa a ter função de proteção solar (principalmente com o aumento da profundidade), estas podem ser designadas como brises-soleil horizontais, ou prateleiras de luz quando utilizadas na parte superior das janelas, possuindo função adicional de difusão da iluminação natural.

Figura 33 - Fachada do edifício Aqua Tower.



Figura 34 - Visão das varandas e lajes.



Fonte: Blessing (2009). Disponível em: https://www.archdaily.com/42694/aqua-tower-studio-gang-architects?ad_medium=gallery. Acesso em: 15 jun 2023.

Segundo Barros et al. (2018), a cidade de Vitória-ES, tem explorado cada vez mais a varanda como elemento em edifícios verticais residenciais, mesmo que essa adoção seja mais uma estratégia de valorização imobiliária do que como estratégia bioclimática para a região. De acordo com Gomes (2009) apud Barros et al. (2018), a elite da cidade de Vitória, no final da década de 1960 e durante toda a década de 1970, optou por migrar do centro da cidade para áreas residenciais mais agradáveis, como o bairro Praia do Canto. Com o passar do tempo, esse bairro começou a apresentar edifícios multifamiliares que gradualmente foram elevando o

gabarito e incorporando mais varandas, tornando-se um dos bairros mais característicos dessa tipologia construtiva no município até os dias atuais (Figura 35).

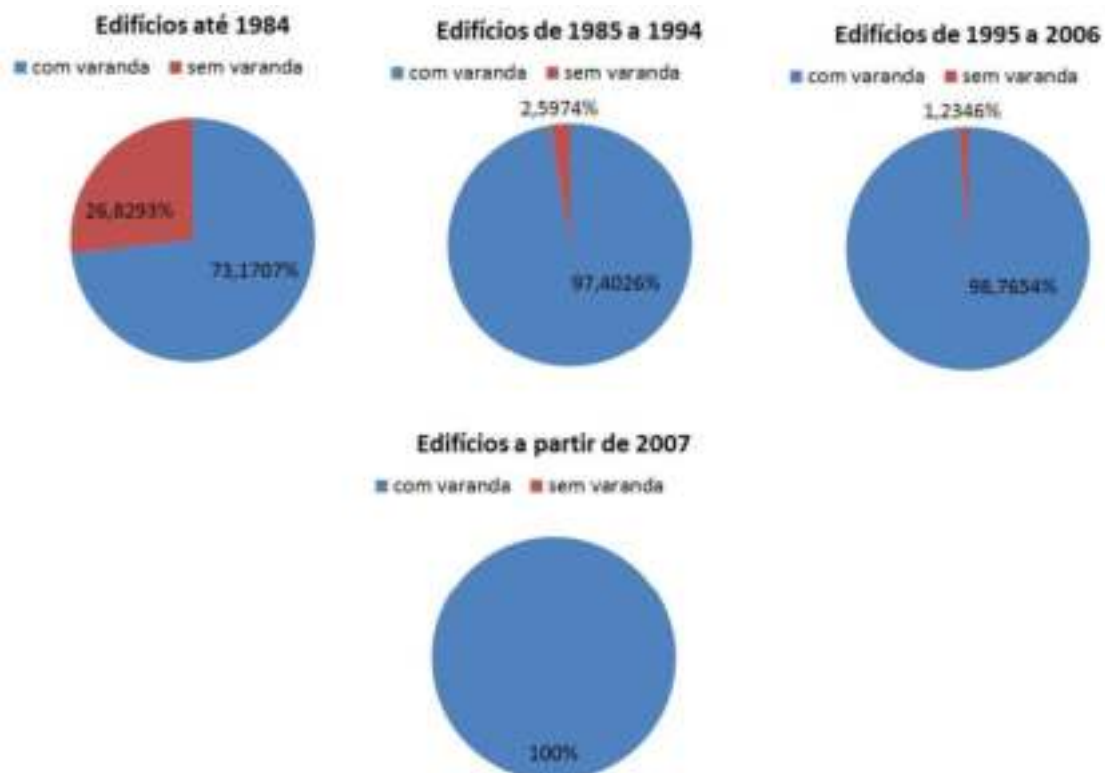
Figura 35 - Foto parcial do bairro Praia do Canto em Vitória-ES.



Fonte: Google Maps (2021). Disponível em: https://www.google.com.br/maps/@-20.3027875,-40.2886733,3a,26.8y,294.37h,95.33t/data=!3m6!1e1!3m4!1shHKCTmV_ak21AKEneeWLzQ!2e0!7i16384!8i8192?coh=205409&entry=ttu.

De acordo com Barros et al. (2018), entre os diversos fatores que impulsionaram a utilização da varanda, está o incentivo via legislação urbana, que desde 1984 permite suprimir a metragem quadrada do cálculo de coeficiente de aproveitamento (CA) das edificações, fator definido no Plano Diretor Urbano (PDU), que multiplicado pela área do lote, define o potencial construtivo deste. No estudo os autores buscaram comparar três períodos com diferentes legislações a fim de identificar sua influência na tipologia construtiva da região. Foram analisadas 263 edificações com projetos aprovados entre 1962 e 2012 no bairro Praia do Canto. Conforme Figura 36, é nítido o aumento da utilização da varanda no decorrer do tempo, chegando a 100% entre 2007 e 2012.

Figura 36 - Incidência da varanda ao longo do tempo na Praia do Canto Vitória-ES.



Fonte: Barros et al. (2018).

Apesar do aumento do uso da varanda como elemento arquitetônico em edifícios residenciais no Espírito Santo, tem ocorrido o surgimento dos fechamentos de vidro (Figura 37), com o objetivo principal de diminuir a quantidade de material particulado no interior dos espaços internos. Essa poluição do ar é causada principalmente pelo tráfego veicular e atividades relacionadas à construção civil e indústrias, presentes em grandes centros urbanos. Com isso, estratégias passivas de conforto ambiental estão perdendo espaço e apresentando resultados negativos, visto que a ação do vento é importante não somente para proporcionar conforto térmico, mas também para minimizar a recirculação de poluentes e renovar o ar em espaços internos. Além disso, o jogo de volumes com reentrâncias e saliências é substituído por fachadas lisas, resultando em uma composição estética questionável, especialmente quando não há acordo entre os condôminos em relação a uma solução única. (BARROS; ALVAREZ; REIZ JÚNIOR, 2018).

Figura 37 - Vista da baía de Vitória e ao fundo o Bairro Praia do Canto onde é possível notar a disseminação do fechamento das varandas com vidro.



Fonte: Barros, Alvarez e Reis Júnior, 2018.

Além da perda da identidade da arquitetura tropical, estudos como o de Hilliano, Mäkitalo e Lahdensivu (2016) revelam que ambientes envidraçados possuem bom desempenho em relação ao conforto térmico apenas em edifícios localizados em regiões de latitudes elevadas. Isso se deve ao fato de que a temperatura do ar no interior das varandas, cujas aberturas foram fechadas com vidros, normalmente é mais alta do que a temperatura do ar externo. Os autores examinaram o impacto da adição de vidros na demanda de energia do edifício e no clima interno. Os resultados obtidos mostram que a demanda de energia para aquecimento foi reduzida entre 5,6% e 25,3% após a instalação dos vidros. Contudo, ficou evidente que a adição de vidros diminuiu o nível de conforto térmico nos ambientes internos durante o verão.

Barros, Alvarez e Reis Júnior (2018) realizaram um estudo que questiona como a tipologia arquitetônica dos edifícios residenciais multifamiliares em Vitória-ES tem se alterado em virtude da crescente preferência da população em fechar as aberturas das varandas com vidros móveis. Embora a atenuação de ruídos, proteção contra vento e chuva tenham sido apontados como motivos para o fechamento das aberturas das varandas, o principal motivo é o desconforto causado pela presença de material particulado nas residências. No entanto, os resultados mostraram que a concentração média diária de partículas era maior quando as varandas estavam fechadas do que quando estavam abertas. Além disso, o uso constante dos vidros fechados resultou em aumento da temperatura do ar no ambiente e desconforto térmico, levando alguns moradores a recorrerem ao ar condicionado, o que vai contra o propósito original das varandas em climas quentes e úmidos, que é fornecer sombreamento e ventilação natural aos espaços internos.

É importante ressaltar que, embora o Código de Edificações de Vitória-ES originalmente estipule no seu artigo 140, parágrafo 4º, que as aberturas das varandas não poderiam ser fechadas com esquadrias (PMV, 1998, p.47), em 2006 foi promulgada a Lei nº 6.801, que modificou este parágrafo, permitindo o fechamento das varandas, desde que os materiais utilizados garantam plena iluminação, ventilação, permeabilidade ou transparência visual para os ambientes aos quais as aberturas se direcionam, e sejam instalados sobre o guarda-corpo ou jardineira (PMV, 2006).

Já outras extensões de fachada, como beirais, cimalhas e brises, passaram a ser uma solução estética na arquitetura contemporânea a fim de evitar panos de vidro muito longos, também em razão de fechamentos de vidro das varandas, o que contribui para a diminuição da incidência solar direta e possibilita formas estéticas mais complexas. Em Vitória-ES, destaca-se o uso deste elemento como prateleira de luz (funcionando também como elemento sombreador) no edifício que hoje abriga a sede do Conselho Regional de Engenharia e Agronomia do Estado do Espírito Santo (CREA-ES) (Figura 38), localizado no bairro Enseada do Suá, e como solução estética para criar “movimento” nas fachadas dos edifícios Mata da Praia Park (Figura 39), The View (Figura 40), Rio Tocantins (Figura 41), localizados no bairro Mata da Praia e o Una Residence, atualmente em construção, em Bento Ferreira (Figura 42).

Figura 38 - Edifício do CREA-ES.



Fonte: CREA. Disponível em: <https://www.creaes.org.br/creaes/CREAES/Quemsomos.aspx>. Acesso em: 3 maio 2023.

Figura 39 - Edifício Mata da Praia Park.



Fonte: Alunobre. Disponível em: <https://alunobre.com.br/portofolio/edificios-residenciais/mata-da-praia-park/>. Acesso em: 3 maio 2023.

Figura 40 - Edifício The View.



Fonte: Nazca. Disponível em: <https://nazca.co/investimentos-imobiliarios/the-view> e <https://riotocantins.com.br/>. Acesso em: 3 maio 2023.

Figura 41 - Edifício Rio Tocantins.



Fonte: Grasseli. Disponível em: <https://riotocantins.com.br/>. Acesso em: 3 maio 2023.

Figura 42 - Edifício Una Residence.



Fonte: Grand. Disponível em: <https://grandconstrutora.com.br/imoveis/una-residence/>. Acesso em: 12 jun 2023.

2.1.4. Dimensões e materiais

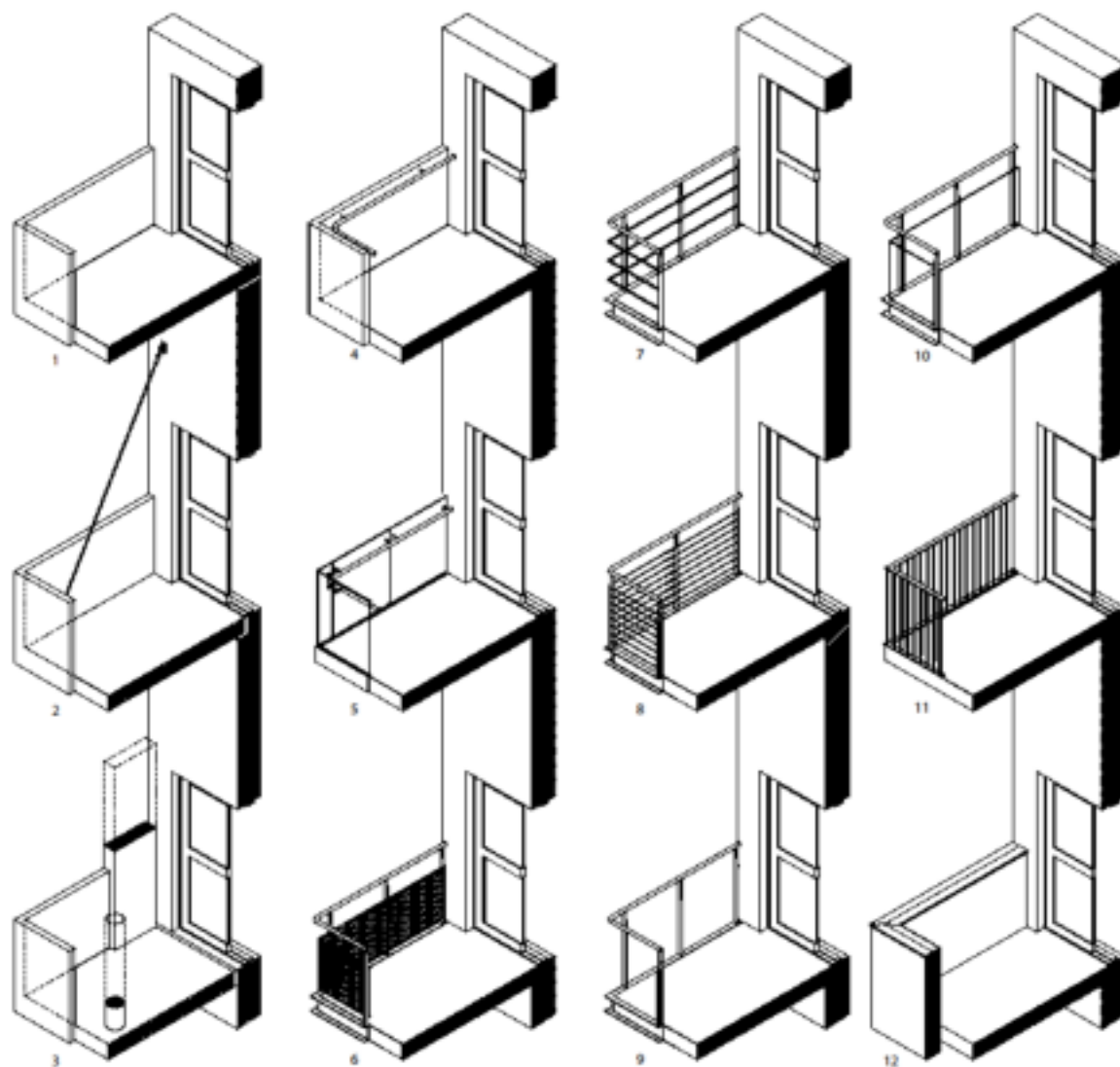
Em diversos Códigos de Edificações e Planos Diretores Urbanos das cidades brasileiras é permitido o avanço da varanda sobre os afastamentos frontais, além de usualmente não serem, até determinado tamanho, contabilizadas nos coeficientes de aproveitamento (CA), o que faz com que esse elemento se torne um recurso das construtoras para acrescer as áreas construídas e por consequência valorizar os imóveis. Desta forma, seu dimensionamento muitas vezes acaba sendo limitado pelo tamanho que consegue ocupar no afastamento ou, ainda, no limite da área para não ser incluída no CA. A mesma coisa ocorre para o beiral.

Barros et al. (2018) analisaram o tamanho médio das varandas em cada período legislativo no bairro Praia do Canto em Vitória-ES, e constataram que até 1984 as varandas tinham uma metragem reduzida. Após a implementação do Primeiro Plano Diretor Urbano (PDU) em 1985, houve um aumento significativo na inclusão de varandas nos projetos arquitetônicos, provavelmente porque elas deixaram de ser contabilizadas na área construída (CA). Em relação à metragem das varandas, verificou-se que até 1984 elas tinham uma área média de cerca de 10 m² nos edifícios estudados. Com a promulgação da Lei 3.158/84, que não incluía a área das varandas no cálculo do CA, houve um crescimento considerável na metragem, chegando a quase 20 m². Posteriormente, a partir de 1995, com as Leis 4.167/94 e 6.705/06, que permitiam a isenção de até 40% no cálculo do CA, a metragem das varandas sofreu uma redução.

Em 2018 o PDU de Vitória recebeu uma nova atualização e a varanda passou a não ser computada no CA no limite de 20% da área computável para imóveis residenciais multifamiliares, unidade de hospedagem em hotéis, apart-hotéis, pensões, hospitais, casas de saúde e de repouso, maternidade e sanatórios. Para edificações não residenciais, essa proporção ficou limitada a 7,5% (Art. 86, parágrafos VIII e IX). Ainda, no art. 97, permite-se que se avance sobre os afastamentos de frente a construção de marquises e beirais que se projetem em no máximo 50% do valor do afastamento frontal, sendo admitida projeção máxima de 3,00m (parágrafo VII), e no caso de balcões, varandas e sacadas, avançando no máximo 1,00m a partir do segundo pavimento, desde que o afastamento frontal mínimo da edificação seja superior ou igual a 4,00m (parágrafo IX) (PMV,2018). O Código de Edificações Art. 127, parágrafo 2º também diz que o dimensionamento das varandas (classificado com compartimento do Grupo B) deverá respeitar o mínimo de 2,30m de pé-direito e possibilitar a inscrição de um círculo no plano do piso com diâmetro de 0,80m para as varandas (PMV, 1998).

Os materiais utilizados nas varandas, assim como suas dimensões, ainda variam de acordo com o padrão de acabamento do edifício, sendo os mais usuais a alvenaria (em edificações de mais baixo padrão), o que cria maior barreira para a iluminação, e o vidro (em edificações de mais alto padrão). Davies e Jokiniemi (2008) apresentam em um modelo esquemático (Figura 43), três principais tipos de varanda, sendo estes: varanda em balanço (1), varanda suspensa (2), varanda autossustentável (3). Entre os principais materiais utilizados no fechamento (guarda-corpo) estão: tipo sólido (4), em vidro (5), em malha de arame (6), em barras de aço (7), em cabos (8), aberto (9), em aço e vidro (10), em gradil vertical (11), em alvenaria (12).

Figura 43 - Modelos de varanda e guarda-corpo.



Fonte: Davies e Jokiniemi (2008).

Já os beirais, cimalhas e brises horizontais fixos em edificações multipavimentos, como observados nas edificações apresentadas anteriormente em Vitória-ES, podem ser uma extensão do balanço da laje, sendo seu principal material o concreto armado revestido com pedra, porcelanato ou alumínio composto (como no ed. The View), ou podem ainda ser fabricados inteiramente em peças metálicas como as de alumínio composto estruturadas com perfis de alumínio (presentes do edifício do CREA-ES, Rio Tocantins, Mata da Praia Park e Uma Residence). Suas dimensões variam de acordo com o tipo de material e seu dimensionamento, pelo menos nos edifícios residenciais citados, parecem ter sido realizados de forma aleatorizada para criar “movimento” nas fachadas quase que inteiramente fechadas por vidro.

2.2. Desempenho ambiental no projeto de arquitetura

Quando se elabora um projeto de arquitetura, uma série de fatores contextuais devem ser cuidadosamente considerados, desde a topografia e o clima, até aspectos culturais, sociais e regulamentares, além da crucial integração de elementos como conforto ambiental, eficiência energética e viabilidade econômica, dados os desafios contemporâneos de sustentabilidade. Contudo, a otimização dessas variáveis de forma simultânea é desafiadora, exigindo um equilíbrio entre elas. O projeto arquitetônico, devido à sua intrínseca complexidade, é frequentemente classificado como um "problema pernicioso" (wicked problem), conceito introduzido na arquitetura principalmente na década de 1970 por Rittel e Weber. Essa designação ressalta a inexistência de uma solução única e definitiva, mas sim a busca por soluções satisfatórias (CELANI, 2012).

De acordo com Bittencourt (2015), o processo de projeto de um edifício com foco no seu desempenho ambiental não deve ser entendido como um processo diferente dos métodos convencionais de projeto. Este envolve raciocínio similar com a particularidade de priorizar as questões relacionadas aos impactos produzidos pelos edifícios e pelas cidades sobre o meio ambiente. As principais diferenças são de natureza metodológica e filosófica, com o comprometimento em mitigar os impactos ambientais utilizando, para isso, ferramentas computacionais que permitam avaliar esses impactos.

Segundo Bittencourt (2015), a elaboração do projeto arquitetônico costuma ser dividida nas etapas de Estudo Preliminar, Anteprojeto, Projeto Executivo e Detalhamento, sendo que as análises ambientais são realizadas durante estas etapas, mas se apresentam de forma mais intensa no Estudo Preliminar, etapa em que o partido arquitetônico é concebido. O partido, por sua vez, é dividido em quatro principais fases: filosofia arquitetônica, definição plástica e espacial, condicionantes arquitetônicas e síntese, sendo que em cada uma dessas fases é possível levar em consideração o desempenho ambiental da edificação. Desta forma, o Estudo Preliminar (fase inicial de projeção) se constitui como o momento mais importante do projeto.

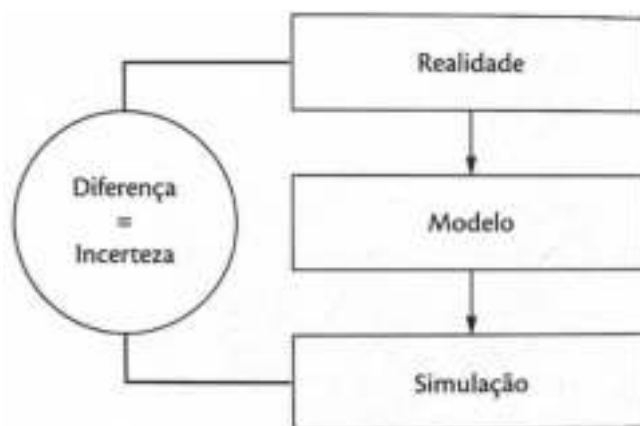
De acordo com Gonçalves (2015), nos últimos anos, houve um crescente foco nas questões de desempenho ambiental ao projetar edifícios, abrangendo conforto e eficiência energética. Esse interesse tem sido acompanhado pelo uso de simulações computacionais, que se tornaram ferramentas essenciais para avaliar o desempenho do edifício e integrar a arquitetura com a engenharia de sistemas prediais. No entanto, mais do que simplesmente aumentar a

complexidade do projeto por meio de simulações, é crucial identificar previamente os critérios ambientais mais relevantes para o desempenho real da edificação.

Hernandez (2015) menciona que as primeiras ferramentas de simulação surgiram nas décadas de 1960 e 1970, concentrando-se inicialmente no desempenho energético da envoltória dos edifícios e, ao longo do tempo, expandiram-se para abranger sistemas de iluminação, climatização, aquecimento, ventilação, entre outros. Atualmente, essas ferramentas têm um escopo ainda mais abrangente, englobando análises combinadas de transferência de calor e massa, acústica, sistemas de controle e até a combinação de climas urbanos e microclimas.

Essas ferramentas de simulação têm como principal característica traduzir o comportamento de um fenômeno em equações e hipóteses que geram um modelo. No entanto, por serem representações, esses modelos apresentam incertezas em relação ao fenômeno real (Figura 44). O grau de incerteza tende a variar de acordo com a etapa do projeto, sendo maior nas etapas iniciais e significativamente reduzido nas etapas finais de detalhamento (HERNANDEZ, 2015).

Figura 44 - Incertezas entre simulações e modelo real.



Fonte: Malkawi e Augenbroe (2004) apud Hernandez (2015)

Segundo Yannas (2015), o processo de elaboração e execução de simulações é similar ao do projeto arquitetônico e vem sendo aperfeiçoado ao longo dos anos, de forma que suas interfaces visuais, facilidade de utilização e agilidade na execução estão sendo constantemente aprimoradas. As experiências no ensino da simulação de desempenho ambiental, têm mostrado que o arquiteto pode dominar rapidamente a mecânica da computação de qualquer complexidade.

O uso de ferramentas de simulação por projetistas se tornou fundamental para apoiar as decisões em estágios iniciais de projetos de edificações com alto desempenho ambiental. Dada a

variedade de opções de ferramentas de simulação, arquitetos e engenheiros são desafiados diariamente com o processo de seleção dessas ferramentas e critérios ambientais durante as fases de projeto (ATTIA et al., 2012).

Para o dimensionamento dos elementos de proteção destacados anteriormente, em fases iniciais de projeto é conveniente que, durante as análises, os projetistas considerem critérios que demandam menor processamento computacional, por conta do grau de incerteza inerente à esta etapa (demandando múltiplas análises), o que pode tornar o processo de projeto mais moroso. Portanto, é importante destacar quais critérios ambientais e suas métricas possuem maior relevância, principalmente em análises multiobjetivo relacionadas à forma do edifício, já que a eficiência dos subsistemas é geralmente avaliada em fases mais avançadas de projeto.

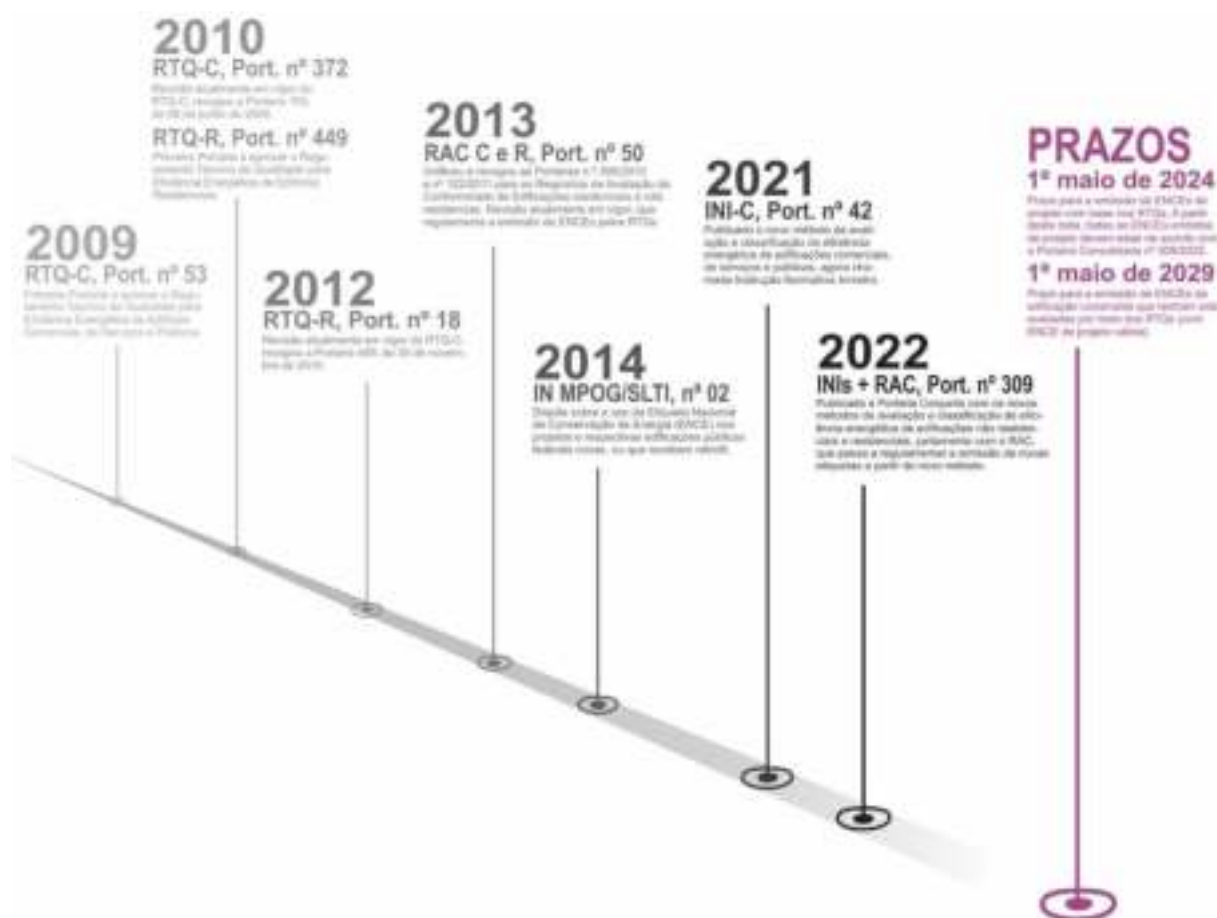
2.2.1. Regulamentações no Brasil

As regulamentações energéticas desempenham um papel crucial no setor da construção, não apenas estabelecendo limites aceitáveis para o consumo de energia, mas também orientando a qualidade geral dos edifícios. No entanto, é importante reconhecer que essas regulamentações são moldadas pelo contexto local e pelos interesses envolvidos na sua criação. Fatores como a estrutura econômica da região e o acesso à tecnologia desempenham um papel significativo na caracterização e evolução dessas regulamentações (KRELLING et al., 2023)

No Brasil, desde 2014, o Procel Edifica em parceria com o CB3E tem colaborado para aprimorar o método de avaliação e classificação de eficiência energética de várias categorias de edificações. O foco dessas iniciativas é melhorar o indicador de desempenho, orientando os consumidores na seleção de imóveis mais eficientes, e promover a inclusão da avaliação de edificações de energia quase zero e energia positiva. A nova abordagem de avaliação utiliza o consumo de energia primária, comparando a edificação real com características de referência equivalentes às classificações de eficiência energética D (para edificações não residenciais) e C (para edificações residenciais) (PBE, 2022).

Recentemente, o Ministério da Economia e o Inmetro publicaram a Portaria Consolidada nº 309, estabelecendo os requisitos para a eficiência energética de edificações comerciais, de serviços, públicas e residenciais, com vigência a partir de outubro de 2022, com disposições transitórias para a conformidade com as normas. Os períodos e as disposições temporárias entre as Instruções Normativas (INIs) e os Requisitos Técnicos de Qualidade (RTQs) estão alinhados com a cronologia representada na Figura 45 (PBE, 2022).

Figura 45 - Cronologia dos Requisitos Técnicos de Qualidade e Instruções Normativas.



Fonte: PBE (2022)

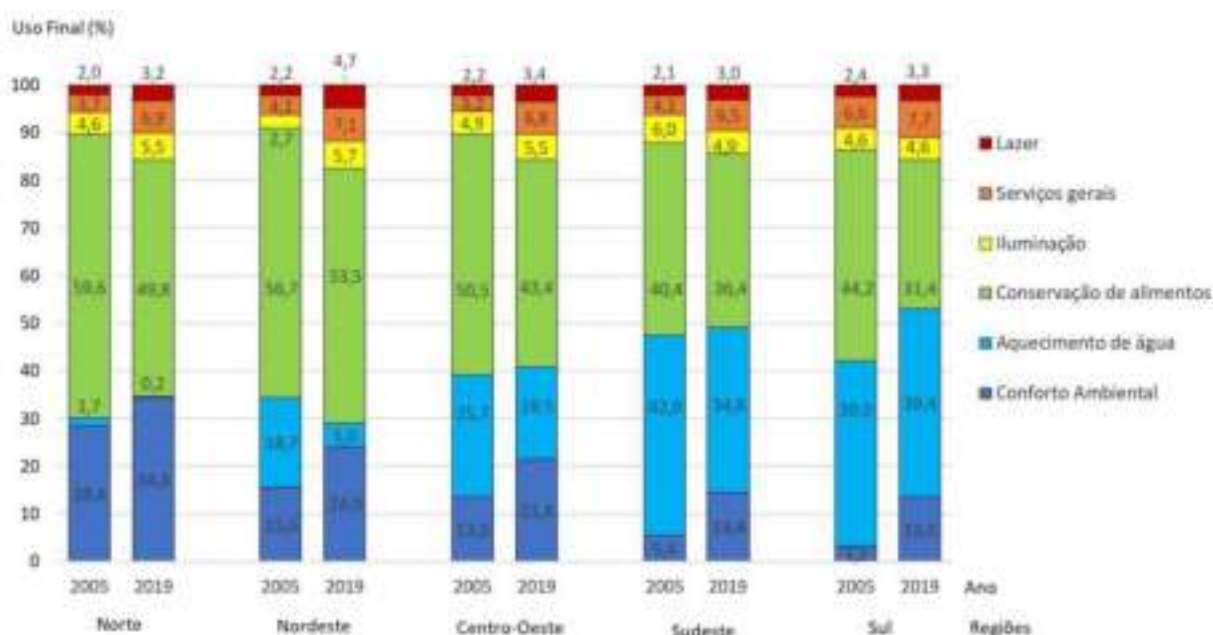
A Instrução Normativa Inmetro estabelece critérios e métodos para classificação da eficiência energética de edificações residenciais, com o objetivo de etiquetar tais edificações. As normas da ABNT são obrigatórias para as edificações submetidas a esta instrução. O documento apresenta procedimentos para determinar a classificação de eficiência energética de edificações residenciais e áreas de uso comum. Para edificações residenciais, a estimativa do consumo de energia pode ser feita por métodos prescritivo, simplificado e de simulação. O método prescritivo compara características geométricas e térmicas com valores de referência da ABNT. O método simplificado segue a norma NBR 15575-1/2021 e o mínimo de desempenho térmico equivale à classe C de eficiência energética. Para classificação mais alta (classes B ou A), métodos simplificados ou de simulação são usados. O sistema de aquecimento de água é avaliado pelo método simplificado. Para áreas de uso comum, a estimativa do consumo de energia é realizada pelo método simplificado, comparando-se com uma condição de referência (PBE, 2022).

2.2.2. Desempenho térmico

A revisão de literatura realizada por Frontczak e Wargocki (2011) aponta que, dentre os critérios ambientais possíveis de serem analisados, estão o conforto térmico, acústico, visual e qualidade do ar. A revisão ainda aponta o conforto térmico como sendo o mais importante para a satisfação geral dos usuários, quando comparado às outras condições ambientais.

Abrahão e Souza (2021) ainda aponta que o gasto energético com o conforto ambiental (relacionado ao conforto térmico) como sendo o de maior impacto, depois dos gastos com conservação de alimento e aquecimento de água. O estudo ainda aponta um crescimento significativo entre os anos de 2005 e 2019 para todas as regiões, chegando a 14,4% do consumo para a região sudeste em 2019, como pode ser observado na Figura 46.

Figura 46 - Estrutura de consumo residencial de energia elétrica por região, de 2005 a 2019.



Fonte: Abrahão e Souza (2021)

Enquanto o conforto térmico refere-se à percepção subjetiva de conforto do usuário em relação à temperatura, o desempenho térmico envolve aspectos técnicos relacionados ao controle e regulação da temperatura em um ambiente. O conforto térmico é definido pela ASHRAE 55 como a condição mental que expressa satisfação térmica com o ambiente, sendo uma avaliação subjetiva (ASHRAE, 2023).

Segundo Olgyay (2015), o estado de conforto térmico ideal é alcançado quando a temperatura é suficientemente quente ou fria para evitar desconforto, de modo que o indivíduo necessite de

um esforço mínimo para regular a troca de calor. Essa definição se aplica ao conforto térmico de um indivíduo, mas em edifícios, onde uma pessoa geralmente compartilha o ambiente com outros ocupantes, os resultados podem variar significativamente.

Segundo Rupp, Vásquez e Lamberts (2015), em relação ao conforto térmico em ambientes internos, a discussão atualmente se concentra em duas abordagens principais. A primeira abordagem é o modelo clássico de estado estacionário desenvolvido por Fanger na década de 1970 para espaços com ar-condicionado. Esse modelo se baseia em um equilíbrio de calor do corpo humano, e o objetivo deste é prever a sensação térmica média de um grupo de pessoas e a porcentagem de insatisfação com o ambiente térmico, que são expressas pelos índices de Voto Médio Previsto (PMV) e Porcentagem Prevista de Insatisfação (PPD).

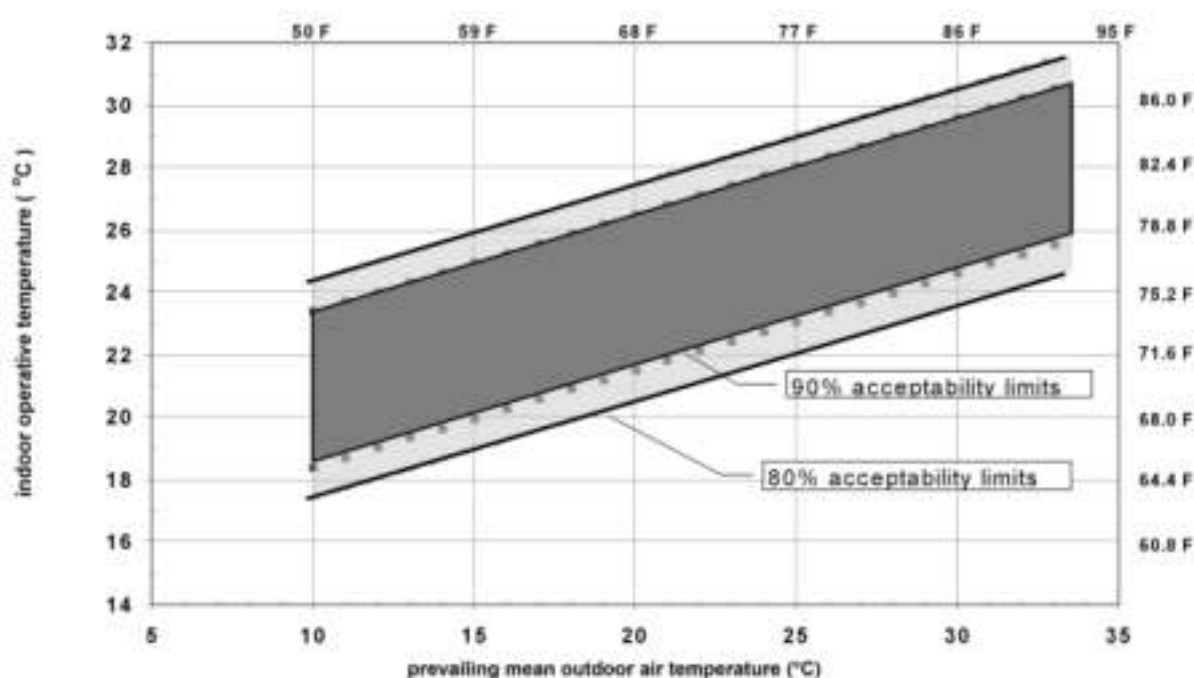
O cálculo do PMV leva em consideração seis variáveis: metabolismo, vestuário, temperatura do ar interno, temperatura média radiante interna, velocidade do ar interno e umidade do ar interno. O PMV é representado por uma escala de sete pontos que abrange o conforto térmico, variando de +3 a -3. Os valores nessa escala correspondem a diferentes sensações térmicas: -3 para muito frio, -2 para frio, -1 para um pouco frio, 0 para neutro, +1 para um pouco quente, +2 para quente e +3 para muito quente. Valores entre -1 e +1 são considerados confortáveis. O PMV é calculado como a média dos votos na escala dadas pelas pessoas submetidas às condições ambientais em estudo. Esse modelo assume que os indivíduos não irão alterar suas atividades, como trocar de roupas ou interagir com janelas. O método PMV foi a base das normas ISO 7730 e ASHRAE 55 e ainda é amplamente utilizado, sendo inclusive expandido para incluir edifícios sem ar-condicionado em climas quentes (DJONGYANG; TCHINDA; NJOMO, 2010).

Segundo Djongyang, Tchinda e Njomo (2010), a segunda abordagem comumente usada para determinar o conforto térmico é o modelo adaptativo, que se baseia no princípio adaptativo de que as pessoas reagem ativamente para restaurar seu conforto quando ocorrem mudanças que causam desconforto. Diferentemente do método PMV, no qual os usuários são passivos, o modelo adaptativo considera a interação dos usuários com seu ambiente térmico. Esse modelo foi desenvolvido com base em estudos de campo realizados em edifícios com ventilação natural, nos quais foram estabelecidas relações lineares entre as temperaturas operativas internas aceitáveis e as temperaturas externas predominantes. Ou seja, as temperaturas de conforto variam de acordo com o clima externo, permitindo temperaturas internas mais altas em climas

externos mais quentes. Essa abordagem representa uma mudança de paradigma em relação à teoria de Fanger.

O Gráfico 2, retirado da ASHRAE 55 (ASHRAE, 2023), demonstra as faixas de conforto adaptativo relacionadas à temperatura operativa interna (eixo y) e à temperatura média do ar externo (eixo x). O conforto interior ideal em um edifício naturalmente ventilado equivale a $0,31 * T_{mot} + 17,8 \text{ °C}$. A faixa de aceitação térmica de 80% é de $\pm 3,5 \text{ °C}$ em relação ao ótimo, enquanto a faixa de aceitação de 90% é de $\pm 2,5 \text{ °C}$.

Gráfico 2 - Gráfico de conforto adaptativo da ASHRAE 55-2023.



Fonte: ASHRAE (2023)

De acordo com Rupp, Vásquez e Lamberts (2015), o modelo adaptativo, incorporado em normas e diretrizes como a ASHRAE 55 em 2004 e a EN 15251, considera três aspectos inter-relacionados: psicológico (expectativa de conforto e habituação em relação ao clima interno e externo), comportamental (inclui ações como abrir janelas, usar persianas, ventiladores e portas) e fisiológico (aclimatação). O conceito de alestesia, que descreve como um estímulo externo pode ser percebido como agradável ou desagradável com base nos sinais internos do corpo, é utilizado para justificar os aspectos fisiológicos e comportamentais do modelo adaptativo.

Atualmente existem três padrões internacionais comumente utilizados para abordar o conforto térmico, baseados na análise das trocas de calor entre as pessoas e o ambiente ao seu redor, sendo estes: ISO 7730, de abrangência internacional; ASHRAE 55, utilizado principalmente na América do Norte, mas também adotado por pesquisadores brasileiros; e EN 15251, específico para o continente europeu, mas não adequado para o clima do Brasil. A norma ISO 7730 é aplicável em ambientes com condições térmicas moderadas e foi desenvolvida em colaboração com a ASHRAE 55. Ela utiliza os índices PPD e para prever a sensação térmica dos usuários e descrever as condições ambientais visando alcançar o conforto térmico. Além disso, a norma aborda a previsão da porcentagem de pessoas insatisfeitas devido a parâmetros locais de desconforto. Ela trata de ambientes térmicos aceitáveis, principalmente com base em condições de estado estacionário. A norma também lista métodos para avaliar condições de não estacionariedade, como variações de temperatura e ciclos, e apresenta um método para avaliar o conforto térmico a longo prazo. Recomendações são fornecidas sobre como levar em consideração a adaptação das pessoas ao avaliar e projetar edifícios (ISO, 2005).

Já a norma ASHRAE 55 tem como objetivo especificar combinações de fatores ambientais térmicos internos e fatores pessoais que resultem em condições térmicas aceitáveis para a maioria dos ocupantes de um espaço. Ela aborda fatores ambientais como temperatura, radiação térmica, umidade e velocidade do ar, além de considerar atividades realizadas e vestuário como fatores pessoais. A norma estabelece que todos esses critérios sejam aplicados em conjunto, uma vez que o conforto térmico em ambientes internos é complexo e depende da interação desses fatores (ASHRAE, 2023).

Na mais recente revisão da NBR 15575-1/2021, o método sugerido para avaliar o desempenho térmico de residências implica na criação e comparação de dois modelos de simulação (Figura 47): o modelo real, que incorpora todas as soluções construtivas do projeto, e o modelo de referência, que preserva a forma da edificação real, mas adota características padronizadas para efeitos de comparação. Essas simulações abrangem um período de um ano completo, com duas condições de uso da habitação (com e sem ventilação natural), levando em conta também as cargas térmicas internas. Os indicadores de desempenho são determinados para os Ambientes de Permanência Prolongada (APPs) e posteriormente convertidos em valores correspondentes à Unidade Habitacional (UH) (KRELLING et al., 2020).

Figura 47 - Esquema de simulação para edificações na NBR 15575/2021.



Fonte: krelling et al. (2020).

Três métricas são apresentadas: o Percentual de Horas em uma Faixa de Temperatura Operativa (PHFT), as Temperaturas Operativas Máxima (Tomax) e Mínima (Tomin) anuais, e a Carga Térmica Total (CgTT). Esses dados são coletados tanto para os modelos real quanto de referência, permitindo uma comparação subsequente. Cada métrica busca capturar diferentes comportamentos observados nas construções ao longo do ano, possibilitando uma análise abrangente do desempenho térmico, incluindo a avaliação do tempo em que a edificação mantém temperaturas adequadas, a presença de extremos de temperatura na Unidade Habitacional (UH) e a estimativa da necessidade de condicionamento artificial. Os critérios para os níveis de desempenho (Mínimo, Intermediário e Superior) são estabelecidos considerando os indicadores propostos, bem como levando em conta características como o tipo de edificação, o andar e a zona bioclimática. (ABNT, 2021).

Para cumprir o critério de PHFTUH no nível mínimo (M), o modelo real de simulação computacional deve garantir que, ao longo de um ano e durante os períodos de ocupação dos Ambientes de Permanência Prolongada (APP), o $PHFT_{UH,real}$ seja superior a 90% do obtido para o modelo de referência ($PHFT_{UH,ref}$). Já para os níveis intermediário (I) e superior (S), o cumprimento do critério de PHFTUH é determinado pelo aumento do $PHFT_{UH,real}$ ($\Delta PHFT$) em relação ao $PHFT_{UH,ref}$, como detalhado no Quadro 1 - Critério de avaliação de desempenho térmico da envoltória quanto ao PHFTUH.. Além disso, a norma estabelece diretrizes para a modelagem da edificação, incluindo as propriedades térmicas de paredes, pisos, esquadrias e cobertura para o modelo de referência, bem como padrões de ocupação para os Ambientes de Permanência Prolongada (APP) e suas cargas internas (ABNT, 2021).

Quadro 1 - Critério de avaliação de desempenho térmico da envoltória quanto ao PHFTUH.

Nível de desempenho	Critério
Mínimo (M)	$PHFTUH_{real} > 0,9.PHFTUH_{ref}$
Intermediário (I)	$\Delta PHFTa \geq \Delta PHFT_{mín} b$
Superior (S)	$\Delta PHFT \geq \Delta PHFT_{mín}$
a $\Delta PHFT$ é o incremento do $PHFTUH_{real}$ em relação ao $PHFTUH_{ref}$. b $\Delta PHFT_{mín}$ é o incremento mínimo do $PHFTUH_{real}$ em relação ao $PHFTUH_{ref}$, com valor obtido pela Tabela 20, para o nível intermediário, e pela Tabela 21, para o nível superior.	

Fonte: ABNT (2021).

2.2.3. Desempenho lumínico

Ainda que, segundo Frontczak e Wargocki (2011), o conforto visual seja aquele com menor impacto no conforto geral do usuário (do ponto de vista da percepção do mesmo), sua avaliação ainda se torna justificável pelo impacto na saúde humana.

De acordo com Andersen (2015), a avaliação da iluminação natural de um espaço é feita utilizando duas abordagens distintas. A primeira aborda os aspectos visuais e de conforto, relacionados ao ocupante na realização de tarefas e ao seu bem-estar no ambiente. A segunda aborda os aspectos não visuais, com base nas ciências fotobiológicas e da saúde, considerando os ciclos circadianos⁵ das pessoas e o papel da luz natural no controle de processos bioquímicos essenciais para a saúde humana.

Estudos revelam que, no que diz respeito ao desempenho luminoso de uma edificação, há uma falta de consenso em relação aos indicadores e critérios mais adequados ou aceitáveis. Entre os parâmetros mais comumente encontrados na literatura para avaliações dinâmicas de iluminação natural, destacam-se o Daylight Autonomy (DA), o Spatial Daylight Autonomy (sDA), o Annual Sunlight Exposure (ASE) e o Useful Daylight Illuminance (UDI) (MARCONDES CAVALERI; CUNHA; GONÇALVES, 2018).

A DA representa a frequência anual em que um determinado nível de iluminância atinge uma superfície de trabalho, após se estabelecer um valor mínimo de iluminância desejado (como 300 lux ou 500 lux). Atingindo os valores mínimos desejados durante o período, pressupõe-se que a iluminação artificial não será necessária. Já a UDI pode ser definida como a ocorrência anual de iluminâncias no plano de trabalho quando luzes artificiais não são necessárias. Essa

⁵ Ritmos biológicos que ocorrem em um período de aproximadamente 24 horas. Esses ritmos estão presentes em muitos organismos, incluindo seres humanos, e influenciam uma ampla gama de processos fisiológicos e comportamentais ao longo do dia. Fonte: Suni e Dimitriu (2023). Disponível em: <<https://www.sleepfoundation.org/circadian-rhythm>>. Acesso jun. 2023.

definição é baseada em estudos de campo que observaram as preferências e o comportamento de ocupantes de edifícios que contam com iluminação natural e sistemas de sombreamento ajustáveis. Nesse contexto, os valores considerados apropriados para a UDI situam-se entre 300 lux e 3.000 lux, o que significa que a luz natural nesse intervalo é suficiente para dispensar a iluminação artificial. Valores de iluminância abaixo de 100 lux são considerados inadequados, enquanto níveis entre 100 lux e 300 lux são considerados insuficientes, e acima de 3.000 há a provável ocorrência de ofuscamento (MARDALJEVIC et al., 2011).

A principal diferença entre os critérios DA e UDI reside na fixação de um limite superior aceitável para os níveis de iluminância no segundo caso. Uma vez que o DA não impõe um limite superior, a sua aplicação pode resultar em níveis excessivamente altos de iluminação, que estão associados ao desconforto visual devido ao ofuscamento e ao indesejável aumento da carga térmica. (MARCONDES CAVALERI; CUNHA; GONÇALVES, 2018).

A sDA é uma medida da suficiência de iluminância da luz do dia para uma determinada área, relatando a porcentagem da área do piso que excede um nível de iluminância de 300 lux por mais de 50% das horas anuais de trabalho (8h às 18h). De acordo com a IES LM-83 (IES, 2012), a sDA foi classificada nos seguintes níveis de suficiência de luz do: suficiência de luz do dia referida (deve atender ou exceder 75% da área de análise), suficiência de luz do dia nominalmente aceita (deve atender ou exceder 55% da área de análise), não aceita (sDA não atende ao valor mínimo exigido de 55% da área de análise). Já a ASE descreve o potencial de desconforto visual e determina conforto visual insatisfatório quando seu resultado é superior a 10% para espaços com luz natural. Essa métrica também pode ser usada como parâmetro para superaquecimento, pois indica a porcentagem do ano em que cada ponto recebe radiação solar direta (LOCHE et al., 2021).

A NBR 15575-1/2021 (ABNT, 2021) estabelece critérios para a disponibilidade de iluminação natural nos cômodos internos das unidades habitacionais (conforme Quadro 2). Vale destacar que os valores se encontram abaixo dos valores mínimos estabelecidos por Mardaljevic et al. (2011), e permite que ambientes como banheiros sequer possuam iluminação natural como mínimo obrigatório, e ainda estabelece um mínimo de 60 lux para Ambientes de Permanência Prologada.

Quadro 2 - Níveis de iluminamento natural.

Dependência	Iluminamento geral para os níveis de desempenho (lux)		
	M (mínimo obrigatório)	I (intermediário)	S (superior)
Sala de estar, dormitório, copa/cozinha e área de serviço	≥ 60	≥ 90	≥ 120
Banheiro, corredor ou escada interna à unidade, corredor de uso comum (prédios), escadaria de uso comum (prédios), garagens/estacionamentos	Não requerido	≥ 30	≥ 45
NOTA 1: Para os edifícios multipiso, são permitidos, para as dependências situadas no pavimento térreo ou em pavimentos abaixo da cota da rua, níveis de iluminância ligeiramente inferiores aos valores especificados nesta Tabela (diferença máxima de 20 % em qualquer dependência). NOTA 2: Os critérios desta Tabela não se aplicam às áreas confinadas ou que não tenham iluminação natural. NOTA 3: Deve-se verificar e atender às condições mínimas requeridas pela legislação local.			

Fonte: ABNT (2021).

Quadro 3 - Fator de luz diurna para os diferentes ambientes da habitação.

Dependência	FLD (%) para os níveis de desempenho		
	M (mínimo obrigatório)	I (intermediário)	S (superior)
Sala de estar, dormitório, copa/cozinha e área de serviço	≥ 0,50 %	≥ 0,65 %	≥ 0,75 %
Banheiro, corredor ou escada interna à unidade, corredor de uso comum (prédios), escadaria de uso comum (prédios), garagens/estacionamentos	Não requerido	≥ 0,25 %	≥ 0,35 %
NOTA 1: Para os edifícios multipiso, são permitidos, para as dependências situadas no pavimento térreo ou em pavimentos abaixo da cota da rua, níveis de iluminância ligeiramente inferiores aos valores especificados nesta Tabela (diferença máxima de 20 % em qualquer dependência). NOTA 2: Os critérios desta Tabela não se aplicam às áreas confinadas ou que não tenham iluminação natural.			

Fonte: ABNT (2021).

Para medir o desempenho da luz natural, a norma utiliza o fator de luz diurna (FLD), e os valores, baseados nos valores mínimos de lux definidos no quadro anterior, podem ser visualizados no Quadro 3. As simulações para analisar a iluminação natural no plano horizontal devem ocorrer de manhã (9:30 h) e à tarde (15:30 h), nos dias 23 de abril e 23 de outubro, seguindo o protocolo da ABNT NBR 15215-3. São consideradas as coordenadas geográficas

do local, com suposição de nebulosidade média (50% de cobertura de nuvens), sendo necessário desativar a iluminação artificial, sem obstruções como cortinas fechadas. As simulações são feitas no centro dos ambientes, a 0,75 m do nível do piso, levando em conta as orientações habituais para diferentes tipos de habitação, incluindo edifícios com vários andares e diferentes posições dos apartamentos, bem como sombreamentos provenientes de construções adjacentes (ABNT, 2021).

A norma NBR 15575/2021 (ABNT, 2021) ainda define parâmetros de iluminação artificial com valores de lux bem acima dos definidos para iluminação natural, valores estes em conformidade com a NBR 8.995-1 (ABNT, 2013), que também estabelece um nível de iluminância mínimo a ser mantido em determinados ambientes de acordo com o tipo de trabalho. Para preparação de alimentos e refeitórios a NBR 8.995-1 define um limite mínimo de 200 lux, enquanto que para salas de descanso define um limite de 100 lux. Outra norma utilizada, para a realização de medições internas de iluminação natural, é a NBR 15215-4 (ABNT, 2005), que determina os parâmetros para cada tipo de experimento, mas sem definir valores de referência.

2.2.4. Influência das varandas e beirais

AI et al. (2011) realizaram um estudo para avaliar as varandas e seu desempenho. Diferentes tamanhos de varandas, alturas de teto e direções do vento foram examinados no estudo para compreender quais tipos de varandas proporcionam a melhor ventilação. Medições de campo e simulações indicaram que o desempenho da ventilação da varanda diminui ligeiramente à medida que a altura do teto da varanda aumenta. Por outro lado, os resultados do estudo mostraram que as dimensões das varandas não têm um impacto significativo no desempenho da ventilação. Desta forma, é possível concluir que o impacto da profundidade das varandas na ventilação não se mostra relevante ao ponto de justificar análises nas fases iniciais de projeto, pois estas utilizam fluidodinâmica computacional (Computational Fluid Dynamics - CFD), exigindo maior tempo de simulação e poder computacional. Portanto, nos tópicos a seguir é dado ênfase nos parâmetros ambientais com maior impacto, sendo eles o térmico e luminoso.

De acordo com Chan (2015), apartamentos residenciais em andares mais próximos do pavimento térreo podem receber auto-sombreamento significativo dos apartamentos acima deste, resultando em um efeito de sombreamento menor pelas varandas. Como uma varanda consome uma quantidade significativa de energia para ser construída e emite poluentes durante sua fabricação e descarte, é fundamental investigar o desempenho energético e ambiental de

apartamentos residenciais com varandas a cada pavimento de forma a otimizar suas dimensões e consequentemente o consumo de materiais.

Segundo Liu e Chen (2017), ainda que associado com a ventilação natural, a maior parte do conforto térmico proporcionado pelas varandas e outros de elementos de proteção solar passiva está no seu efeito de sombreamento. Os autores analisaram a profundidade das varandas no desempenho térmico de uma edificação localizada em Taiwan e chegaram à conclusão que, quanto mais profunda a varanda, e assim maior o seu efeito de sombreamento, maior a energia economizada com ventilação mecânica.

Liu e Chen (2017) relacionaram a profundidade das varandas com o tamanho das aberturas e concluíram que quanto mais profunda a varanda, maiores deverão ser as aberturas. Os resultados mostraram que fachadas com um percentual de abertura de 50%, as varandas deveriam ter de 2,5 m de profundidade, o que reduziria o consumo energético anual em 22% em comparação a um edifício sem varandas. Para fachadas com percentuais de abertura de 75% ou 100%, as varandas deveriam ter 3 m de profundidade, o que reduziria o consumo energético anual em cerca de 30%. Os autores também fizeram análises considerando uma edificação isolada com varandas, e o nível do piso foi identificado como o parâmetro de menor impacto no desempenho luminoso dos ambientes internos, o que provavelmente se deve ao fato de a edificação ter sido simulada sem edificações vizinhas. Os autores ainda mostraram que o aumento da profundidade das varandas tende a diminuir a disponibilidade de iluminação natural no ambiente, sendo a profundidade das varandas o parâmetro de maior impacto no desempenho luminoso.

De acordo com Izadyar et al. (2020), em relação à ventilação natural e sua influência no desempenho térmico, os tamanhos das aberturas tiveram um impacto maior do que a dimensão da varanda. As análises mostraram que aberturas menores levaram a um melhor desempenho térmico e que a influência da profundidade da varanda variou de acordo com a orientação do vento dominante na fachada, mas que profundidades maiores (entre 2,5 e 3m) apresentaram o melhor conforto térmico e maior Velocidade do Ar Interno (IAV).

Nikolic et al. (2020), por meio de simulações computacionais para uma edificação residencial localizada na Sérvia, demonstrou como a profundidade das varandas e beirais impactam no consumo energético para resfriamento, iluminação e aquecimento. Os autores encontraram a profundidade ótima de varanda em relação ao consumo energético para cada orientação solar,

sendo: 0,4m para a fachada norte, 0,7 m para a fachada sul, 2,6 m para a fachada leste e 2,4 m para a fachada oeste. Com essa configuração, os autores conseguiram uma redução da demanda energética total, em relação à mesma edificação sem varandas, de 7,12%, sendo 44,15% de redução no resfriamento, enquanto o consumo para aquecimento e iluminação artificial aumentaram, respectivamente, em 16,33% e 4,98%. É possível concluir, portanto, que a utilização de varandas abertas, em lugares que não necessitam de aquecimento em determinadas estações do ano, é mais vantajosa, já que o consumo energético para aquecimento em lugares frios é significativo.

Loche et al. (2021) realizaram análises para um modelo de edifício de escritório na cidade de São Paulo, onde foi variado o tamanho das aberturas, tamanho das varandas, profundidade das varandas, dois tipos de vidro, orientação da fachada e altura do pavimento. Os resultados foram cruzados em uma análise sistemática e mineração de dados que resultou em uma árvore de decisão. Foram utilizadas três métricas baseadas no clima para avaliar o desempenho da luz diurna, sendo estas: Useful Daylight Illuminance (UDI), Spatial Daylight Autonomy (sDA) e Annual Sunlight Exposure (ASE).

Loche et al. (2021), mediante os resultados, conseguiram delinear as seguintes recomendações de projeto para a tipologia em questão: evitar janelas na fachada norte que contenham varandas de profundidade menor ou igual a 1 m e larguras de janela superiores ou iguais a 3,0 m, pois tendem a resultar em ofuscamento não aceitável. Evitar combinações com vidros transparentes e janelas mais estreitas ou iguais a 1,5 m, pois tendem a causar Spatial Daylight Autonomy (sDA) não aceitáveis. Também evitar cenários com vidros laminados e janelas mais estreitas ou iguais a 2,5 m, pois tendem a resultar em sDA não aceitáveis. Também é importante atentar para a largura da janela ao projetar varandas com mais de 1,0 m de profundidade e usando vidro laminado para que os valores de sDA não fiquem abaixo do nível aceitável.

Também é importante destacar a necessidade de estudos que avaliem os efeitos das varandas no desempenho luminoso por meio de métricas dinâmicas de análise (que consideram as condições reais do céu), em detrimento das métricas estáticas (como previstas nas normas NBR ISO 8995-1 e NBR 15575-1). Outros parâmetros de projeto também devem ser considerados na abordagem do desempenho luminoso edificações com varandas, como a transmitância visível do vidro, tamanho das aberturas e profundidade dos ambientes (LOCHE et al., 2021).

2.3. Projeto baseado em desempenho

Segundo Agkathidis (2015), encontrar a forma arquitetônica ideal é uma questão central na prática e educação em arquitetura, onde o processo de produção arquitetônica é acompanhado por debates que questionam a legitimidade das abordagens de design, explorando as interações entre forma e função, estética e sistemas construtivos, contexto e estrutura, bem como as necessidades dos usuários e os custos de construção.

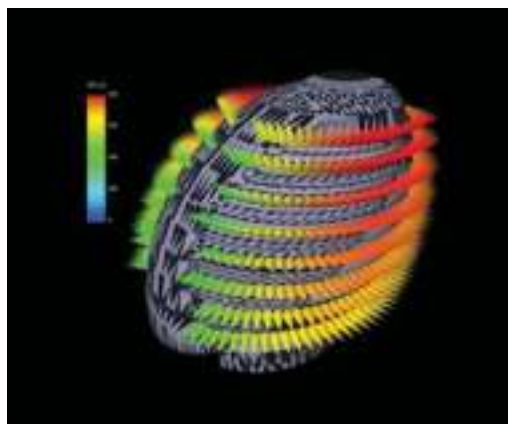
Nas últimas décadas, as ferramentas computacionais desempenharam um papel transformador ao introduzir técnicas inovadoras para a busca de formas, como o projeto generativo (conceito que será introduzido neste capítulo) e o paramétrico (abordagem que utiliza parâmetros variáveis e relacionamentos entre esses parâmetros para criar soluções). Essas abordagens representam novos paradigmas para os arquitetos, rompendo com as relações previsíveis entre a forma e sua representação, em favor da introdução de complexidades geradas por algoritmos e cálculos computacionais avançados. Como consequência, o enfoque tradicional de *form-making* (criação de soluções a partir da forma) está gradualmente evoluindo para uma abordagem de *form-finding* (descoberta da forma a partir de critérios lógico-formais, onde está incluída a arquitetura baseada em desempenho) (KOLAREVIC, 2005).

O projeto arquitetônico baseado em desempenho é aquele que emprega simulações durante a sua concepção, ajustando a forma geométrica da edificação com base no seu desempenho, que pode ser atendido em várias dimensões, incluindo aspectos financeiros, espaciais, sociais, culturais e técnicos. Exemplos como o Greater London Authority Headquarters – City Hall (Figura 48 e Figura 49) e o Swiss RE building, destacam a relevância das simulações de desempenho desde as etapas iniciais de projeto (OXMAN, 2008).

Figura 48 - City Hall em Londres (1998-2002), projetado pelo escritório Foster and Partners.



Figura 49 - Diagrama solar para o City Hall.



Fonte: Kolarevic (2005).

A modelagem paramétrica desempenha um papel fundamental nesse contexto, permitindo estabelecer relações entre os elementos geométricos. Enquanto isso, o método de projeto generativo mostra potencial para se integrar às análises de desempenho, embora ainda enfrente desafios em sua aplicação prática na arquitetura (OXMAN, 2008).

2.3.1. Sistemas baseados em regras: sistemas generativos

Atualmente, para encontrar as soluções de projeto, os projetistas utilizam abordagens variadas de métodos de projeto, sendo que estas abordagens podem ser classificadas em: métodos de tentativa e erro; métodos de satisfação de restrições; métodos baseados em regras; e métodos baseados em precedentes (KALAY, 2004).

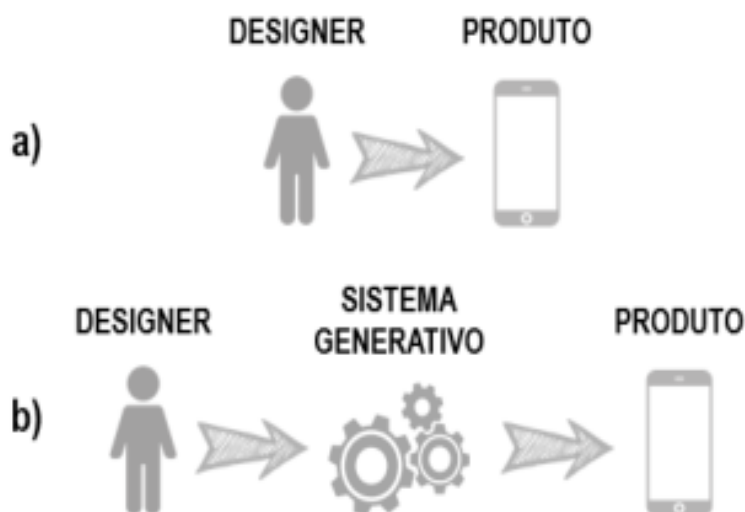
O método de projeto baseado em regras consiste em utilizar regras como instrumentos para guiar a execução dos diversos passos na atividade de projeto. É um dos métodos mais populares entre projetistas, onde se usa uma forma concisa com procedimentos progressivos (passo a passo) para realizar tarefas utilizando uma lógica subjacente, criando assim heurísticas e, consequentemente, reduzindo a quantidade de problemas. As heurísticas consistem em um método para inventar, descobrir ou corrigir um problema, e em sistemas baseados em regras estas podem ser mais ou menos explícitas, dividindo-se em cinco classes: as analogias literais, antropométricas, relações ambientais, tipologias e linguagens formais (KOWALTOWSKI et al., 2011).

Nas analogias literais, a heurística utiliza conhecimentos existentes como ponto de partida para estruturar um problema de projeto e assim criando regras (como na gramática da forma). Nas analogias antropométricas as regras se baseiam especificamente em aspectos próximos da

experiência humana (andar, sentar, subir, etc.). Já nas relações ambientais, as regras buscam criar uma ligação entre o meio ambiente, o homem e o edifício, incorporando conhecimento de fatores ambientais como clima, desempenho dos materiais, tecnologia, etc. Nas tipologias as heurísticas são variantes de projeto, subdividindo-se em três outras classes: tipos de edifício modelo, tipologias organizacionais e tipos elementares (regras para uma classe de problema). E, por último, nas linguagens formais, apresentam-se como regras bem definidas e apresentam-se de forma explícita no funcionamento e significado, ordenando elementos de projeto (tratados, normas, leis, etc.) (ROWE, 1998 apud KOWALTOWSKI et al., 2011).

Dentro do método baseado em regras, estão incluídos os sistemas generativos de projeto, com funções de restrição que podem ser essencialmente formais. De acordo com Fischer e Herr (2001), o sistema generativo é uma metodologia de projeto que difere de outras abordagens na medida em que, durante o processo de projeto, o projetista não interage diretamente o produto, mas através de um sistema generativo (Figura 50). Um sistema generativo é uma configuração baseada em definições abstratas de possíveis variações de soluções, capazes de exibir ou produzir produtos (ou elementos de produtos). Sistemas generativos, por sua vez, não são restritos à aplicação por ferramentas digitais, podendo ser utilizados em sistemas analógicos.

Figura 50 - (a) método usual de projeto; b) método de projeto utilizando sistema generativo.

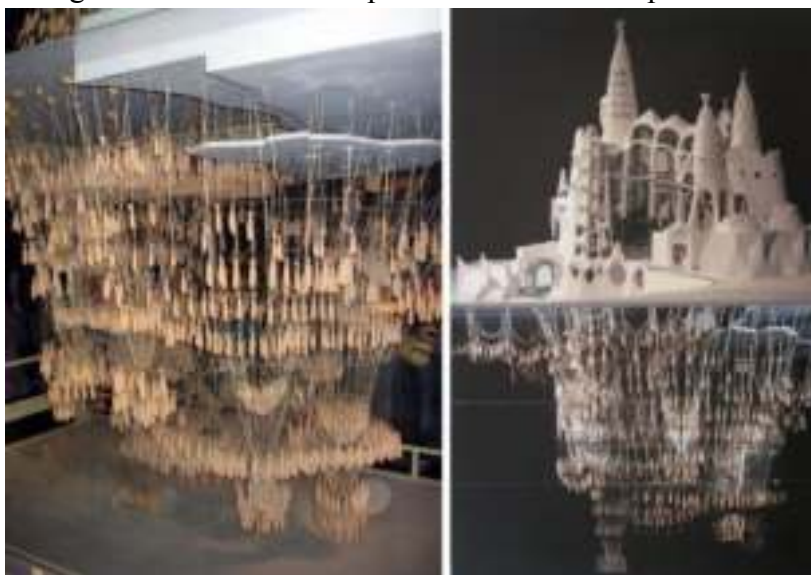


Fonte: Adaptado de Fischer e Herr, 2001.

De acordo com Mitchell (1975), os sistemas generativos podem ser agrupados em três categorias amplas, de acordo com as maneiras pelas quais eles representam ou modelam o item que está sendo projetado, podendo ser: analógicos, icônicos ou simbólicos. Sistemas geradores analógicos geralmente representam projetos em potencial por ajustes em engrenagens, mostradores, colunas deslizantes, etc. As operações executadas para alterar o estado do sistema

(ou seja, para descrever um novo projeto em potencial) são, portanto, mecânicas. Um exemplo famoso de uso prático de um sistema generativo analógico no projeto arquitetônico ocorreu na obra do arquiteto catalão Antonio Gaudí. Ao projetar a igreja da Sagrada Família e a capela Guell (Figura 51) em Barcelona, Gaudí empregou armações de arame suspensas flexíveis, cobrindo com tecido e penduradas com pesos.

Figura 51 - Modelo da capela Guell idealizado por Gaudí.



Fonte: Mingle, 2019. Disponível em: <https://99percentinvisible.org/episode/la-sagrada-familia-2/>. Acesso 23 maio 2023.

Já os sistemas generativos icônicos representam projetos de uma maneira literal, onde uma parte específica do sistema se parece com a solução potencial que ele representa. Exemplos típicos são as plantas baixas, elevações e modelos em escala comumente usados pelos arquitetos em projetos. As operações executadas para alterar o estado do sistema são gráficas, por exemplo, criar e apagar linhas, mover recortes de papelão e assim por diante, sendo geralmente transformações de escala (ampliações ou reduções) dos objetos que eles descrevem. Por fim, os sistemas generativos simbólicos representam soluções potenciais por meio de símbolos como palavras, números e operações matemáticas. Em geral, são utilizadas formações lineares de símbolos como frases ou fórmulas. No entanto, tabelas, matrizes e outros tipos diferentes de formações também podem ser utilizadas (MITCHELL, 1975).

Singh e Gu (2012) apontam cinco técnicas mais populares de sistemas generativos em arquitetura, sendo estas: gramáticas da forma (Shape Grammar - SG), L-Systems (LS), autômatos celulares (Cellular Automata - CA), algoritmos genéticos (Genetic Algorithms - GA) e inteligência de enxames (Swarm Intelligence - SI), sendo que todas essas técnicas podem ser

classificadas como sistemas generativos simbólicos. Os autores revisaram as cinco técnicas, indicando suas particularidades em função do propósito, abordagem, problemas e características relacionadas ao design (Quadro 4).

Quadro 4 – Comparativo entre cinco técnicas de sistemas generativos.

	Gramática da forma (SG)	L-Systems (LS)	Autômatos celulares (CA)	Inteligência de Enxames (SI)	Algoritmo Genético (GA)
Propósito do design	Exploração de design: layout do espaço e composições visuais.	Exploração de design: padrões e composições visuais.	Design baseado em <i>grid</i> : planejamento/ zonamento. Desenvolvimento de design especialmente sensível ao contexto com base em usabilidade.	Usabilidade do design, como a facilitação da orientação. Avaliação e análise do design.	Otimização. Aperfeiçoamento o/aperfeiçoamento do design. Busca simultânea de múltiplas alternativas de design que atendam aos critérios de adequação.
Abordagens de design	Formas e padrões emergentes. Formas geométricas. Função segue forma. Abordagens iterativas e baseadas em reengenharia.	Padrões emergentes repetitivos, fractais e formas orgânicas naturais. Função segue forma. Abordagens iterativas e baseadas em reengenharia	Estudo dos efeitos do entorno, padrões de crescimento, fenômenos sociais, etc. Forma segue função.	Design centrado no usuário e baseado em casos de uso. Estudo de fenômenos sociais, como criação de normas, orientação, etc. Análise de função.	Designs combinatoriais e morfológicos. Inovação disruptiva.
Problemas de design	Estilos arquitetônicos, objetos e padrões. Design regulamentado e baseado em regras. Geralmente em 2D, mas também exemplos em 3D.	Estradas e redes, terrenos e texturas. Formas que evoluem naturalmente e tendem a ser orgânicas. Geralmente em 2D.	Design de blocos e volumetria, planejamento/ zonamento e design urbano. Geralmente em 2D, mas também exemplos de extrusão para o 3D.	Passarelas, espaços públicos, áreas de recepção, fluxo de tráfego, e assim por diante. Raramente usado para design geométrico.	Designs baseados em componentes, problemas de otimização.
Características do resultado do design	Características emergentes e exploratórias, geométricas. As soluções geralmente requerem validação.	Características emergentes e exploratórias, de natureza geométrica. As soluções normalmente exigem validação.	Características emergentes e normativas, sensíveis ao contexto. Normalmente, soluções satisfatórias.	Características emergentes e normativas. Geralmente orientado pela usabilidade.	Soluções otimizadas, geralmente satisfatórias. Em muitos casos, há múltiplas alternativas de design.

Fonte: Singh e Gu, 2012.

GAs são mais adequados para a otimização de design, enquanto SG e LS são melhores adaptados para geração de forma e estilo. CA é mais adequado para apoiar processos de *design bottom-up*⁶ sensíveis ao contexto. Já SI é útil para avaliar a usabilidade do design, simular padrões de circulação e navegação para informar o desenvolvimento do design e gerar designs que emergem da auto-organização de unidades autônomas. Enquanto CA e SI são especialmente adequados para processos de design orientados pelo comportamento, SG e LS são adequados para processos orientados pela forma. GAs apesar de permitirem uma exploração não direcionada do espaço, fornecem uma busca por meio da função de adequação para garantia de qualidade (SINGH; GU, 2012).

2.3.2. Algoritmos evolutivos

Um algoritmo é um procedimento que visa resolver um problema em um número limitado de etapas. Ele pode ser uma estratégia planejada para solucionar um problema conhecido ou uma busca aleatória por soluções possíveis em um problema parcialmente conhecido. O algoritmo representa uma codificação do problema, seguindo uma sequência de passos finitos, consistentes e lógicos. Embora a maioria dos algoritmos seja projetada com uma solução específica em mente, há casos em que a solução do problema é desconhecida, vaga ou mal definida. Nesses casos, os algoritmos são utilizados como ferramentas para explorar diferentes caminhos que podem levar a soluções potenciais (TERZIDIS, 2006).

O desenvolvimento de algoritmos orientados para a evolução começou nos anos 60 do século XX inspirados no processo de evolução biológica de Darwin. Quatro correntes principais se desenvolveram, sendo estas: (1) os algoritmos genéticos originais foram introduzidos por John Holland nos anos 1960 e utilizam representação binária para as soluções. As estratégias evolutivas (2), desenvolvidas por Ingo Rechenberg e Hans-Paul Schwefel na mesma época, são voltadas para espaços de solução contínuos. A programação evolutiva (3), proposta por Fogel, Owens e Walsh, também surgiu nos anos 1960 e é usada para evoluir autômatos finitos determinísticos e otimizar em espaços binários e contínuos. Por fim, a programação genética (4), proposta por John Koza na década de 1990, usa algoritmos genéticos para evoluir programas de computador. Essas variantes representam abordagens distintas, cada uma com

⁶ O design bottom-up (de baixo para cima) é uma abordagem na qual o processo de design começa a partir de elementos ou componentes individuais e, em seguida, é construído gradualmente em direção a um todo mais abrangente. Nessa abordagem, as decisões de design são tomadas com base nas características e necessidades dos componentes individuais, que eventualmente se combinam para formar o produto final (SINGH; GU, 2012).

suas características e aplicações específicas na resolução de problemas complexos de otimização e busca (KRAMER, 2018).

Segundo Eiben e Smith (2015), os algoritmos genéticos (GAs) são métodos de busca estocástica⁷ que aplicam operadores evolutivos a uma população em um espaço de busca para encontrar aqueles que melhor se adaptam a uma função de aptidão (*fitness function*). Cada solução é representada por um conjunto de genes, que codificam as características ou parâmetros da solução. O processo evolutivo começa aplicando operadores genéticos, como seleção, recombinação (*crossover*) e mutação, para criar novas soluções a partir da população atual. A seleção é baseada no princípio de "sobrevivência dos mais aptos", onde soluções mais adequadas ao problema possuem maior probabilidade de serem selecionadas para a reprodução. Durante a recombinação, os genes das soluções selecionadas são combinados para formar descendentes que herdam características de seus "pais". A mutação introduz aleatoriamente alterações nos genes dos indivíduos, permitindo a exploração de novas regiões do espaço de busca. A Figura 52 exemplifica a funcionamento de um algoritmo genético por meio de um fluxograma.

Figura 52 - Estrutura do algoritmo genético.



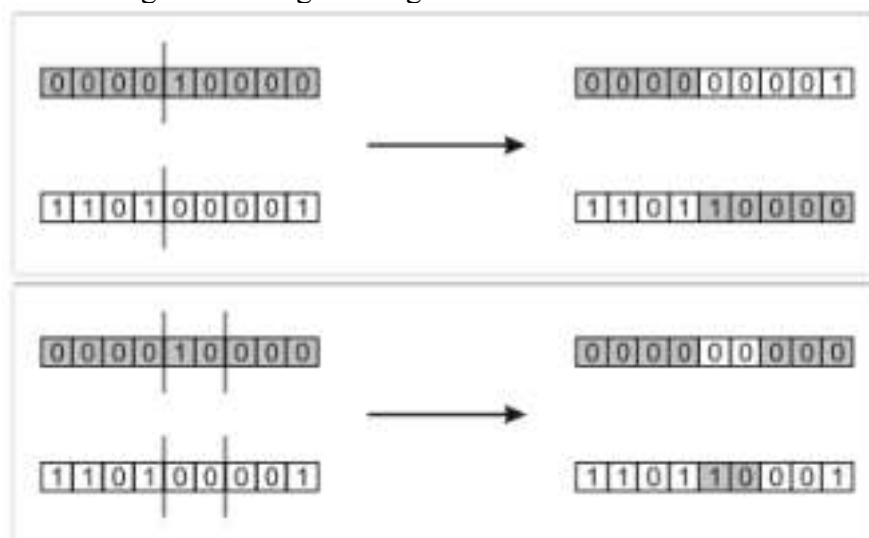
Fonte: Martino, 2015 apud Bentley, 1996.

⁷ Estocástico pode ser entendido como um modelo matemático cujas variáveis respondem a uma distribuição específica. Tais modelos não oferecem soluções únicas, mas apresentam uma distribuição de soluções associadas a uma probabilidade, segundo uma determinada distribuição de probabilidades. Fonte: Debastiani (2008). Disponível em: < <https://pt.wikipedia.org/wiki/Estoc%C3%A1stico> >. Acesso jun 2023.

Após a criação de uma nova geração, o processo se repete até que um critério de parada seja atingido, como um número máximo de gerações ou a obtenção de uma solução satisfatória. O espaço de busca é composto por sequências de caracteres de comprimento fixo ou variável (cromossomos ou genótipos) que são compostos por elementos de um alfabeto específico (alelos). O espaço dos genótipos é mapeado em outro espaço de busca (fenótipo). A *fitness function* ainda pode ser definida como uma função que avalia o desempenho de um estado no espaço fenotípico (SINGH; GU, 2012).

Segundo Kramer (2018), os primeiros Algoritmos Genéticos eram baseados principalmente em representações de *strings* binárias⁸. Uma função decodificadora é necessária para mapear o genótipo em forma de *string* de bits para o fenótipo, que é a solução final para o problema específico. Na época inicial dos algoritmos genéticos de Holland, os operadores desempenhavam um papel mais importante do que a mutação. A mutação consistia principalmente em inverter os bits, transformando zeros em uns e vice-versa, com uma probabilidade fixa (Figura 53).

Figura 53 - Algoritmo genético clássico de Holland.



Fonte: Eiben e Smith, 2015.

2.3.3. Algoritmos evolutivos multiobjetivo

Para que os edifícios alcancem alto desempenho em termos de energia, conforto térmico interno, custo do ciclo de vida, entre outros aspectos, é necessário considerar e otimizar várias

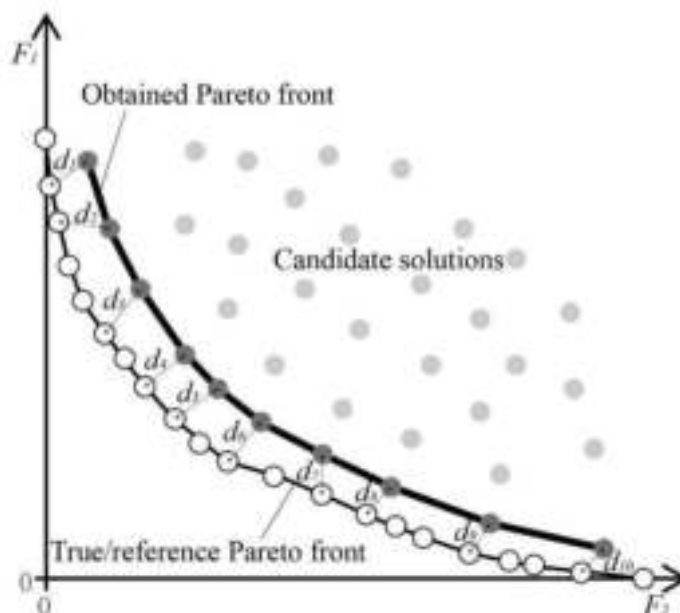
⁸ Uma string binária é uma sequência de bits, onde cada bit pode ter o valor de 0 ou 1. Ela representa informações em formato binário, sendo utilizada em diversas áreas, como ciência da computação e eletrônica (KRAMER, 2018).

variáveis de projeto. Essas variáveis geralmente podem ser agrupadas em cinco categorias: o envelope opaco do edifício, o envelope transparente do edifício, a forma e a estrutura, o tipo de sistema mecânico e a operação do sistema mecânico. Em comparação com outras variáveis de projeto, como as propriedades térmicas, a forma e a estrutura são particularmente difíceis de descrever matematicamente, especialmente em edifícios complexos com formas não lineares (YANG et al., 2018).

A simulação computacional e o algoritmo genético (GA) são duas das abordagens mais eficientes, sendo também métodos simplificados. Em análises onde o consumo de energia operacional é o único critério de otimização considerado, o edifício proposto pode ser mais bem isolado, mas menos rentável. Para resolver esse dilema, diversas pesquisas têm examinado outros critérios, como avaliação do custo e do ciclo de vida. Dado que os projetistas não consideram apenas um único critério no processo de tomada de decisão, os modelos de otimização multiobjetivo estão se tornando cada vez mais comuns (LIN; YANG, 2018).

De acordo com Yu et al. (2015), o algoritmo genético multiobjetivo (*Multi-Objective Evolutionary Algorithm* - MOEA) difere do algoritmo genético comum porque avalia de maneira abrangente cada valor objetivo das soluções de otimização. No entanto, esses valores muitas vezes entram em conflito, dificultando a busca por uma solução ótima para cada objetivo. O MOEA é uma classe específica de GA baseada na dominância de Pareto, permitindo que o algoritmo otimize todos os objetivos simultaneamente. No entanto, a complexidade do MOEA reside na competição entre cada função objetivo. Assim, a solução ótima geralmente não é única, mas um conjunto de soluções ótimas que não têm uma relação de dominação mútua, formando a chamada frente de Pareto. O algoritmo usa a frente de Pareto para calcular a aptidão de cada solução (soluções com o mesmo ranking têm a mesma aptidão). O Gráfico 3 ilustra o conjunto de soluções e a frente de Pareto entre duas soluções divergentes (F1 e F2).

Gráfico 3 - Frente de Pareto para uma análise hipotética entre soluções divergentes.



Fonte: Si et al. (2019)

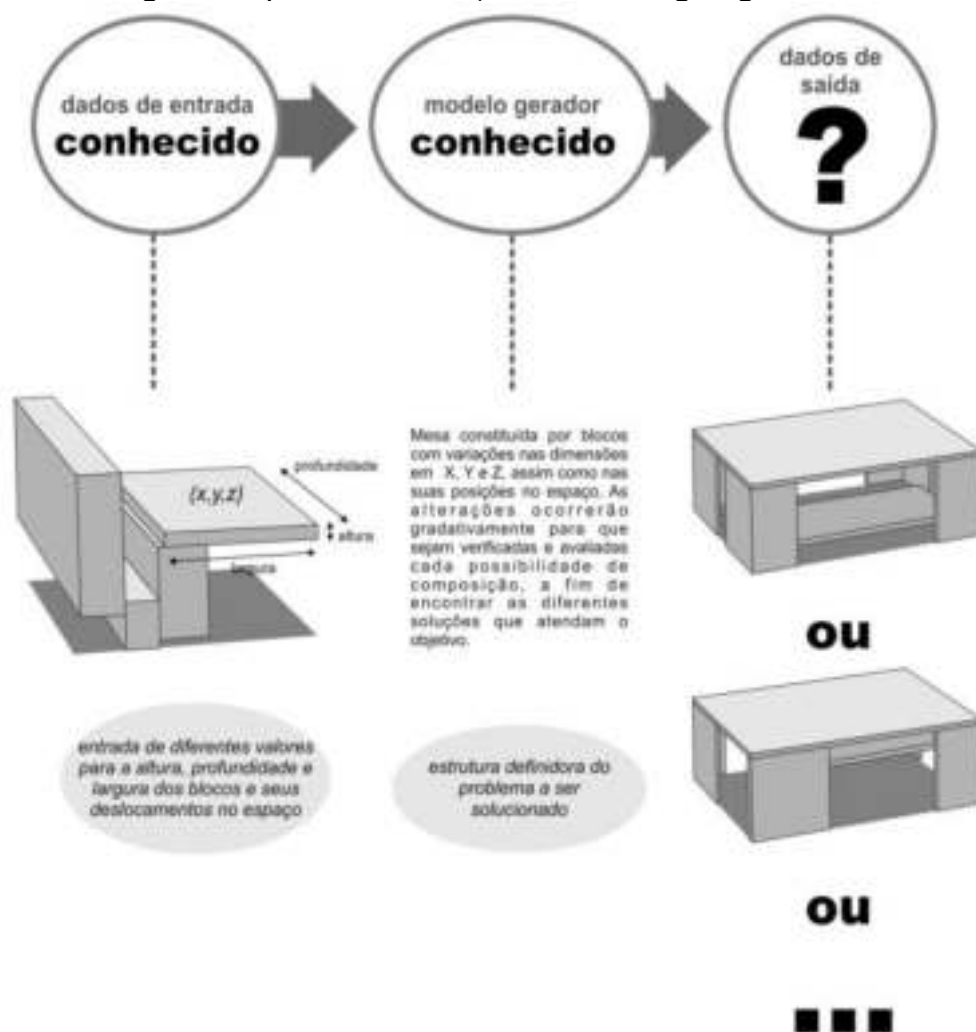
Um exemplo de algoritmo genético multiobjetivo é o algoritmo genético de ordenação não dominada e de multidão II (NSGA-II). Este algoritmo emprega uma metodologia específica de ordenação da população, que inicialmente se baseia na dominância e, posteriormente, na distância de multidão calculada para cada indivíduo. Esse processo de seleção assegura tanto a convergência quanto a dispersão da frente de solução, sem a necessidade de recorrer a uma população externa. O NSGA-II mantém a diversidade da população e evita a perda de indivíduos de alta qualidade mesmo em iterações computacionais reduzidas, além de não exigir a definição de certos parâmetros do algoritmo (YU et al., 2015).

Si et al. (2019) avaliaram quatro algoritmos multiobjetivo e concluíram que o NSGA-II obteve os melhores resultados. Os autores realizaram um estudo para avaliar um edifício complexo recém-construído, otimizando variáveis de design, como a forma do beiral, para melhorar a eficiência energética e o conforto térmico interno. Em vez de usar um modelo de simulação detalhado, empregou-se um modelo substituto baseado em rede neural artificial para reduzir o tempo de computação.

2.3.4. Sistemas generativos evolutivos

De acordo com Martino (2015), no contexto do sistema gerativo evolutivo em projetos de edificações, a otimização envolve questões sobre desempenho acústico, térmico, cargas estruturais, iluminação, etc. Na criação de modelos estão os projetos evolutivos conceituais e generativos, diferenciados pelo nível de representação, criando modelos que podem ser implementados em diversas situações. Já no contexto criativo, o algoritmo pode ser principalmente utilizado nas etapas iniciais de projeto, onde o foco está no processo criativo e original, e não na busca de uma solução global ótima. Nesse sentido, as representações formais da arquitetura são simplificadas, permitindo uma exploração inicial das diferentes combinações estruturais dos elementos envolvidos, por meio do uso criativo de ferramentas computacionais (Figura 54).

Figura 54 - processo de criação com abordagem generativa.

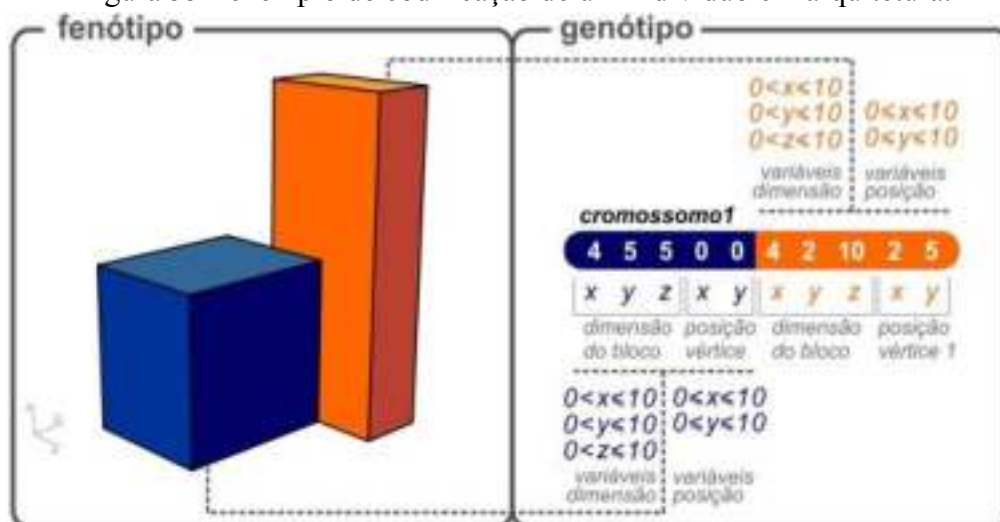


Fonte: Martino, 2015 apud Eiben e Smith (2010).

A composição de um projeto arquitetônico envolve uma série de variáveis, desde aspectos técnicos até os subjetivos. Essas variáveis podem abranger requisitos como ventilação, iluminação, insolação, áreas dos espaços e suas relações com ambientes adjacentes, etc. Lidar com essas variáveis simultaneamente pode ser complexo, uma vez que dificilmente haverá uma solução única que satisfaça todos os critérios. Isso caracteriza um problema do tipo pernicioso⁹, no qual encontrar a solução ideal requer um bom desempenho entre todas as variáveis. Nesse contexto, os algoritmos evolutivos têm se mostrado adequados como uma abordagem de projeto, pois são capazes de oferecer recursos para a otimização entre múltiplas variáveis (MARTINO, 2015).

De acordo com Martino (2015) há diferentes formas de representação do algoritmo evolutivo em elementos arquitetônicos (ou qualquer outro elemento projetável). Essa representação pode se dar na forma caracteres ou valores simbólicos (*strings*), usados para representar os elementos, sem uma relação direta com os parâmetros. Podem também ser representados sem codificação, utilizando números inteiros para representar diretamente as características do elemento, evitando a necessidade constante de codificação e decodificação. Dessa forma, no processo de projeto, as características de um elemento podem ser diretamente relacionadas ao seu valor em termos de dimensão e localização espacial, facilitando a visualização dos dados pelo projetista e consequentemente facilitando o processo de solução (conforme Figura 55).

Figura 55 - exemplo de codificação de um indivíduo em arquitetura.



Fonte: Martino, 2015.

⁹ Problemas do tipo pernicioso, também conhecidos como *wicked problems*, são problemas que não possuem uma formulação bem definida, apresentam diferentes soluções, podendo ser melhores ou piores, e permitem mais de uma possibilidade de explicação (CELANI, 2012).

De acordo com Oxman e Oxman (2010), o indivíduo deve ser composto por um conjunto de elementos, cada um com características que variam dentro de um intervalo mínimo e máximo. Além disso, é necessário definir as possíveis relações geométricas entre esses elementos, resultando em um sistema parametrizado. Dessa forma, a estrutura do indivíduo é determinada, identificando-se apenas os padrões estruturais que o compõem. Isso fornece um conhecimento geral sobre o potencial de configuração do indivíduo, baseado em seus atributos geométricos.

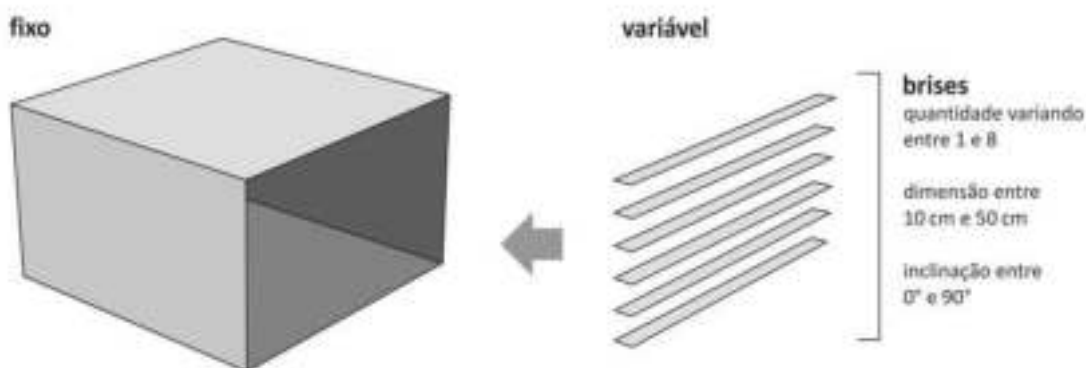
A utilização de sistemas generativos evolutivos em arquitetura pode contribuir, principalmente, com o processo de concepção do projeto nas fases iniciais, onde diferentes opções surgem para resolver um problema. Por meio do uso de algoritmos evolutivos é possível identificar aquelas que melhor atendem às necessidades, além de permitir gerar uma maior diversidade de soluções, muitas vezes não previstas pelo projetista, evitando assim a tendência de se adotar uma única solução para o problema. Dessa forma, a busca por soluções ideais torna-se mais objetiva, uma vez que essas técnicas são capazes de gerar, comparar e avaliar as diversas possibilidades disponíveis.

2.3.5. Exemplos de sistemas generativos para proteções solares

De forma a contribuir com o desenvolvimento desta pesquisa, foram selecionados exemplos de sistemas generativos que utilizaram a técnica de algoritmo genético para a otimização de elementos de proteção de solar. Por meio destes, foi possível identificar três etapas básicas do sistema generativo evolutivo: etapa de forma, etapa de análise ambiental e etapa de algoritmo evolutivo.

Martino (2015) criou diversos experimentos para testar sistemas generativos com a utilização de algoritmos genéticos. Um destes foi o de brises horizontais, onde buscou-se obter uma configuração de brises com a menor largura, a menor quantidade de elementos distribuídos na abertura e o maior ângulo de inclinação possível, mantendo o índice de iluminância média no interior do ambiente entre 500 e 750 lux, sendo os valores adotados para classes de tarefas visuais da NBR 5413/1992. Exemplificado na Figura 56, o experimento ocorreu em duas etapas EX1 (variando quantidade de brises e inclinação) e EX2 (variando também a largura). O melhor resultado foi adotado para um terceiro experimento (EX3) para verificação da insolação.

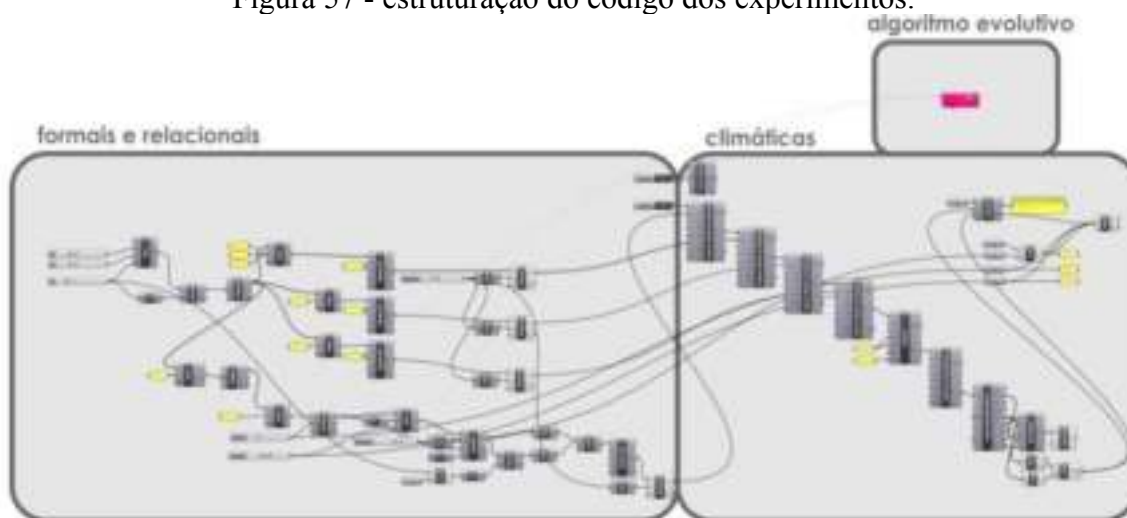
Figura 56 - esquema de configuração do experimento.



Fonte: Martino, 2015.

Os softwares e plugins utilizados foram os mesmos do experimento anterior, e a configuração adotada para os algoritmos evolutivos no componente *Galapagos* foi a maximização para o valor da função de avaliação (*fitness function*), vinte indivíduos para cada geração (a inicial possuindo o dobro de indivíduos – *initial boost* igual a duas vezes), e a finalização da execução do código ao atingir cinquenta gerações. A taxa de cruzamento entre indivíduos com características semelhantes (endogamia ou *inbreeding*), foi considerada de 70%, e a de permanência de indivíduos de uma geração para a outra em 5%. O autor apresenta a estruturação do código na Figura 57 e como resultado foram encontradas cinco soluções que satisfizeram o requisito de índice de iluminância, sendo utilizados os outros critérios (largura do brise, quantidade e ângulo de abertura) para a definição da melhor solução. O indivíduo selecionado foi o que apresentou o maior índice de iluminância dentro do intervalo definido (MARTINO, 2015).

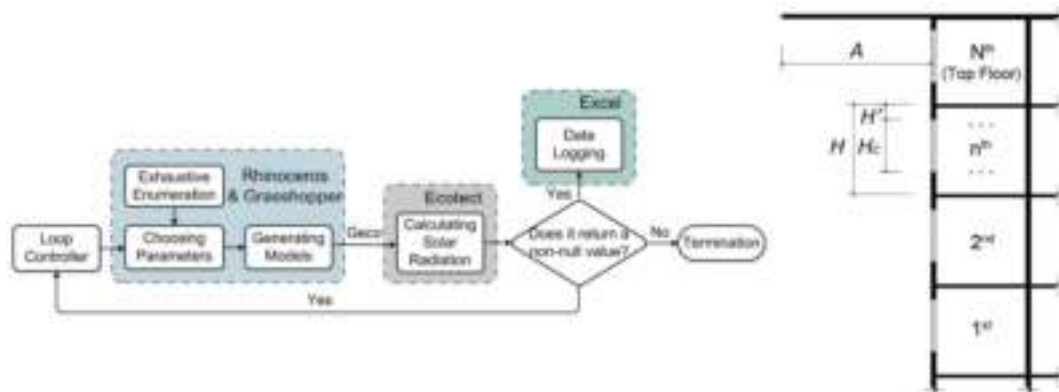
Figura 57 - estruturação do código dos experimentos.



Fonte: Martino, 2015.

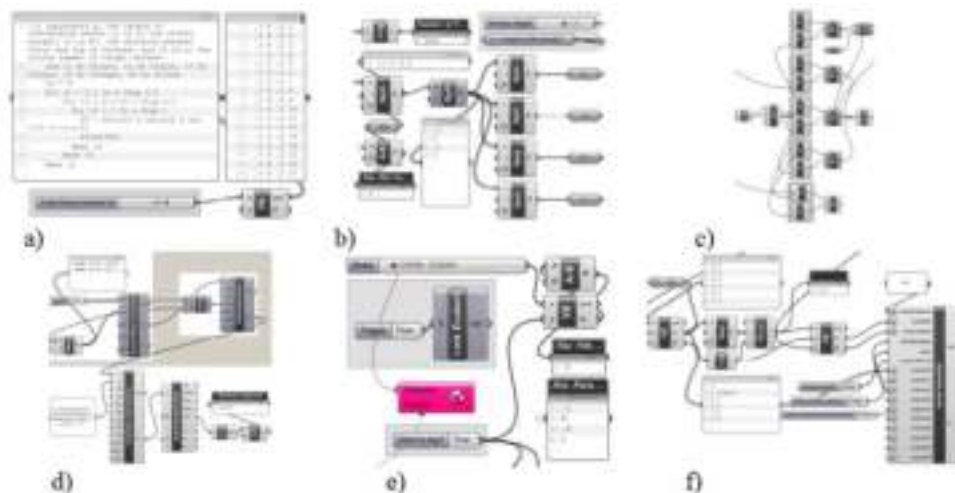
Zhang, Shen e Zhao (2013) estabeleceram uma plataforma de projeto e análise paramétrica para beirais amplos a fim de gerar modelos paramétricos. Mediante o estudo, foi descoberta uma relação matemática entre os coeficientes de sombreamento e os parâmetros de tamanho do modelo. Como metodologia foi utilizado o *software* Rhinoceros para modelagem, junto com o plugin Grasshopper para programação visual associado ao *add-on* Geco e Autodesk Ecotect para simulações e o Galápagos para o algoritmo genético. Dados não nulos foram selecionados e inseridos em uma tabela no excel a fim de identificar a relação matemática do modelo. A Figura 58 à esquerda apresenta o fluxograma do sistema generativo e à direita um corte esquemático com as variáveis: A= largura do beiral, Hs=alturas do pavimento, peitoril e aberturas e N=número de pavimentos. A Figura 59 também mostra o código gerado nos experimentos e suas etapas.

Figura 58 - à esquerda fluxograma do sistema generativo e à direita corte esquemático com variáveis impostas.



Fonte: Zhang, Shen e Zhao, 2013.

Figura 59 - estruturação do código dos experimentos a) enumeração exaustiva b) escolhendo parâmetros de tamanho c) geração do modelo d) simulação pelo ecotect e) controle de loop e algoritmo genético f) gerador de dados para o excel.



Fonte: Zhang, Shen e Zhao, 2013

3. METODOLOGIA

Neste capítulo são apresentados os procedimentos metodológicos relacionadas aos resultados da pesquisa. Inicialmente foi feito o delineamento geral da pesquisa por meio da Design Science Research (DSR). Após, foi feita a caracterização do edifício genérico, objeto de estudo para realização das simulações. Em seguida foram definidas a variável paramétrica (elemento com os parâmetros que irão variar de acordo com as análises), materiais da edificação a serem inseridos no software, cálculo das aberturas, condicionantes locais, softwares e plugins utilizados, metodologias de análise ambiental (conforto térmico adaptativo e desempenho lumínico), avaliação do sistema generativo, especificação do hardware e definição da população para análise do algoritmo genético multiobjetivo.

3.1. *Design Science Research* como metodologia de pesquisa

De acordo com Hevner e Chatterjee (2010), a *Design Science Research* (DSR) é um paradigma de pesquisa em que um pesquisador responde perguntas relevantes para problemas humanos por meio da criação de artefatos inovadores, e assim contribuindo com novos conhecimentos em evidências científicas, sendo os artefatos não só úteis, mas também fundamentais para entender um determinado problema.

A aplicação da DSR pode reduzir potencialmente as lacunas existentes entre a teoria e a prática, pois o método não é apenas orientado para a solução de problemas, mas também produz conhecimento que pode servir de referência para o aprimoramento de teorias, sendo dois fatores essenciais para o sucesso da pesquisa: o rigor e a relevância (DRESCH; LACERDA; ANTUNES, 2015).

Baseado em Peffers et al. (2007), a DSR e suas etapas aplicadas a esta pesquisa podem ser identificadas no Figura 60. A primeira fase (identificação do problema e motivação), o resultado principal é a descrição detalhada do problema e da motivação subjacente à pesquisa. Na segunda fase, os objetivos para a solução são delineados, ou seja, o que se espera alcançar com o artefato em sua forma ideal, e as saídas incluem a definição dos objetivos gerais e específicos. Na terceira fase, ocorre o projeto e desenvolvimento do artefato, fundamentados na revisão da literatura (onde são investigados artefatos similares e as tecnologias mais recentes de desenvolvimento), resultando na definição da metodologia e no subsequente desenvolvimento do artefato.

Na quarta fase (implementação prática do artefato), é estabelecida a metodologia para demonstração, que inclui tipos de simulações, estudos de caso, entre outros, juntamente com suas respectivas etapas. Na quinta fase, ocorre a etapa de avaliação, que tem como objetivo medir a eficácia e eficiência do artefato desenvolvido na fase anterior, sendo uma etapa crucial para determinar se o artefato atendeu aos objetivos da solução estabelecidos na fase 2. Por fim, na sexta fase (comunicação da pesquisa), embora não tenha sido representada nos diagramas dos principais artigos por não estar diretamente relacionada ao desenvolvimento e qualidade do artefato, foi incluída por ser uma fase importante para o aprimoramento de artefatos futuros.

Figura 60 – Etapas da DSR.



Fonte: Autor (2024).

Segundo March e Smith (1995) os artefatos em DSR podem ser divididos em: **constructos**, constituindo uma conceituação utilizada na descrição de problemas dentro do domínio e na especificação de respectivas soluções; **modelos**, que são um conjunto de proposições que expressam as relações entre os constructos (problema e solução), podendo ser visto como uma descrição de como as coisas são, se preocupando com a utilidade dos modelos; **métodos**, que são um conjunto de passos (algoritmo ou orientação) utilizado para executar uma determinada tarefa, baseando-se em constructos (linguagem) e modelo (representação), sendo as criações típicas de uma DSR; e **instanciações**, que são a concretização do artefato no ambiente, operacionalizando constructos, modelos e métodos, podendo, ainda, preceder os mesmos para demonstrar viabilidade e eficácia.

O sistema generativo produzido por esta pesquisa se encaixa na categoria de artefatos relacionados a método, de modo que a utilização da DSR como metodologia se mostra fundamental. Conforme o framework sugerido por Hevner (2004), onde se define que uma

pesquisa é realizada em um ambiente que produz uma base de conhecimento. Os produtos da pesquisa são: teorias e artefatos que devem ser justificados e avaliados para produzirem feedback que possa refinar as teorias e os artefatos. Adicionalmente, o autor disponibiliza um conjunto de diretrizes que as pesquisas em sistema de informação devem apresentar. No Quadro 5 Quadro 5 - DSR aplicada à pesquisa. constam as diretrizes aplicadas à presente pesquisa.

Quadro 5 - DSR aplicada à pesquisa.

Critério	Princípio	Descrição
1	Artefato	O artefato produzido é um sistema generativo para proteções solares horizontais que podem ser utilizadas como varanda, sacadas, beirais, e outras extensões. Esse sistema utiliza como base o conforto térmico e desempenho lumínico durante as fases iniciais de projeto.
2	Relevância do Problema	A automação de processos de projeto é imprescindível não só para o aumento de produtividade, mas para conceder maior grau de assertividade nas decisões do projetista. Como a forma do pavimento e alguns elementos fixos são definidos ainda nas fases iniciais de projeto (Estudo Preliminar e Anteprojeto), é imprescindível que análises ambientais sejam feitas durante essas etapas para que o projeto atenda melhor a critérios ambientais, diminuindo a necessidade de equipamentos ativos para garantir o devido conforto ambiental e lumínico aos usuários e por consequência diminuindo a demanda energética da edificação.
3	Processo de Busca da Solução	O processo de busca da solução foi realizado por meio de revisões bibliográficas em periódicos bem qualificados em bases de dados consolidadas, além de normas vigentes e a utilização de ferramentas validadas para desenvolver o sistema generativo.
4	Contribuições da Pesquisa	Disseminação da metodologia de análise multiobjetivo para proteções solares horizontais nas fases iniciais de projeto e criação de um modelo de sistema generativo para tais análises.
5	Rigor da Pesquisa	O rigor da pesquisa será mantido por meio da utilização de ferramentas validadas, utilização de normas e bibliografia consolidadas e bem qualificadas, além da constante avaliação dos professores orientadores.
6	Avaliação do Artefato	A avaliação do artefato se dará por meio da análise quantitativa dos resultados gerados pelo sistema generativo em comparação a formas genéricas. Uma avaliação do sistema generativo por potenciais usuários, aplicado a outros projetos, poderá se dar em uma futura pesquisa.
7	Comunicação da Pesquisa	A comunicação da pesquisa se dará mediante a publicação de artigo em periódico qualificado, assim como a própria dissertação.

Fonte: Autor (2024).

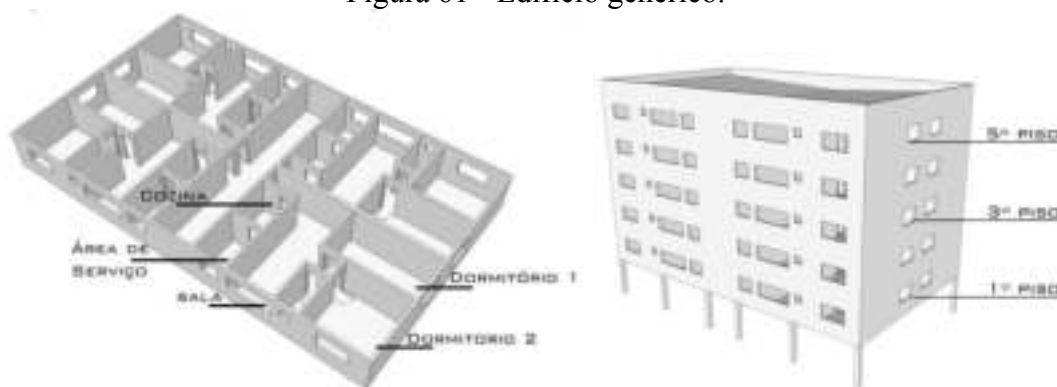
3.2. Caracterização do objeto

Para a realização desta pesquisa, as análises para o dimensionamento de varandas e outros elementos de fachada apresentou como recorte um edifício residencial multifamiliar genérico,

visando representar características comuns dos edifícios encontrados no Brasil. O mesmo modelo também foi utilizado em pesquisas, como Sorgato et al. (2011), Nico-Rodrigues (2015), Machado (2019) e Bussolotti (2020).

O edifício em questão (Figura 61) é composto por um térreo em pilotis e cinco pavimentos tipo, com uma cobertura de telhado embutido na platibanda. Cada andar possui quatro apartamentos com dois dormitórios, sala de estar, cozinha, área de serviço e banheiro, totalizando aproximadamente 70m². Cada apartamento tem fachadas voltadas para duas orientações e, exceto pela cozinha, que possui ventilação indireta através da área de serviço, todos os ambientes possuem aberturas para o exterior. O pé direito para todos os cômodos foi mantido em 2,70m.

Figura 61 - Edifício genérico.



Fonte: Nico-Rodrigues (2015)

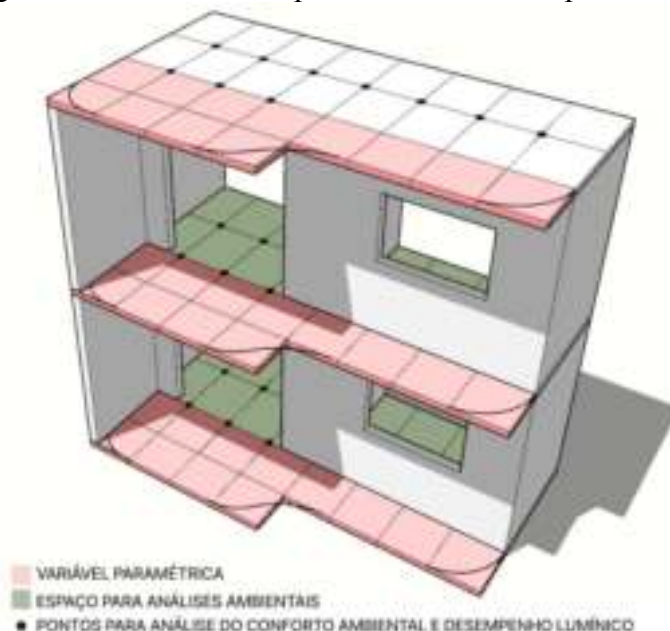
A fim de otimizar o tempo das análises, foram gerados resultados apenas para o pavimento tipo para todas as orientações solares. Para identificar o efeito de auto-sombreamento, proposto por Chan (2015), foi gerado um modelo simplificado de oito pavimentos, com proteções solares e aberturas apenas para a fachada oeste.

3.3. Variável Paramétrica

Foi definido como variável paramétrica a profundidade dos elementos de proteção solar horizontal inseridos ao longo de toda a fachada, formando elementos livres que podem ser transformados em varandas, beirais, áreas técnicas, etc. Para efeito prático, adotou-se que para profundidades maiores que 1,2m o elemento poderá ser utilizado como varanda, enquanto elementos menores poderão ser utilizados como beiral, brise horizontal individual ou área técnica. A variável conta ainda com uma função de abaulamento de arestas, permitindo criar

formas mais orgânicas. Um modelo com a identificação da variável paramétrica e demais elementos está exemplificado na Figura 62.

Figura 62 - Modelo exemplificando a variável paramétrica.



Fonte: Autor (2024).

A variável paramétrica é formada a partir de uma curva inserida no alinhamento da fachada, com divisões inicialmente aleatórias que podem ser alteradas de acordo com a necessidade do projetista. A quantidade ótima de pontos de divisão é aquela que coincide com os pontos da malha utilizado nas análises ambientais, mas isso pode resultar em formas de difícil execução, portanto, como segundo critério, indica-se que a divisão seja coincidente com o eixo das aberturas, pois são essas as principais responsáveis pelos resultados das análises. Para o desenvolvimento desta pesquisa foi adotado o segundo critério.

Como forma de medir a eficiência do Sistema generativo (SG), optou-se por adotar um valor mínimo de profundidade de 0,5m e um máximo de 3m para a variável paramétrica. Ao final, como forma de avaliação, serão comparados os modelos mínimo, máximo e o gerado pelo SG.

3.4. Materiais da edificação

Os materiais utilizados no modelo foram aqueles mais comumente utilizados no mercado brasileiro da construção civil. Os materiais foram extraídos da biblioteca próprio do Honeybee e configurados de acordo com os componentes básicos (paredes, piso, teto, cobertura e aberturas).

Geraldi, Logen e Soares (2022) calcularam as transmitâncias térmicas de componentes construtivos usuais brasileiros segundo a NBR 15220-2:2022, norma esta que foi atualizada de forma a alinhar o método de cálculo da transmitância térmica com a norma internacional ISO 6946/2017 Parte 2.

Ainda que os materiais utilizados da biblioteca do Honeybee não apresentassem os mesmos valores de transmitância definidos pela NBR 15220-2:2022, os mesmos foram mantidos, pois testes iniciais (com alguns dos materiais da norma modelados) não retornaram diferenças significativas nos resultados de temperatura operativa conforto adaptativo, pelos valores serem relativamente próximos e pelos resultados se darem em cima de uma média para o pavimento todo. Desta forma, optou-se por manter os materiais originais da biblioteca Honeybee, a fim de simplificar o código do sistema generativo. A composição dos elementos, assim como suas transmitâncias térmicas, comparados com os resultados de Geraldi, Logen e Soares (2022), estão apresentados no Quadro 6.

Quadro 6 - Composição dos materiais e suas propriedades.

Componente	Material	Espessura	Transmitância Térmica U par (w/m².k)	
			NBR 15220-2:2022	Honeybee
Parede	Argamassa	2,5cm	1	0,72
	Bloco cerâmico (9.0 x 19.0 x 19.0 cm) / Bloco genérico (Honeybee) 10cm	10cm	0,7	0,9
	Argamassa	2,5cm	1	0,72
Teto	Laje de concreto	10cm	2,5	2,31
	camada de ar	10cm	-	-
	gesso acartonado	1,25cm	0,25	0,16
Piso	Laje de concreto	10cm	2,5	2,31
Cobertura	Cobertura metálica	1mm	50	44,98
	Laje de concreto	10cm	2,5	2,31
	camada de ar	10cm	-	-
	gesso acartonado	1,25cm	0,25	0,16
Aberturas	vidro incolor	0,6cm	1	0,9

Fonte: Autor (2024).

Para a varanda, foi desconsiderado o material do guarda-corpo a fim de simplificar as análises e diminuir a complexidade da forma gerada pelo sistema generativo. Para efeito prático, foi

considerado um guarda-corpo hipotético em gradil de ferro vazado, considerando uma menor influência na ventilação e iluminação em ambientes internos.

3.5. Cálculo das Aberturas

O tamanho das aberturas foi calculado conforme Código de Edificação da cidade de Vitória-ES (PMV, 1998). Para o cálculo das aberturas, o Código de Edificações considera como dimensão mínima para iluminação 12,5% (1/8) da área do piso para ambientes considerados de alta permanência (quartos, salas, escritório, etc.).

Para o cálculo das aberturas (Quadro 7) foi considerado o peitoril de altura 1,10m nas janelas dos quartos e altura das vergas de 2,30m do piso. A largura das aberturas variou de acordo com o mínimo exigido no Código de Edificações, com valores arredondados para cima.

Quadro 7 - Quadro de esquadrias externas.

Quadro de Esquadrias			
Superfície	Peitoril	Largura	Altura
Porta da Varanda	-	1,50	2,30
Janela Quarto 1	1,10	1,65	1,20
Janela Quarto 2	1,10	1,20	1,20
Janela Área de Serviço	1,10	1,50	1,20

Fonte: Autor (2024).

3.6. Condicionantes locais

O local escolhido para realização das simulações foi a cidade de Vitória (Figura 63), capital do estado do Espírito Santo, localizada na região Sudeste do Brasil (20°19'09" latitude Sul e 40°20'50" longitude Oeste). A escolha se deu por ser o local onde se realiza a presente pesquisa, de forma que se espera que esta possa contribuir com a qualidade do ambiente construído da região. A cidade faz parte da Região Metropolitana da Grande Vitória, que é conhecida por ter o maior desenvolvimento urbano no estado. Segundo a classificação de Köppen, o clima de Vitória é considerado Tropical Atlântico, típico de regiões litorâneas com variações térmicas relativamente baixas ao longo do ano, resultando em estações climáticas pouco definidas (LAMBERTS, DUTRA, PEREIRA, 2014).

Figura 63 - Localização do município de Vitória-ES.



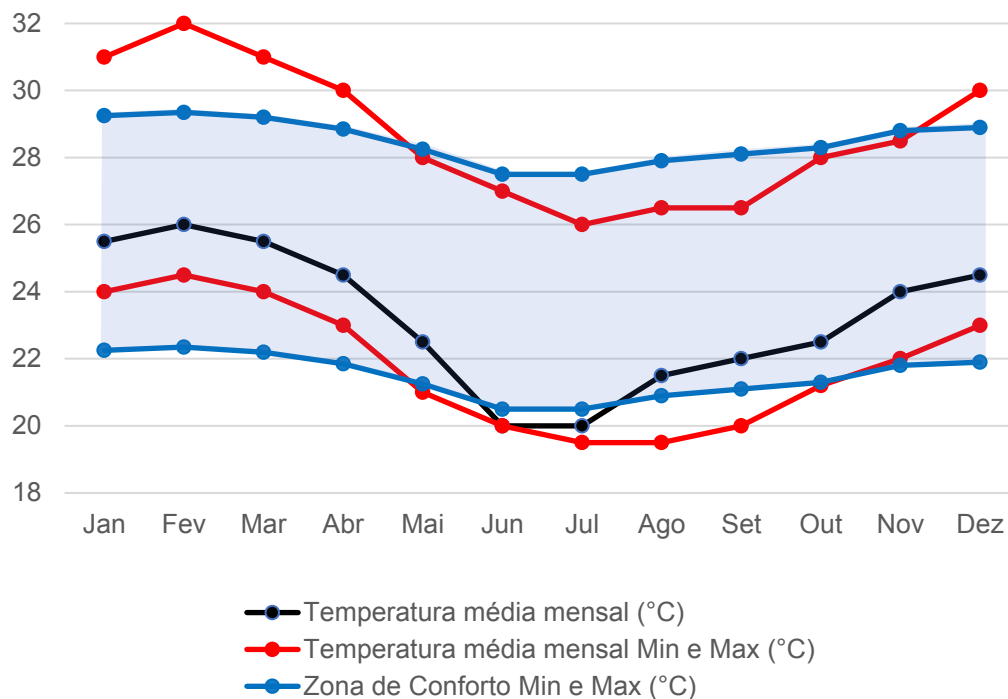
Fonte: Adaptado de TUBS (2011). Disponível em:
[https://pt.wikipedia.org/wiki/Esp%C3%ADrito_Santo_\(estado\)](https://pt.wikipedia.org/wiki/Esp%C3%ADrito_Santo_(estado)). Acesso jun. 2023.

De acordo com dados da normal climatológica¹⁰ para Vitória-ES entre os períodos de 1991 a 2020, a temperatura média de Vitória vai de 27,50°C em fevereiro a 22,50°C em julho, tendo máximas de 32°C e 26,7 e mínimas de 24,4°C e 19,6°C nos mesmos meses (INMET, 2022).

O Gráfico 4 ilustra as temperaturas da cidade em relação à zona de conforto definida pela ASHRAE 55, onde observa-se por meio das temperaturas mínimas e máximas médias que quase todos os meses apresentam temperaturas fora da zona, seja para o frio ou para o calor durante inverno e verão. De acordo com a Figura 64 é possível visualizar que em 61% do ano ocorre o desconforto por calor, enquanto em apenas 19% desconforto por frio. Enquanto que para a proteção contra o frio o usuário pode usar mais peças de roupa ou controlar as aberturas das esquadrias, nos meses quentes estes artifícios acabam sendo insuficientes para o conforto do usuário, de forma que se faz necessária a utilização de equipamentos mecânicos de resfriamento (PROJETEEE, 2023).

¹⁰ As normais climatológicas são valores médios de variáveis meteorológicas calculados para um período relativamente longo e uniforme, compreendendo no mínimo três décadas consecutivas, e representa as características médias do clima em um determinado local (INMET, 2022).

Gráfico 4 - Temperatura e zona de conforto térmico em Vitória-ES.



Fonte: Adaptado de Projeteee (2023)

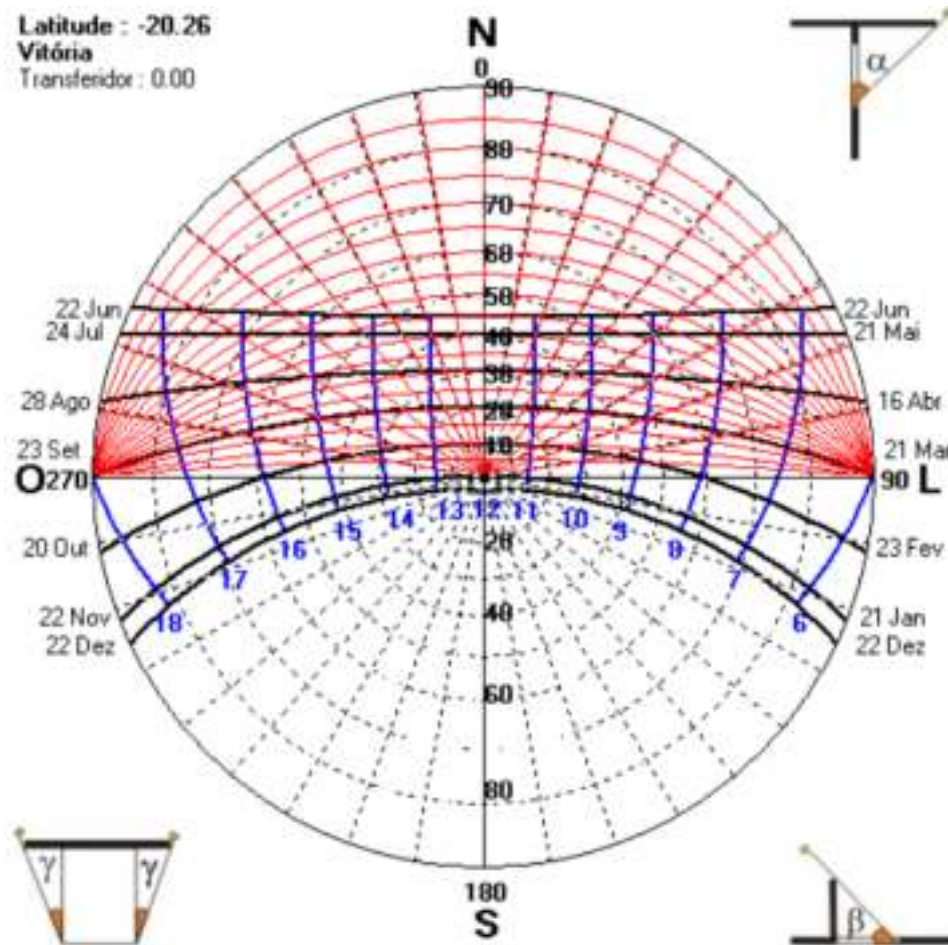
Figura 64 - Proporção de meses em que há conforto e desconforto térmico.



Fonte: Projeteee (2023)

Por meio da carta solar gerada pelo software Analysis SOL-AR (Figura 65), é possível identificar que há incidência de luz solar na direção leste durante as manhãs e na direção oeste durante as tardes em todos os meses. Na orientação norte, há incidência de radiação solar ao longo de todo o dia de março a setembro, enquanto nos demais meses o sol é recebido apenas durante parte da manhã e da tarde. Já na direção sul, a insolação ocorre durante todo o dia apenas de novembro a janeiro, que é o período mais quente do ano. Desta forma é possível concluir que para todas as orientações de fachada, há alguma incidência solar direta durante os meses mais quentes do ano e, portanto, todas as orientações seriam passíveis de receber algum tipo de proteção solar passiva.

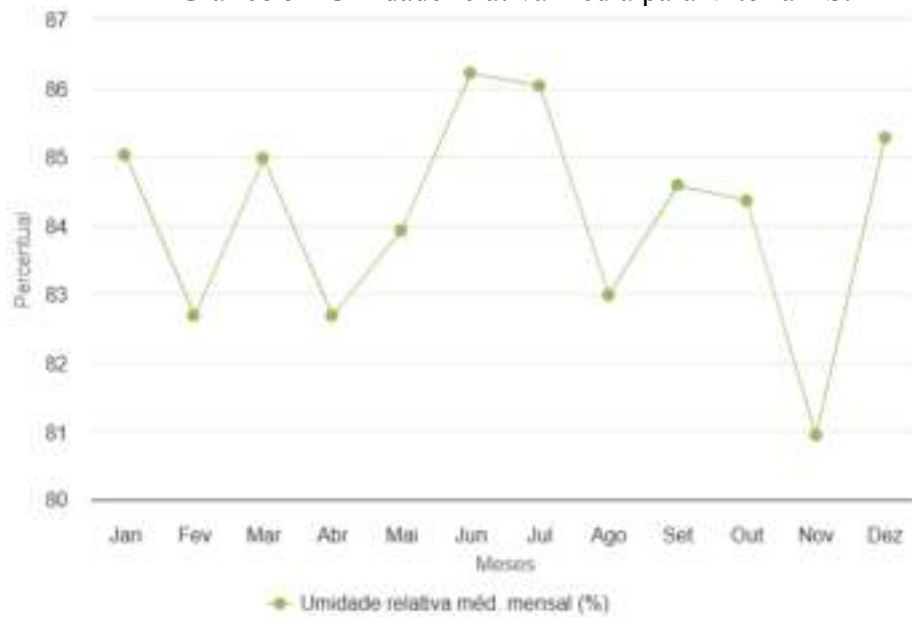
Figura 65 - Carta solar para Vitória-ES.



Fonte: LABEEE (2023)

No que diz respeito à umidade relativa, que está relacionada à temperatura na definição da sensação térmica, observa-se que há alta umidade média, acima de 80%, durante todos os meses do ano (Gráfico 5). Em locais com alta umidade, ocorre desconforto térmico devido à sensação de abafamento e dificuldade de evaporação do suor, resultando em uma redução da temperatura corporal. Além disso, uma consequência da alta umidade é a baixa amplitude térmica, o que faz com que o calor persista durante as noites nessas regiões (PROJETEEE, 2023).

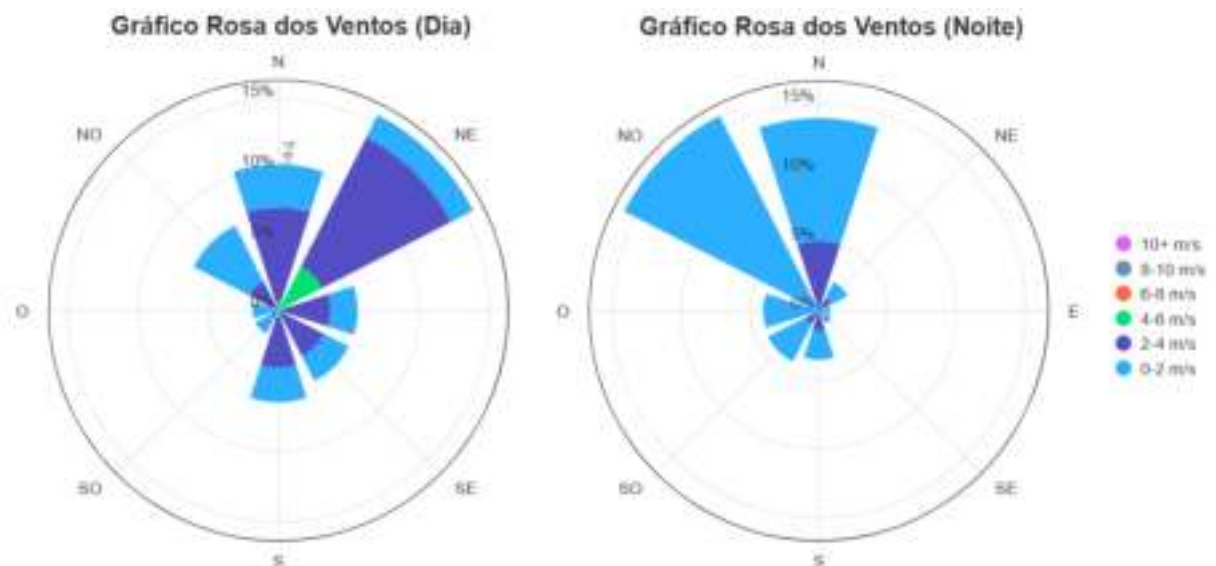
Gráfico 5 - Umidade relativa média para Vitória-ES.



Fonte: Projeteee (2023)

Durante o dia, os ventos predominantes na cidade sopram na direção nordeste, enquanto durante a noite, a direção dos ventos é norte e nordeste (Figura 66). A utilização da ventilação natural no projeto desempenha um papel importante ao reduzir o desconforto térmico nos espaços internos, principalmente durante os meses mais quentes do ano.

Figura 66 - Umidade relativa média para Vitória-ES.



Fonte: Projeteee (2023)

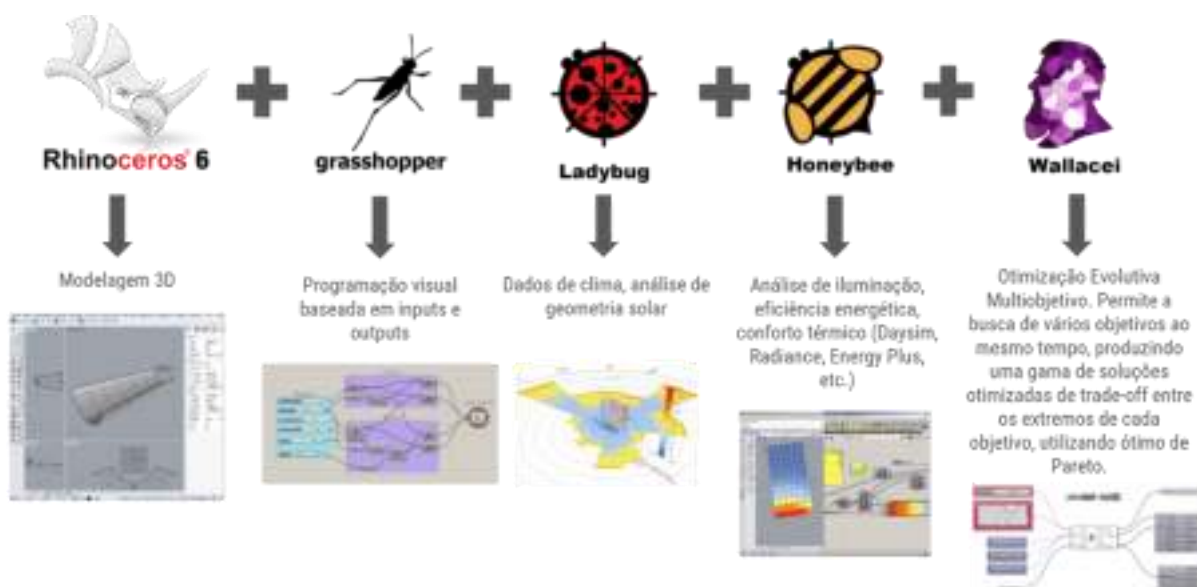
3.7. Softwares e plugins

A escolha do software se deu pela disponibilidade de plugins de parametrização, análise ambiental e de otimização evolutiva, sendo vários destes livres ou possuindo licença estudantil, além de serem validados por pesquisas acadêmicas e terem sido utilizados por pesquisas que são referência para esta dissertação.

Como é possível visualizar na Figura 67, foi utilizado o software Rhinoceros 6 (versão compatível com alguns dos plugins utilizados), juntamente com o plug-in Grasshopper, para a estruturação do sistema generativo e modelagem do edifício e elementos de proteção de forma paramétrica. Além disso, foram utilizados outros três plug-ins: Ladybug, HoneyBee e Wallacei.

O plug-in Ladybug Tools é responsável por trabalhar com dados climáticos e inseri-los no Grasshopper. Por sua vez, o Honeybee utiliza os mecanismos de simulação do Radiance, Daysim e EnergyPlus para realizar análises relacionadas à radiação, luz natural e consumo energético, respectivamente (LADYBUG TOOLS, 2023).

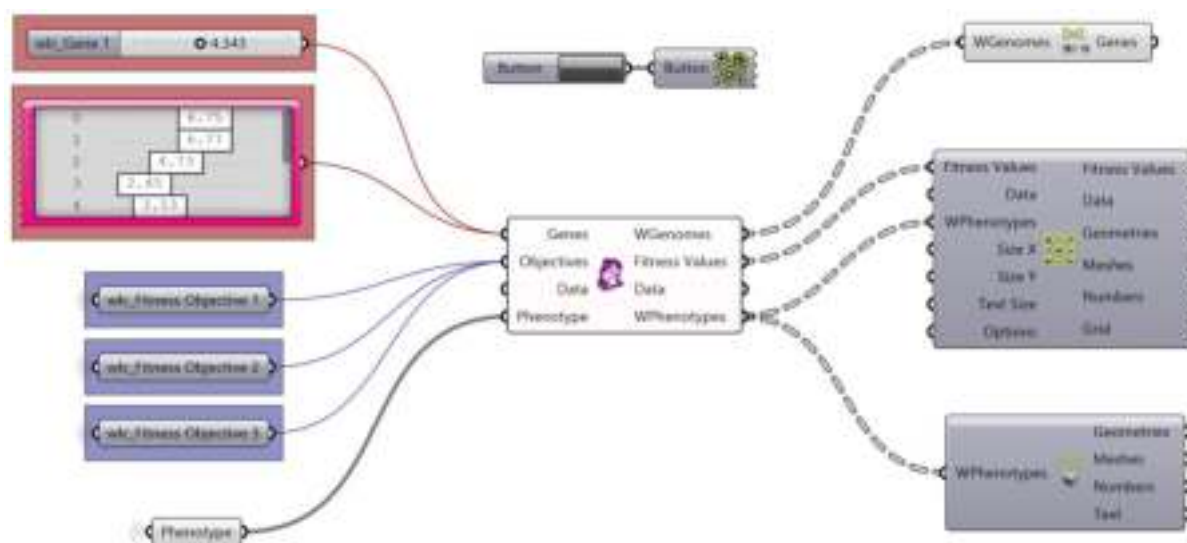
Figura 67 - Software de modelagem e plugins de análise e algoritmo genético.



Fonte: Autor (2024).

O Wallacei é uma ferramenta evolutiva que permite ao usuário realizar simulações evolutivas multiobjetivas no Grasshopper. Para isto ele emprega o algoritmo genético NSGA-2, o método K-means para agrupamento, e utiliza as bibliotecas JMetal, LiveCharts e HelixToolkit. A Figura 68 apresenta o principal componente do Wallacei na interface do Grasshopper com os dados de entrada e saída (WALLACEI, 2019).

Figura 68 - Componente principal do Wallacei e dados de entrada e saída.



Fonte: Wallacei (2019)

3.8. Metodologias de análise ambiental

Foram realizadas análises de conforto térmico e desempenho lumínico para todo o pavimento em todas as orientações. O sombreamento causado por outras construções no entorno não foi considerado. A malha de pontos utilizada para a análise do conforto térmico foi a mesma da análise de desempenho lumínico, pois apenas esta última possui valores mínimos definidos por norma brasileira e por ser valor compatível com uma boa visualização em mapas de calor (utilizados nos resultados desta pesquisa).

Como o objetivo foi avaliar apenas o impacto das proteções solares no desempenho da edificação, optou-se por não utilizar as métricas de análise propostas na NBR 15575-1/2021, já que as métricas da ASHRAE 55 para conforto adaptativo e de desempenho lumínico embutidas no Honeybee tendem a ser semelhantes ou até mais rigorosas, além de avaliar diferentes parâmetros (principalmente para a iluminação natural, onde a norma brasileira prevê apenas o cálculo do FLD e com limites mais baixos). Desde que o edifício de referência tenha as características básicas mantidas (materiais, forma principal, orientação, localização, etc.), os resultados para os dispositivos de sombreamento propostos tendem a ser semelhantes.

3.8.1. Análise do conforto térmico adaptativo

A análise do conforto térmico nos ambientes foi realizada com base nos parâmetros estabelecidos pela norma internacional ASHRAE 55 que se aplica a ambientes com condições térmicas moderadas.

Como metodologia, foi utilizado o conforto adaptativo, um modelo desenvolvido para ajustar as estimativas de desconforto calculadas pelo PMV em edifícios sem sistemas de ar-condicionado. Nesse modelo, as pessoas adaptam-se às suas preferências térmicas, controlando a abertura ou fechamento de janelas e ajustando a vestimenta, por exemplo (DJONGYANG; TCHINDA; NJOMO, 2010).

Para os parâmetros relacionados às pessoas e aos ganhos térmicos, foram utilizados valores disponibilizados pela biblioteca do Honeybee (Quadro 8) para edifícios de apartamentos de altura média (quatro a doze pavimentos). Os valores de ocupação se alternam ao longo do dia, e foi considerado os valores base do próprio programa para as demais variáveis. A escolha por parâmetros da biblioteca do Honeybee se deu para reduzir o tempo da modelagem do sistema generativo, mas podem ser modificados a critério do projetista ou outros pesquisadores.

Quadro 8 - Parâmetros de ocupação, humanos e de ganho térmico de equipamentos.

Parâmetros de ocupação	Horários
Usuário	7h – 8hs = 85% ocupado
	8h – 9hs = 40% ocupado
	9h – 17hs = 25% ocupado
	17h – 18hs = 50% ocupado
	18h – 21hs = 85% ocupado
	21hs - 6hs = 100% ocupado
Parâmetros humanos	Valores
Postura	em pé
Quantidade de ocupantes	0,028 pessoas/m²
Absorbância da pele e roupa (pele morena e roupas médias)	0,7
Ganhos Térmicos de equipamentos	Cargas
Iluminação artificial	6,5W/m²
Equipamentos	6,70 W/m²

Fonte: Autor (2024).

Para a análise de conforto térmico foram extraídos os mapas de calor da planta do pavimento tipo para temperatura operativa, percentual de conforto térmico e percentual de calor. Foi

adotado como objetivo na ferramenta de algoritmo evolutivo o percentual de conforto térmico que, de acordo com a ASHRAE 55 deve ficar acima de 80% durante os períodos ocupados.

Após avaliação dos resultados preliminares, observou-se que, ao realizar as análises para todos os meses do ano, havia maior incidência de desconforto causado pelo frio, ainda que as médias estivessem próximas no mínimo da ASHRAE 55 (em torno de 18°C), desconforto esse facilmente mitigado pela mudança do tipo de roupa e fechamento de janelas. Desta forma, foram realizadas análises apenas para os meses mais quentes do ano (dezembro a abril), pois este tem maior impacto no gasto energético por ventilação mecânica para região de Vitória-ES. Esta alteração também reduziu o tempo necessário para realização das análises computacionais.

3.8.2. Análises do desempenho lumínico

De acordo com os parâmetros estabelecidos pela norma NBR 15215-4 (ABNT, 2005), o número mínimo de pontos necessários para verificar o nível de iluminação natural no pavimento foi calculado utilizando a equação fornecida por essa mesma norma, retornando uma média de um ponto a cada 50cm a uma altura de 75cm do piso.

As simulações foram realizadas para todos os dias do ano, no intervalo das 8h00 às 18h00, com o meio do intervalo conforme definido pela LM-83-12 (IES, 2012). Foi utilizado arquivos climáticos da cidade de Vitória - ES. As refletâncias das superfícies internas, como piso, parede e teto, foram determinadas de acordo com a NBR 8.995-1 (ABNT, 2013), conforme indicado no Quadro 9 - Refletâncias das superfícies internas e externas.

Quadro 9 - Refletâncias das superfícies internas e externas.

Refletâncias das superfícies		
Superfície	Ambiente interno	Ambiente externo
Piso	0,2	0,2
Parede	0,6	-
Teto	0,8	-

Fonte: Adaptado de NBR 8.995-1 (ABNT, 2013).

O primeiro critério utilizado para a avaliação foi a UDI (Useful Daylight Illuminance ou Iluminância útil de luz natural - IULN), com o objetivo de alcançar um mínimo de 75% do ano na área do pavimento. Inicialmente, considerou-se uma UDI de 200 lux a 3.000 lux (faixa considerada ideal). Esse critério foi analisado e comparado às recomendações da norma NBR 8.995-1 (ABNT, 2013), que estabelece um valor mínimo de 200 lux no plano de trabalho, para

isso, também foram extraídos os resultados abaixo de 200 lux (medida de insuficiência), assim como acima de 3000 lux (risco de ocorrer ofuscamento), como estabelecido por Mardaljevic et al. (2011).

Para ilustrar o potencial do ambiente em fornecer um nível mínimo de iluminância ao longo do ano, foram gerados resultados de DA (Daylight Autonomy – Autonomia de Luz Diurna) mínima de 200 lux e sDA (Spatial Daylight Autonomy – Autonomia Espacial de Luz Diurna), sendo esta última a medida da suficiência de iluminância da luz do dia para uma determinada área, relatando a porcentagem da área do piso que excede um nível de iluminância de 200 lux por mais de 50% das horas anuais de trabalho (8h às 18h). De acordo com a IES LM-83 (IES, 2012), a sDA foi classificada nos seguintes níveis: suficiência de luz do dia referida (deve atender ou exceder 75% da área de análise), suficiência de luz do dia nominalmente aceita (deve atender ou exceder 55% da área de análise), não aceito (sDA não atende ao valor mínimo exigido de 55% da área de análise)

3.9. Avaliação do sistema generativo

A fim de avaliar o sistema generativo, foram propostos comparativos dos resultados das simulações com outros dois modelos, os de proteções de 0,5m e 3m em todos os pontos das curvas. Intuitivamente, os resultados do SG deverão se situar entre os dos outros dois elementos, aliando um potencial conforto térmico próximo do elemento de 3m, enquanto mantendo um desempenho lumínico próximo do elemento de 0,5m. Os resultados foram avaliados por meio de gráficos para cada um dos resultados das análises ambientais e também pela área das superfícies geradas pela variável paramétrica, sendo esta última mais uma forma de medir a eficiência da proteção gerada pelo SG, por significar, em teoria, um menor consumo de materiais construtivos.

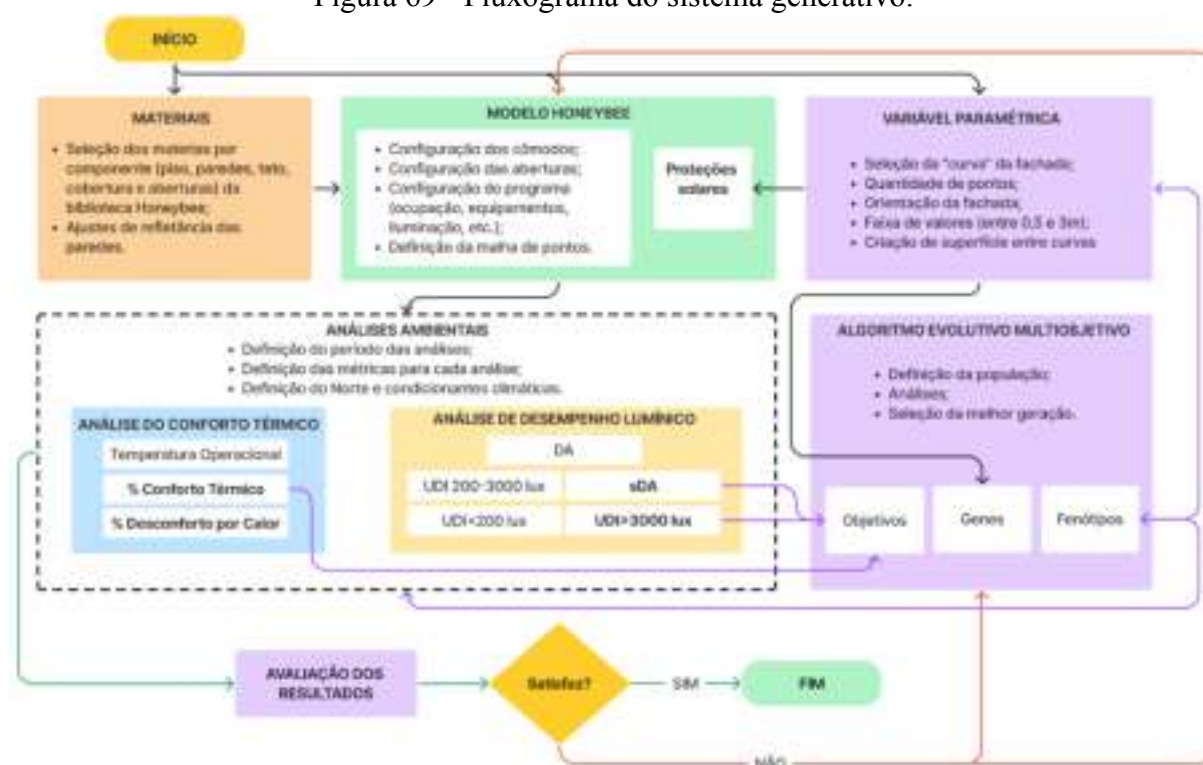
3.10. Hardware

Para realização das simulações foi utilizado um notebook com processador intel core i5-13450HX, com 24gb de memória ram. As análises consumiram em média 1gb de memória ram e 5% a 15% da capacidade de processamento do computador. O Grasshopper não utiliza todos os núcleos de processamento, o que faz com que as análises sejam limitadas ao *clock* de apenas um núcleo do processador.

3.11. Fluxograma do sistema generativo

Para facilitar a visualização do funcionamento do SG, foi criado um fluxograma (Figura 69), onde é possível identificar as suas cinco principais partes. Primeiro, têm-se as etapas de configuração dos Materiais, Modelo Honeybee, e Variável Paramétrica (esta última é ligada aos genes do Algoritmo Evolutivo Multiobjetivo). A partir do modelo Honeybee inicia-se as Análises Ambientais, composta pela Análise do Conforto Térmico e Análise do Desempenho Lumínico. A partir das análises, os resultados podem ser considerados satisfatórios, se não, o projetista pode retornar à variável paramétrica, alterando métricas de análise, ou ainda ao modelo e variável paramétrica, alterando dimensões, materiais, etc.

Figura 69 - Fluxograma do sistema generativo.



Fonte: Autor (2024).

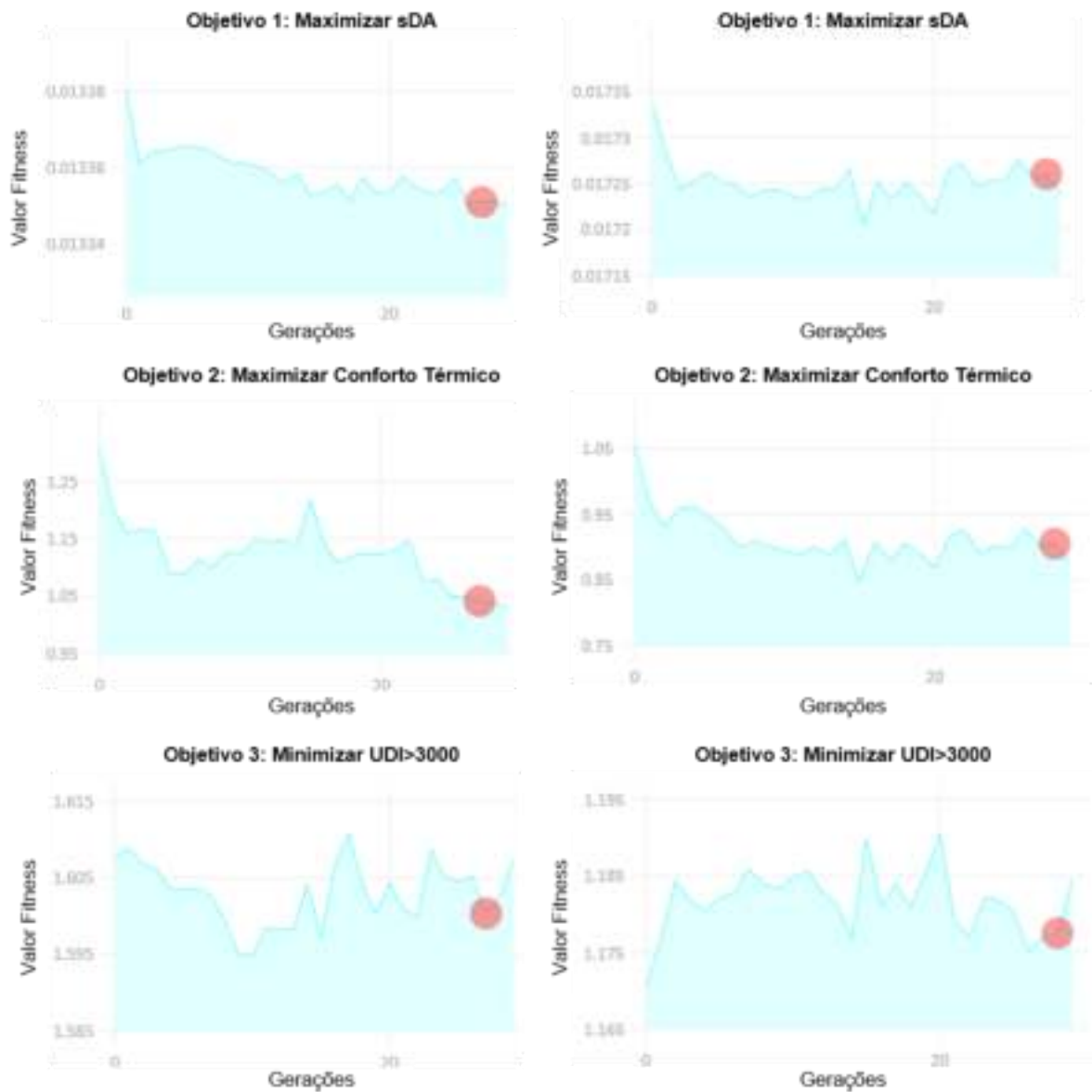
Alguns dos resultados das análises são então inseridos como objetivos na Ferramenta de Algoritmo Genético Multiobjetivo. A partir dos fenótipos da ferramenta multiobjetivo, os dados são então extraídos e novas análises são realizadas. A partir das análises, os resultados podem ser considerados satisfatórios, se não, o projetista pode retornar à variável paramétrica, alterando métricas de análise, ou ainda ao modelo e variável paramétrica, alterando dimensões, materiais, etc.

3.12. Tamanho da população para análises multiobjetivo

A definição do tamanho da população é importante para que a quantidade de *crossovers* (mutações) seja suficiente para que os resultados tenham diferenças estatísticas pouco relevantes entre si nas gerações finais. A maioria dos algoritmos evolutivos NSGA-II (presente no Wallacei) são pré-configurados para uma população de 100 indivíduos, mas um estudo mostrou que uma variação populacional pode trazer resultados estatísticos melhores, sendo o caso quando os autores fizeram testes com uma população total de 500 (HORT; SARRO, 2021).

Testes preliminares, iniciando com uma população de 50 (população inicial de 5 e 10 gerações) e indo até 300 (população inicial de 10 e 30 gerações), mostraram que este último apresentou resultados mais relevantes e diferenças estatísticas menores entre as últimas gerações, como é possível perceber nos gráficos de tendência (Gráfico 6) com os valores médios dos resultados de cada objetivo (o eixo y do gráfico representa a tendência dos valores de *Fitness* de cada objetivo, comparados à primeira geração), com exceção do objetivo UDI>3000 lux, onde os valores das gerações tendiam a ser mais aleatórios, mas dado que sua importância foi considerada como sendo menor que os outros dois objetivos, decidiu-se que a população de 300 seria suficiente para gerar os melhores resultados.

Gráfico 6 - À esquerda: gráfico de tendência do pavimento tipo; à direita: oito pavimentos.



Fonte: Autor (2024).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados da pesquisa, que envolveu o desenvolvimento do sistema generativo (SG) e análise dos resultados como forma de avaliar a sua eficácia. Primeiro, é apresentada a estrutura geral do sistema generativo e depois detalhadas cada parte do sistema. Após, foram apresentados os resultados para os elementos de 0,5m, 3m e do SG e os mesmos comparados por meio de gráficos, como forma de avaliação. Ainda foram apresentados resultados para um modelo reduzido para oito pavimentos a fim de avaliar o efeito de auto-sombreamento. Ao final é apresentada a classe para generalização de um problema em que o desenvolvimento do SG se encaixa.

4.1. Estrutura geral do sistema generativo

A estrutura final do SG foi dividida em oito partes (Figura 70). Essa divisão se deu para separar o desenvolvimento do SG em etapas, com a sequência representada pelos números em vermelho. São as etapas: variável paramétrica (1), materiais (2), modelo Honeybee (3), análises espaciais de desempenho lumínico (4), análises espaciais de conforto térmico adaptativo (5), definição do norte e arquivos EPW (EnergyPlus Weather File) e DDY (Design Day File) (6), gráficos de conforto adaptativo e temperaturas externas durante o ano (7) e algoritmo evolutivo multiobjetivo (8). Foram desenvolvidos dois modelos para as análises: um para análises do pavimento tipo e outro com oito pavimentos (com um pavimento tipo simplificado) para identificar se o SG gera resultados diversos entre pavimentos, dado o efeito de auto-sombreamento identificado por Chan (2015). A variação entre os dois modelos se deu apenas entre as variáveis paramétricas e o modelo Honeybee. A seguir serão detalhadas cada uma das partes do SG.

Figura 70 - Estrutura geral do Sistema generativo.



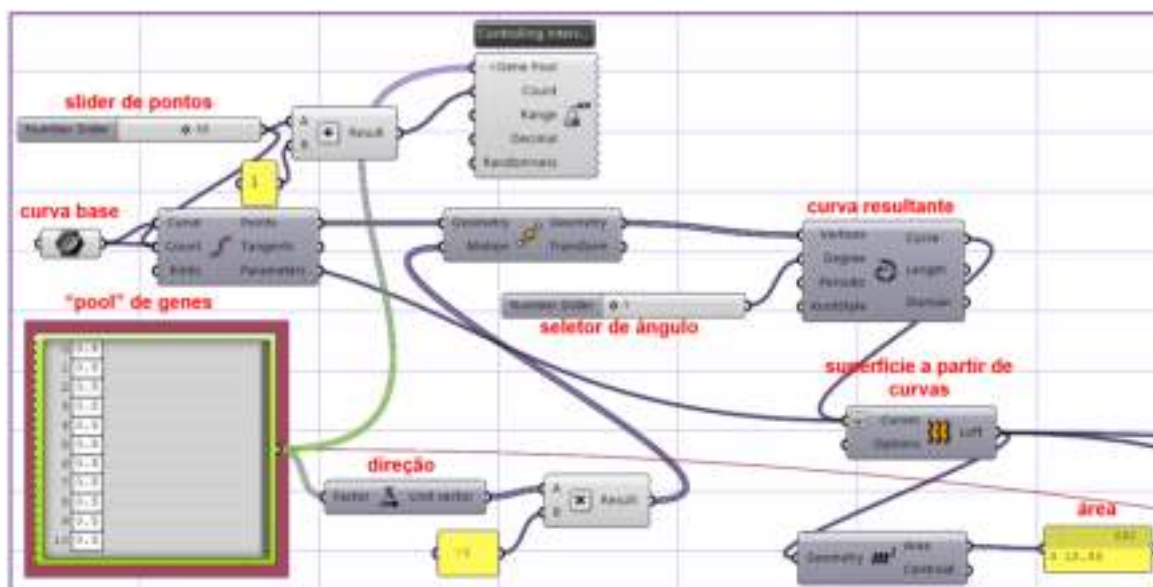
Fonte: Autor (2024).

4.1.1. Variável paramétrica

A variável paramétrica definida do SG (Figura 71), como especificado na metodologia, é a profundidade do elemento de proteção solar horizontal (podendo este ser uma varanda, beiral, etc.). Para a criação desta variável utilizando do Grasshopper, foi necessário criar o elemento curva (conjunto de pontos que segue uma determinada trajetória) no topo do pavimento ao longo dos limites externos da fachada e, a seguir, dividir o mesmo por meio de um “slider de pontos”. Decidiu-se por dividir a curva em uma média de um ponto a cada dois metros (coincidindo com o eixo das esquadrias, já que as aberturas são as que mais interferem nos resultados).

Para as fachadas maiores de 24,10 metros de comprimento (leste e oeste), a divisão retornou 11 pontos, enquanto que para as fachadas menores de 13,70 metros (norte e sul), a divisão retornou 7 pontos. A quantidade de pontos pode ser definida livremente pelo projetista, idealmente tendo pelo menos um ponto alinhado ao eixo ou próximo das esquadrias para retornar melhores valores, mas vale ressaltar que quanto maior a quantidade de pontos, maior serão o tempo despendido com as análises.

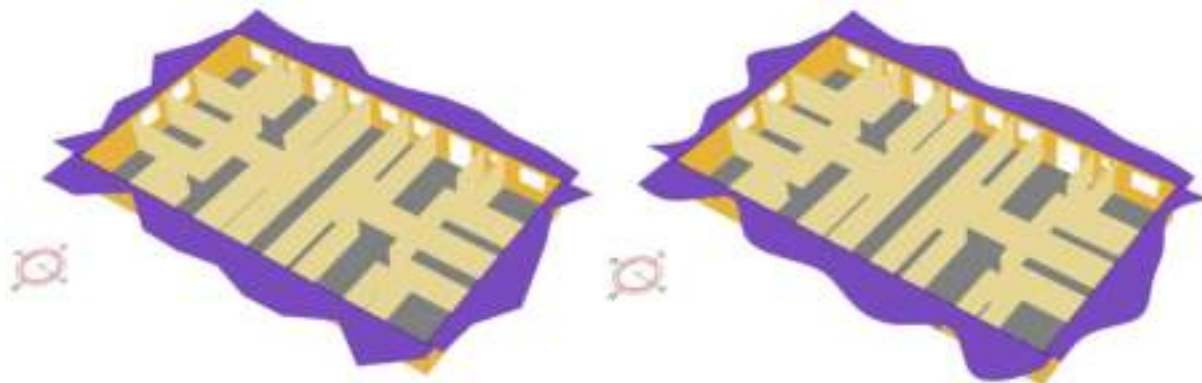
Figura 71 - Variável paramétrica.



Fonte: Autor (2024).

A seguir foi aplicada a função Move para mover os pontos por meio de um “pool de genes”, onde é possível escolher um valor entre 0,5m e 3m para cada ponto. Por meio da função de interpolação (Interpolate) cria-se uma nova curva através desses pontos (gerando que seria a borda do elemento sombreador). Ainda na função Interpolate, foi inserido um Slider (seletor de ângulo). Por meio deste seletor (valores entre 1 e 3), é possível alterar o ângulo das arestas da curva de borda, podendo ser menos suave (valor 1 como na imagem) e suave (valor 3). A diferença entre os valores pode ser identificada na Figura 72, onde é possível perceber que se trata de um artifício estético importante, principalmente para arquitetos nas fases iniciais de projeto, para ajudar a definir a forma final do edifício.

Figura 72 - Efeito de suavização de arestas. À esquerda valor=1 e direita valor=3.

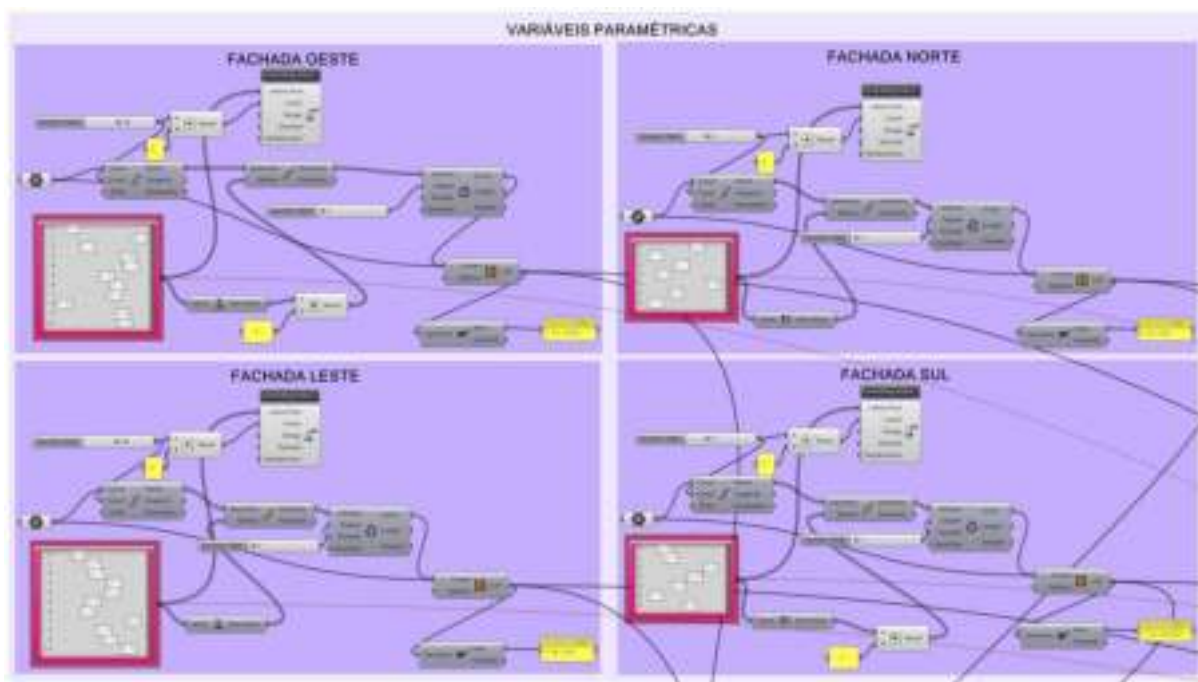


Fonte: Autor (2024).

Para criar superfícies a partir das curvas, foi utilizada a função Loft e, ainda, interligada a função Area para gerar dados de área do elemento. Ao final, a variável foi então repetida para cada

uma das fachadas (Figura 73), alterando apenas a direção do movimento (eixo x e y). Para direções com valores negativos de x e y (fachadas oeste e sul), foi necessário multiplicar os valores por -1. Para o modelo de oito pavimentos, as análises foram realizadas apenas para a orientação oeste, gerando uma variável paramétrica para cada pavimento.

Figura 73 - Variáveis paramétricas por orientação solar.

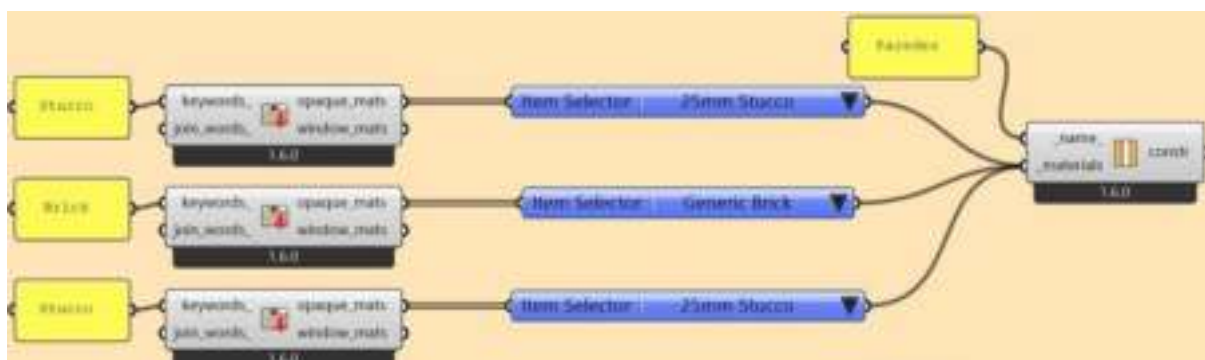


Fonte: Autor (2024).

4.1.2. Materiais

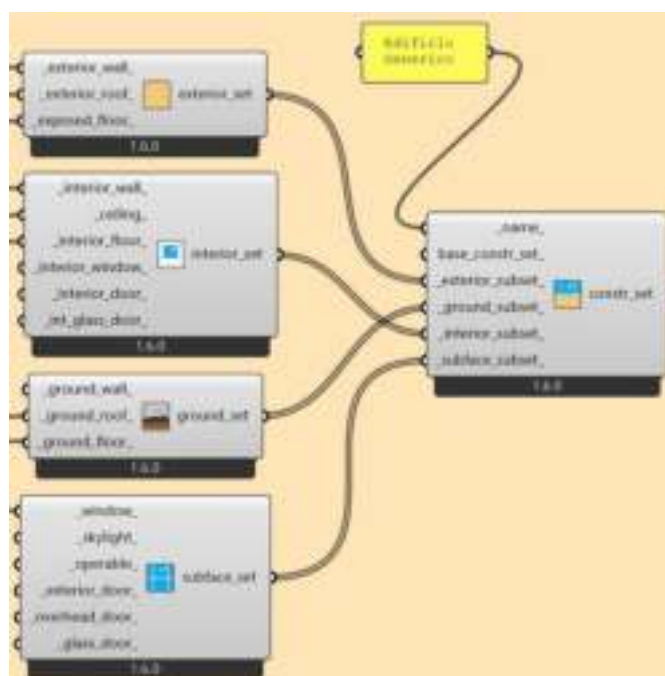
Os materiais, como justificado na metodologia, foram criados por meio da seleção de materiais opacos e de janela da própria biblioteca do Honeybee e integrados a Subsets e estes integrados ao Constructionset (programa construtivo). Dessa forma o Honeybee entende quais os materiais constituintes do modelo para cada uma de suas partes (paredes externas, internas, cobertura, pisos e janelas). A Figura 74 demonstra a composição dos materiais das paredes, enquanto a Figura 75 demonstra a integração entre Subsets e o Constructionset.

Figura 74 - Exemplo de composição de materiais para as paredes.



Fonte: Autor (2024).

Figura 75 - Integração entre Subsets e o ConstructionSet.



Fonte: Autor (2024).

Como relatado na metodologia, optou-se por utilizar materiais da própria biblioteca do Honeybee, após testes preliminares utilizando alguns materiais com valores da NBR 15220-2:2022 não terem apresentado alterações significativas nos resultados de temperatura operativa e percentual de conforto térmico. Ao longo do tempo é possível que o projetista crie sua própria biblioteca de materiais, de acordo com aqueles que mais utiliza em seus projetos.

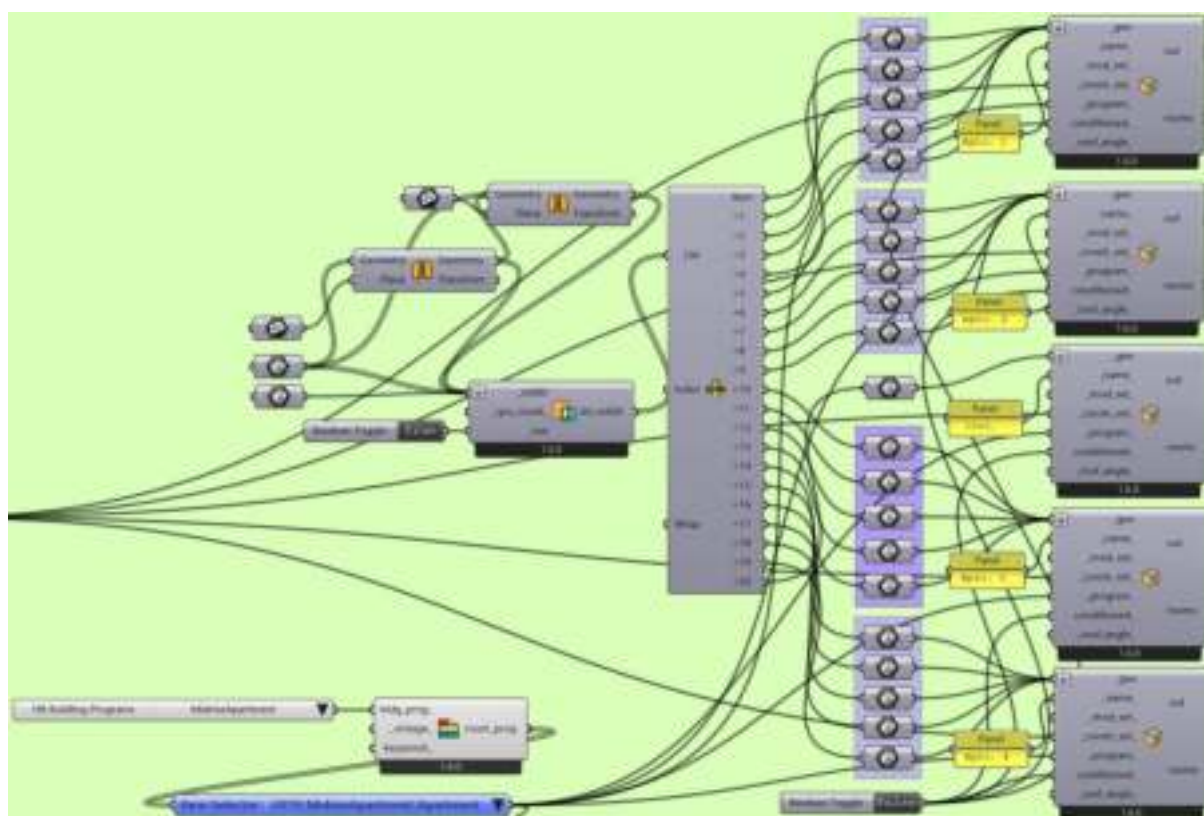
4.1.3. Modelo Honeybee

Existem diferentes metodologias para se criar um modelo de projeto no Honeybee. Na metodologia utilizada, para que o Honeybee interprete de forma adequada os componentes da

edificação, é necessário decompor suas partes e reintegrá-las. Isso se dá inicialmente por meio da criação de Breps referenciados com os volumes do modelo 3D do Rhino. Depois de criados os Breps, é possível uni-los em um único volume, que posteriormente é decomposto utilizando a função de interseção de sólidos e listagem de itens, para então serem novamente transformados em Breps e ligados ao HB Room From Solid (ambientes a partir de sólidos). Desta forma, o Honeybee passa a interpretar corretamente os cômodos e suas interseções (paredes internas, externas, pisos e cobertura). Esta etapa do modelo pode ser visualizada na Figura 76.

Nesta pesquisa, como os dados coletados das análises espaciais foram executadas para todo o pavimento, os blocos de Breps foram separados por apartamento e circulação comum, ainda que não houvesse a real necessidade, já que os materiais utilizados para todos os ambientes foram os mesmos. A individualização por ambiente é importante quando se deseja alterar características dos materiais, ou então excluir ou adicionar estes ambientes nas análises. No modelo de oito pavimentos, cada pavimento retornou apenas um Brep, já que se trata de um modelo simplificado.

Figura 76 - Criação do modelo Honeybee.

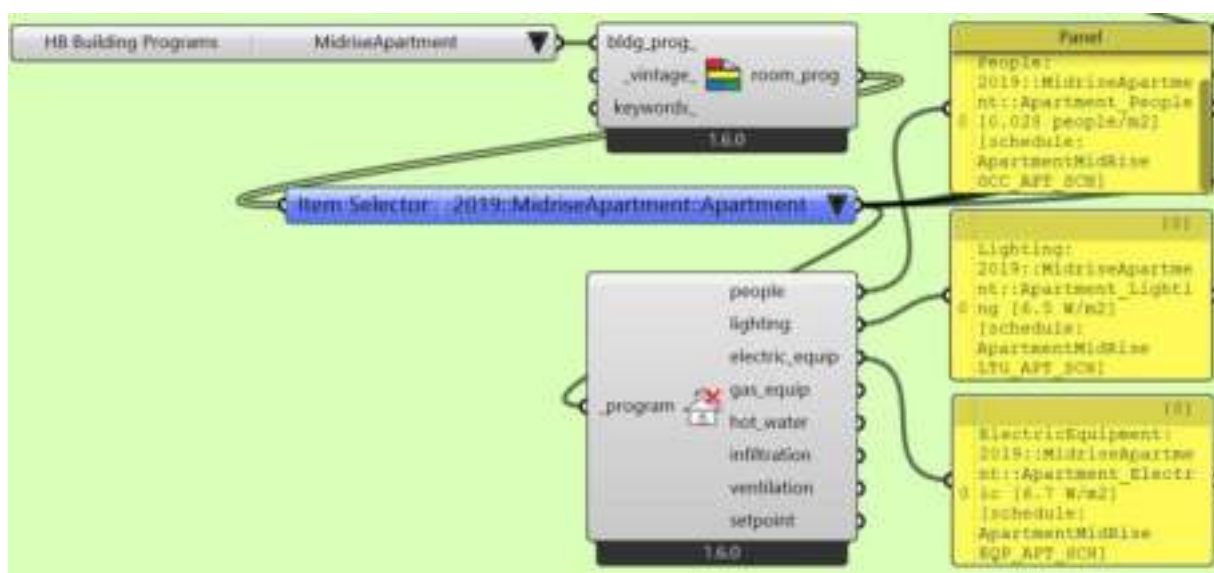


Fonte: Autor (2024).

A partir do componente Room From Solid, conecta-se a Geometria, Nome, Materiais (ConstructionSet desenvolvido anteriormente), Programa e se o mesmo possui ventilação mecânica (conditioned_). O Programa utilizado foi retirado da biblioteca do Honeybee para edifícios de apartamentos de média altura. Neste programa estão incluídos importantes parâmetros a serem utilizados nas análises ambientais, como consumo da iluminação, equipamentos elétricos, ocupação durante o dia, etc. Na

Figura 77 é possível identificar o seletor de Programa para MidriseApartment e um componente que decompõe os dados, que podem ser observados nos Panels em amarelo.

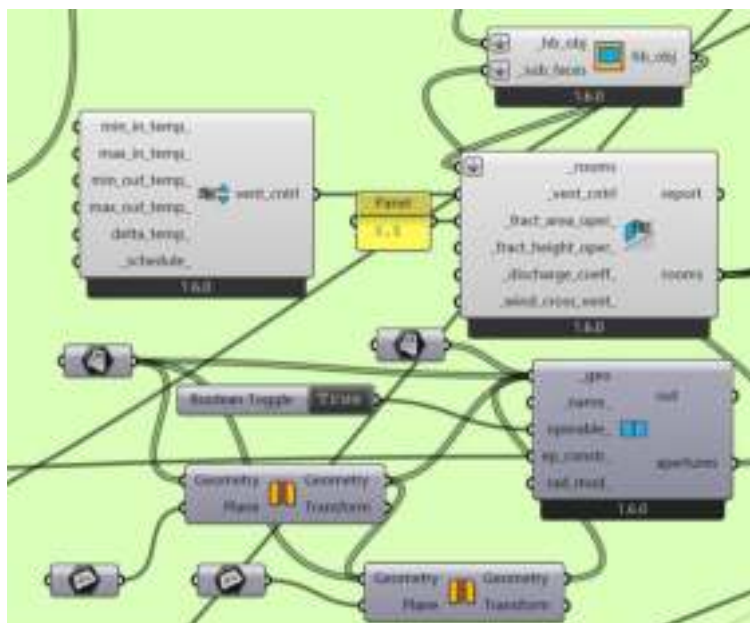
Figura 77 - Seleção do Programa da edificação.



Fonte: Autor (2024).

A seguir foram definidas as aberturas externas (janelas e portas das varandas das salas) por meio da definição das superfícies e, após, definida a operabilidade através do componente HB Window Opening (fator de 50% de abertura). Também foi conectado um componente de controle de ventilação (HB Ventilation Control) com valores padrão do Honeybee, importante para o controle de temperatura em análises de conforto adaptativo. Os dados foram então inseridos em um componente HB Add Surface que integra os cômodos (_hb_obj) e as aberturas (_sub_faces), gerando um único objeto Honeybee (hb_obj). Os componentes citados podem ser visualizados na Figura 78.

Figura 78 - Configuração das aberturas.



Fonte: Autor (2024).

O Honeybee possui componentes específicos para alterar alguns valores de superfície. Nesta pesquisa foi alterado o valor de refletância das paredes para se adaptar aos valores da norma brasileira para as análises de desempenho lumínico. Na Figura 79 é possível identificar o novo valor de refletância adicionado para as paredes e, por meio do componente Faces by Attribute, e um Panel, é possível visualizar todos os dados de refletância por superfície.

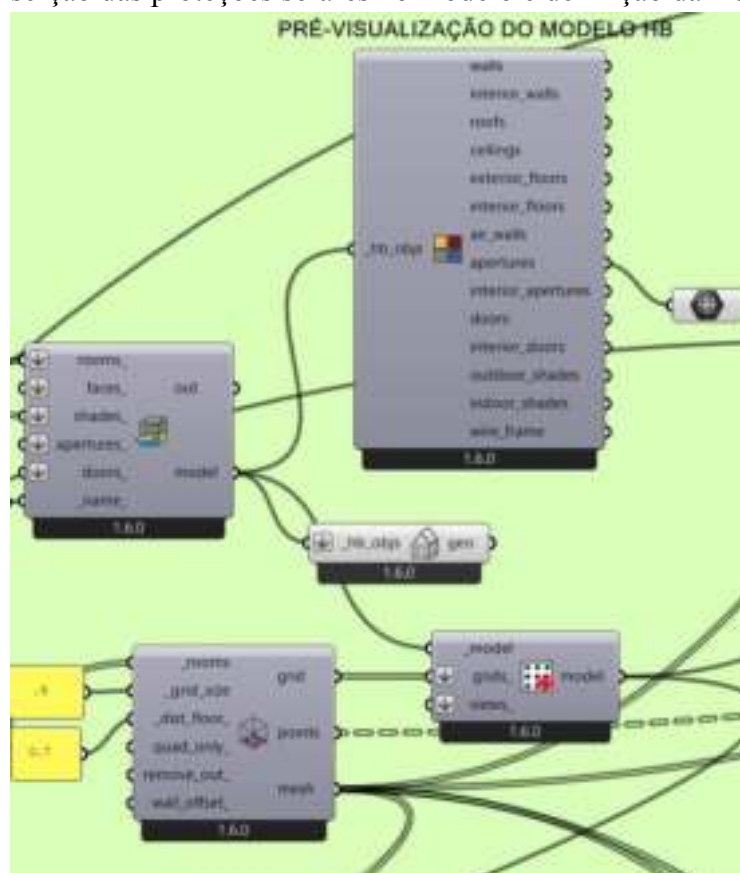
Figura 79 - Correção de refletância das paredes.



Fonte: Autor (2024).

Ao final da configuração do modelo Honeybee, foram conectadas as proteções solares (variável paramétrica) por meio do componente HB Shade ao componente Model (Figura 80), que recebeu os dados (rooms_) do componente Hb Add Surface citado anteriormente.

Figura 80 - Inserção das proteções solares no modelo e definição da malha de pontos.



Fonte: Autor (2024).

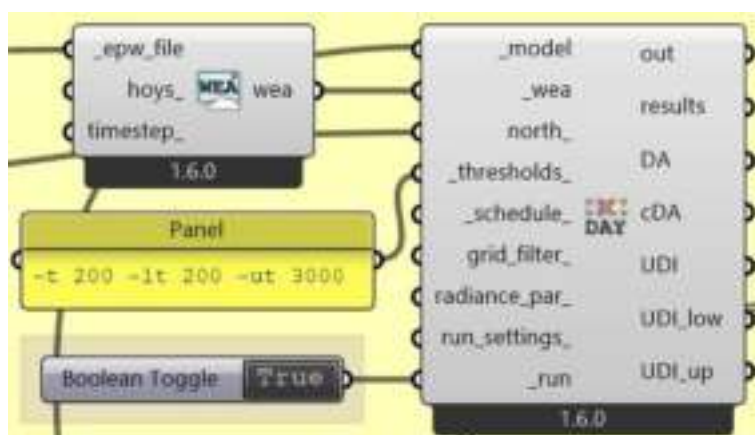
No componente Model foi possível conectar um componente de pré-visualização (HB Visualize by Type) do modelo Honeybee, onde é possível identificar se todas as superfícies estão sendo identificadas como deveriam. Por fim, foi conectado ao Modelo o componente HB Sensor Grid From Rooms e HB Assign Grids and Views, onde foi configurada a malha de pontos (Mesh) para as análises ambientais como especificado no subcapítulo 3.8.2 da metodologia de acordo com a norma pela norma NBR 15215-4 (ABNT, 2005), retornando uma média de um ponto a cada 50cm a uma altura de 75cm do piso.

4.1.4. Análises espaciais de desempenho lumínico

Por meio do componente HB Annual Daylight (Figura 81), foram extraídos quatro principais resultados de desempenho lumínico especificados na metodologia: DA, UDI, UDI_low (UDI<200 lux) e UDI_up (UDI>3000 lux). Ainda, mediante os resultados de DA, foi possível obter os valores de sDA por meio de componente próprio (Figura 82). Após as análises iniciais, dois desses resultados foram transformados em objetivos na ferramenta de análise multiobjetivo (Wallacei): sDA e UDI>3000 lux. Esta escolha se deu, pois são objetivos antagônicos, uma vez

que uma sDA maior resultou em uma porcentagem de UDI acima de 3000 lux também maior, quando o desejado é que esta última fique sempre abaixo desse valor pela possibilidade de ofuscamento. Um objetivo que busca uma UDI abaixo dos 3000 lux também auxilia no objetivo de conforto ambiental.

Figura 81 - Componente Honeybee para análises de desempenho lumínico.



Fonte: Autor (2024).

Figura 82 - Componente Honeybee para sDA.

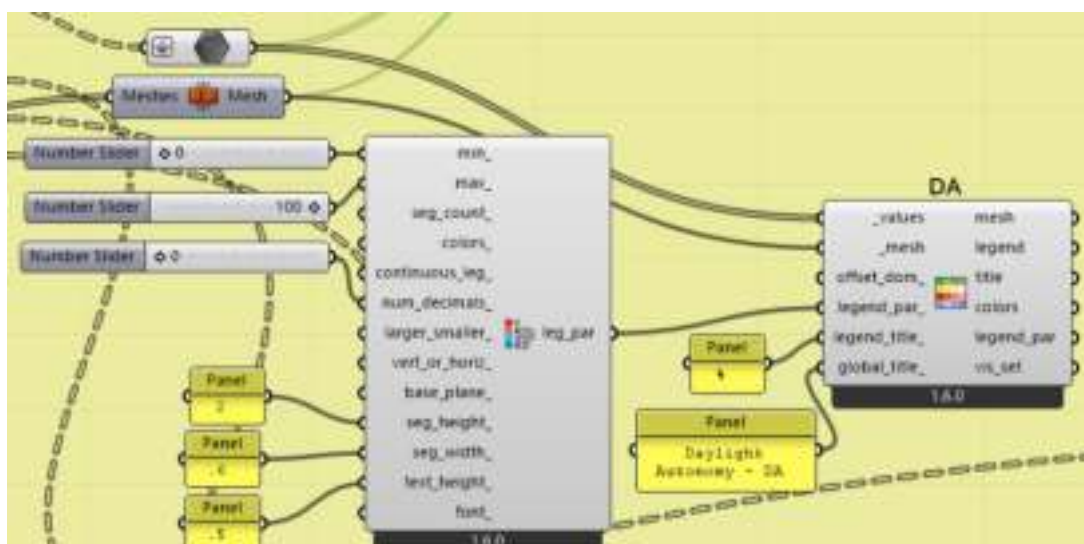


Fonte: Autor (2024).

No componente principal (DAY) foi conectado o modelo (_model), o componente Weather que extrai os dados climáticos do arquivo EPW do local, e também o Norte. A agenda de ocupação (_schedule_) não foi conectada, pois no modelo está inserida a agenda do Programa da edificação para apartamentos de altura média, como especificado no capítulo 4.2.3. Foram definidos limites entre 200 e 3000 lux para as análises e conectado a _thresholds_. O grid_filter_ é utilizado quando se deseja limitar o cômodo para realização das análises, e o radance_par_ (dados de radiação) foram mantidos como padrão do Honeybee. Para dar início às análises é utilizado um botão (Toggle) que alterna entre valores True e False (o False é utilizado para fazer alterações no modelo sem que as análises sejam realizadas de forma automática).

Os resultados foram apresentados em planta no modelo 3D Rhino por meio de mapas de calor (representando as zonas com melhor ou pior desempenho), para cada resultado das análises (menos o sDA que gerou apenas um único valor percentual), foi utilizado o componente Spatial Heatmap do Ladybug. Neste componente foram conectados os dados extraídos do HB Annual Daylight utilizando um componente Data, e também da malha de pontos (Mesh). Foi conectado também o componente de configuração de parâmetros de legenda (legendPar) para melhor visualização das informações (tamanho de fonte e localização). A Figura 83 apresenta os componentes citados anteriormente com o exemplo para DA,

Figura 83 - Componentes para visualização dos dados. Exemplo para DA.



Fonte: Autor (2024).

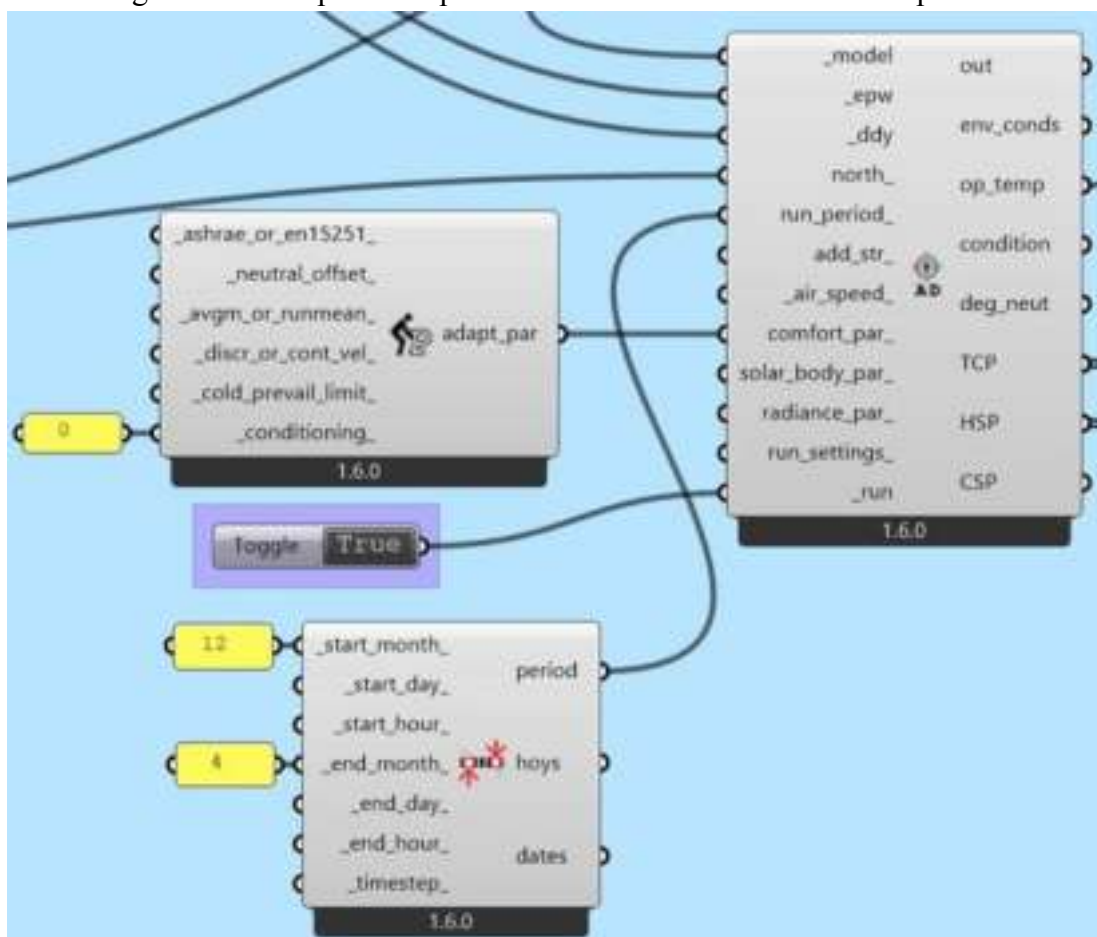
4.1.5. Análises espaciais de conforto térmico adaptativo

Assim como para as análises de desempenho luminoso, o Honeybee possui um componente próprio para análises de conforto térmico. Como definido na metodologia, por se tratar de uma edificação com foco na ventilação natural, foi utilizado apenas o componente espacial de conforto adaptativo (Figura 84). Do componente principal (AD – Adaptive Comfort) foram extraídos três resultados para as análises iniciais: temperatura operativa (op_temp), Percentual de Conforto Térmico (TCP) e Percentual de Sensação de Calor (HSP). Apenas o TCP foi utilizado como objetivo no Wallacei, por ser esse o principal resultado do conforto adaptativo.

Ao componente principal, foram conectados o modelo (_model), o arquivo EPW, o arquivo DDY, o norte, o período das análises utilizando o componente LB Analysis Period (todos os dias e horas de dezembro a abril), e o componente de parâmetros do conforto adaptativo

(AdaptPar) do Ladybug, que traz por padrão os dados da norma ASHRAE-55. Ao AdaptPar também foi conectado um Panel com valor “0”, indicando a ausência de ventilação mecânica para se alcançar os valores de conforto. Assim como para os resultados de desempenho lumínico, foram utilizados os mesmos componentes para visualização dos resultados em planta.

Figura 84 - Componentes para análises de conforto térmico adaptativo.



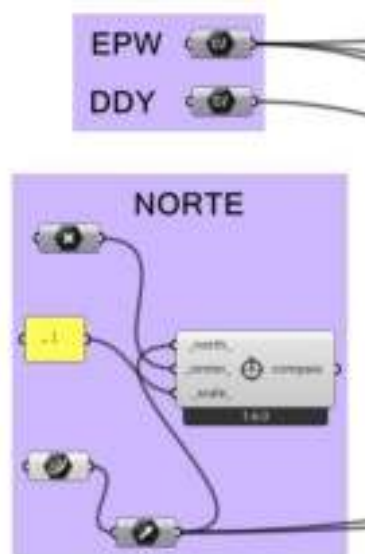
Fonte: Autor (2024).

4.1.6. Definição do norte geográfico e arquivos EPW e DDY

Os principais dados climáticos, necessários para as análises, são fornecidos pelo componente File Path (Figura 85), inserindo arquivos externos EPW e DDY ao Grasshopper. Esses arquivos foram fornecidos pelo website climate.onebuilding.org com a média dos dados climáticos de 2007 a 2021 para Vitória-ES.

Outro dado importante para as análises é a orientação solar, que é feita por meio de um ponto e um vetor. Também foi utilizado o componente Compass para que uma bússola pudesse ser visualizada nas plantas e modelo 3D.

Figura 85 - Arquivos EPW/DDY e componente orientação solar.

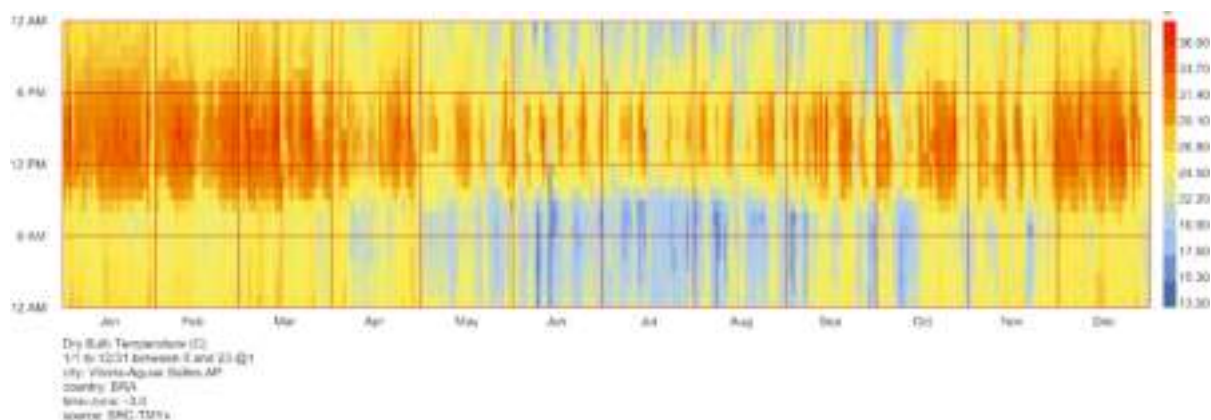


Fonte: Autor (2024).

4.1.7. Gráficos de temperatura e conforto adaptativo externos

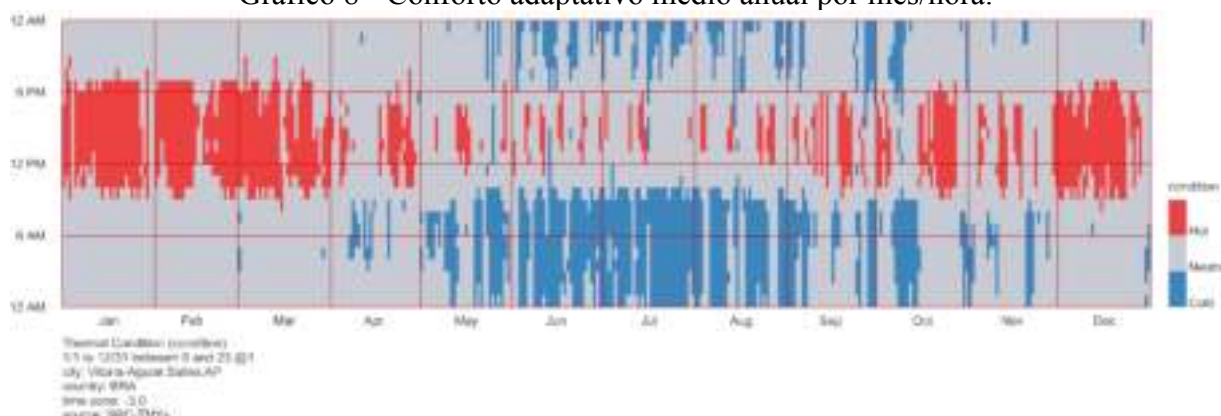
Para determinar o período das análises, identificando os meses de maior calor e frio e sua interferência nos dados de conforto térmico, foram plotados gráficos anuais externos de temperatura (Gráfico 7) e de conforto adaptativo com limite de aceitabilidade de 80% (Gráfico 8) por meio de componentes do Ladybug. Analisando os gráficos, foi possível identificar o período de maior desconforto térmico gerado pelo calor (dezembro a abril), assim como os de maior frio (maio a setembro), corroborando com os dados apresentados anteriormente na metodologia.

Gráfico 7 - Temperaturas médias anuais por mês/hora.



Fonte: Autor (2024).

Gráfico 8 - Conforto adaptativo médio anual por mês/hora.



Fonte: Autor (2024).

De acordo com Projeteer (2023), como apresentado na metodologia, Vitória-ES apresenta desconforto térmico por frio em 19% do ano, o que acabou por influenciar os resultados preliminares, que foram gerados para dados do ano todo. Desta forma, decidiu-se que as análises seriam feitas apenas para os meses mais quentes do ano, já que dificilmente é utilizada ventilação mecânica na região para aquecimento, de forma que, nas situações de frio, é possível alcançar o conforto térmico nesses períodos apenas fechando as janelas ou mudando o tipo de roupa. Também foi possível identificar que, durante os meses mais quentes do ano, o horário de maior desconforto térmico ocorria entre o período de 9h às 19h, mas as análises foram mantidas para todas as horas do dia, de acordo com os dados de ocupação, já que em alguns meses do ano também ocorre desconforto por calor mesmo nos horários noturnos.

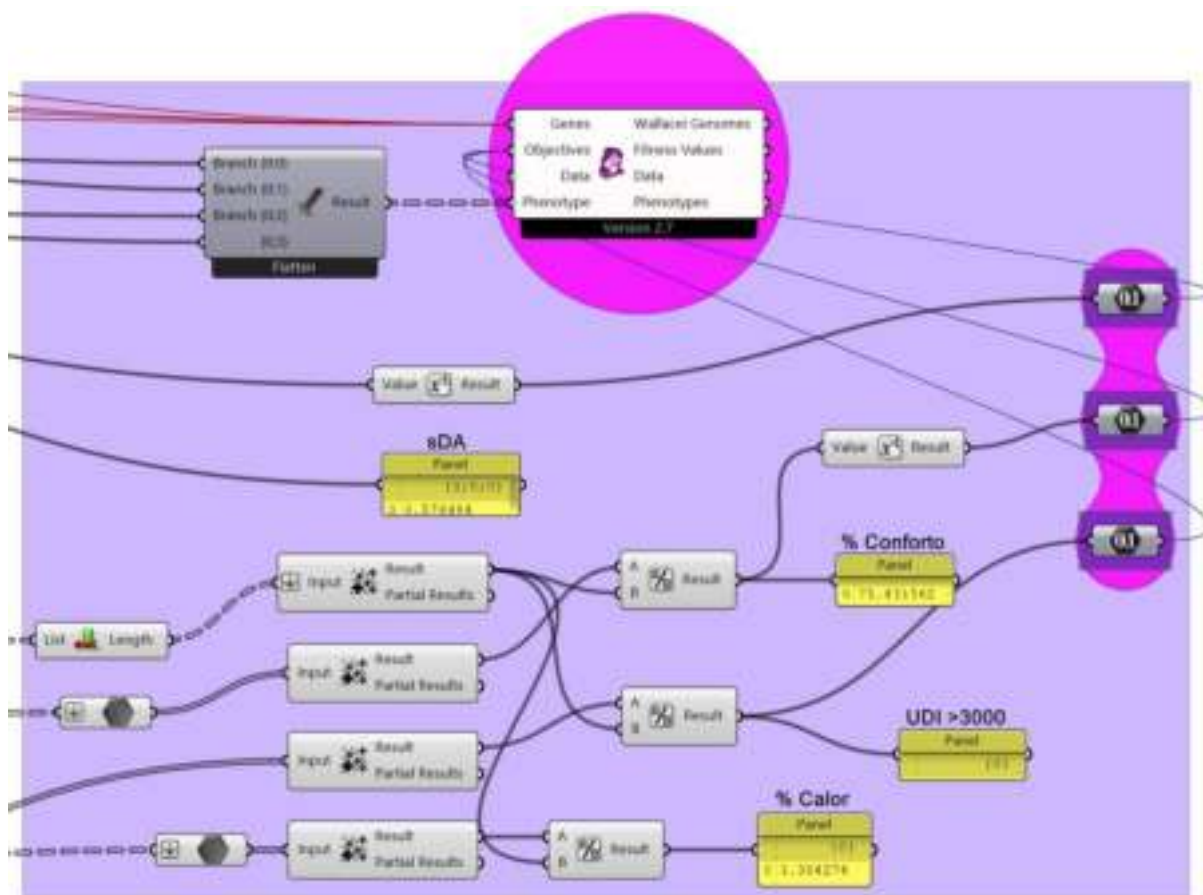
4.1.8. Algoritmo evolutivo multiobjetivo

Como especificado na metodologia, o plugin de algoritmo genético multiobjetivo utilizado foi o Wallacei. O componente principal e seus objetivos podem ser visualizados na Figura 86 em rosa. Foram conectados ao componente principal: variáveis paramétricas aos Genes, objetivos (sDA, percentual de conforto térmico e percentual de UDI>3000 lux) aos Objectives e as superfícies geradas pelas variáveis paramétricas ao Phenotype por meio do componente Entwine (combina uma coleção de fluxo de dados).

Os fenótipos são importantes, pois ao selecionar e exportar a geração desejada dentro do plugin Wallacei, é por meio destes que os dados retornam para o Grasshopper. Retornados os dados, as análises ambientais podem ser realizadas para a geração em específico e seus resultados visualizados no modelo 3D Rhino. Os dados que o projetista deverá utilizar ao retornar para o

modelo arquitetônico deverá ser exatamente aqueles ligados ao fenótipo, que são os valores de cada ponto da curva presentes no “gene pool” das variáveis paramétricas.

Figura 86 - Componente principal do Wallacei e objetivos.



Fonte: Autor (2024).

Plugins de análise multiobjetivo, disponíveis para o Grasshopper, apenas aceitam um único valor do tipo número, e sempre tentam minimizar esses valores ao realizar as análises. Desta forma, para os objetivos de sDA e conforto, onde o desejado era a maximização de valores, foi necessário aplicar uma função inversa (*one over x*). Ainda, para os resultados de conforto e UDI>3000 lux (onde foi gerado um valor para cada ponto da malha), foi necessário somar os resultados obtidos para cada ponto e dividi-los pela quantidade de pontos, a fim de retornar um valor único (média dos valores) a ser inserido no plugin.

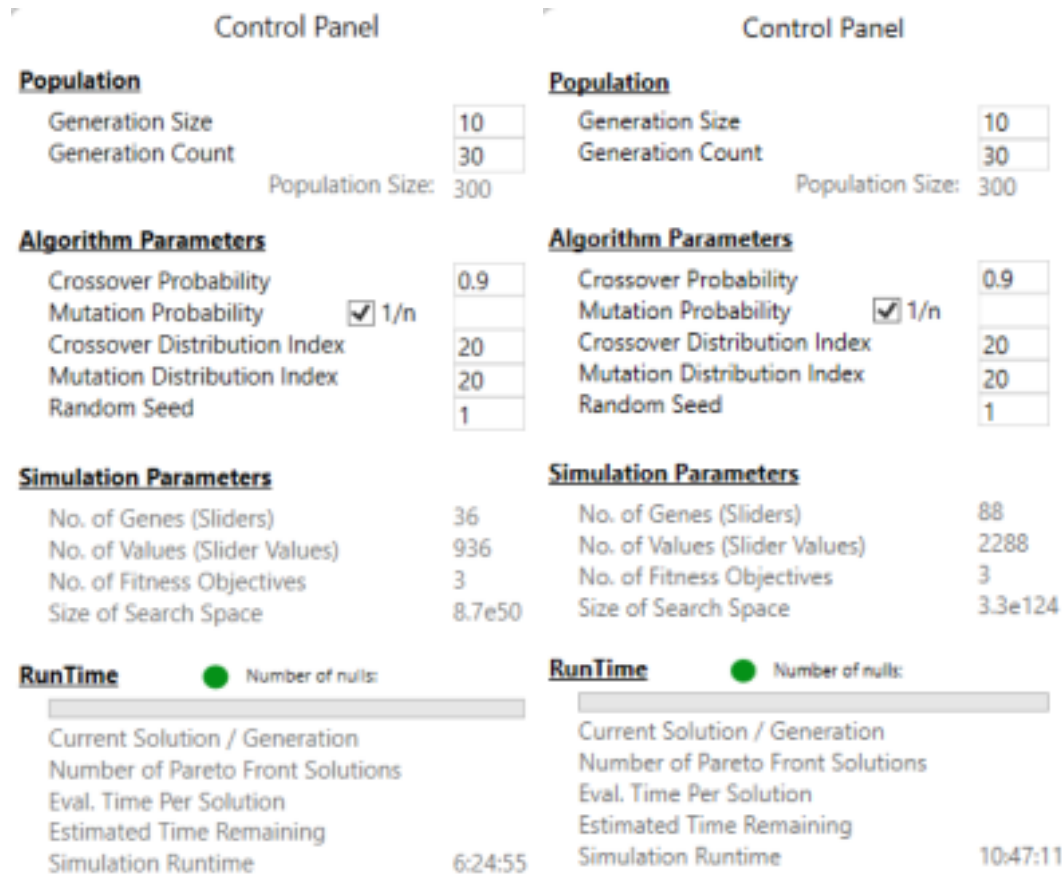
A função *fitness*, composta pelos objetivos, foi encontrar o maior valor de sDA (encontrado no menor elemento de proteção solar) e o maior valor de Conforto Térmico (encontrado no maior elemento de proteção solar) resultando em um elemento de proteção solar horizontal com área otimizada. Para adicionar peso aos resultados de conforto térmico e habilitar o gráfico de pesos

do Wallacei (mínimo de 3 objetivos), foi adicionado o objetivo de minimizar valores de UDI> 3000 lux, pois ambos tendem a maximizar valores de área do elemento de proteção. No Wallacei é possível inserir um número indeterminado de objetivos, mas, segundo seus criadores, o ideal é que o número de objetivos seja de no máximo 5 ou 6, pois acima disso os valores podem não ser representativos ou, ainda, indesejados.

4.2. Gerações selecionadas

A Figura 87 apresenta o painel de controle do Wallacei, onde foram definidos a população (tamanho da geração e número de gerações) e os parâmetros do algoritmo (mantidos no padrão do Wallacei). O tempo total das análises foi de aproximadamente 6 horas e 26 minutos para o modelo do pavimento tipo e 10 horas e 47 minutos para o modelo com oito pavimentos.

Figura 87 - À esquerda o Painel de Controle para modelo pavimento tipo e à direita o de oito pavimentos.



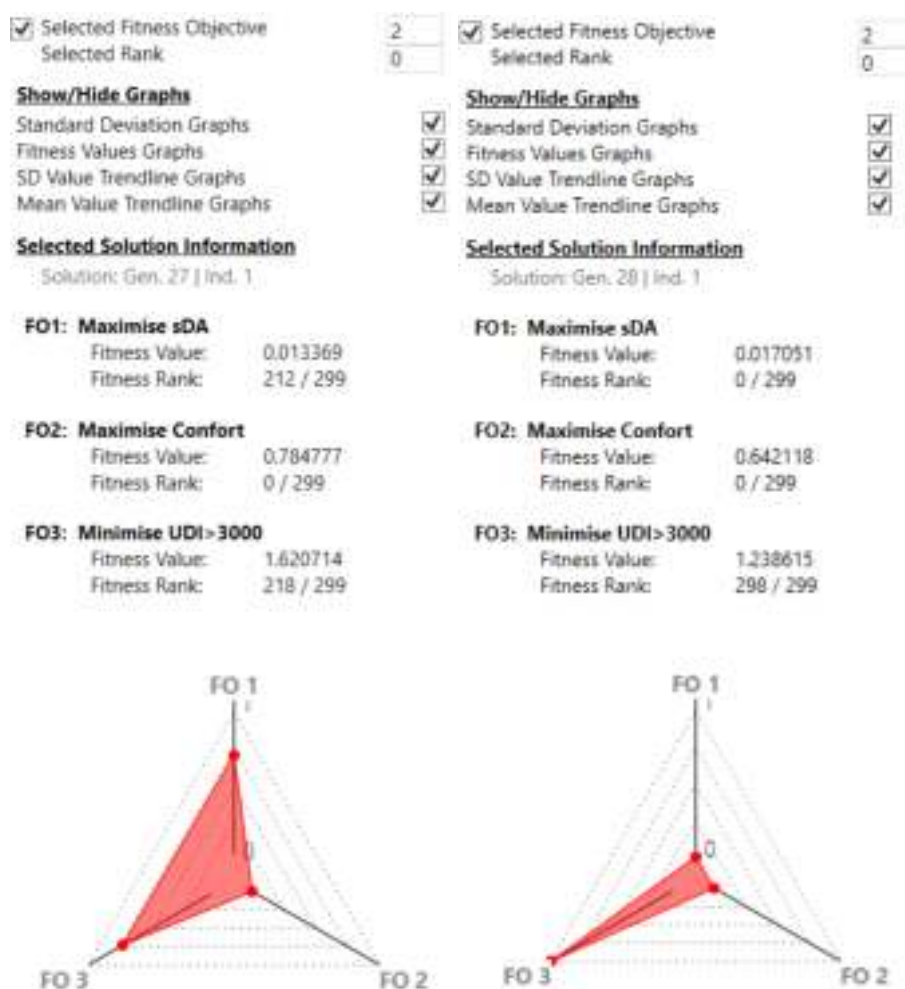
Fonte: Autor (2024).

As últimas gerações de fato apresentaram as melhores soluções para os dois primeiros objetivos, sendo que a geração escolhida como sendo ideal foi a de 27/29 (indivíduo 1/9) para o caso das

análises do pavimento tipo e 28/29 (indivíduo 1/9) para as análises do modelo de oito pavimentos. Desta forma, cabe ressaltar que nem sempre a última geração será a melhor adaptada, já que caberá ao projetista escolher qual o peso (força) dará para os objetivos que considerar mais importantes. No Wallacei, é possível escolher o objetivo (*Fitness Objective*) e seu *rank* (onde zero é o valor com maior “força”).

Para ambos os modelos (pavimento tipo ou oito pavimentos) o *Fitness Objective* selecionado foi o conforto térmico com força máxima, por se tratar do principal objetivo. No caso do modelo do pavimento tipo, o *Fitness Rank* = 0 do conforto térmico retornou *Fitness Rank* = 212 e 218 para sDA e UDI>3000, respectivamente, enquanto no modelo de oito pavimentos retornou *Fitness Rank* = 0 (sDA) e 298 (UDI>3000). Os *Fitness Objective* selecionados e os dados resultantes da geração podem ser identificados na Figura 88. O plugin ainda retorna um gráfico com três eixos (em vermelho) que facilita a visualização das forças da geração selecionada.

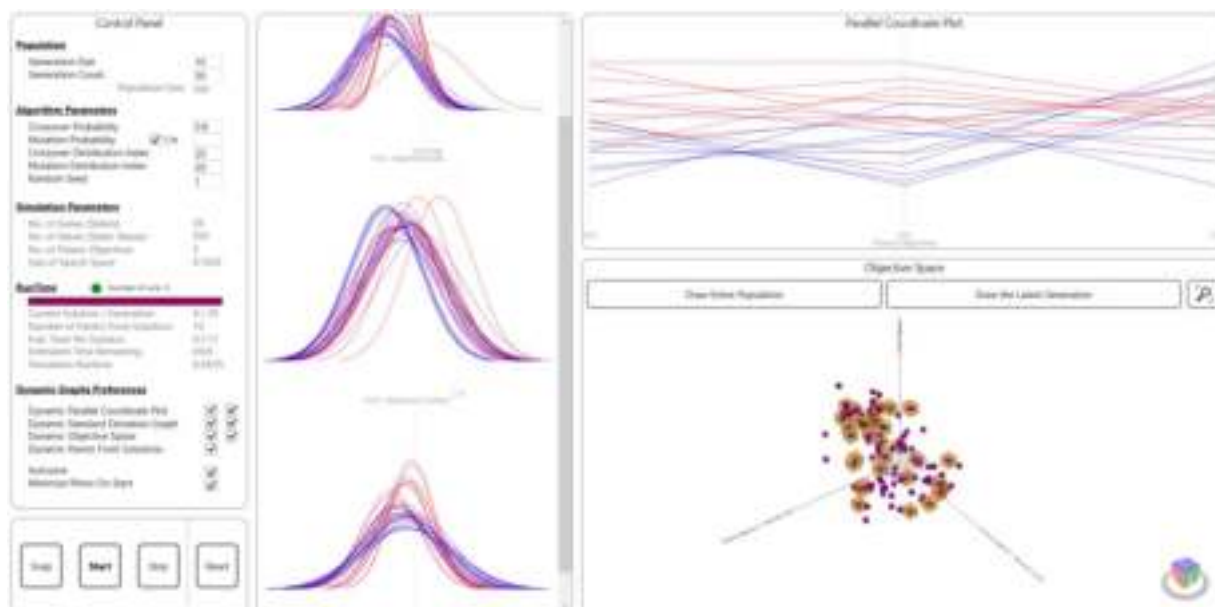
Figura 88 - À esquerda ranking de objetivos para o modelo pavimento tipo, e à direita para oito pavimentos.



Fonte: Autor (2024).

Durante as análises o Wallacei retorna, em tempo real, gráficos de desvio padrão (possibilitando visualizar o grau de mutação entre gerações), coordenadas paralelas entre objetos e um gráfico de dispersão tridimensional (os eixos são os objetivos). Estes gráficos podem ser observados na Figura 89, na mesma tela de Painel de Controle.

Figura 89 - Interface visual do Wallacei com gráficos variados para o pavimento tipo.



Fonte: Autor (2024).

4.3. Análises do pavimento tipo

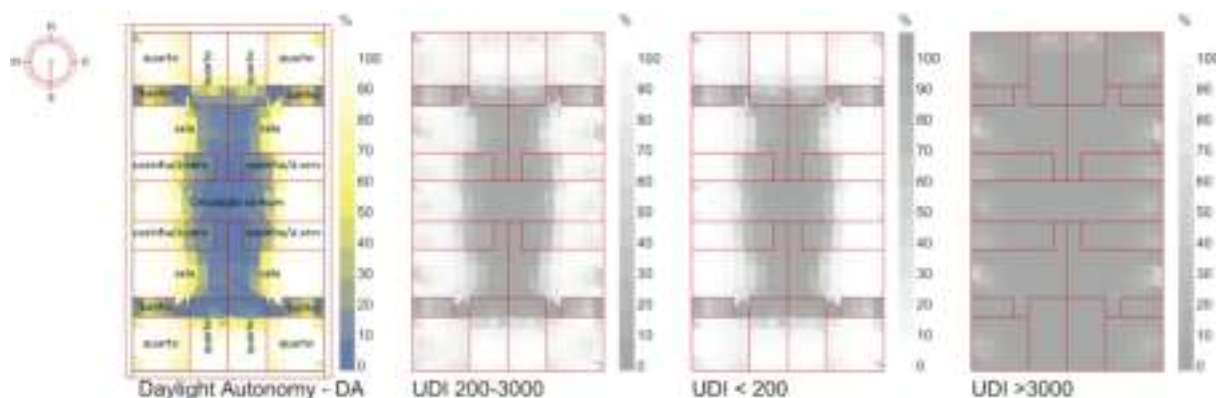
Como especificado na metodologia, foram realizadas análises do pavimento tipo para os elementos de 0,5 metros de largura, 3 metros e para o Sistema generativo (SG). Inicialmente, os dados foram analisados separadamente por meio de mapas de calor para DA, UDI 200-3000 lux, UDI<200 lux, UDI>3000 lux, temperatura operativa, porcentagem de conforto térmico e porcentagem de calor. Após, alguns desses dados foram selecionados para um comparativo entre os sistemas utilizando gráficos e, adicionados também, os dados de área dos elementos.

4.3.1. Análises para 0,5m

A Figura 90 apresenta os resultados de desempenho lumínico em planta para cada ponto da malha do elemento de 0,5 metros para todas as orientações. A primeira imagem (da esquerda para direita) apresenta os dados de DA no pavimento, onde é possível perceber que os cômodos mais profundos (cozinha, sala e um dos quartos), possuem autonomia de luz diurna insuficientes, apesar de que o valor de sDA médio (64,62%) para o pavimento tenha ficado acima do normalmente aceito (55%), mas ainda assim não atendendo aos 75% de referência da

IES LM-83. Os banheiros também apresentaram valores abaixo do aceitável pelo tamanho da janela.

Figura 90 – Mapas de calor da planta do pav. tipo de desempenho lumínico para 0,5m.



Fonte: Autor (2024).

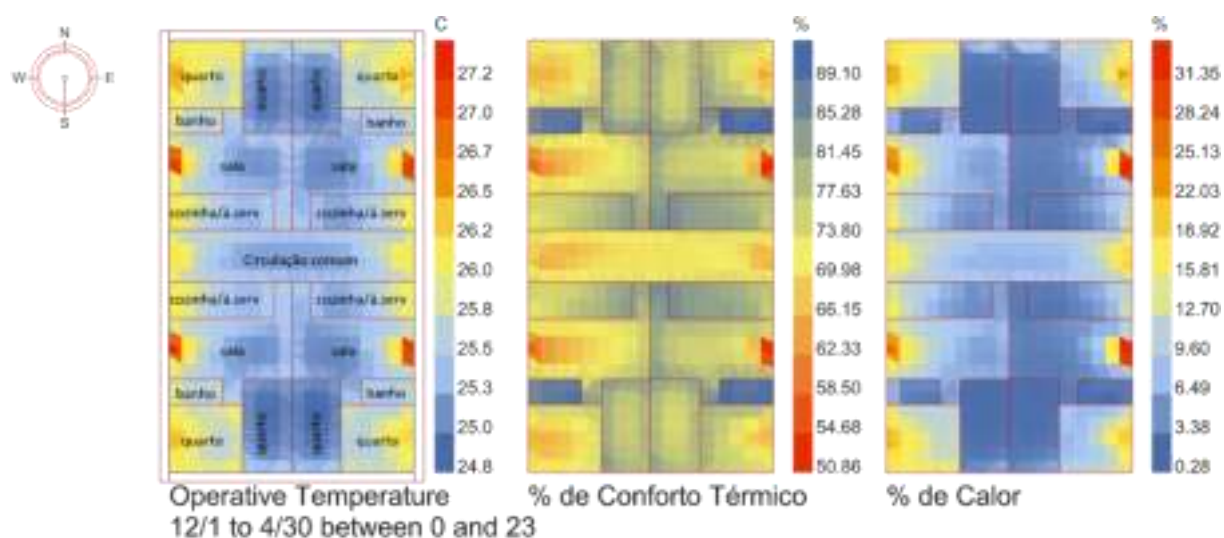
Os elementos sombreadores de 0,5m influenciam pouco nos valores pelo seu tamanho reduzido. Desta forma, é possível admitir que a solução para a insuficiência de autonomia de luz natural passaria por revisar, principalmente, a profundidade dos cômodos ou, ainda, o tamanho das esquadrias (mas em alguns casos limitado pela largura do cômodo, como no caso da cozinha/área de serviço). Como o objetivo desta pesquisa é investigar a variação entre os valores das proteções solares, decidiu-se por manter as métricas iniciais das esquadrias, definidas na metodologia.

Já o valor médio de UDI, para a faixa entre 200-3000 lux, ficou em 59,94% (abaixo dos 75% estabelecidos na metodologia), enquanto os valores abaixo de 200 lux ficaram na média de 38,96%, e a UDI acima de 3000 lux em 3,10%. Assim com para o valor de sDA, os resultados para UDI apresentaram insuficiência de iluminância para os cômodos profundos.

Já para o conforto térmico, os melhores resultados foram inversamente proporcionais aos de desempenho lumínico, sendo estes presentes, pelo menos em parte, nos cômodos mais profundos (além daqueles orientados para fachadas com menor insolação). Na Figura 91, a primeira imagem apresenta os valores médios de temperatura operativa no pavimento (mínima de 24,8°C e máxima de 27,2°C), onde é possível perceber que os cômodos mais afetados pelo desconforto foram aqueles voltados para fachadas com maior insolação (leste e oeste), com destaque para a região das portas das varandas.

O mapa de calor (representado ao centro em vermelho) apresenta a porcentagem de conforto térmico durante o período de análise (mínima de 50,86%, máxima de 89,10% e média de 74,76%, sendo o aceitável pela ASHRAE 55 valores acima de 80%). Desta forma, é possível concluir que haveria a necessidade de ventilação mecânica para se atingir os valores mínimos de conforto no pavimento. A terceira imagem ainda apresenta o percentual de calor, apresentando um máximo de 31,35%.

Figura 91 - Mapas de calor da temperatura operativa e conforto para elemento de 0,5m.

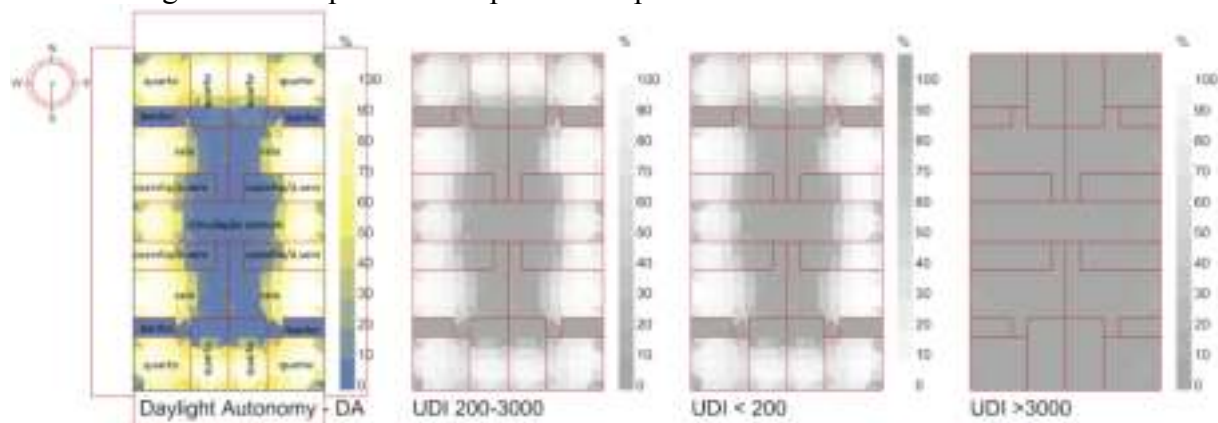


Fonte: Autor (2024).

4.3.2. Análises para 3m

Como esperado, os valores de desempenho luminoso para o elemento de 3m, apresentados na Figura 92, foram inferiores aos do elemento de 0,5m. Apresentou-se valores médios de sDA de 53%, UDI 200-3000 lux de 46,16%, UDI<200 lux de 53,58% e UDI>3000 lux de 0,26%.

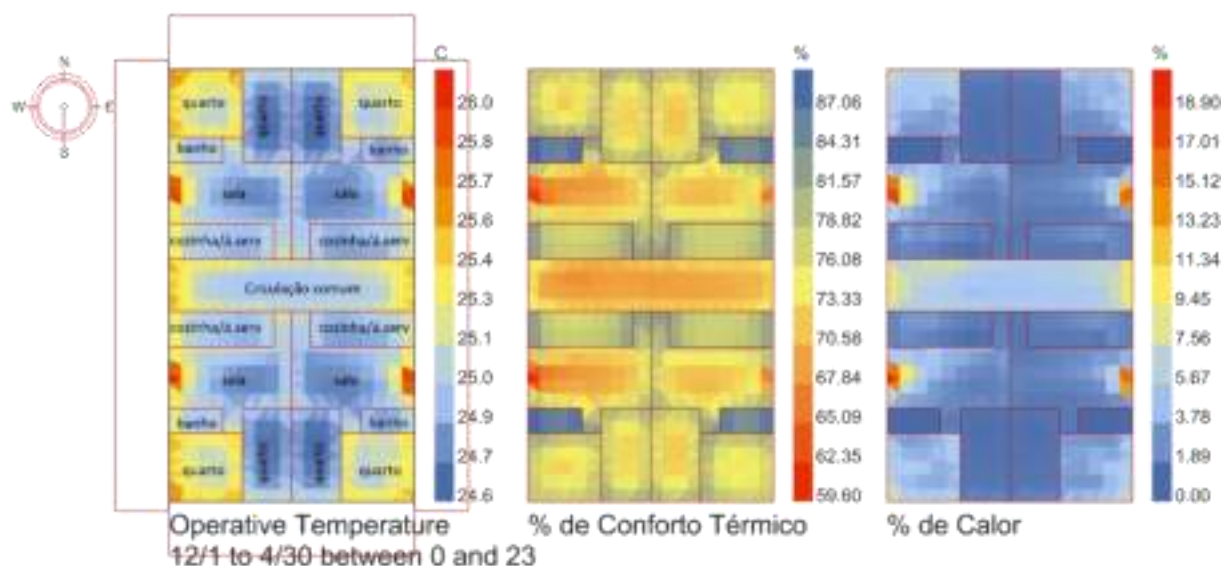
Figura 92 - Mapas de calor para desempenho lumínico do elemento de 3m.



Fonte: Autor (2024).

Já o desconforto térmico pelo calor apresentou melhoras significativas (Figura 93), com redução de 1,2 graus na média máxima das temperaturas operativas. O percentual de conforto térmico se manteve praticamente estável, em 74,75%, isso se deu pelo desconforto térmico gerado pelo frio, mesmo com as análises sendo realizadas para os meses mais quentes do ano. Mas, com as temperaturas médias mínimas operacionais se mantendo acima de 24°C, entende-se que o desconforto pelo frio seja facilmente mitigado pelo fechamento das aberturas. Analisando o mapa do percentual de calor, é possível perceber uma redução significativa para 18,90%, uma redução de 39,71% em relação ao elemento de 0,5m. Para minimizar ainda mais o impacto da sensação de frio nos resultados de conforto térmico adaptativo, é possível realizar as análises apenas para os horários mais quentes do dia.

Figura 93 - Mapas de calor da temperatura operativa e conforto para elemento de 3m.

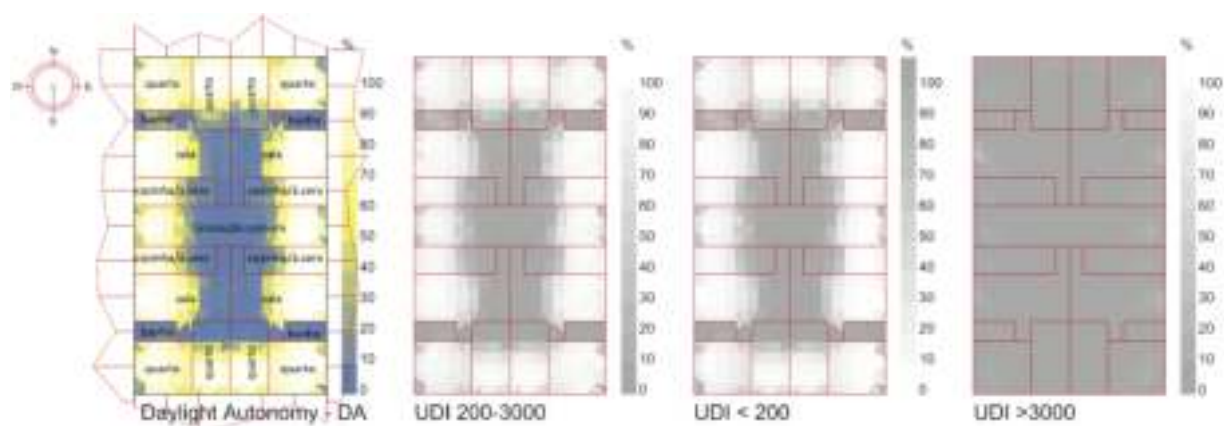


Fonte: Autor (2024).

4.3.3. Resultados do sistema generativo

Seguindo a sequência lógica dos resultados já apresentados, as análises realizadas para o modelo SG (Figura 94) retornaram valores intermediários entre os dois elementos citados anteriormente. Nas análises de desempenho lumínico, o SG apresentou valores médios de sDA de 57,44%, UDI 200-3000 lux de 51,50%, UDI<200 lux de 47,79% e UDI>3000 lux de 0,71%. Valores significativamente melhores que os do elemento de 3m.

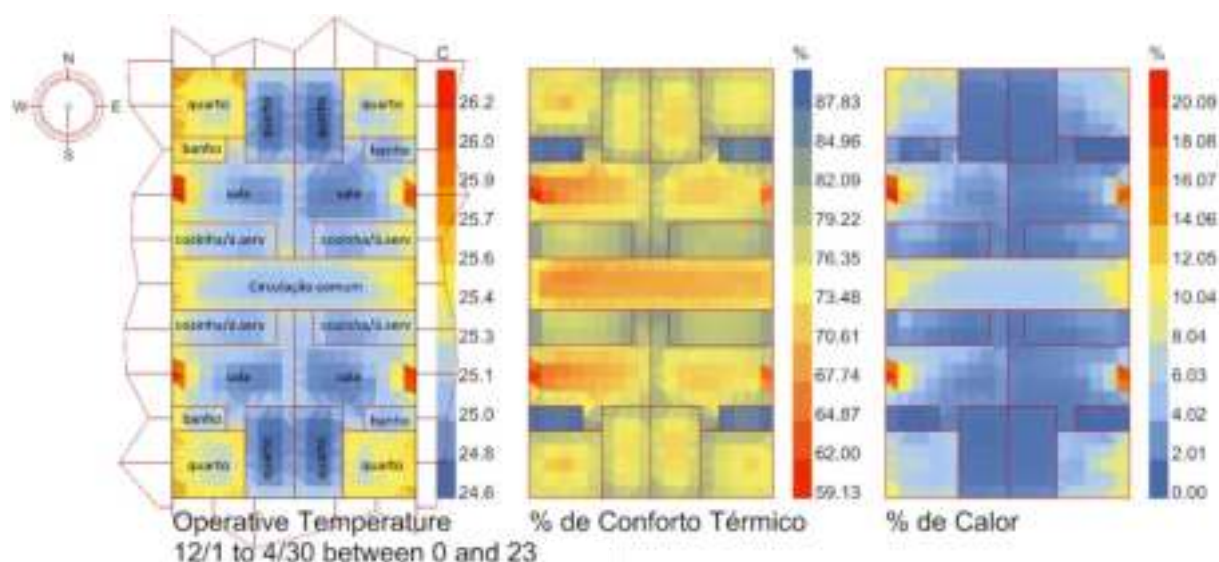
Figura 94 – Mapas de calor de desempenho lumínico para elemento do SG.



Fonte: Autor (2024).

Já para o conforto térmico (Figura 95), o mapa de calor da temperatura operativa apresentou média máxima superior ao elemento de 3m de apenas 0,2°C, enquanto o percentual do conforto térmico foi ligeiramente superior (75,18%), pelo menor desconforto pelo frio. Ainda, o percentual máximo de calor, encontrado na região das portas da sala, foi de 20,09%, 5,92% acima do elemento de 3m e 35,92% abaixo do de 0,5m.

Figura 95 - Mapas de calor de temperatura operativa e conforto para elemento do SG.

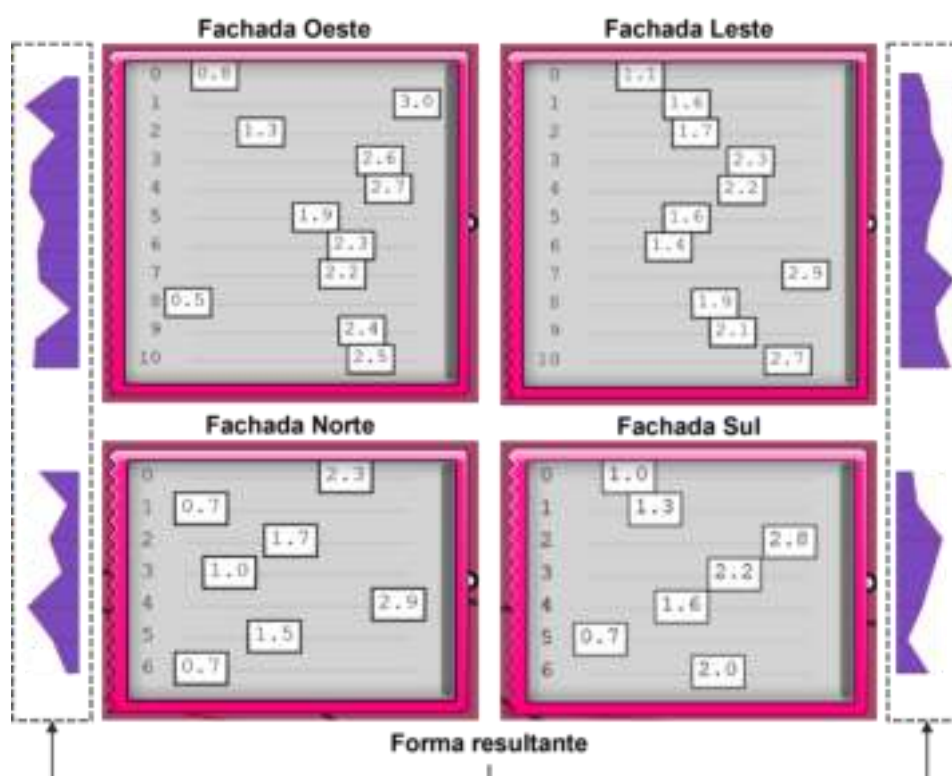


Fonte: Autor (2024).

Após selecionada a geração do SG, o Wallacei, por meio dos fenótipos, retornou os valores das variáveis paramétricas para os “genes pools” (Figura 96). É possível observar que o tamanho máximo de 3 metros só foi atingido em um ponto para a fachada oeste, coincidindo com o eixo da janela de um dos quartos. Os menores valores apresentados foram aqueles onde os pontos

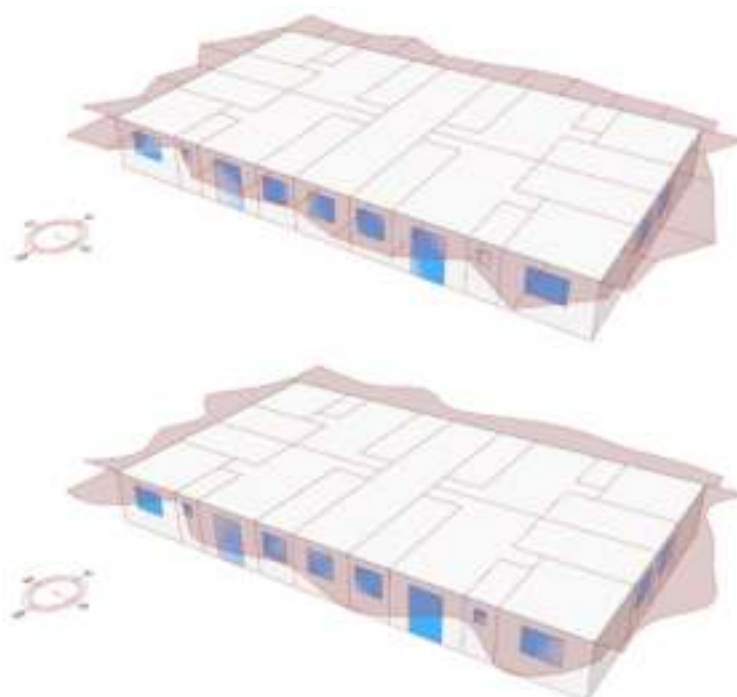
coincidiam com fachadas cegas ou janelas dos banheiros. Ainda, a forma resultante do modelo, com e sem efeito de abaulamento de arestas pode ser visualizado na Figura 97.

Figura 96 – Resultados da variável paramétrica para cada fachada.



Fonte: Autor (2024).

Figura 97 – Forma resultante com e sem efeito de abaulamento de arestas.



Fonte: Autor (2024).

Para efeito prático, foram geradas imagens renderizadas de uma edificação hipotética com as soluções geradas pelo SG para o pavimento tipo (Figura 98 e Figura 99). No pavimento térreo, sob pilotis, foi adicionada fachada ativa com possibilidade de abrigar lojas comerciais, e dado novo recuo para criar área de circulação e criar maior proteção solar para uma fachada envidraçada. A edificação foi repetida em mais um módulo compondo o que seria um condomínio. As esquadrias do pavimento tipo foram fechadas com venezianas de madeira apenas para efeito estético e para simplificar a modelagem.

Figura 98 – Imagem renderizada de edificação baseada no resultado do SG.



Fonte: Autor (2024).

Figura 99 – Imagem renderizada com vista lateral da edificação.

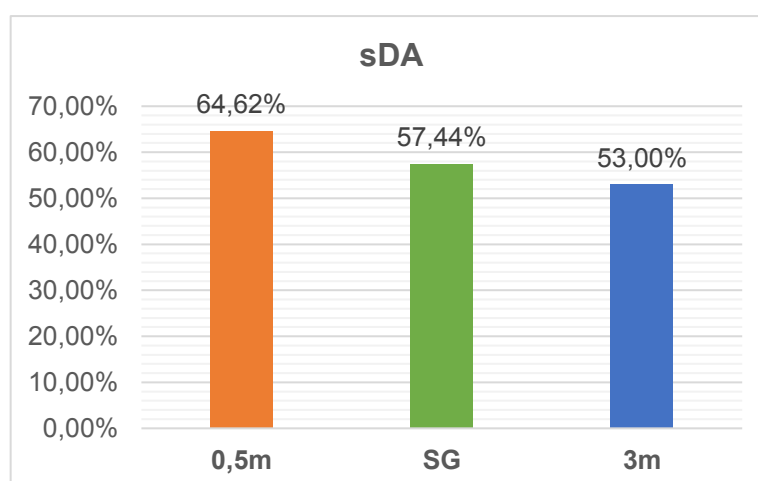


Fonte: Autor (2024).

4.3.4. Comparativo entre soluções

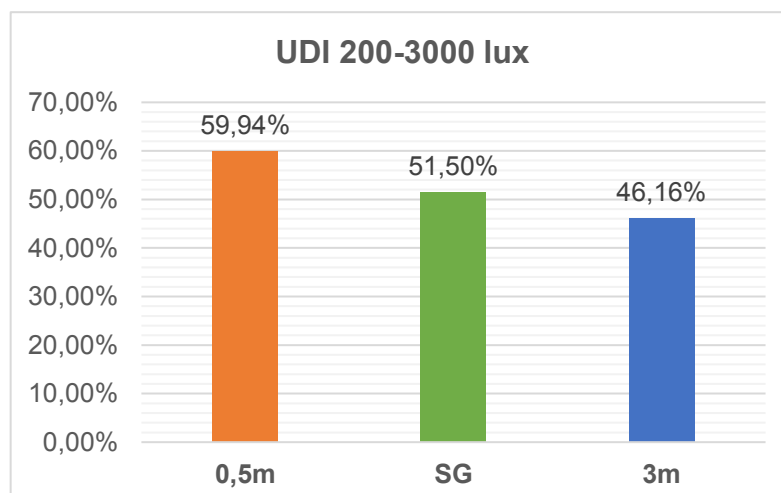
De forma a identificar a eficácia do sistema generativo, foram extraídos e comparados, por meio de gráficos de barra, os dados de sDA, percentual de UDI 200-3000 lux, percentual de conforto térmico, percentual de desconforto por calor e área dos elementos sombreadores. No Gráfico 9 é possível observar o comparativo entre as sDA's dos três sistemas, onde o SG obteve valor intermediário em relação aos outros dois elementos. O mesmo pode ser conferido no Gráfico 10 para os resultados de UDI 200-3000 lux. Em ambos os resultados, todos os elementos ficaram abaixo dos 75% definidos na metodologia, o que exige, como citado anteriormente, mudanças no tamanho das esquadrias e na profundidade dos cômodos em qualquer solução. Ainda, o elemento de 3m ficou abaixo dos 55% para sDA, tido como aceitável.

Gráfico 9 - Comparativo entre os resultados de sDA.



Fonte: Autor (2024).

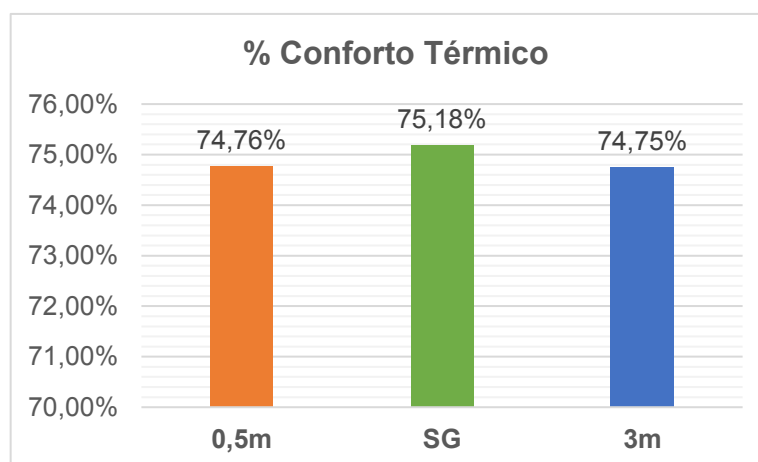
Gráfico 10 - Comparativo entre os resultados de UDI 200-3000 lux.



Fonte: Autor (2024).

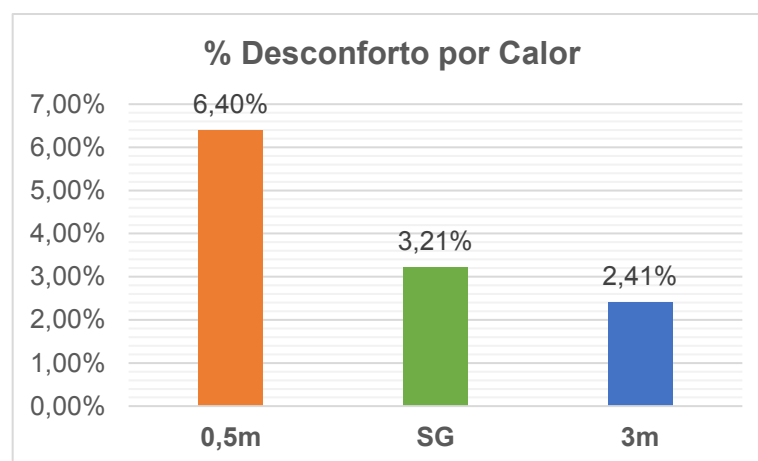
Já para o Gráfico 11 de conforto térmico, os resultados ficaram próximos, principalmente pelo desconforto gerado pelo frio nos maiores elementos. Desta forma, como explicado anteriormente, decidiu-se por gerar dados do desconforto térmico gerado pelo calor, já que o frio na região pode ser facilmente mitigado pela mudança de roupa pelos usuários ou fechamento das aberturas. Assim, apesar de no conforto térmico geral, o SG ter retornado o melhor valor, analisando o Gráfico 12 é possível perceber que o elemento de 3 metros ainda resultava em melhores valores, mesmo que com pouca diferença.

Gráfico 11 - Comparativo entre os resultados de conforto térmico.



Fonte: Autor (2024).

Gráfico 12 - Comparativo entre os resultados desconforto por calor.



Fonte: Autor (2024).

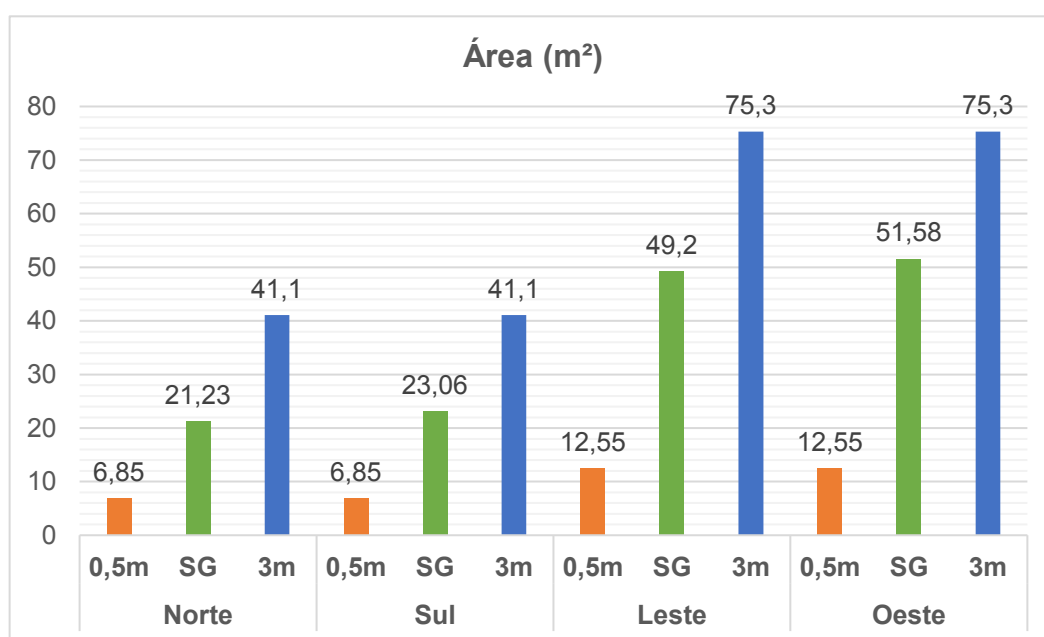
Mesmo com o maior elemento de proteção solar, o conforto térmico não atinge os 80% mínimos definidos pela ASHRAE 55. Pelo lado do desconforto por calor, isso pode ser justificado, pois mesmo um elemento de 3m de largura não seria suficiente para impedir o bloqueio total da radiação solar nas fachadas leste e oeste, principalmente em aberturas que vão até o piso, como

em portas de varandas. Uma das soluções poderia ser a utilização de múltiplos brises soleil horizontais ou verticais ou, ainda, persianas internas (solução mais comum), ainda que o desempenho lumínico fosse prejudicado.

Outra métrica de eficiência adotada nesta pesquisa foram os resultados da área quadrada dos elementos de proteção solar, onde os elementos gerados pelo sistema generativo (SG), mesmo com valores de conforto térmico semelhantes ao elemento de tamanho máximo (visto nos resultados anteriores), resultaria em um gasto de material relativamente menor, como é possível observar no Gráfico 13. Um gráfico resumo também foi apresentado (Gráfico 14), onde identificou-se que, somando os dados para todas as fachadas, o SG pode resultar em uma economia de até 37,68% de área de elemento construído em relação ao elemento de 3 metros (100%)

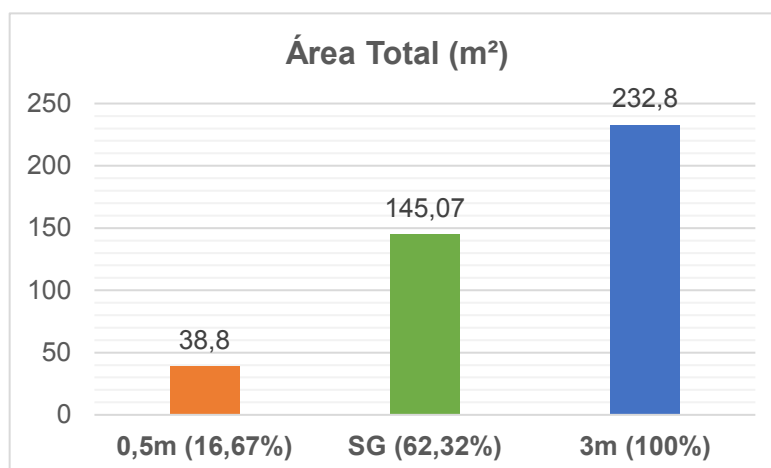
É importante ressaltar que não se notou diferença significativa entre a área dos elementos para as fachadas norte e sul, o que pode ser explicado pelo período em que as análises foram realizadas, pois em parte dos meses mais quentes a incidência solar na fachada norte pode ser menor do que nos meses mais frios. É provável, portanto, que se as análises tivessem sido realizadas para o ano todo, a área dos elementos da fachada norte fosse relativamente maior que os da fachada sul, mas que, novamente, a diferença também poderia ser mitigada pelo desconforto térmico gerado pelo frio nos meses com maior incidência solar na fachada norte.

Gráfico 13 - Comparativo entre as áreas dos elementos por fachada.



Fonte: Autor (2024).

Gráfico 14 - Comparativo entre a área total dos elementos.



Fonte: Autor (2024).

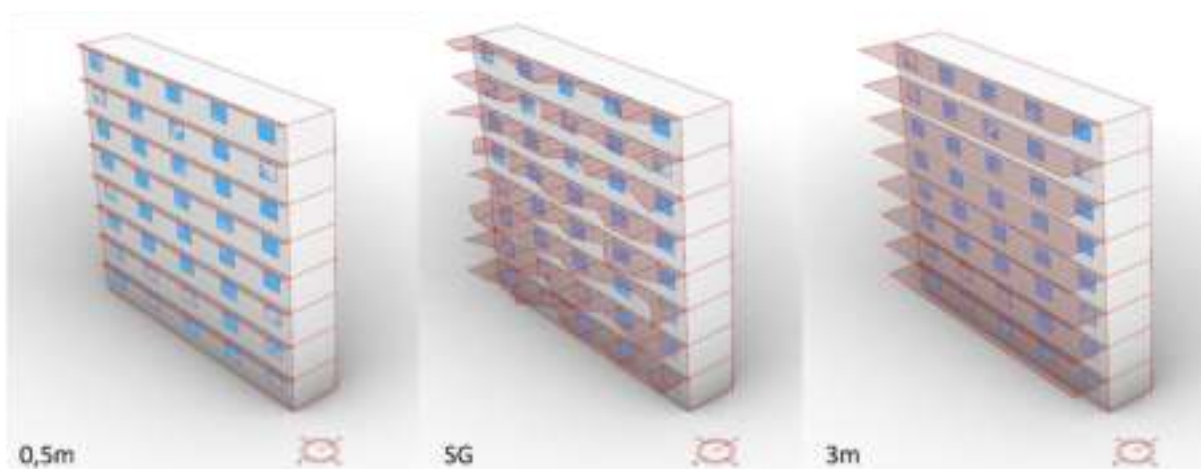
4.4. Análises para oito pavimentos

Na tentativa de investigar o efeito de auto-sombreamento descrito por Chan (2015) para edificações de múltiplos pavimentos com varandas, foram realizadas análises para um modelo reduzido, a fim de otimizar o tempo das análises. Este modelo consiste em uma edificação de oito pavimentos com planta livre e janelas retangulares igualmente espaçadas na fachada.

As análises foram realizadas para uma fachada oeste (maior insolação) com 24,10m de comprimento. Foram geradas janelas igualmente espaçadas em um cômodo único com 4,10m de profundidade. A curva da variável paramétrica foi dividida em 11 pontos igualmente espaçados, e foi criada uma variável para cada pavimento, de forma independente.

Os dados do SG foram comparados, como no pavimento tipo, com elementos de proteção de 0,5m e 3m, como demonstrado na Figura 100. Para avaliar o efeito de auto-sombreamento, foi realizado um comparativo entre as áreas dos elementos sombreados criados, que, se confirmado, pavimentos inferiores deverão retornar área menor do que os pavimentos superiores. Também foram realizados comparativos utilizando as mesmas métricas do pavimento tipo: sDA, UDI 200-3000, percentual de conforto térmico e percentual de desconforto pro calor.

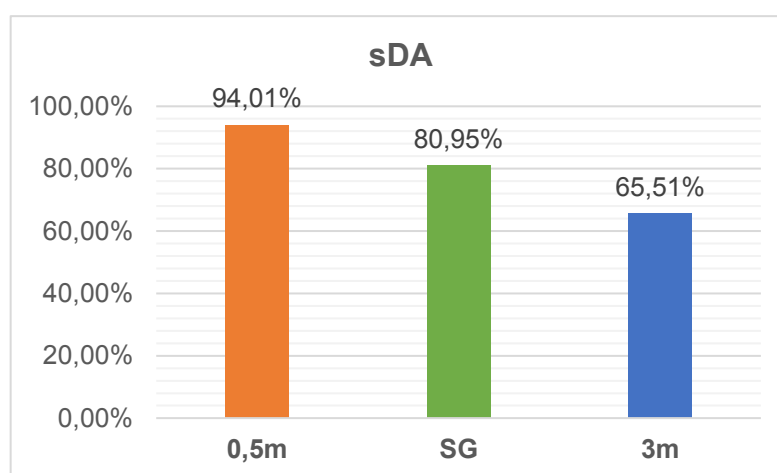
Figura 100 - Modelo 3D da edificação com elementos 0,5m, SG e 3m.



Fonte: Autor (2024).

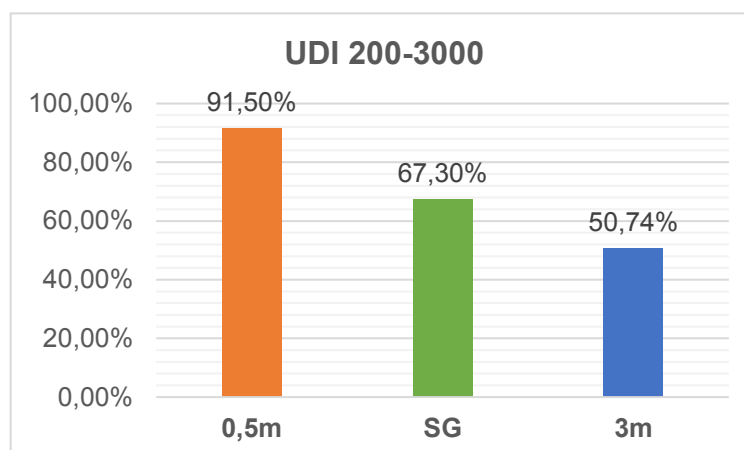
Diferente do modelo pavimento tipo utilizado nas análises anteriores, a planta do modelo reduzido apresenta um cômodo único de profundidade reduzida, o que resultou em valores maiores de sDAs (Gráfico 15) para 0,5m e o SG, mesmo com janelas de mesmo tamanho. Neste caso, o SG apresentou valores acima dos 75% mínimos definidos na metodologia para sDA. Já para UDI 200-3000 lux, o SG apresentou valores de 67,30% para o e 91,5% para 0,5m. Os valores de UDI podem ser observados no Gráfico 16.

Gráfico 15 - Comparativo entre os resultados de sDA.



Fonte: Autor (2024).

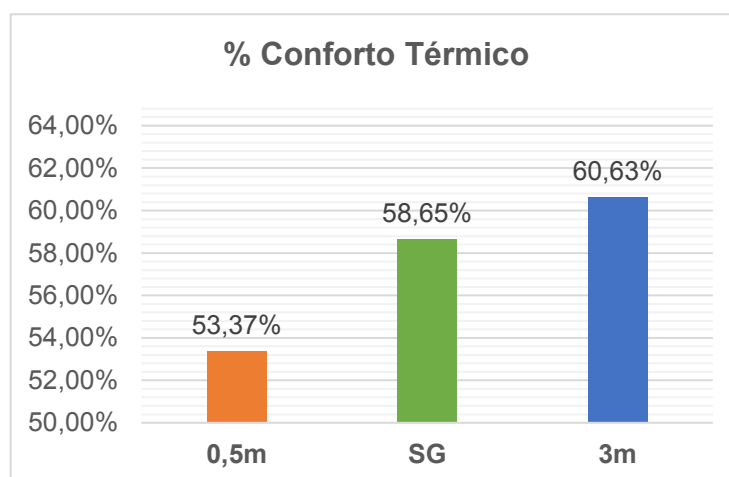
Gráfico 16 - Comparativo entre os resultados de UDI 200-3000 lux.



Fonte: Autor (2024).

Já o conforto térmico (Gráfico 17) foi substancialmente prejudicado em todos os elementos. Isso se deu pela radiação solar direta incidente na cobertura e fachadas cegas laterais, que na ausência de material isolante, não são capazes de mitigar os efeitos de condução de calor para o ambiente interno. Desta forma, não foi possível identificar o efeito de auto-sombreamento, pois mesmo o maior elemento de proteção não foi capaz de reduzir substancialmente o calor para os pavimentos superiores (como mostra a Figura 101), onde a temperatura máxima média chegou a 27,9°C.

Gráfico 17 - Comparativo entre os resultados de conforto térmico.

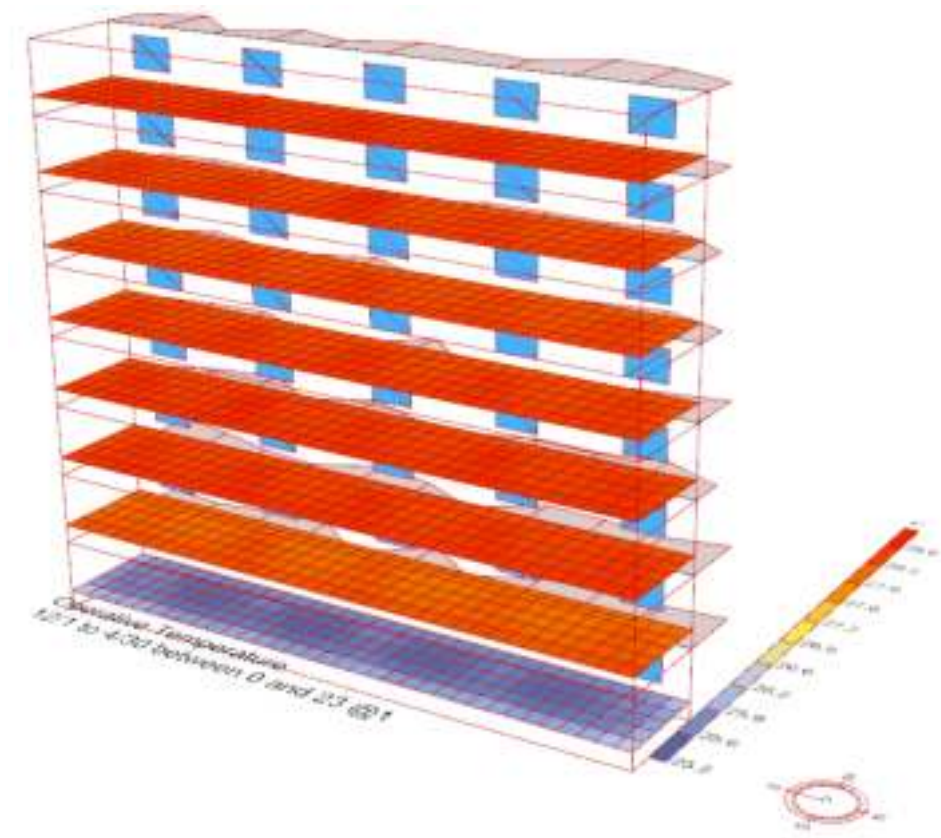


Fonte: Autor (2024).

O SG chegou a reduzir o tamanho da proteção solar para os dois últimos pavimentos, como pode ser observado no Gráfico 18, que compara a área dos elementos por pavimento. Especula-se que alternância de valor das áreas entre pavimentos (“efeito onda”), com pavimentos 2 e 6

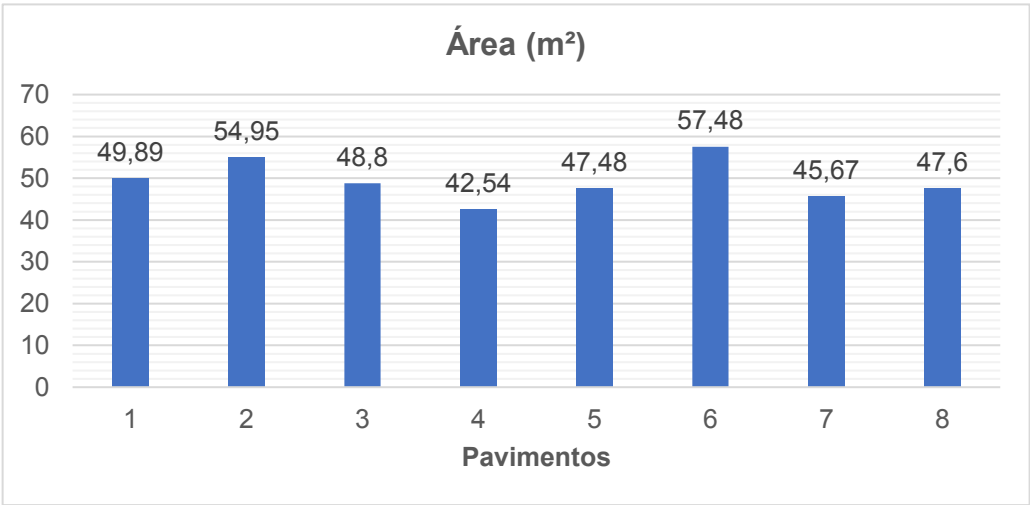
retornando os maiores valores, seja por efeito do algoritmo evolutivo em otimizar a área como um todo, possivelmente não tendo relação com o efeito de auto-sombreamento.

Figura 101 - Modelo 3D com temperatura operativa média por pavimento.



Fonte: Autor (2024).

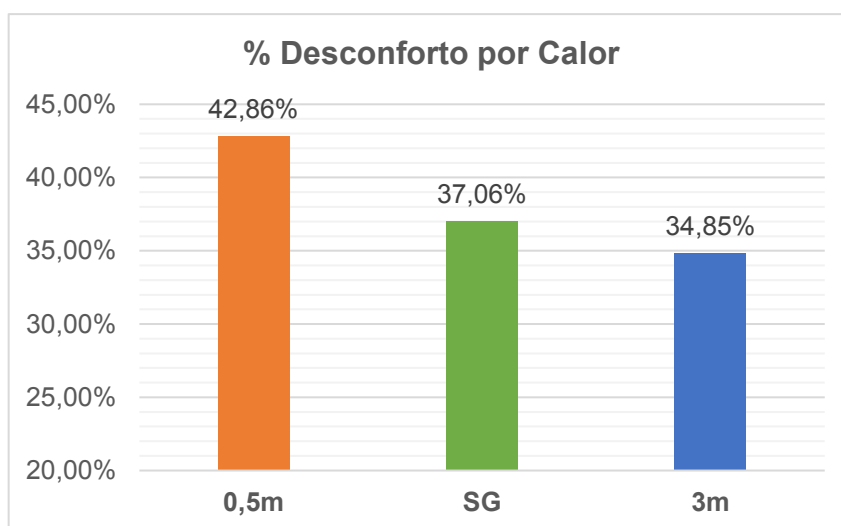
Gráfico 18 - Comparativo entre a área dos elementos por pavimento na fachada Oeste.



Fonte: Autor (2024).

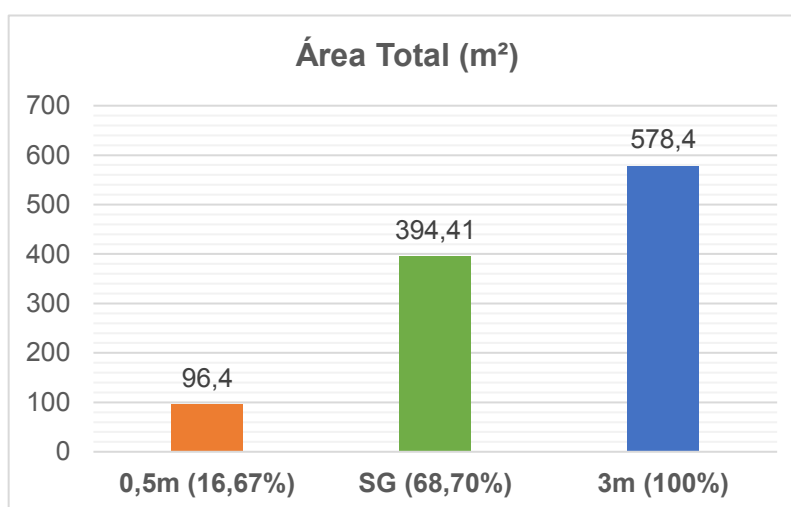
Apesar dos elementos SG e 3m terem reduzido em até 5,8% o desconforto por calor no pavimento, ainda assim o menor desconforto foi de 34,85%, como pode ser visualizado no Gráfico 19, o que é consideravelmente elevado, quando comparado aos resultados do pavimento tipo. Uma maneira de reavaliar o modelo seria utilizar proteções solares nas demais fachadas ou, ainda, utilizar materiais com melhor isolamento térmico nas paredes externas e na cobertura. O elemento SG ainda se prova uma alternativa melhor que o elemento 3m, por apresentar desconforto por calor próximo, melhor desempenho lumínico e menor área (Gráfico 20), sendo esta última 31,75% menor.

Gráfico 19 - Comparativo entre os resultados desconforto por calor.



Fonte: Autor (2024).

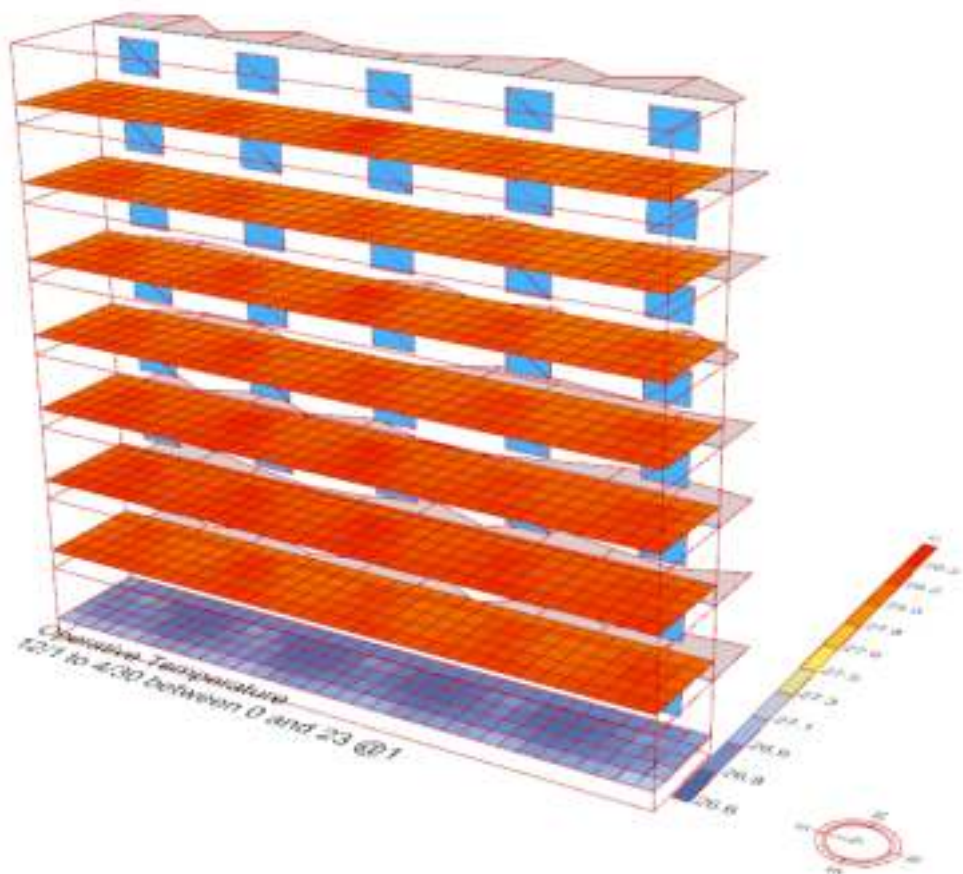
Gráfico 20 - Comparativo entre a área total dos elementos.



Fonte: Autor (2024).

A fim de investigar a influência dos materiais nos resultados, e verificar se uma cobertura com melhor isolamento térmico resultaria em um elemento de proteção maior para os pavimentos superiores, foi utilizado um ConstructionSet do Honeybee para climas muito quentes, que inclui materiais isolantes na cobertura. Os resultados das novas temperaturas operativas podem ser visualizados no mapa de calor dos pavimentos da Figura 102.

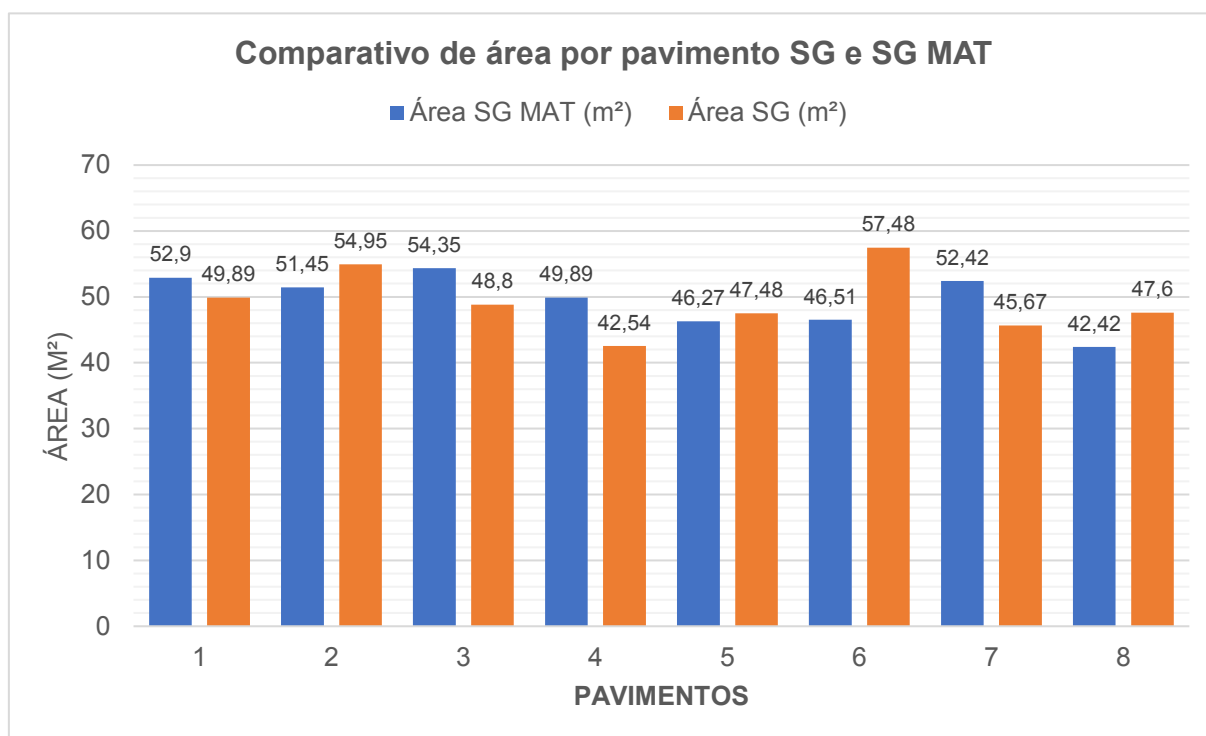
Figura 102 - Modelo 3D com temperatura operativa média com materiais modificados.



Fonte: Autor (2024).

Analisando o gráfico de área (Gráfico 21), comparando a área de ambos os modelos (SG MAT = materiais modificados e SG = modelo original) é possível perceber que houve pouca variação após a mudança dos materiais. Observa-se, desta forma, que em análises para todos os pavimentos a otimização ocorre de maneira generalizada, não levando em consideração as peculiaridades de cada pavimento. Portanto, é desejável que, análises para toda uma edificação, ocorram de forma independente por pavimento, começando de último (mais alto) até o primeiro.

Gráfico 21 - Comparativo entre modelos SG original e SG MAT (materiais modificados).



Fonte: Autor (2024).

4.5. Generalização e disponibilização do código

Como descrito na metodologia DSR, a generalização para uma classe de problemas está entre as características essenciais para que o artefato gerado (sistema generativo desta pesquisa) tenha relevância científica.

Com este objetivo, o sistema generativo criado pode ser aplicado a qualquer tipo de fachada (plana ou curva), desde que o usuário identifique corretamente as aberturas. Ainda, é possível mesclar a parte das análises com sistemas de proteção solar verticais, o que seria ideal, principalmente para a fachada oeste, onde mesmo elementos horizontais únicos, por mais profundos que sejam, não são capazes de interromper a radiação solar direta. Desta forma, pode-se definir a classe de problemas como “qualquer fachada que recebe insolação direta”. Ainda, é possível alterar os elementos de proteção solar e utilizar apenas a parte das análises ambientais do sistema generativo, sendo esta uma generalização parcial do sistema.

É importante ressaltar que esta pesquisa se limitou a um sistema generativo que gerasse formas de proteções solares horizontais individuais, podendo ser adaptado principalmente às situações de varanda ou beirais. Esta limitação se deu pela dificuldade em integrar formas verticais na fachada (persianas e múltiplos brises horizontais ou verticais), que iriam gerar mais curvas e

sliders (genes a serem inseridos no algoritmo evolutivo), tornando as análises mais demoradas e, ainda, limitando a geração das formas da proteção solar principal. A integração com elementos de proteção solar vertical pode ser realizada posteriormente, utilizando ferramentas do próprio Honeybee ou em conjunto com o atual sistema, podendo ser, inclusive, tema de nova pesquisa.

Ainda, tornar o sistema generativo disponível para pesquisadores e eventuais projetistas é fundamental para que o mesmo seja testado, aprimorado e difundido. Desta forma, o código (arquivo .3dm do Rhyno e .gh do Grasshopper) foi hospedado no site do grupo de Tecnologias Integradas ao Projeto da Universidade Federal do Espírito Santo (TIP-UFES) no endereço: <https://tip.ufes.br/biblioteca/codigos/multiobjetivo-evolutivo/>.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao longo desta pesquisa, com base nas metodologias de análise ambiental e sistemas generativos evolutivos, foi proposto o desenvolvimento de um sistema para proteções solares horizontais de fachada durante as fases iniciais de projeto. Acredita-se que o resultado da pesquisa apresenta um avanço no campo da arquitetura e da aplicação de tecnologias no processo criativo de projeto.

As análises dos resultados comparando os elementos, mostraram que o sistema generativo pode ser particularmente eficiente, por atingir valores de conforto térmico próximos aos elementos de maior proporção, mesmo com uma área construída até 31,75% menor, e ainda trazendo ganhos expressivos de desempenho lumínico. Desta forma, acredita-se que, mesmo dentro das limitações encontradas durante o seu desenvolvimento, o sistema generativo proposto cumpriu com os objetivos delineados no início da pesquisa.

Para que projetistas e pesquisadores possam utilizar de forma eficaz o sistema generativo, é fundamental possuir um conhecimento prévio das ferramentas, especialmente dos plugins Grasshopper e Ladybug. Destaca-se, no entanto, a escassez de informações e cursos em língua portuguesa, o que constitui uma limitação significativa no Brasil, apesar do crescimento substancial na quantidade de cursos, fóruns e documentação nos últimos anos.

Além disso, outra possível limitação reside no tempo necessário para aprender as ferramentas e operar o sistema generativo, bem como no tempo exigido para adaptá-lo a casos de uso específicos. As simulações também consomem tempo considerável, levando mais de 6 horas para um pavimento e mais de 10 horas para multipavimentos e elementos em apenas uma orientação. Esse tempo pode ser considerado relativamente elevado para análises em fases iniciais de projeto, principalmente pelo aumento da competitividade e introdução de ferramentas de inteligência artificial que geram resultados de forma quase imediata. Mas é necessário ressaltar que, dentro das opções de ferramentas validadas e disponíveis a um custo baixo, o framework apresentado ainda é um dos mais utilizados para simulações e pesquisas acadêmicas em arquitetura. Também é importante frisar que o plugin utilizado para as simulações apresentou uma limitação no poder de processamento (utilizando apenas um dos núcleos do processador), o que pode ser resolvido pelos desenvolvedores em um futuro próximo.

Cabe ressaltar que o próprio processo de desenvolvimento do sistema generativo resultou em exercício científico importante, ainda incipiente, de análises multiobjetivo em projetos de edificações em etapas iniciais de projeto. Durante as fases iniciais desta pesquisa, esperava-se que a programação fosse apenas uma etapa de implementação da articulação teórica, mas ao avançar nas etapas de programação visual, foram surgindo novas demandas (relacionadas às restrições do software e interações entre componentes), assim como a necessidade de gerar novos dados (relacionados à geometria do edifício, materiais, análises ambientais, etc.), que contribuíram para o amadurecimento do próprio fluxograma do SG desenvolvido inicialmente, assim como os seus parâmetros e variáveis, a fim de que fosse possível atingir o objetivo da pesquisa.

É importante frisar que esta pesquisa representa apenas um ponto de partida. Para pesquisas futuras, seria fundamental explorar novas possibilidades em relação às formas geradas, integração com softwares BIM e expandir os tipos de análise (como por exemplo eficiência energética, Avaliação do Ciclo de Vida – ACV, ou ainda dos custos), importantes não só para avaliar a eficácia do sistema, mas também para garantir o seu aprimoramento.

O sistema generativo proposto é passível de aprimoramentos, tanto na parte dos dados de materiais e métricas ambientais, quanto da parte de configuração da variável paramétrica e algoritmo evolutivo, mas para isso é necessário a realização de novas modelagens, configurações e simulações que iriam esgotar o tempo hábil para a produção desta pesquisa. Caberá ao autor, ou outros pesquisadores interessados, realizar este aprimoramento em um momento futuro.

A integração da arquitetura e novas tecnologias de projeto desempenha um papel crucial na construção de edificações melhores adaptadas ao clima local. O sistema generativo aqui proposto pode se tornar uma ferramenta valiosa para arquitetos e demais profissionais envolvidos no processo de tomada de decisão em projetos arquitetônicos. Por fim, acredita-se que a convergência entre criatividade e tecnologia é um caminho necessário para enfrentar os desafios do campo, não só da arquitetura, mas das ciências sociais aplicadas.

REFERÊNCIAS

- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15215-4: Iluminação Natural - Parte 4 - verificação experimental das condições de iluminação interna de edificações - método de medição**. Rio de Janeiro, 2005.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575-1: Edificações habitacionais — Desempenho Parte 1: Requisitos gerais**. Rio de Janeiro, 2021.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO/CIE 8995: Iluminação de ambientes de trabalho. Parte 1 – Interior**. Rio de Janeiro, 2013.
- ABRAHÃO, Karla Cristina de Freitas Jorge; SOUZA, Roberta Gonçalves Vieira De. **Estimativa da evolução do uso final de energia elétrica no setor residencial do Brasil por região geográfica**. Ambiente Construído, v. 21, n. 2, p. 383–408, abr. 2021.
- AGKATHIDIS, Asterios. **Generative Design Methods - Implementing Computational Techniques in Undergraduate Architectural Education**. eCAADe proceedings, v. 2, n. 33, 2015.
- ALBERNAZ, Maria Paula; LIMA, Cecília Modesto. **Dicionário Ilustrado de Arquitetura, Vol. I – A a I**. 1ª Edição. São Paulo: ProEditores, 1998.
- ANDERSEN, M. **Unweaving the human response in daylight design**. Building and Environment. v. 91, p.101-117, set. 2015.
- ASHRAE - AMERICAN SOCIETY OF HEATING REFRIGERATING AND AIR CONDITIONING ENGINEERS. **ASHRAE Standard 55-2023: Thermal environmental conditions for human occupancy**. Atlanta: [s.n.], 2023.
- BANDEIRA, Júlio; LAGO, Pedro C. **Debret e o Brasil: Obra completa**. Rio de Janeiro: Capivara, 2008.
- BARROS, Maria C. de S. L. S B., MOÇA, Isabela F. F., BARROS, Joana D’Arc P. de., MAIOLI, Ricardo N., PAGEL, Erica C. **A influência da legislação urbana no uso de varandas em edifícios residenciais multifamiliares em Vitória- ES**. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 17 2018, Paraná. Anais... Foz do Iguaçu: ANTAC, 2018.
- BITTENCOURT, Leonardo. **Arquitetura da Adaptação: seção 1.2**. Edifício Ambiental. Organizadores: GONÇALVES, J. C. S.; BODE, K. São Paulo: Editora Oficina de Textos, 2015.
- BRANDÃO, Helena; MARTINS, Angela. **Varandas nas habitações brasileiras do modernismo à contemporaneidade: o caso do Rio de Janeiro**. Cadernos Proarq, Rio de Janeiro, n. 11, p. 209 – 218, 2007b.
- BRANDÃO, Helena; MARTINS, Angela. **Varandas nas moradias brasileiras: do período de colonização a meados do século XX**. Revista Tempo de Conquista, Rio de Janeiro, 2007a.

Disponível em: <<http://www.revistatempodeconquista.com.br/documents/RTC1/HELENALACE1.pdf>>. Acesso em abril de 2023.

BRUAND, Yves. **Arquitetura Contemporânea no Brasil**, 5ª edição. São Paulo: Perspectiva, 2000.

CARDEMAN, D.; CARDEMAN, R. G. **O fechamento de varandas como artifício de venda**. 2022. Disponível em: https://caosplanejado.com/o-fechamento-de-varandas-como-artificio-de-venda-dos-apartamentos/?utm_medium=website&utm_source=archdaily.com.br. Acesso em: 14 abr. 2023.

CELANI, G. **Além da avaliação energética e ambiental nas etapas iniciais do processo de projeto**. PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção, v. 3, n. 2, p. 63, 2012.

CHAN, A.L.S. **Investigation on the appropriate floor level of residential building for installing balcony, from a view point of energy and environmental performance. A case study in subtropical Hong Kong**. Energy, [S.L.], v. 85, p. 620-634, jun. 2015.

CORBELLA, Oscar; CORNER, Viviane. **Manual de Arquitetura Bioclimática Tropical para a Redução de Consumo Energético**. Rio de Janeiro: Revan, 2011.

CORDEIRO, Patrícia; MARCONSINI, Cynthia; PAGEL, Erica; STANGE, Matheus. **Edifícios multifamiliares no Brasil: Análise da produção contemporânea**. CADERNOS DO PROARQ (UFRJ), vol. 1, no. 37, p. 56, 2021.

DAVIES, N.; JOKINIEMI, E. **Dictionary of Architecture and Building Construction**. Londres, Inglaterra: Routledge, 2008.

EIBEN, A. E.; SMITH, James E. **Introduction to evolutionary computing**. 2. ed. Berlim, Germany: Springer, 2015.

EMEKCİ, Ş. **Balcony: A remembered architectural element amid pandemic: Evidences from digital media**. IDEALKENT, 2021.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. **Balanço Energético Nacional 2023: Ano base 2022**. Ministério de Minas e Energia. Rio de Janeiro, 2023.

FISCHER, Thomas; HERR, Christiane M. **Teaching generative design**. Proceedings of the 4th Conference on Generative Art. 2001.

GERALDI, Matheus Soares; LOGEN, João; NUNES, Victória Silveira. **Cálculo da transmitância térmica de componentes construtivos usuais segundo a NBR 15220-2:2022**. CB3E - Centro Brasileiro de Eficiência Energética em Edificações, 2022. Disponível em: https://labeee.ufsc.br/sites/default/files/publicacoes/notas_tecnicas/RI%2010-2022-02.pdf. Acesso em: 02 de Fevereiro de 2024.

GONÇALVES, Joana Carla Soares. **Projeto integrado e o papel da simulação computacional de desempenho ambiental**. Edifício Ambiental. Organizadores: GONÇALVES, J. C. S.; BODE, K. São Paulo: Editora Oficina de Textos, 2015.

HERNANDEZ, Alberto. **Fundamentos da Simulação Energética de Edificações**. Edifício Ambiental. Organizadores: GONÇALVES, J. C. S.; BODE, K. São Paulo: Editora Oficina de Textos, 2015.

HORT, Max; SARRO, Federica. **The effect of offspring population size on NSGA-II: A preliminary study**. Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference Companion. New York, 2021.

IES - ILLUMINATING ENGINEERING SOCIETY OF NORTH AMERICA. **LM-83-12: IES Spatial Daylight Autonomy (sDA) and Annual Sunlight Exposure (ASE)**. New York, 2012.

INMET – INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. **NORMAIS CLIMATOLÓGICAS DO BRASIL 1991-2020**. MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. Brasília, 2022.

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

IZADYAR, Nima; MILLER, Wendy; RISMANCHI, Behzad; GARCIA-HANSEN, Veronica. **A numerical investigation of balcony geometry impact on single-sided natural ventilation and thermal comfort**. Building And Environment, v. 177, p. 106847, jun. 2020.

KALAY, Yehuda E. **Architecture's new media: Principles, theories, and methods of computer-aided design**. MIT Press, 498 p., 2004.

KOLAREVIC, Branko. **Towards the Performative in Architecture**. Em: Performative Architecture: Beyond Instrumentality. New York: Spon Press, 2005, p. 204–213.

KONTADAKIS, A. et al. **A review of light shelf designs for daylight environments**. Sustainability, v. 10, n. 2, p. 71, 2017.

KOWALTOWSKI, D. C. C. K; MOREIRA, D. de C.; PETRECHE, J. R. D.; FABRÍCIO, M. M. (orgs.) **O Processo de Projeto em Arquitetura**. São Paulo: Editora Oficina de Textos, 504p, 2011.

KRAMER, Oliver. **Genetic algorithm essentials**. Cham, Switzerland: Springer International Publishing, 2018.

KRELLING, A. F.; ELI, L. G.; OLINGER, M. S.; MACHADO, R. M. E. S.; MELO, A. P.; LAMBERTS, R. **A thermal performance standard for residential buildings in warm climates: Lessons learned in Brazil**. Energy and buildings, v. 281, n. 112770, p. 112770, 2023.

KRELLING, Amanda F.; ELI, Letícia G.; OLINGER, Marcelo S.; VEIGA, Rodolfo K. s.; MELO, Ana P.; LAMBERTS, Roberto. **Proposta de método de avaliação do desempenho térmico de residências: NBR 15575**. Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. UFRGS, 2020.

LADYBUG TOOLS. **What is Ladybug?** Disponível em: <<https://www.ladybug.tools/ladybug.html>>. Acesso em: 05 Jun, 2023.

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. O. R. **Eficiência Energética na Arquitetura**. ELETROBRAS/ PROCEL. Rio de Janeiro. 2014.

LAWSON, Bryan. **How designers think**. Routledge, 321 p., 2006.

LEMOES, Carlos A. C. **História da casa brasileira**. São Paulo: Contexto, 1996.

LIN, Yaolin; YANG, Wei. **Application of Multi-Objective Genetic Algorithm Based Simulation for Cost-Effective Building Energy Efficiency Design and Thermal Comfort Improvement**. Frontiers in Energy Research, vol. 6. 2018.

LIU, K. S.; CHEN, C. C. **The effects of deep balcony of different building heights on indoor lighting and thermo-environment**. Applied Ecology and Environmental Research, v. 15, n. 2, p. 103–109, 2017.

LOCHE, I.; SOUZA, C. Bleil de; SPAETH, A.B.; NEVES, L.O. **Decision-making pathways to daylight efficiency for office buildings with balconies in the tropics**. Journal Of Building Engineering, [S.L.], v. 43, p. 102596, nov. 2021.

MARAGNO, G. V. **Sombras profundas: Dimensión Estética y Repercusión Ambiental del Diseño de la Varanda en la Arquitectura Brasileña**. 2010. - Universitat Politècnica De Catalunya, 2010.

MARAGNO, Gogliardo Vieira; COCH, Helena. **O Desenho Da Varanda E Sua Repercussão Ambiental Na Arquitetura Das Casas Brasileiras**. XI ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, Búzios - RJ, 2011.

MARCONDES CAVALERI, Mônica Pereira; CUNHA, Guilherme Reis Muri ; GONÇALVES, Joana Carla Soares. **Iluminação natural em edifícios de escritórios: avaliação dinâmica de desempenho para São Paulo**. PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção, v. 9, n. 1, p. 19–34, 2018.

MARDALJEVIC, J. et al. **Daylighting Metrics for Residential Buildings**. In: Session of the cie, 27., 2011, Sun City. Proceedings... Sun City: CIE, 2011.

MARTINO, J. **Algoritmos Evolutivos como Método para Desenvolvimento de Projetos de Arquitetura**. [s.l.] UNICAMP, Campinas, 2015.

MENDES, Chico; VERÍSSIMO, Chico; BITTAR, William. **Arquitetura no Brasil**: de Cabral a Dom João VI. 3ª edição. Rio de Janeiro: Imperial Novo Milênio, 2011.

MITCHELL, William J. **The theoretical foundation of computer-aided architectural design**. Environment and Planning B: Planning and Design, v. 2, n. 2, p. 127-150, 1975.

NICO-RODRIGUES, E. A. **Influência da janela no desempenho térmico de ambientes ventilados naturalmente**. [s.l.] Universidade del Bio-Bio, Chile, 2015.

NIKOLIC, Danijela; DJORDJEVIC, Slobodan; SKERLIC, Jasmina; RADULOVIC, Jasna. **Energy Analyses of Serbian Buildings with Horizontal Overhangs: a case study**. Energies, [S.L.], v. 13, n. 17, p. 4577, 3 set. 2020.

OLGYAY, Victor. **Design With the Climate: Bioclimatic Approach to Architectural Regionalism**. New Jersey: Princeton University Press, 2015.

OXMAN, R.; OXMAN, R. **New structuralism: design, engineering and architectural technologies**. Architectural Design, v. 80, n. 4, p14-23, jul./ago. 2010.

OXMAN, Rivka. **Performance-based design: Current practices and research issues**. International journal of architectural computing, vol. 6, no. 1, p. 1–17, 2008.

PAGEL, E. C.; ALVAREZ, C. E.; REIS JÚNIOR, N. C. **Avaliação e percepção do usuário em relação ao conforto térmico e qualidade do ar em varandas com fechamento em vidros móveis situadas em uma região urbana industrializada**. Gestão e Tecnologia de Projetos, São Carlos, v.13, n.3, p.57-77, dez. 2018.

PBE, Programa Brasileiro de Etiquetagem. **Portaria no 309, de 06 de setembro de 2022 - PBE EDIFICA**. Disponível em: <<https://pbeedifica.com.br/portariaconsolidada>>. Acesso em: 2 fev. 2024.

PEFFERS, Ken; TUUNANEN, Tuure; ROTHENBERGER, Marcus A.; CHATTERJEE, Samir. **A design science research methodology for information systems research**. Journal of management information systems : JMIS, v. 24, n. 3, p. 45–77, 2007.

PETERS, T.; HALLERAN, A. **How our homes impact our health: using a COVID-19 informed approach to examine urban apartment housing**. Archnet-IJAR, 2020.

PMV - Prefeitura Municipal de Vitória. **Lei 6.801 Seção III do capítulo V da Lei 4821 de 30 de dezembro de 1998**. Vitória, 2006.

PMV - Prefeitura Municipal de Vitória. **Lei Nº 4.821 Código de Edificações do Município de Vitória**. Vitória, 1998.

PMV, Prefeitura Municipal de Vitória. **Lei n. 9.271, de 22 de maio de 2018. Aprova o Plano Diretor Urbano do Município de Vitória e dá outras providências**. Diário Oficial do Município de Vitória. Vitória, 2018.

PROJETEEE. **Dados Climáticos Vitória-ES**. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/projeteee/dados-climaticos/?cidade=ES+-+Vit%C3%B3ria&id_cidade=bra_es_vitoria-salles.ap.836490_try.1962>. Acesso em: 15 jun. 2023.

REIS FILHO, Nestor Goulart. **Quadro da arquitetura no Brasil**. 9ª edição. São Paulo: Perspectiva, 2000.

RUPP, R. F.; VÁSQUEZ, N. G.; LAMBERTS, R. **A review of human thermal comfort in the built environment**. Energy and Buildings, v. 105, p. 178–205, 15 out. 2015.

SI, Binghui; WANG, Jianguo; YAO, Xinyue; SHI, Xing; JIN, Xing; ZHOU, Xin. **Multi-objective optimization design of a complex building based on an artificial neural network and performance evaluation of algorithms**. Advanced Engineering Informatics, vol. 40, p. 93–109. 2019.

SILVEIRA, Ana Lucia R. C. da; CRAVEIRO, Jaísse; TALITA, Thâmara. **Análise da adequação bioclimática de edifícios modernos em Teresina-PI**. In: 8º Seminário DOCOMOMO Brasil. Cidade Moderna e Contemporânea, Rio de Janeiro: 2009.

SINGH, V.; GU, N. **Towards an integrated generative design framework**. Design studies, v. 33, n. 2, p. 185–207, 2012.

SORGATO, M. J.; MARINOSKI, D. L. .; MELO, A. P. .; LAMBERTS, R. **Nota técnica referentebà avaliação para a norma de desempenho NBR 15575 em consulta pública**. Laboratório de Eficiência Energética em Edificações. Florianópolis, 2011.

TERZIDIS, Kostas. **Algorithmic Architecture**. [s.l.] : Elsevier Science & Technology, 2006.

UNEP - United Nations Environment Programme, & Global Alliance for Buildings and Construction. **Global Status Report for Buildings and Construction - Beyond foundations: Mainstreaming sustainable solutions to cut emissions from the buildings sector**. Nairobi, 2024.

VERÍSSIMO, Francisco S.; BITTAR, William S. M. **500 Anos da Casa no Brasil**, Rio de Janeiro: Ediouro, 1999.

WÅGØ, S.; HAUGE, B.; STØA, E. **Between indoor and outdoor: Norwegian perceptions of well-being in energy-efficient housing**, Journal of Architectural and Planning Research, v. 33, n. 4, p. 329–346, 2016.

WALLACEI, Primer. **An Evolutionary Multi-Objective Optimization and Analytic Engine for Grasshopper 3D**. 2019. Disponível em: <<https://www.wallacei.com/>>. Acesso em: autumn 2024.

YANG, Ding; REN, Shibo; TURRIN, Michela; SARIYILDIZ, Sevil; SUN, Yimin. **Multi-disciplinary and multi-objective optimization problem re-formulation in computational design exploration: A case of conceptual sports building design**. Automation in Construction, vol. 92, p. 242–269. 2018.

YANNAS, Leonardo. **Arquitetura da Adaptação: seção 1.3**. Edifício Ambiental. Organizadores: GONÇALVES, J. C. S.; BODE, K. São Paulo: Editora Oficina de Textos, 2015.

YU, Wei; LI, Baizhan; JIA, Hongyuan; ZHANG, Ming; WANG, Di. **Application of multi-objective genetic algorithm to optimize energy efficiency and thermal comfort in building design**. Energy and Buildings, vol. 88, p. 135–143. 2015.

ZHANG, Z. P.; SHEN, J.; ZHAO, L. H. **Research on large eaves' shading effect based on parametric design platform**. Applied mechanics and materials, v. 368–370, p. 57–62, 2013.