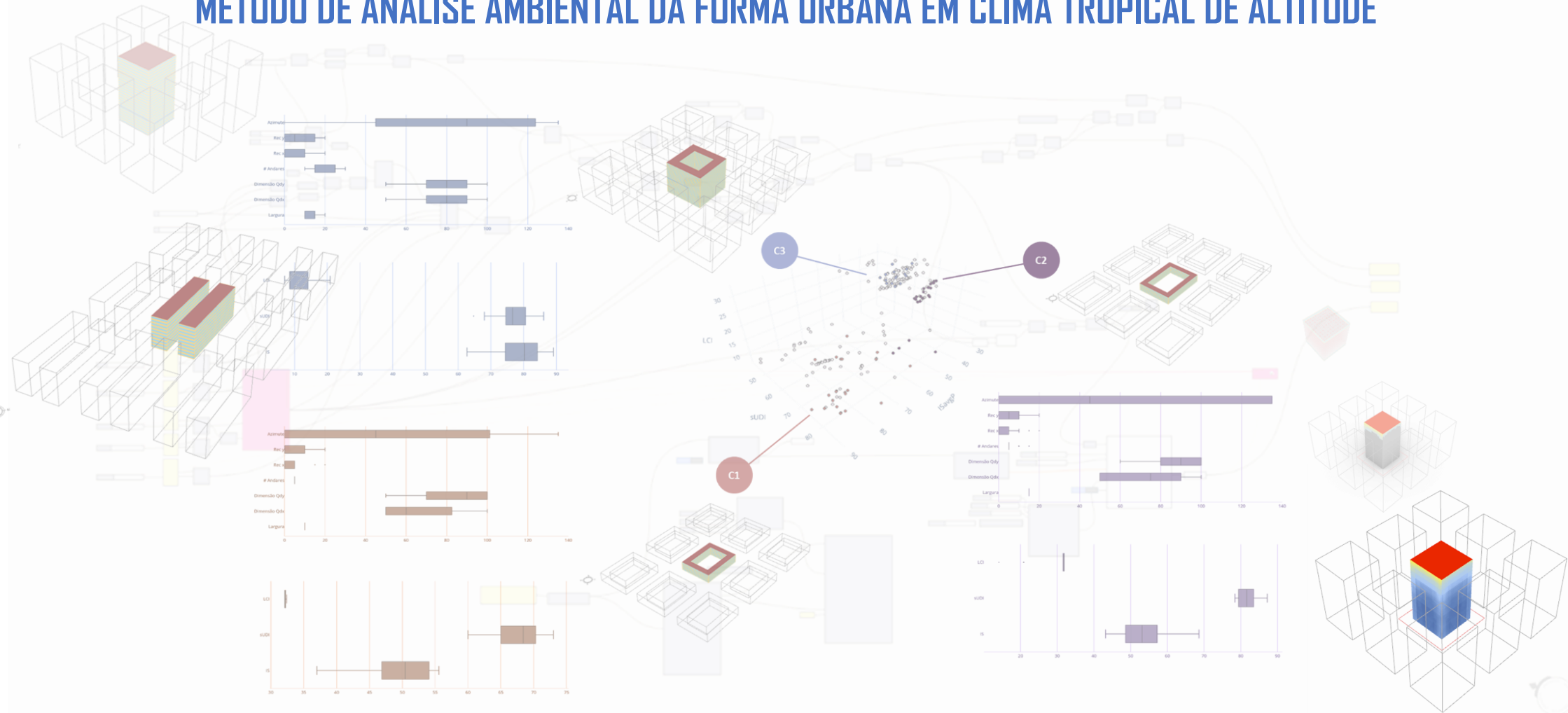


QUADRA ZERO

MÉTODO DE ANÁLISE AMBIENTAL DA FORMA URBANA EM CLIMA TROPICAL DE ALTITUDE



**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE ARQUITETURA E URBANISMO
PROGRAMA DE POS-GRADUAÇÃO EM ARQUITETURA E URBANISMO**

QUADRA ZERO: MÉTODO DE ANÁLISE AMBIENTAL DA FORMA URBANA EM CLIMA TROPICAL DE ALTITUDE

**AUTOR: THIAGO MONTENEGRO GÓES
ORIENTADOR: CAIO FREDERICO E SILVA**

TESE DE DOUTORADO EM ARQUITETURA E URBANISMO

BRASÍLIA/DF
Maio – 2024

THIAGO MONTENEGRO GÓES

QUADRA ZERO:

MÉTODO DE ANÁLISE AMBIENTAL DA FORMA URBANA EM CLIMA TROPICAL DE ALTITUDE

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de Brasília como requisito parcial à obtenção do título de doutor em arquitetura e urbanismo.

Brasília, 02 de maio de 2024

Banca Examinadora:

Dr. Caio Frederico e Silva (PPG-FAU/UnB) - *Presidente*

Dr. Fernando Tadeu de Araújo Lima (*Belmont University*) - *Membro Externo*

Dra. Cláudia Naves David Amorim (PPG-FAU/UnB) - *Membro Interno*

Dr. Eduardo Leite Krüger (UFTPR) - *Membro Externo*

Dr. Joára Cronemberger Ribeiro Silva (PPG-FAU/UnB) - *Membro Interno*

DEDICATÓRIA

À Universidade Pública e de Qualidade.

AGRADECIMENTOS

O desenvolvimento de um trabalho como o doutorado demanda muito, não apenas intelectualmente, mas acima de tudo emocionalmente, o que impacta, de alguma forma, além do autor, todos os envolvidos nesse processo. Neste sentido, quero agradecer a todas as pessoas que acreditaram em mim acima de tudo, em especial a minha família. Meus pais, madrasta, irmã, sobrinha, tios e avós, que puderam me ajudar materialmente nos momentos de dificuldades, mas sobretudo, com apoio, carinho e exemplo. A vocês, sou eternamente grato.

Gostaria de expressar minha gratidão à Universidade de Brasília (UnB), que se tornou uma segunda casa para mim quando me mudei para Brasília em 2015, local onde pude me reinventar pessoal e profissionalmente e me tornar professor e pesquisador. Nesta casa pude realizar uma especialização, mestrado e, agora, doutorado, além de ser professor-substituto, professor da pós-graduação *lato sensu* em Reabilitação Ambiental Sustentável Arquitetônica e Urbanística (REABILITA), e de participar de diversos projetos. Neste sentido, não tenho como agradecer à instituição o compromisso com ensino, pesquisa e extensão públicos, gratuitos e de qualidade.

Nesta jornada, conheci diversas pessoas com quem pude compartilhar muitos momentos de realização, mas também de angústia, como Adriano Lopes, Ana Carolina Lima, Ayana Dantas, Bárbara Gomes, Camila Telles, Daniela Werneck, Fernanda Messias, Fernanda Moreira, João Francisco Walter, Júlia Adário, Juliana Andrade, Lucídio Avelino e Rejane Viegas, entre outros. Todas as experiências vividas só contribuíram para meu crescimento e amadurecimento e são laços que levo a diante na jornada que se segue.

Gostaria de expressar minha gratidão também aos laboratórios de que faço parte: ao Laboratório de Controle Ambiental e Eficiência Energética (LACAM), especialmente às professoras Cláudia Naves David Amorim e Joára Cronemberger Ribeiro Silva, por quem tenho muita admiração e que me permitiram participar do projeto do LabZero, apoiado pela Eletrobras; ao Laboratório de Sustentabilidade Aplicada à Arquitetura e ao Urbanismo (LaSUS) e à figura da professora Marta Adriana Bustos Romero, com quem tenho o privilégio de trabalhar, especialmente no projeto REABILITA CER financiado pelo Ministério da Saúde e no curso de pós-graduação *lato sensu* REABILITA; e à todos os seus membros do grupo de pesquisa em Simulação Computacional no Ambiente Construído (SiCAC), coordenado pelo professor Caio Frederico e Silva.

À Universidade Federal de Goiás (UFG), que se tornou minha nova casa, desde o meu ingresso no curso de Arquitetura e Urbanismo da Cidade de Goiás, em 2023. Esta oportunidade foi uma grande conquista pessoal, entretanto é a convivência com todos, colegas, técnicos e alunos que têm sido uma experiência única, com um ambiente estimulante que muito tem agregado a meu crescimento pessoal e acadêmico.

E por fim, não poderia deixar de expressar minha profunda gratidão ao meu orientador, Dr. Caio Frederico e Silva, pelas sábias orientações e apoio inabalável ao longo de toda esta trajetória. Mais do que somente transmitir conhecimento, seus ensinamentos e mentoria foram fundamentais no meu amadurecimento profissional e pessoal. Mais do que o coleguismo, principalmente pela sua amizade, exemplo e por me ajudar a encontrar meu próprio valor, sou infinitamente grato.

EPÍGRAFE

*"A principal função da cidade é converter poder em forma,
energia em cultura, matéria morta em símbolos vivos da
arte, reprodução biológica em criatividade social"*
Lewis Mumford (1961)

RESUMO

A transição para uma sociedade pós-carbono representa um imperativo crescente, dada a significativa influência da atividade humana contemporânea sobre o ambiente natural. Nesse contexto, o ambiente construído desempenha um papel crucial tanto na mitigação desses impactos, devido à sua considerável pegada energética, quanto na adaptação às mudanças climáticas emergentes. O conceito de *Zero-Energy Building* (ZEB) tem ganhado visibilidade por ser um padrão de construção que possui balanço energético nulo que se atinge por meio da adoção de medidas de eficiência e conservação energética, e da geração de energia com fontes renováveis. No entanto, a maioria das pesquisas relacionadas ao tema se concentra na eficiência energética de edificações isoladas, especialmente em contextos climáticos de países desenvolvidos. Com base nisso, o principal objetivo da tese é analisar o potencial para obtenção de ZEB na escala urbana de diferentes tipologias de quadra residenciais no clima tropical de altitude, especificamente no contexto climático de Brasília, por meio de otimização multiobjetivo com critérios ambientais holísticos. Para tanto, os objetivos específicos são três: consolidar a definição de ZEB na escala urbana; desenvolver um procedimento computacional para a avaliação holística de tipologias de quadra; e discutir indicadores e estratégias de desenho urbano baseados no desempenho ambiental. Neste sentido, a tese possui um aspecto de fundamentação e consolidação metodológica. Na tese, a fundamentação teórica consolida as iniciativas no campo conceitual de ZEB na escala urbana por meio de revisão e análise bibliométricas, a partir do banco de dados Scopus e da ferramenta Biblioshiny. Como método, emprega-se uma abordagem computacional baseada na simulação da performance ambiental, *design* paramétrico e processo de otimização. Analisam-se três tipologias de quadras urbanas: Torre, Edifícios em Fita e Edifícios Perimetrais com Pátio Interno. Desenvolve-se o *design* paramétrico na interface de programação visual *Grasshopper* do programa *Rhinoceros3D*, enquanto as simulações de performance ambiental realizam-se via *Ladybug Tools*, que servem de interface de acesso para o *Radiance* e o *EnergyPlus*. Já o processo de otimização realizado com o *plug-in Opossum*, empregado com três objetivos a serem maximizados: Índice de Sombra Médio Ponderado (ISmp) para análise do conforto térmico do pedestre; *spatial Useful Daylight Illuminance* (sUDI) como indicador da iluminação dos espaços internos e *Load Cover Factor* (LCF) que contempla o consumo e geração energéticos e assim serve para análise do balanço energético nulo. Analisam-se os resultados por meio de correlação de r-Pearson entre as variáveis de projeto da tipologia, objetivos da otimização e outros indicadores, além de aprofundamento com apoio de gráficos de dispersão e análise das variáveis de

projeto com auxílio de gráficos *boxplot*. Também se realiza a clusterização por meio de algoritmo *C-means* dos melhores resultados presentes na frente de Pareto. Por fim, analisam-se os melhores cenários para cada um dos três objetivos, além do Volume Dominado – indicador para o equilíbrio (ou *trade-off*) entre os objetivos de otimização – para cada uma das tipologias, além de uma análise comparativa. Os resultados do estudo no contexto climático de Brasília apontam desempenho superior das quadras com pátio interno, seguidas das quadras com edificações em fita e por último quadras com torres isoladas. Os melhores resultados obtidos apresentam Índice de Sombra Médio Ponderado (ISmp) de 89%, *spatial Useful Daylight Illuminance* (sUDI) de 88% e *Load Cover Factor* (LCF) de 34%. Adicionalmente, os melhores resultados de Volume Dominado apresentam aspectos morfológicos que beneficiam cada um dos objetivos de otimização: 1. Edificações mais baixas, o que auxilia a um melhor *Load Cover Factor* (LCF); 2. Profundidade da edificação intermediária, com equilíbrio entre faixa perimetral com excesso de iluminância e núcleo com iluminância insuficiente, o que favorece *spatial Useful Daylight Illuminance* (sUDI) e; 3. Quadras com dimensões menores, o que se beneficiam da proteção solar nas áreas urbanas e assim favorece Índice de Sombra Médio Ponderado (ISmp). Dessa forma, o processo de otimização e o indicador de Volume Dominado demonstram potencial para auxiliar na tomada de decisão de projeto, ao fornecer uma abordagem quantitativa que auxilia na exploração do universo de cenários possíveis. Por fim, a abordagem holística da tese impulsiona a busca por soluções de eficiência energética na escala urbana, além de promover o desenvolvimento de projetos urbanísticos mais resilientes e de maior qualidade ambiental, tão necessários em tempos de desafios climáticos crescentes.

Palavras-chave: *Zero-Energy Building*, Morfologia Urbana, *Design* Computacional, Simulação do Desempenho Ambiental, Cidades Sustentáveis.

ABSTRACT

The transition to a post-carbon society represents a growing imperative, given the significant influence of contemporary human activity on the natural environment. In this context, the built environment plays a crucial role both in mitigating these impacts, due to its considerable energy footprint, and in adapting to the already evident climate change. The concept of Zero-Energy Building (ZEB) has gained visibility, a construction standard that has a zero-energy balance in a year, through the reduction of energy demand, by energy efficiency and conservation measures, and energy generation with the use of renewable sources. However, most research related to the topic focuses on the energy efficiency of isolated buildings, especially in climatic contexts of developed countries. Based on this, the present thesis emphasizes the analysis of the ZEB pattern at the urban scale, through morphological study and with a holistic approach to environmental performance indicators, instead of only energy efficiency. The main objective of the research is to analyze the potential to obtain ZEB at the urban scale of different typologies of urban block for the climatic context of Brasília, through multiobjective optimization with holistic criteria. To this end, the specific objectives are to consolidate the definition of ZEB at the urban scale; develop a computational procedure for the holistic evaluation of court typologies; and discuss urban design indicators and strategies based on environmental performance. The theoretical foundation seeks to consolidate the initiatives in the conceptual field of ZEB at the urban scale through bibliometric review and analysis, based on the Scopus database and the Biblioshiny tool. For the analysis, a computational approach is employed based on the simulation of environmental performance, parametric design, and optimization process. Three common typologies of urban blocks are analyzed: Tower, Slab Buildings and Perimeter Buildings with Internal Courtyard. The parametric design is developed in the Grasshopper, visual programming interface of the Rhinoceros3D, while the environmental performance simulations are performed by the Ladybug Tools, which serve as an access interface for Radiance, EnergyPlus and PVWatt. On the other hand, the optimization process carried out with the Opossum plug-in, employed with three objectives to be maximized: Weighted Average Shade Index (ISmp) for urban climate analysis; spatial Useful Daylight Illuminance (sUDI) as an indicator of the lighting of internal spaces and Load Cover Factor (LCF) that contemplates energy consumption and generation and thus serves to analyze the zero-energy balance. The results are analyzed by means of r-Pearson correlation between the typology project variables, optimization objectives and other indicators, as well as deepening with the support of scatter plots and analysis of the

project variables with the aid of boxplot graphs. The best results present in the Pareto forehead are also clustered using the C-means algorithm. Finally, the best scenarios for each of the three objectives are analyzed, in addition to the Dominated Volume – an indicator for the balance (or trade-off) between the objectives – for each of the typologies, in addition to a comparative analysis between typologies. The results of the study in the climatic context of Brasília point to superior performance of the blocks with internal courtyard, followed by the slab buildings and finally blocks with isolated towers. The best results obtained have a Weighted Average Shadow Index (ISmp) of 89%, a spatial Useful Daylight Illuminance (sUDI) of 88% and a Load Cover Factor (LCF) of 34%. In addition, the best results of Dominated Volume present morphological aspects that interestingly benefit each of the optimization objectives: 1. Lower buildings, which helps to achieve a better Load Cover Factor (LCF); 2. Width of the intermediate building, with a balance between perimeter strip with excess illuminance and core with insufficient illuminance, which favors spatial Useful Daylight Illuminance (sUDI) and; 3. Smaller blocks, which benefits from the solar protection of urban areas and thus favors the Weighted Average Shade Index (ISmp). Thus, the optimization process and the Dominated Volume indicator demonstrate potential to assist in design decision-making, by providing a quantitative approach that assists in the exploration of the universe of possible scenarios. Finally, the holistic approach of the thesis drives the search for energy efficiency solutions at the urban scale, in addition to promoting the development of more resilient urban projects with higher environmental quality, so necessary in times of growing climate challenges.

Keywords: Zero-Energy Building, Urban Morphology, Computational Design, Environmental Performance Simulation, Sustainable Cities.

ÍNDICE

I INTRODUÇÃO	1
1.1 PROBLEMA DE PESQUISA.....	6
1.2 OBJETIVOS.....	8
1.2.1 Objetivo geral.....	8
1.2.2 Objetivos específicos.....	8
1.3 CONTRIBUIÇÕES.....	8
1.4 ORIGINALIDADE.....	9
1.5 ESTRUTURA DA TESE.....	10
II ZERO-ENERGY BUILDING NA ESCALA URBANA	13
2.1 ZERO-ENERGY BUILDINGS.....	13
2.1.1 Da arquitetura solar ao Zero-Energy Building.....	16
2.1.2 Zero-Energy Buildings.....	19
2.1.3 Design regenerativo.....	25
2.2 ZEB NA ESCALA URBANA: ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA.....	27
2.2.1 Visão geral do campo.....	28
2.2.2 Fontes de publicação.....	30
2.2.3 Autores.....	33
2.2.4 Documentos principais.....	36
2.2.5 Principais temas.....	40
2.2.6 Extração de dados.....	44
2.3 MAIS DO QUE ZEB NA ESCALA URBANA.....	50
2.3.1 Planejamento urbano solar.....	50
2.3.2 UBEM: ainda um campo em expansão.....	52
2.3.3 Morfologia urbana e energia.....	54
2.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO.....	55
III MATERIAIS E MÉTODOS	59
3.1 METODOLOGIA.....	59
3.1.1 Design computacional.....	60
3.1.2 Benchmark dos algoritmos de busca.....	74
3.1.3 Tipologias de quadras urbanas.....	78
3.2 MÉTODO.....	82
3.3 MATERIAIS.....	85
3.3.1 Grasshopper.....	85
3.3.2 Ladybug.....	85
3.3.3 EnergyPlus.....	86
3.3.4 Radiance.....	86
3.3.5 PVWatt.....	86
3.3.6 Opossum.....	86
3.3.7 Versões dos principais programas e plug-ins.....	87
3.4 PROCEDIMENTOS.....	87
3.4.1 Caracterização das variáveis de projeto das tipologias de quadra.....	87
3.4.2 Caracterização dos procedimentos de simulação.....	90
3.4.3 Caracterização dos procedimentos de otimização.....	105
3.4.4 Caracterização dos outros indicadores ou covariáveis.....	106
3.4.5 Caracterização do tratamento e análise dos dados.....	109
3.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO.....	113
IV RESULTADOS E DISCUSSÃO	117
4.1 QUADRA COM TORRE ISOLADA.....	117
4.1.1 Variáveis de projeto e objetivos da otimização.....	118
4.1.2 Análise das correlações significativas.....	120
4.1.3 Análise das variáveis de projeto.....	124
4.1.4 Clusterização da Frente de Pareto.....	130
4.1.5 Melhores resultados – quadra com torre isolada.....	135
4.1.6 Considerações finais – quadra com torre isolada.....	139
4.2 QUADRA COM EDIFICAÇÕES EM FITA.....	140
4.2.1 Variáveis de projeto e objetivos da otimização.....	140
4.2.2 Análise das correlações significativas.....	141
4.2.3 Análise das variáveis de projeto.....	145
4.2.4 Clusterização da Frente de Pareto.....	153
4.2.5 Melhores resultados – quadra com edificações em fita.....	159
4.2.6 Considerações finais – quadra com edificações em fita.....	163
4.3 QUADRA COM PÁTIO INTERNO.....	164
4.3.1 Variáveis de projeto e objetivos da otimização.....	164
4.3.2 Análise das correlações significativas.....	165
4.3.3 Análise das variáveis de projeto.....	169
4.3.4 Clusterização da Frente de Pareto.....	176
4.3.5 Melhores resultados – quadra com pátio interno.....	182
4.3.6 Considerações finais – quadra com pátio interno.....	186
4.4 COMPARAÇÃO TIPOLÓGICAS.....	187
4.4.1 Comparação global entre tipologias.....	187
4.5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	191

4.5.1 Quadra Zero	191
4.5.2 Desenho urbano baseado em desempenho	194
4.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO	200
V CONCLUSÃO	203
5.1 LIMITAÇÕES DE PESQUISA	206
5.2 OPORTUNIDADES DE PESQUISAS FUTURAS.....	207
5.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS	208
REFERÊNCIAS	211
APÊNDICE A: PRINCIPAIS PUBLICAÇÕES	231
ARTIGO PUBLICADO EM CADERNOS DE ARQUITETURA E URBANISMO PARANOÁ	231

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – <i>ZERO-ENERGY HOME</i> EM LYNGBY	19
FIGURA 2 – DIAGRAMA DE ESTRATÉGIAS DE GERAÇÃO ENERGÉTICA E OS LIMITES DE SEUS SISTEMAS	21
FIGURA 3 – DIAGRAMA DE HIERARQUIA ENERGÉTICA DE <i>ZERO-ENERGY BUILDING</i>	22
FIGURA 4 – DIAGRAMA DO NÍVEL DE IMPACTO AMBIENTAL DAS DIFERENTES ABORDAGENS DE PROJETO DE ACORDO COM A FILOSOFIA DE <i>DESIGN</i> REGENERATIVO.....	26
FIGURA 5 – PROCESSO DE TRIAGEM DE ARTIGOS	28
FIGURA 6 – DIAGRAMA DE REDE RELACIONAL DE ACOPLAMENTO BIBLIOGRÁFICO DE DOCUMENTOS.....	39
FIGURA 7 – DIAGRAMA TEMPORAL DA REDE DE CONEXÃO DIRETA HISTÓRICO.....	40
FIGURA 8 – DENDROGRAMA DA ESTRUTURA CONCEITUAL	40
FIGURA 9 – MAPA DA ESTRUTURA CONCEITUAL	41
FIGURA 10 – REDE DE CO-OCORRÊNCIA TEMÁTICA BASEADA NA ANÁLISE FATORIAL	42
FIGURA 11 – MAPA TEMÁTICO	43
FIGURA 12 – MAPA TEMÁTICO DE 2016 A 2020.....	44
FIGURA 13 – PROCESSO DE DESENVOLVIMENTO DE <i>DESIGN</i> GENERATIVO	61
FIGURA 14 – HIERARQUIA DOS NÍVEIS DE ABSTRAÇÃO EMPREGADOS NOS MODELOS COMPUTACIONAIS	61
FIGURA 15 – ILUSTRAÇÃO DOS PILARES DO <i>DESIGN</i> COMPUTACIONAL.....	63
FIGURA 16 – DIAGRAMA DOS COMPONENTES DA MODELAGEM PARAMÉTRICA.....	67
FIGURA 17 – DIAGRAMA DO CONCEITO DE SIMULAÇÃO COMO EXPERIMENTO	68
FIGURA 18 – DIAGRAMA DO PROCESSO DE OTIMIZAÇÃO DO PARADIGMA DE MODELAGEM PARAMÉTRICA	70
FIGURA 19 – EXEMPLO GRÁFICO DA FRONTE DE PARETO E SOLUÇÕES DOMINADAS E NÃO-DOMINADAS	72
FIGURA 20 – EXEMPLO GRÁFICO DO PROCESSO DE COMBINAÇÃO DE GENES DOS INDIVÍDUOS MAIS APTOS NO PROCESSO DE OTIMIZAÇÃO COM ALGORITMO EVOLUTIVO OU GENÉTICO	73
FIGURA 21 – GRÁFICO DA EVOLUÇÃO DO IS PARA OS ALGORITMOS DE BUSCA.....	77
FIGURA 22 - GRÁFICO DA EVOLUÇÃO DO SUDI PARA OS ALGORITMOS DE BUSCA.....	77
FIGURA 23 - GRÁFICO DA EVOLUÇÃO DO LCF PARA OS ALGORITMOS DE BUSCA.....	77
FIGURA 24 - GRÁFICO DA EVOLUÇÃO DO VD PARA OS ALGORITMOS DE BUSCA	77
FIGURA 25 – TIPOLOGIAS DE QUADRAS USUALMENTE EMPREGADAS EM ANÁLISES AMBIENTAIS	79
FIGURA 26 – TIPOLOGIAS DE QUADRAS SEGUNDO CLASSIFICAÇÃO DE TARBATT E TARBATT	80
FIGURA 27 – TIPOLOGIAS DE QUADRAS SEGUNDO FIGUEROA.....	81
FIGURA 28 – DIGRAMA GERAL DO MÉTODO	84
FIGURA 29 – VARIÁVEIS MORFOLÓGICAS DE PROJETO E SEUS NÍVEIS PARA TIPOLOGIA DE QUADRA COM TORRE ISOLADA	88
FIGURA 30 – VARIÁVEIS MORFOLÓGICAS DE PROJETO E SEUS NÍVEIS PARA TIPOLOGIA DE QUADRA COM EDIFICAÇÃO EM FITA	89
FIGURA 31 - VARIÁVEIS MORFOLÓGICAS DE PROJETO E SEUS NÍVEIS PARA TIPOLOGIA DE QUADRA COM PÁTIO INTERNO.....	90
FIGURA 32 – ÁREA DE AVALIAÇÃO DO ÍNDICE DE SOMBRA DA QUADRA CENTRAL	91
FIGURA 33 – EXEMPLO COMPARATIVO ENTRE HORAS DE INSOLAÇÃO COM E SEM OBSTRUÇÃO.....	92
FIGURA 34 – MAPA EXEMPLO DO ÍNDICE DE SOMBRA	92
FIGURA 35 – DEFINIÇÃO DO <i>GRASSHOPPER</i> DO CÁLCULO DA PONDERAÇÃO DE DESCONFORTO POR FRIO E CALOR	93
FIGURA 36 – ANDARES AVALIADOS PELA SIMULAÇÃO DA ILUMINAÇÃO NATURAL.....	95
FIGURA 37 – DISPOSIÇÃO DO <i>GRID</i> DE SENSORES EM UM ANDAR	95
FIGURA 38 – EXEMPLO DE MAPA COMPARATIVO ENTRE UDI E SUDI.....	97
FIGURA 39 – ESTUDO DE IRRADIAÇÃO E SELEÇÃO DAS ÁREAS COM VALORES MÍNIMOS DE IRRADIAÇÃO	98
FIGURA 40 – DETERMINAÇÃO DE <i>GRASSHOPPER</i> PARA AGREGAÇÃO DAS FACES ACIMA DO LIMITE DE IRRADIAÇÃO	99
FIGURA 41 – GEOMETRIA DO MODELO DE <i>ENERGYPLUS</i> E A DIVISÃO EM ZONAS TÉRMICAS	101
FIGURA 42 – GRÁFICO DE ROTINA DE USO E OCUPAÇÃO DIÁRIA PARA AMBIENTES RESIDENCIAIS ..	103
FIGURA 43 – EXPLICAÇÃO DOS ELEMENTOS DE TENDÊNCIA CENTRAL E LIMITES DOS GRÁFICOS <i>BOXPLOT</i> E CRITÉRIOS DE SOBREPOSIÇÃO DOS INTERVALOS ENTRE GRUPOS	111
FIGURA 44 – DIAGRAMA GERAL DOS RESULTADOS DOS CENÁRIOS PERTENCENTES À FRONTE DE PARETO DA TIPOLOGIA DE QUADRA COM TORRE ISOLADA.....	134
FIGURA 45 – REPRESENTAÇÃO MORFOLÓGICA DOS TRÊS MELHORES CENÁRIOS DE ÍNDICE DE SOMBRA MÉDIO PONDERADO (ISmp) PARA A QUADRA COM TORRE ISOLADA.....	135
FIGURA 46 – REPRESENTAÇÃO MORFOLÓGICA DOS TRÊS MELHORES CENÁRIOS DE <i>SPATIAL USEFUL DAYLIGHT ILLUMINANCE</i> (SUDI) PARA A QUADRA COM TORRE ISOLADA.....	136
FIGURA 47 – REPRESENTAÇÃO MORFOLÓGICA DOS TRÊS MELHORES CENÁRIOS DE <i>LOAD COVER FACTOR</i> (LCF) PARA A QUADRA COM TORRE ISOLADA	137
FIGURA 48 – REPRESENTAÇÃO MORFOLÓGICA DOS TRÊS MELHORES CENÁRIOS DE VOLUME DOMINADO PARA A QUADRA COM TORRE ISOLADA	138
FIGURA 49 – DIAGRAMA GERAL DOS RESULTADOS DOS CENÁRIOS PERTENCENTES À FRONTE DE PARETO DA TIPOLOGIA DE QUADRA COM EDIFICAÇÃO EM FITA	158
FIGURA 50 - REPRESENTAÇÃO MORFOLÓGICA DOS TRÊS MELHORES CENÁRIOS DE ÍNDICE DE SOMBRA MÉDIO PONDERADO (ISmp) PARA A QUADRA COM EDIFICAÇÃO EM FITA	159
FIGURA 51 - REPRESENTAÇÃO MORFOLÓGICA DOS TRÊS MELHORES CENÁRIOS DE <i>SPATIAL USEFUL DAYLIGHT ILLUMINANCE</i> (SUDI) PARA A QUADRA COM EDIFICAÇÃO EM FITA	160
FIGURA 52 - REPRESENTAÇÃO MORFOLÓGICA DOS TRÊS MELHORES CENÁRIOS DE <i>LOAD COVER FACTOR</i> (LCF) PARA A QUADRA COM EDIFICAÇÃO EM FITA	161

FIGURA 53 - REPRESENTAÇÃO MORFOLÓGICA DOS TRÊS MELHORES CENÁRIOS DE VOLUME DOMINADO (VD) PARA A QUADRA COM EDIFICAÇÃO EM FITA	162
FIGURA 54 – DIAGRAMA GERAL DOS RESULTADOS DOS CENÁRIOS PERTENCENTES À FRONTE DE PARETO DA TIPOLOGIA DE QUADRA COM PÁTIO INTERNO	181
FIGURA 55 - REPRESENTAÇÃO MORFOLÓGICA DOS TRÊS MELHORES CENÁRIOS DE ÍNDICE DE SOMBRA MÉDIO PONDERADO (ISMP) PARA A QUADRA COM PÁTIO INTERNO	182
FIGURA 56 - REPRESENTAÇÃO MORFOLÓGICA DOS TRÊS MELHORES CENÁRIOS DE <i>SPATIAL USEFUL DAYLIGHT ILLUMINANCE</i> (SUDI) PARA A QUADRA COM PÁTIO INTERNO	183
FIGURA 57 - REPRESENTAÇÃO MORFOLÓGICA DOS TRÊS MELHORES CENÁRIOS DE <i>LOAD COVER FACTOR</i> (LCF) PARA A QUADRA COM PÁTIO INTERNO	184
FIGURA 58 - REPRESENTAÇÃO MORFOLÓGICA DOS TRÊS MELHORES CENÁRIOS DE VOLUME DOMINADO (VD) PARA A QUADRA COM PÁTIO INTERNO.....	185
FIGURA 59 – DIAGRAMA DE DIRETRIZES PROJETUAIS SIMPLIFICADAS	197

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1- EVOLUÇÃO E TENDÊNCIA DO NÚMERO DE PUBLICAÇÕES	29
GRÁFICO 2 – DOCUMENTOS PUBLICADOS POR TIPO DE FONTE	30
GRÁFICO 3 – DOCUMENTOS POR FONTE	31
GRÁFICO 4 – NÚMERO DE CITAÇÕES DOS DOCUMENTOS POR FONTE	32
GRÁFICO 5 – FONTES POR DOCUMENTOS CITADOS NA LISTA DE REFERÊNCIA	32
GRÁFICO 6 – PORCENTAGEM DE AUTORES POR NÚMERO DE DOCUMENTOS.....	33
GRÁFICO 7 – AUTORES MAIS PRODUTIVOS – NÚMERO DE DOCUMENTOS	34
GRÁFICO 8 – AUTORES MAIS IMPACTANTES - NÚMERO DE CITAÇÕES	35
GRÁFICO 9 - PAÍSES MAIS PRODUTIVOS – NÚMERO DE DOCUMENTOS.....	35
GRÁFICO 10 – PAÍSES DE AFILIAÇÃO COM A MAIORIA DAS CITAÇÕES.....	36
GRÁFICO 11 – DOCUMENTOS MAIS IMPACTANTES.....	37
GRÁFICO 12 - TIPOS DE PESQUISA EMPREGADOS.....	46
GRÁFICO 13 – FOCO DE PESQUISA.....	47
GRÁFICO 14 - TIPOS DE CLIMAS AVALIADOS	49
GRÁFICO 15 - TIPOS DE MODELOS EMPREGADOS.....	49
GRÁFICO 16 – MATRIZ DE CORRELAÇÃO ENTRE OS OBJETIVOS DA OTIMIZAÇÃO E AS VARIÁVEIS E COVARIÁVEIS DE PROJETO PARA QUADRA COM TORRE ISOLADA	118
GRÁFICO 17 – GRÁFICOS DE DISPERSÃO DA TO, IA, TxAPERMEAVEL, H/Wx e H/Wy PELO ÍNDICE DE SOMBRA MÉDIO PONDERADO (ISMP)	121
GRÁFICO 18 – GRÁFICOS DE DISPERSÃO DA PROFUNDIDADE DA EDIFICAÇÃO, FF, P/A E ÍNDICE DE INFRAESTRUTURA PELO <i>SPATIAL USEFUL DAYLIGHT ILLUMINANCE</i> (SUDI).....	122
GRÁFICO 19 – GRÁFICOS DE DISPERSÃO DO NÚMERO DE ANDARES DA EDIFICAÇÃO E RELAÇÃO ÁREA DE COBERTURA POR ÁREA DE FACHADA (ACOB/AFACH) PELO <i>LOAD COVER FACTOR</i> (LCF)	123
GRÁFICO 20 – GRÁFICOS <i>BOXPLOT</i> DE <i>LOAD COVER FACTOR</i> (LCF), <i>SPATIAL USEFUL DAYLIGHT ILLUMINANCE</i> (SUDI) E ÍNDICE DE SOMBRA MÉDIO PONDERADO (ISMP) PARA PROFUNDIDADE DA EDIFICAÇÃO	125
GRÁFICO 21 – GRÁFICOS <i>BOXPLOT</i> DE <i>LOAD COVER FACTOR</i> (LCF), <i>SPATIAL USEFUL DAYLIGHT ILLUMINANCE</i> (SUDI) E ÍNDICE DE SOMBRA MÉDIO PONDERADO (ISMP) PARA DIMENSÃO DA QUADRA NO EIXO X.....	126
GRÁFICO 22 – GRÁFICOS <i>BOXPLOT</i> DE <i>LOAD COVER FACTOR</i> (LCF), <i>SPATIAL USEFUL DAYLIGHT ILLUMINANCE</i> (SUDI) E ÍNDICE DE SOMBRA MÉDIO PONDERADO (ISMP) PARA DIMENSÃO DA QUADRA NO EIXO Y.....	127
GRÁFICO 23 – GRÁFICOS <i>BOXPLOT</i> DE <i>LOAD COVER FACTOR</i> (LCF), <i>SPATIAL USEFUL DAYLIGHT ILLUMINANCE</i> (SUDI) E ÍNDICE DE SOMBRA MÉDIO PONDERADO (ISMP) PARA NÚMERO DE ANDARES DA EDIFICAÇÃO.....	128
GRÁFICO 24 – GRÁFICOS <i>BOXPLOT</i> DE <i>LOAD COVER FACTOR</i> (LCF), <i>SPATIAL USEFUL DAYLIGHT ILLUMINANCE</i> (SUDI) E ÍNDICE DE SOMBRA MÉDIO PONDERADO (ISMP) PARA AZIMUTE.....	129
GRÁFICO 25 - GRÁFICO DE DISPERSÃO 3D PELOS EIXOS LCF, SUDI E ISMP COM INDICAÇÃO DA FRONTE DE PARETO PARA QUADRA COM TORRE ISOLADA.....	130
GRÁFICO 26 – GRÁFICO DE DEFINIÇÃO DA QUANTIDADE RECOMENDADA DE <i>CLUSTERS</i>	130
GRÁFICO 27 – GRÁFICO DE DISPERSÃO 3D PELOS EIXOS LCF, SUDI E ISMP COM INDICAÇÃO DE <i>CLUSTERS</i> NO FRONTE DE PARETO PARA QUADRA COM TORRE ISOLADA.....	131
GRÁFICO 28 – GRÁFICO DESCRITIVO DOS OBJETIVOS DA OTIMIZAÇÃO DO <i>CLUSTER 1</i> DA TIPOLOGIA COM TORRE ISOLADA	131
GRÁFICO 29 – GRÁFICO DESCRITIVO DAS VARIÁVEIS DE PROJETO DO <i>CLUSTER 1</i> DA TIPOLOGIA COM TORRE ISOLADA	132
GRÁFICO 30 – GRÁFICO DESCRITIVO DOS OBJETIVOS DA OTIMIZAÇÃO DO <i>CLUSTER 2</i> DA TIPOLOGIA COM TORRE ISOLADA	132
GRÁFICO 31 GRÁFICO DESCRITIVO DAS VARIÁVEIS DE PROJETO DO <i>CLUSTER 2</i> DA TIPOLOGIA COM TORRE ISOLADA	133
GRÁFICO 32 – GRÁFICO DESCRITIVO DOS OBJETIVOS DA OTIMIZAÇÃO DO <i>CLUSTER 3</i> DA TIPOLOGIA COM TORRE ISOLADA	133
GRÁFICO 33 – GRÁFICO DESCRITIVO DAS VARIÁVEIS DE PROJETO DO <i>CLUSTER 3</i> DA TIPOLOGIA COM TORRE ISOLADA	133
GRÁFICO 34 - MATRIZ DE CORRELAÇÃO ENTRE OS OBJETIVOS DA OTIMIZAÇÃO E AS VARIÁVEIS E COVARIÁVEIS DE PROJETO PARA QUADRA COM EDIFICAÇÕES EM FITA.....	140
GRÁFICO 35 - GRÁFICOS DE DISPERSÃO DE NÚMERO DE ANDARES, RELAÇÃO DE ÁREA DE COBERTURA POR ÁREA DE FACHADA, ÍNDICE DE APROVEITAMENTO E <i>LOAD COVER FACTOR</i> (LCF)	142
GRÁFICO 36 - GRÁFICOS DE DISPERSÃO DE NÚMERO DE ANDARES, RELAÇÃO DE ÁREA DE COBERTURA POR ÁREA DE FACHADA, ÍNDICE DE APROVEITAMENTO E ÍNDICE DE SOMBRA MÉDIO PONDERADO (ISMP)	144
GRÁFICO 37 – GRÁFICOS <i>BOXPLOT</i> DE <i>LOAD COVER FACTOR</i> (LCF), <i>SPATIAL USEFUL DAYLIGHT ILLUMINANCE</i> (SUDI) E ÍNDICE DE SOMBRA MÉDIO PONDERADO (ISMP) PARA PROFUNDIDADE DA EDIFICAÇÃO	146
GRÁFICO 38 – GRÁFICOS <i>BOXPLOT</i> DE <i>LOAD COVER FACTOR</i> (LCF), <i>SPATIAL USEFUL DAYLIGHT ILLUMINANCE</i> (SUDI) E ÍNDICE DE SOMBRA MÉDIO PONDERADO (ISMP) PARA COMPRIMENTO DA EDIFICAÇÃO	147
GRÁFICO 39 – GRÁFICOS <i>BOXPLOT</i> DE <i>LOAD COVER FACTOR</i> (LCF), <i>SPATIAL USEFUL DAYLIGHT ILLUMINANCE</i> (SUDI) E ÍNDICE DE SOMBRA MÉDIO PONDERADO (ISMP) PARA DISTÂNCIA FRONTAL ENTRE EDIFICAÇÕES.....	148
GRÁFICO 40 – GRÁFICOS <i>BOXPLOT</i> DE <i>LOAD COVER FACTOR</i> (LCF), <i>SPATIAL USEFUL DAYLIGHT ILLUMINANCE</i> (SUDI) E ÍNDICE DE SOMBRA MÉDIO PONDERADO (ISMP) PARA DISTÂNCIA POSTERIOR ENTRE EDIFICAÇÕES.....	149

GRÁFICO 41 – GRÁFICOS <i>BOXPLOT</i> DE <i>LOAD COVER FACTOR</i> (LCF), <i>SPATIAL USEFUL DAYLIGHT ILLUMINANCE</i> (SUDI) E ÍNDICE DE SOMBRA MÉDIO PONDERADO (ISMP) PARA NÚMERO DE ANDARES EDIFICAÇÕES.....	150
GRÁFICO 42 – GRÁFICOS <i>BOXPLOT</i> DE <i>LOAD COVER FACTOR</i> (LCF), <i>SPATIAL USEFUL DAYLIGHT ILLUMINANCE</i> (SUDI) E ÍNDICE DE SOMBRA MÉDIO PONDERADO (ISMP) PARA AZIMUTE	151
GRÁFICO 43 – GRÁFICOS <i>BOXPLOT</i> DE <i>LOAD COVER FACTOR</i> (LCF), <i>SPATIAL USEFUL DAYLIGHT ILLUMINANCE</i> (SUDI) E ÍNDICE DE SOMBRA MÉDIO PONDERADO (ISMP) PARA LARGURA ADICIONAL DA QUADRA	152
GRÁFICO 44 – GRÁFICO DE DISPERSÃO 3D PELOS EIXOS LCF, SUDI E ISMP COM INDICAÇÃO DA FRONTE DE PARETO PARA QUADRA COM EDIFICAÇÃO EM FITA	153
GRÁFICO 45 - GRÁFICO DE <i>C-MEANS CLUSTERING</i> PARA DEFINIÇÃO DA QUANTIDADE IDEAL DE CLUSTERS DA QUADRA COM EDIFICAÇÃO EM FITA	153
GRÁFICO 46 - GRÁFICO DE DISPERSÃO 3D PELOS EIXOS LCF, SUDI E ISMP COM INDICAÇÃO DE CLUSTERS NO FRONTE DE PARETO PARA QUADRA COM EDIFICAÇÃO EM FITA.....	154
GRÁFICO 47 – GRÁFICO DESCRITIVO DOS OBJETIVOS DA OTIMIZAÇÃO DO <i>CLUSTER 1</i> DA TIPOLOGIA COM EDIFICAÇÕES EM FITA	154
GRÁFICO 48 – GRÁFICO DESCRITIVO DAS VARIÁVEIS DE PROJETO DO <i>CLUSTER 1</i> DA TIPOLOGIA COM EDIFICAÇÕES EM FITA	155
GRÁFICO 49 – GRÁFICO DESCRITIVO DOS OBJETIVOS DA OTIMIZAÇÃO DO <i>CLUSTER 2</i> DA TIPOLOGIA COM EDIFICAÇÕES EM FITA	155
GRÁFICO 50 – GRÁFICO DESCRITIVO DAS VARIÁVEIS DE PROJETO DO <i>CLUSTER 2</i> DA TIPOLOGIA COM EDIFICAÇÕES EM FITA	156
GRÁFICO 51 – GRÁFICO DESCRITIVO DOS OBJETIVOS DA OTIMIZAÇÃO DO <i>CLUSTER 3</i> DA TIPOLOGIA COM EDIFICAÇÕES EM FITA	156
GRÁFICO 52 – GRÁFICO DESCRITIVO DAS VARIÁVEIS DE PROJETO DO <i>CLUSTER 3</i> DA TIPOLOGIA COM EDIFICAÇÕES EM FITA	157
GRÁFICO 53 - MATRIZ DE CORRELAÇÃO ENTRE OS OBJETIVOS DA OTIMIZAÇÃO E AS VARIÁVEIS E COVARIÁVEIS DE PROJETO PARA QUADRA COM PÁTIO INTERNO	164
GRÁFICO 54 – GRÁFICOS DE DISPERSÃO DE NÚMERO DE ANDARES, RELAÇÃO DE ÁREA DE COBERTURA POR ÁREA DE FACHADA, ÍNDICE DE APROVEITAMENTO, ÍNDICE DE INFRAESTRUTURA, FATORES H/W E <i>LOAD COVER FACTOR</i> (LCF)	166
GRÁFICO 55 – GRÁFICOS DE DISPERSÃO DE NÚMERO DE ANDARES, RELAÇÃO DE ÁREA DE COBERTURA POR ÁREA DE FACHADA, ÍNDICE DE APROVEITAMENTO, ÍNDICE DE INFRAESTRUTURA, FATORES H/W E ÍNDICE DE SOMBRA MÉDIO PONDERADO (ISMP)	168
GRÁFICO 56 – GRÁFICOS <i>BOXPLOT</i> DE <i>LOAD COVER FACTOR</i> (LCF), <i>SPATIAL USEFUL DAYLIGHT ILLUMINANCE</i> (SUDI) E ÍNDICE DE SOMBRA MÉDIO PONDERADO (ISMP) PARA PROFUNDIDADE DA EDIFICAÇÃO	170
GRÁFICO 57 – GRÁFICOS <i>BOXPLOT</i> DE <i>LOAD COVER FACTOR</i> (LCF), <i>SPATIAL USEFUL DAYLIGHT ILLUMINANCE</i> (SUDI) E ÍNDICE DE SOMBRA MÉDIO PONDERADO (ISMP) PARA DIMENSÃO DA QUADRA EM X	171
GRÁFICO 58 – GRÁFICOS <i>BOXPLOT</i> DE <i>LOAD COVER FACTOR</i> (LCF), <i>SPATIAL USEFUL DAYLIGHT ILLUMINANCE</i> (SUDI) E ÍNDICE DE SOMBRA MÉDIO PONDERADO (ISMP) PARA DIMENSÃO DA QUADRA EM Y	172
GRÁFICO 59 – GRÁFICOS <i>BOXPLOT</i> DE <i>LOAD COVER FACTOR</i> (LCF), <i>SPATIAL USEFUL DAYLIGHT ILLUMINANCE</i> (SUDI) E ÍNDICE DE SOMBRA MÉDIO PONDERADO (ISMP) PARA NÚMERO DE ANDARES.....	173
GRÁFICO 60 - – GRÁFICOS <i>BOXPLOT</i> DE <i>LOAD COVER FACTOR</i> (LCF), <i>SPATIAL USEFUL DAYLIGHT ILLUMINANCE</i> (SUDI) E ÍNDICE DE SOMBRA MÉDIO PONDERADO (ISMP) PARA RECUO DA EDIFICAÇÃO EM X	174
GRÁFICO 61 – GRÁFICOS <i>BOXPLOT</i> DE <i>LOAD COVER FACTOR</i> (LCF), <i>SPATIAL USEFUL DAYLIGHT ILLUMINANCE</i> (SUDI) E ÍNDICE DE SOMBRA MÉDIO PONDERADO (ISMP) PARA RECUO DA EDIFICAÇÃO EM Y	175
GRÁFICO 62 – GRÁFICOS <i>BOXPLOT</i> DE <i>LOAD COVER FACTOR</i> (LCF), <i>SPATIAL USEFUL DAYLIGHT ILLUMINANCE</i> (SUDI) E ÍNDICE DE SOMBRA MÉDIO PONDERADO (ISMP) PARA AZIMUTE	176
GRÁFICO 63 - GRÁFICO DE DISPERSÃO 3D PELOS EIXOS LCF, SUDI E ISMP COM INDICAÇÃO DA FRONTE DE PARETO PARA QUADRA COM PÁTIO INTERNO.....	176
GRÁFICO 64 - GRÁFICO DE <i>C-MEANS CLUSTERING</i> PARA DEFINIÇÃO DA QUANTIDADE IDEAL DE CLUSTERS DA QUADRA COM PÁTIO INTERNO	177
GRÁFICO 65 - GRÁFICO DE DISPERSÃO 3D PELOS EIXOS LCF, SUDI E ISMP COM INDICAÇÃO DE CLUSTERS NO FRONTE DE PARETO PARA QUADRA COM PÁTIO INTERNO	177
GRÁFICO 66 – GRÁFICO DESCRITIVO DOS OBJETIVOS DA OTIMIZAÇÃO DO <i>CLUSTER 1</i> DA TIPOLOGIA COM PÁTIO INTERNO	178
GRÁFICO 67 – GRÁFICO DESCRITIVO DAS VARIÁVEIS DE PROJETO DO <i>CLUSTER 1</i> DA TIPOLOGIA COM PÁTIO INTERNO	178
GRÁFICO 68 – GRÁFICO DESCRITIVO DOS OBJETIVOS DA OTIMIZAÇÃO DO <i>CLUSTER 2</i> DA TIPOLOGIA COM PÁTIO INTERNO	179
GRÁFICO 69 – GRÁFICO DESCRITIVO DAS VARIÁVEIS DE PROJETO DO <i>CLUSTER 2</i> DA TIPOLOGIA COM PÁTIO INTERNO	179
GRÁFICO 70 – GRÁFICO DESCRITIVO DOS OBJETIVOS DA OTIMIZAÇÃO DO <i>CLUSTER 3</i> DA TIPOLOGIA COM PÁTIO INTERNO	180
GRÁFICO 71 – GRÁFICO DESCRITIVO DAS VARIÁVEIS DE PROJETO DO <i>CLUSTER 3</i> DA TIPOLOGIA COM PÁTIO INTERNO	180
GRÁFICO 72 – GRÁFICO <i>BOXPLOT</i> DO ÍNDICE DE SOMBRA MÉDIO PONDERADO (ISMP) PARA AS TIPOLOGIAS DE QUADRA.....	187
GRÁFICO 73 – GRÁFICO <i>BOXPLOT SPATIAL USEFUL DAYLIGHT ILLUMINANCE</i> (SUDI) PARA AS TIPOLOGIAS DE QUADRA.....	188

GRÁFICO 74 – GRÁFICO *BOXPLOT* DO *LOAD COVER FACTOR* (LCF) PARA AS TIPOLOGIAS DE QUADRA 189

GRÁFICO 75 – GRÁFICO *BOXPLOT* DO VOLUME DOMINADO PARA AS TIPOLOGIAS DE QUADRA ... 190

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – DESCRIÇÃO GERAL DO CORPO DA LITERATURA	29
TABELA 2 – CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES ÓTICAS DAS SUPERFÍCIES OPACAS	96
TABELA 3 - CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES ÓTICAS DOS ELEMENTOS TRANSLÚCIDOS	96
TABELA 4 – PARÂMETROS DE CONFIGURAÇÃO DE SIMULAÇÃO DO <i>RADIANCE</i>	96
TABELA 5 – VALORES DOS LIMITES DE ILUMINÂNCIA DE UDI	97
TABELA 6 - CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA DE GERAÇÃO FOTOVOLTAICO	99
TABELA 7 – PORCENTAGEM DE COBRIMENTO DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS POR TIPO DE SISTEMA DE VEDAÇÃO.....	99
TABELA 8 - PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS DOS COMPONENTES CONSTRUTIVOS OPACOS	101
TABELA 9 - PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS E ÓTICAS DO VIDRO	102
TABELA 10 – CARACTERIZAÇÃO DAS CARGAS INTERNAS	102
TABELA 11 – CONFIGURAÇÃO DO <i>OPOSSUM</i> PARA CADA TIPOLOGIA DE QUADRA	106
TABELA 12 – <i>C-MEANS CLUSTERING</i> DA QUADRA COM TORRE ISOLADA	130
TABELA 13 – CARACTERÍSTICAS DOS CINCO CENÁRIOS MAIS BEM RANQUEADOS PARA ÍNDICE DE SOMBRA MÉDIO PONDERADO (ISMP) DA QUADRA COM TORRE ISOLADA	135
TABELA 14 - CARACTERÍSTICAS DOS 5 MELHORES CENÁRIOS PARA <i>SPATIAL USEFUL DAYLIGHT ILLUMINANCE</i> (SUDI) DA QUADRA COM TORRE ISOLADA	136
TABELA 15 - CARACTERÍSTICAS DOS 5 MELHORES CENÁRIOS PARA <i>LOAD COVER FACTOR</i> (LCF) DA QUADRA COM TORRE ISOLADA	137
TABELA 16 - CARACTERÍSTICAS DOS 5 MELHORES CENÁRIOS PARA VOLUME DOMINADO DA QUADRA COM TORRE ISOLADA.....	138
TABELA 17 – TABELA RESUMO DE <i>C-MEANS CLUSTERING</i> DA QUADRA COM EDIFICAÇÃO EM FITA.....	153
TABELA 18 – CARACTERÍSTICAS DOS CINCO CENÁRIOS MAIS BEM RANQUEADOS PARA ÍNDICE DE SOMBRA MÉDIO PONDERADO (ISMP) DA QUADRA COM EDIFICAÇÃO EM FITA	159
TABELA 19 – CARACTERÍSTICAS DOS CINCO CENÁRIOS MAIS BEM RANQUEADOS PARA <i>SPATIAL USEFUL DAYLIGHT ILLUMINANCE</i> (SUDI) DA QUADRA COM EDIFICAÇÃO EM FITA.....	160
TABELA 20 – CARACTERÍSTICAS DOS CINCO CENÁRIOS MAIS BEM RANQUEADOS PARA <i>LOAD COVER FACTOR</i> (LCF) DA QUADRA COM EDIFICAÇÃO EM FITA	161
TABELA 21 – CARACTERÍSTICAS DOS CINCO CENÁRIOS MAIS BEM RANQUEADOS PARA VOLUME DOMINADO (VD) DA QUADRA COM EDIFICAÇÃO EM FITA	162
TABELA 22 - <i>C-MEANS CLUSTERING</i> DA QUADRA COM PÁTIO INTERNO	177
TABELA 23 – CARACTERÍSTICAS DOS CINCO CENÁRIOS MAIS BEM RANQUEADOS PARA ÍNDICE DE SOMBRA MÉDIO PONDERADO (ISMP) DA QUADRA COM PÁTIO INTERNO.....	182
TABELA 24 – CARACTERÍSTICAS DOS CINCO CENÁRIOS MAIS BEM RANQUEADOS PARA <i>SPATIAL USEFUL DAYLIGHT ILLUMINANCE</i> (SUDI) DA QUADRA COM PÁTIO INTERNO	183
TABELA 25 – CARACTERÍSTICAS DOS CINCO CENÁRIOS MAIS BEM RANQUEADOS PARA <i>LOAD COVER FACTOR</i> (LCF) DA QUADRA COM PÁTIO INTERNO	184
TABELA 26 – CARACTERÍSTICAS DOS CINCO CENÁRIOS MAIS BEM RANQUEADOS PARA VOLUME DOMINADO (VD) DA QUADRA COM PÁTIO INTERNO.....	185
TABELA 27 – TABELA DESCRITIVA DO ÍNDICE DE SOMBRA MÉDIO PONDERADO (ISMP) PARA AS TIPOLOGIAS DE QUADRA.....	187
TABELA 28 – TABELA DESCRITIVA DO <i>SPATIAL USEFUL DAYLIGHT ILLUMINANCE</i> (SUDI) PARA AS TIPOLOGIAS DE QUADRA.....	189
TABELA 29 – TABELA DESCRITIVA DO <i>LOAD COVER FACTOR</i> (LCF) PARA AS TIPOLOGIAS DE QUADRA	189
TABELA 30 – TABELA DESCRITIVA DO VOLUME DOMINADO (VD) PARA AS TIPOLOGIAS DE QUADRA	190

LISTA DE EQUAÇÕES

EQUAÇÃO 1 – CÁLCULO DO VOLUME DOMINADO (VD)	76
EQUAÇÃO 2 - FÓRMULA DO ÍNDICE DE SOMBRA PARA CADA PONTO	92
EQUAÇÃO 3 – FÓRMULA DO ÍNDICE DE SOMBRA MÉDIO	93
EQUAÇÃO 4 – FÓRMULA DO ÍNDICE DE SOMBRA PARA FRIO OU CALOR PARA CADA PONTO	94
EQUAÇÃO 5 – FÓRMULA DO ÍNDICE DE SOMBRA PONDERADO.....	94
EQUAÇÃO 6 – FÓRMULA DO ÍNDICE DE SOMBRA MÉDIO PONDERADO	94
EQUAÇÃO 7 – FÓRMULA DA NORMALIZAÇÃO DA ENERGIA GERADA PELA ÁREA CONSTRUÍDA.....	100
EQUAÇÃO 8 – FÓRMULA DA ENERGIA CONSUMIDA NORMALIZADA	104
EQUAÇÃO 9 – FÓRMULA DO BALANÇO ENERGÉTICO SIMPLES.....	104
EQUAÇÃO 10 – FÓRMULA DO <i>LOAD COVER FACTOR</i>	105
EQUAÇÃO 11 – RELAÇÃO LÓGICA SIMPLIFICADA DO <i>LOAD COVER FACTOR</i>	105
EQUAÇÃO 12 – FÓRMULA DA RAZÃO ENTRE ÁREA DE COBERTURA E ÁREA DE FACHADA.....	106
EQUAÇÃO 13 – FÓRMULA DO FATOR FORMA.....	107
EQUAÇÃO 14 – FÓRMULA DA RAZÃO DE COMPACIDADE	107
EQUAÇÃO 15 – FÓRMULA DA RAZÃO ENTRE PERÍMETRO E ÁREA DO PAVIMENTO TIPO	107
EQUAÇÃO 16 – FÓRMULA DA TAXA DE OCUPAÇÃO	108
EQUAÇÃO 17 – FÓRMULA DO ÍNDICE DE APROVEITAMENTO GLOBAL.....	108
EQUAÇÃO 18 – FÓRMULA DA TAXA DE ÁREA PERMEÁVEL	108
EQUAÇÃO 19 – FÓRMULA DA TAXA DE INFRAESTRUTURA	109
EQUAÇÃO 20 – FÓRMULA DO FATOR H/W	109

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 - ESTRUTURA DA TESE	10
QUADRO 2 – <i>STRING</i> DE BUSCA EMPREGADA NA BASE DE DADOS SCOPUS	27
QUADRO 3 – DEFINIÇÃO DA FRONTE DE PARETO E VOLUME DOMINADO	73
QUADRO 4 – VERSÕES DOS PROGRAMAS EMPREGADAS NA MODELAGEM E SIMULAÇÃO	87

INTRODUÇÃO

A necessidade de descarbonizar as atividades humanas torna-se cada vez mais evidente diante dos impactos significativos da atividade humana contemporânea no ambiente natural, notadamente devido à extensa utilização de combustíveis fósseis nos diversos processos produtivos. Os recentes recortes históricos de temperatura revelam uma alarmante realidade de crise ambiental com superação do limite de aquecimento global de 1,5° C, com a aproximação a pontos de não retorno no processo de mudanças climáticas. Este cenário de acelerada crise ambiental inclusive já é caracterizada como a sexta extinção em massa da história de nosso planeta (Kolbert, 2014). As mudanças climáticas, apontadas como sinais evidentes dessa situação, impõem inúmeros desafios à humanidade e à natureza que não podem ser postergados (UNDP, 2020).

Além disso, o estresse que a ação antrópica lança sobre a natureza pode se desdobrar em muitos aspectos, já que a pandemia de covid-19 lançou luz à exigência de uma sociedade mais resiliente, para melhor suportar e lidar com tais situações (IRP, 2020). Além disso, mais do que apenas mitigar o impacto das ações humanas, é necessário uma mudança paradigmática para uma relação mais simbiótica entre humanos e natureza, na qual a atividade humana possa melhorar a natureza – e não comprometer –, que tem sido chamadas de desenho regenerativo (Naboni; Havinga, 2019). Neste sentido, para mitigar o impacto das mudanças climáticas, é fundamental que a sociedade realize uma rápida transição para um futuro pós-carbono, que não dependa exclusivamente de combustíveis fósseis. Para esse fim, o ambiente construído possui papel central, desde que promova práticas mais sustentáveis de forma duradoura (Commission, 2008).

O ambiente construído é uma das principais fontes de esgotamento ambiental, pois é responsável pelo consumo de cerca de metade de todas as matérias-primas extraídas da natureza pela atividade humana (John, 2000; Ruuska; Häkkinen, 2014). Para equacionar essa questão, nas últimas décadas houve um crescimento no emprego de certificações ambientais no setor de construção civil (Reichardt *et al.*, 2012), como LEED, BREAM, *Living Challenge*. Essa busca por edifícios mais sustentáveis visa diminuir o impacto no ambiente natural, o que, em grande parte, significa edifícios com maior desempenho. Esses edifícios se sobressaem pela melhor gestão de recursos cada vez mais escassos como água, minerais, madeira, mas com destaque especial à energia.

Essa ênfase na questão energética não surpreende ao observar a demanda energética do ambiente construído. De acordo com o relatório do

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (Ürge-Vorsatz *et al.*, 2014)¹, em 2010, os edifícios consumiram 32% de toda a energia, ou 51% de toda a eletricidade gerada em todo o mundo, o que correspondeu a 19% de todas as emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE). Especificamente, no Brasil, os edifícios são responsáveis pelo consumo de 47% de toda a energia elétrica gerada (Lorenço; Pessoa; Lamberts, 2013).

A energia desempenha um papel importante na busca pela sustentabilidade, não apenas pelo impacto do consumo direto de energia, mas pelo impacto indireto associado a outros recursos. De fato, a energia – em sentido mais amplo, além da eletricidade – é o que impulsiona o universo, a vida e, conseqüentemente, a sociedade, suas organizações e seus processos desde o início dos tempos. De acordo com os Princípios de Energia em Sistemas Ecológicos (Odum, 1994) a energia é o regulador dos processos físicos de equilíbrio e degradação no universo (três primeiras leis da termodinâmica), mas também responsável pela organização de todos os sistemas ecológicos e seu padrão de evolução. Nesse sentido, a economia – como todos os esforços humanos – é um subconjunto do sistema ecológico e está confinada às restrições impostas pela natureza como seu sistema de suporte (Daly, 2015). Assim, para qualquer futuro razoável, uma economia sustentável deve obedecer aos limites da natureza e aos fluxos energéticos (Georgescu-Roegen, 1971; Georgescu Roegen-, 1994). Portanto, uma gestão adequada da energia durante todo o ciclo da natureza é fundamental para a realização de uma sociedade sustentável, e especificamente, do ambiente construído.

Com os avanços tecnológicos da primeira metade do século XX, como eletrodomésticos e especialmente condicionamento artificial – aquecimento e resfriamento –, a demanda de energia tem crescido drasticamente. Isso levou a um crescente distanciamento entre arquitetura e clima, com vasta repercussão do assunto por autores seminais (Banham, 1969; Fathy, 1969; Olgyay, 1963; Romero, 2013). Na década de 1970, com a crise da OPEP (Organização dos Países Exportadores de Petróleo), tornou-se evidente a insustentabilidade de edifícios de alta demanda energética, que se desdobrou nos primeiros esforços modernos em direção à eficiência energética no campo do ambiente construído (Keller; Burke, 2010).

Estes esforços pela melhoria da eficiência energética no ambiente construído são contínuos e constantes. Mais recentemente, um dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Organização das Nações Unidas (ONU) trata especificamente da Energia Limpa (#7), que inclui o aumento do emprego de fontes renováveis (UN, 2016). Além disso, a Nova Agenda Urbana (UN Habitat, 2016), também da ONU-Habitat, afirma que a moradia adequada e o acesso à energia especialmente limpa são essenciais para um futuro sustentável. Adicionalmente, a mesma Agenda Urbana (UN Habitat, 2016), destaca a importância da forma urbana, infraestrutura e projeto arquitetônico como principais impulsionadores da eficiência energética, energia renovável e resiliência urbana. Em particular, nas economias em desenvolvimento situadas em climas tropicais, enfrentar os desafios da urbanização e das mudanças climáticas é imperativo. A crescente demanda por resfriamento artificial emerge como um dos

¹ Autores do relatório do IPCC.

principais obstáculos à eficiência energética no ambiente construído, conforme destacado pela Agência Internacional de Energia (IEA, 2018).

Para abordar a questão da eficiência energética nos edifícios, há um número crescente de iniciativas de construção eficientes em termos energéticos em todo o mundo, como etiquetas nacionais – por exemplo, *PBEdifica*², *EnergyStar*³ – e padrão voluntário internacional – como *PassivHaus*⁴, *Minergie*⁵. No entanto, um dos padrões mais rigoroso é o *Zero-Energy Buildings* (ZEBs), ou edifícios de balanço energético nulo em português, que almeja edifícios com geração energética equivalente ao seu consumo no período de um ano. Para isso, deve reduzir a demanda energética com medidas de eficiência e conservação de energia e contemplar sua demanda por meio de fontes de energia renováveis (Torcellini; Pless; Deru, 2006). Muitas políticas para isso já estão implementadas, como a ZEBRA 2020⁶, na Europa, e o Desafio AIA⁷ 2030, nos EUA. No Brasil, uma das primeiras iniciativas de fomento estatal foi a chamada pública da Eletrobras NZEB Brasil, de 2019, vinculada ao PROCEL Edifica, em que os 4 projetos vencedores foram contemplados com recurso para construção de edificações modelo (Eletrobras, 2019).

Entretanto, apesar dos avanços realizados nas últimas décadas, a implantação do padrão ZEB ainda não conseguiu alterar o panorama da eficiência energética das edificações de forma significativa. Para acelerar significativamente a transformação da eficiência energética no ambiente construído, é crucial

estender o conceito de *Zero-Energy* (ZE) além do escopo de edifícios individuais e abranger o parque construído, escalas maiores. A aplicação do conceito de ZEB na Escala Urbana tem sido contemplada desde pelo menos o início dos anos 2000, com estudos em diferentes escalas e objetos, com grande variedade de terminologia, como: *Zero-Energy Cites*, *Zero-Energy Districts*, *Zero-Energy Communities*, *Zero-Energy Neighborhoods*, entre outros. Essa abordagem visa aumentar o ritmo das melhorias de eficiência energética do setor de construção, ao considerar o entorno das edificações, sinergias energéticas entre os edifícios e programas e outros aspectos além da demanda de energia predial, como transporte, infraestrutura pública e setor produtivo (Amaral *et al.*, 2018; Carlisle; Geet; Pless, 2009; Marique; Reiter, 2014a). Dessa forma, esse novo enquadramento está alinhado com o ODS #7 Energias Limpas mencionado anteriormente, mas também com o ODS #11 Cidades e Comunidades Sustentáveis (UN, 2016).

Nesse sentido, a questão da eficiência energética no parque construído deixa de ser apenas de projeto de arquitetura e engenharia civil e passa a ser também um problema de projeto urbanístico e desenho urbano, uma questão da cidade. Algo inevitável, visto que arquitetura e cidade são elementos indissociáveis e não podem ser entendidos um sem o outro. Assim, essa mudança de perspectiva da escala e escopo de análise da eficiência energética nas edificações já foi notada

² Programa de Brasileiro de Etiquetagem de Edificações (PBEdifica).

³ Sistema de etiquetagem de eficiência energética dos Estados Unidos.

⁴ Norma alemã de eficiência energética voluntária.

⁵ Norma suíça de eficiência energética voluntária.

⁶ Projeto europeu Estratégia de *Nearly Zero-Energy Buildings* 2020 com foco na transição para *nZEB*.

⁷ *American Institute of Architecture*, em tradução direta Instituto Americano de Arquitetura.

pelo crescente número de projetos da Agência Internacional de Energia (AIE)⁸, como a *Task 60* sobre Bairros Solares. Algo que deve se acentuar cada vez mais, especialmente aliado ao conceito emergente de *Smart City*, e a prática *Digital Twins* e *City Information Modeling* (CIM).

No entanto, da mesma forma que o ZEB, atualmente, a maioria dos esforços em relação aos ZEBs na escala urbana tem se concentrado na eficiência energética dos sistemas ativos e na geração de energia e com predominância em países centrais, com climas temperado ou frio. Isso implica em maior ênfase nos sistemas de aquecimento, que difere drasticamente das condições de muitos países periféricos em climas tropicais. Neste contexto, deve-se haver maior foco no resfriamento – seja ele ativo ou passivo – em vez de aquecimento, como indicado por diversos autores que sugerem a prática deliberada de controle solar, ou evitar a exposição ao sol (Boake, 2014), ou mesmo a adoção de um projeto antissolar (Sternfeld, 1953 *apud* Barber, 2016).

O desenvolvimento de estratégias para os climas mais quentes é fundamental para combater os efeitos emergentes das mudanças climáticas. Essas regiões enfrentam desafios significativos devido ao aumento populacional, à rápida urbanização e à ascensão social, o que resulta em uma maior demanda por bens de consumo, como eletrodomésticos e, particularmente, aparelhos de ar-condicionado (IEA, 2018). Adicionalmente, há uma tendência de soluções de eficiência e geração energética baseadas em inovação com maior complexidade tecnológica em vez de soluções mais acessíveis, com tecnologia mais simples e

maior ênfase na conservação energética, que podem evitar a necessidade de soluções ativas completamente, ou pelo menos durante alguns períodos.

Para isso é fundamental conceber uma arquitetura adaptada ao clima local, onde estratégias passivas podem desempenhar um papel crucial na redução do consumo e dependência de energia das edificações. Decisões muitas vezes iniciais de projeto como forma, técnica de construção e materiais estão estritamente ligadas ao consumo de energia do edifício (Catalina; Virgone; lordache, 2011; Naboni *et al.*, 2015; Olgyay, 1963). Todos esses aspectos estão interrelacionados com as decisões de projeto arquitetônico e urbano desde seus primeiros esboços e têm grande influência no desempenho térmico, iluminação natural e ventilação dos ambientes. Esses aspectos têm um grande impacto no consumo operacional de energia, que corresponde à maior parte da energia consumida pelo edifício ao longo de seu ciclo de vida (UNEP, 2007).

Especificamente, a morfologia das edificações e do conjunto urbano é considerada um dos elementos fundamentais no desenvolvimento de uma arquitetura adaptada ao clima e, como estratégia passiva, se encontra na base da pirâmide de hierarquia de energia. Como já apontado por Steemers e Baker (Baker; Steemers, 2016), as questões de projeto da edificação, o que inclui aspectos morfológicos e de implantação, possuem o maior impacto na variação do consumo de energia – na faixa de 2,5 vezes.

No entanto, mais do que uma mudança de paradigma de escala de análise, questionam-se as métricas pautadas exclusivamente em eficiência energética no sentido mais restrito do conceito, em vez de um conjunto de

⁸ Ou em inglês, *International Energy Agency* (IEA)

indicadores que também contemple a qualidade e o conforto ambiental e o bem-estar do usuário. Neste contexto, dentro da ideia de *Design* Regenerativo, defende-se a necessidade de se considerar uma avaliação holística, além da mera eficiência energética, com maior ênfase na análise da qualidade ambiental e bem-estar do usuário, aspecto que se tornou ainda mais relevante em tempos de pandemia (Naboni; Havinga, 2019; Natanian; Auer, 2020). Isso corrobora a necessidade de avaliar com precisão estratégias passivas em relação ao desempenho térmico e à iluminação natural, por exemplo. Além disso, a qualidade ambiental não deve se restringir à Qualidade Ambiental Interna (QAI), mas também a todo o meio ambiente, incluindo a escala urbana, no que diz respeito ao microclima, ilha de calor urbano, entre outros problemas associados a condição urbana.

Uma abordagem baseada em evidências é essencial para um melhor processo de tomada de decisão para de fato alcançar ambientes com maior desempenho (Attia *et al.*, 2012; Hamilton; Watkins, 2008), seja em eficiência energética, geração de energia ou desempenho ambiental do próprio edifício ou microclima. Neste contexto, as ferramentas computacionais desempenham papel fundamental, pois permitem a avaliação quantitativa de diversos cenários em um período razoável (Hensen; Lamberts, 2011). Embora a *Building Performance Simulation* (BPS) tenha seja empregada desde meados do século XX, é nas últimas duas décadas que esta abordagem se destaca por sua capacidade de melhorar tanto edifícios existentes quanto novos, ao avaliar a qualidade ambiental e, conseqüentemente, aprimorar seu desempenho (Athienitis; Brien, 2015; Keller; Burke, 2010). Assim, *Building Performance Simulation* (BPS) emerge como uma ferramenta crucial para a tomada de decisões embasadas em evidências no

projeto de edificações (Attia *et al.*, 2012), especialmente dentro do contexto de projeto integrado (Athienitis; Brien, 2015; Keller; Burke, 2010).

Contudo, habitualmente a avaliação do desempenho do edifício ainda é realizada para um edifício de cada vez. Desde o início da década, muitos esforços têm sido desenvolvidos para preencher essa lacuna como modelagem rápida de energia, modelagem de energia de construção urbana e modelagem de distrito (Emmanuel; Jérôme, 2015; Peronato *et al.*, 2015; Reinhart; Cerezo Davila, 2016). Entretanto, o enfoque ainda é predominante na análise do desempenho termoenergético dos ambientes internos em vez de uma abordagem holística que inclua o desempenho do ambiente urbano.

Para alcançar esse objetivo de uma avaliação holística, não há, atualmente, ferramenta que possa abordar todos os aspectos, o que torna necessário o uso de um conjunto de ferramentas ou uma caixa de ferramentas, como sugerem Mackey e Sadeghipour Roudsari (2017). Essa abordagem de simulação computacional de desempenho ambiental holística é potencializada pelos avanços de outras técnicas de *design* computacional, especialmente o *design* paramétrico e o emprego de algoritmos de busca – ou otimização. Esse conjunto de recursos possibilita automação de processos, com mais rápida interação de cenários e conversão de melhores resultados, uma abordagem mais proativa e exploratória para informar as decisões de projeto (Negendahl; Nielsen, 2015; Ostergard *et al.*, 2016). Nesse sentido, uma prática computacional de fato – ao invés de computadorizada – auxilia na exploração do universo de soluções possíveis (Knecht; Stefanescu; Koenig, 2020) ao invés de meramente testar soluções, e assim o processo passa de *form-making* – ou desenvolver uma forma – para *form-finding* – de encontrar uma forma (Kolarevic, 2003).

1.1 PROBLEMA DE PESQUISA

Para enfrentar as mudanças climáticas e a crise ambiental, é crucial avançar em direção a uma sociedade pós-carbono, o que requer a minimização da demanda energética do ambiente construído e o uso de fontes renováveis de energia. A eficiência energética é primordial para alcançar edifícios de alto desempenho e minimizar o impacto antrópico na natureza, além de combater as mudanças climáticas, aspectos centrais para um futuro pós-carbono. O impacto no meio ambiente é evidente ao observar que as edificações, somente na fase de operação, são responsáveis pelo consumo de 19% de toda a energia gerada mundialmente e de 25% de todas as emissões dos gases do efeito estufa (Ürge-Vorsatz *et al.*, 2014).

Os *Zero-Energy Buildings* representam um dos padrões de eficiência energética mais exigentes, pois mais do que reduzir o consumo de energia por medidas de conservação e eficiência energética, também produzem energia de fontes de renováveis suficiente para suprir sua demanda anual (Torcellini; Pless; Deru, 2006). No entanto, em virtude do baixo ritmo de implementação dos *Zero-Energy Buildings*, é imperativo abordar a questão numa escala mais ampla, por meio de estudos dedicados ao parque construído, em vez de pesquisas de edifícios únicos. Assim, as pesquisas em *Zero-Energy Buildings* na escala urbana almejam equacionar essas questões.

Apesar de historicamente estas pesquisas possuírem maior enfoque nos sistemas energéticos, como rede de distribuição e geração energética, e em sistemas ativos, como condicionamento e iluminação artificial, há crescente interesse em questões de estratégias passivas, que se localizam na base da pirâmide de hierarquia energética do ambiente construído. Como indicam Baker e

Steemers (Baker; Steemers, 2016), estes elementos da base da pirâmide são prioritários visto que possuem efeito cumulativo na eficiência energética. Neste contexto, o desenho urbano é um tópico emergente, com destaque a aspectos da forma urbana (Koutra; Becue; Ioakimidis, 2017; Marique; Reiter, 2014b; Natanian; Aleksandrowicz; Auer, 2019; Ratti; Baker; Steemers, 2005), o que representa um passo importante para se pensar a cidade de forma ambientalmente responsável por meio de uma visão global e integrativa, características do campo de pesquisa em arquitetura e urbanismo.

No entanto, assim como nas pesquisas *Zero-Energy Buildings*, estudos dentro desta conjuntura são limitados se comparados à literatura em países centrais, especialmente europeus e estadunidenses (IEA, 2018). Contudo, os países em desenvolvimento desempenham um papel significativo na transição energética, dado os contextos climáticos, habitualmente tropicais, o crescimento da população urbana e a sua maior vulnerabilidade às mudanças climáticas. Mesmo quando o *design* passivo é levado em consideração, a maioria das soluções desenvolvidas são concebidas principalmente para climas predominantemente frios, com o alto emprego de isolamento e envelopes herméticos, bem como os direitos solares passivos. Geralmente, essas abordagens de *design* passivo enfatizam o ganho direto de calor solar, que deve ser minimizado em climas predominantemente quentes (Boake, 2014, Sternfeld, 1953 *apud* Barber, 2016).

Nos últimos anos, ocorrem avanços significativos com maior número de pesquisas que contemplam o estudo em *Zero-Energy Buildings* na escala urbana com enfoque na forma urbana dentro de contextos climáticos tropicais (Natanian; Aleksandrowicz; Auer, 2019; Natanian; Auer, 2020; Natanian,; Aleksandrowicz; Auer, 2019). No Brasil, há também marcos importantes no estudo da eficiência

energética da forma urbana (Birck; Amorim, 2020; Martins *et al.*, 2019, 2016; Martins; Bonhomme; Adolphe, 2013; Santana *et al.*, 2019). Entretanto, especialmente nos estudos brasileiros, há ainda uma predominância de modelos de simulação simplificados, com ênfase em estudos de irradiação para analisar o desempenho térmico, geração de energia e eficiência energética. Algo que pode ser explicado pelos custos computacionais envolvidos na época das pesquisas.

Com os avanços de técnicas computacionais, há uma necessidade de se desenvolver e experimentar soluções que auxiliem na exploração do universo projetual. O tripé de *design* computacional composto por *design* paramétrico, simulação de desempenho ambiental e algoritmos de busca pode contribuir de forma significativa. Entretanto, no campo do ambiente construído ainda há predominância de algoritmos de busca evolutivos – ou genéticos – para realização de otimização, apesar de não serem a técnica computacional mais empregada em ciências da computação e ciências de dados (Wortmann; Nannicini, 2017). Assim, há crescente interesse no aprofundamento de estudos com técnicas mais consolidadas em outros campos, como modelos de aprendizagem de máquina por meio de *surrogate models*, o que pode ampliar a compreensão e eficácia na resolução desses desafios. Adicionalmente, este tipo de estudo acarreta grande número de dados, o que dificulta a tomada de decisão, que deveria ser questão central dessas técnicas computacionais. Portanto, é fundamental avançar investigações a respeito da visualização e agregação dos resultados.

Adicionalmente, de forma semelhante às pesquisas *Zero-Energy Buildings*, os esforços de pesquisa de projeto de *Zero-Energy Buildings* na escala

urbana ainda têm maior enfoque principalmente em medidas de eficiência energética de sistemas ativos e seu consumo de energético, ou nos sistemas de geração e distribuição de energia. Em sua maioria, a avaliação é realizada exclusivamente em termoenergéticos em detrimento de outros aspectos que possam explicar o consumo ou geração de energia, bem como o desempenho ambiental, o conforto humano, a saúde e o bem-estar. Portanto, é preciso atualizar a abordagem para avaliar esses ambientes, de forma mais holística (Brown; Naboni; Havinga, 2019a; Naboni *et al.*, 2019; Naboni; Luca, 2021), mais centrada na experiência humana, que contemple a atuação ambiental do interior dos edifícios, bem como o ambiente urbano.

Portanto, esta tese evidencia a necessidade de uma estrutura capaz de analisar a aplicação do conceito de *Zero-Energy* para além de um único edifício, mas na escala urbana, desde os estágios iniciais de projeto, especialmente em climas tropicais, com a necessidade de reduzir o ganho de calor e contar com soluções de baixo custo e de baixa tecnologia, com ênfase em estratégias passivas. Essa abordagem deve integrar o desenho urbano à arquitetura, microclima ao desempenho da construção, e considerar não apenas o equilíbrio energético dos edifícios, mas outros aspectos⁹ da demanda energética, suas fronteiras espaciais e temporais, bem como outras métricas¹⁰ que explicam o equilíbrio energético e o conforto humano e o bem-estar. Além disso, inclui também os desafios da interoperabilidade, comunicação e colaboração para integrar a análise *Zero-Energy Buildings* na escala urbana em um escopo mais amplo de *Smart City* e estrutura de *City Information Modeling*.

⁹ Como transporte, indústria, agricultura, espaço públicos.

¹⁰ Como conforto térmico, iluminação natural, qualidade do ar.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Analisar o potencial de diferentes tipologias de quadra residenciais para o contexto climático de Brasília para obtenção de *Zero-Energy Building* na escala urbana, por meio de otimização multiobjetivo com critérios holísticos.

1.2.2 Objetivos específicos

- I. Apresentar um panorama teórico e conceitual fundamentado em análise bibliométrica do campo de pesquisa *Zero-Energy Building* na escala urbana;
- II. Desenvolver uma estrutura de avaliação computacional para a análise holística do *Zero-Energy Building* na escala urbana na etapa de concepção de projeto;
- III. Discutir potenciais indicadores e estratégias de desenho urbano baseados no desempenho ambiental com enfoque na obtenção de *Zero-Energy Building* na escala urbana e em abordagem computacional.

1.3 CONTRIBUIÇÕES

Esta pesquisa apresenta contribuições ao campo de pesquisa em 3 frentes principais: 1. contribuição teórica e conceitual; 2. metodológica e computacional; e 3. instrumental em questões de projeto urbanístico e desenho urbano.

Embora a crescente atenção, o campo de pesquisa da ZEB na escala urbana em todas as suas variações – como o *Zero-Energy District*, *Zero-Energy*

Community, *Zero-Energy Neighborhood*, entre outros – ainda está em consolidação, o que demanda um amadurecimento quanto à terminologia, abordagens, métodos, parâmetros, ferramentas, entre outros. Portanto, avaliar o corpo da literatura é essencial para a cristalização e desenvolvimento do campo de pesquisa. Mais do que padronizar a terminologia e os métodos, melhor compreender o campo de pesquisa pode ser fundamental para o seu amadurecimento e auxiliar futuros desenvolvimentos.

Metodologicamente, busca-se contribuir tanto com a experimentação com procedimentos de análise computacional baseados no tripé *Design Paramétrico*, *Simulação de Desempenho Ambiental*, *Otimização*, além da abordagem do tratamento de dados. Por um lado, há o emprego de técnicas de simulação mais robustas como modelos termoenergéticos completos, que melhoram a resolução dos dados. Por outro lado, há a contrapartida de indicadores simplificados, que, apesar de menos precisos, têm menor custo computacional e permitem maior exploração do universo projetual pelo algoritmo de busca. Nesse sentido, os resultados obtidos podem servir de indicação sobre a adequação dessas abordagens. Adicionalmente, o trabalho apresenta técnicas de aprendizagem de máquina para o tratamento dos dados do processo de otimização apoiada por simulação, e dessa forma visa contribuir com a tomada de decisão a partir dessas técnicas computacionais.

Por fim, a pesquisa busca contribuir de forma instrumental com as questões práticas de projeto urbanístico e desenho urbano. Assim, para que pesquisas como esta tenham relevância prática, é fundamental que seus resultados se tornem acessíveis a profissionais de planejamento urbano que sejam leigos em técnicas computacionais e análises ambientais. Apesar de tratar de

soluções morfológicas genéricas, a pesquisa tem a intenção de desenvolver diretrizes práticas para o desenvolvimento de políticas públicas de planejamento no contexto local do Distrito Federal. Adicionalmente, o trabalho discute perspectivas importantes de *design* computacional aplicado ao planejamento urbano ambiental, como por exemplo processos generativos de forma e impacto de Inteligência Artificial.

1.4 ORIGINALIDADE

Especificamente quanto à originalidade e inovação apresentada pela pesquisa, destacam-se três aspectos mais relevante:

- i. **A avaliação do ZEB na escala urbana nos trópicos:** embora o ZEB na escala urbana tenha sido realizado nos climas tropicais, a maioria destas iniciativas está focada no potencial de geração de energia, ou visa estratégias frequentemente utilizadas em climas temperados, que basicamente se concentram na maximização da eficiência do HVAC. A presente pesquisa visa explorar ainda mais o *design* passivo, especialmente da questão da morfologia urbana, que se encontra na base da pirâmide de hierarquia energética.
- ii. **Visão holística e métricas:** a maioria dos estudos no ZEB na escala urbana foca em aspectos diretamente relacionados à energia, porém percebe-se uma mudança para uma abordagem de análise mais abrangente. Dentro do contexto do *Design* Regenerativo, denomina-se esta abordagem mais abrangente de análise holística, com maior ênfase no usuário, com emprego de outros indicadores de desempenhos ambientais e que também contempla à análise do ambiente urbano. Apesar de não ser uma inovação em si desta

pesquisa há a integração de métrica existentes (Natanian; Aleksandrowicz; Auer, 2019; Natanian; Auer, 2020). Neste sentido, esta pesquisa emprega 3 indicadores principais de desempenho, *Load Cover Factor* (LCF), *spatial Useful Daylight Illuminance* (sUDI) e Índice de Sombra Médio Ponderado (IS). Para avaliação da eficiência energética, tanto para a geração, quanto para o consumo, emprega-se o *Load Cover Factor* (LCF), que possui maior resolução temporal, e que, apesar de não ser uma inovação da pesquisa, é menos empregado que o tradicional Balanço Energético Simples. No entanto, métricas mais extensas são avaliadas, incluindo autonomia térmica. Para a iluminação natural, em vez de *Daylight Autonomy* (DA), é avaliada a *Useful Daylight Illuminance* (UDI), porém, de forma espacial, de maneira semelhante à *spatial Daylight Autonomy* (sDA). Para a análise do microclima emprega-se um indicador simplificado, o Índice de Sombra Médio Ponderado, visto que a radiação direta possui alta correlação com indicadores mais robustos, como *Universal Thermal Climate Index* (UTCI), especialmente em climas mais quentes. Isso implica em uma vantagem significativa devido ao seu baixo custo computacional, o que permite mais agilidade de iteração e capacidade de exploração do universo de soluções projetuais.

- iii. **Metodologia de simulação e análise mais robustas:** diversas pesquisas empregaram processos de simulação computacional do desempenho ambiental para avaliar a morfologia urbana. Especialmente no contexto climático de Brasília, Silva (Silva, 2013) discutiu o desempenho ambiental de cânions urbanos, mas não apresenta uma análise integrada do ambiente construído, o que esta tese pretende tocar e avançar. Entretanto, especificamente para no cenário brasileiro, estes estudos utilizam indicadores menos precisos, como irradiação direta para tratar da eficiência

energética. Neste sentido, a presente pesquisa emprega modelos termoenergéticos completos com resolução temporal horária – o que permite a análise com o *Load Cover Factor* (LCF). Adicionalmente, a realização das análises emprega procedimento de aprendizagem de máquina para *clusterização* dos resultados ótimos – presentes na frente de Pareto. Essa abordagem almeja melhorar a interpretação de grandes conjuntos de dados do processo de otimização.

1.5 ESTRUTURA DA TESE

A tese está estruturada em 5 capítulos, conforme apresentado no Quadro 1 a seguir. O presente capítulo – capítulo 1 – introduz o tema, os objetivos, o problema de pesquisa e a abordagem – uma apresentação breve e sucinta do método. Na sequência, no capítulo 2, apresenta-se a fundamentação teórica, que contempla uma contextualização do tema de *Zero-Energy Building*, uma análise bibliométrica da aplicação de ZEB na escala urbana e uma revisão sobre áreas correlatas. Já no capítulo 3, delinea-se o método proposto em mais detalhes, o que inclui uma parte metodológica sobre os porquês da definição do método propriamente dito, uma visão geral do método em si, os materiais ou programas utilizados e a caracterização dos procedimentos específicos. O capítulo 4, por sua vez descreve os resultados, com seções específicas para cada uma das tipologias, assim como uma discussão destes resultados. Por fim, o capítulo 5 expõe as considerações finais, com balanço geral da pesquisa, um resgate sucinto dos resultados, apontamentos sobre as principais reflexões da discussão e apresentação de limitações e indicações de trabalhos futuros. Adicionalmente, após as referências, apresentam-se publicações realizadas durante o desenvolvimento da pesquisa no Apêndice A.

Quadro 1 - Estrutura da Tese

Paleta	Capítulo	Conteúdo
	Capítulo 1 <i>Introdução</i>	Panorama do tema Problema de pesquisa Objetivos Contribuição Estrutura da tese
	Capítulo 2 <i>Zero-Energy Building na Escala Urbana</i>	Contextualização geral de ZEB Análise bibliométrica de ZEB na escala urbana Revisão sobre áreas correlatas
	Capítulo 3 <i>Materiais e Métodos</i>	Metodologia Métodos Materiais Procedimentos
	Capítulo 4 <i>Resultados e Discussão</i>	Análise tipológica – Quadra com Torre Isolada Análise tipológica – Quadra com Edifícios em Fita Análise tipológica – Quadra com Pátio Interno Discussão
	Capítulo 5 <i>Considerações Finais</i>	Balanço geral da pesquisa Limitações de pesquisa Trabalhos futuros
	Apêndice A <i>Publicações</i>	Artigo em periódico Outras publicações



ZERO-ENERGY BUILDING NA ESCALA URBANA

O presente capítulo desenvolve a fundamentação teórica sobre *Zero-Energy Building* na escala urbana que possui diversos recortes espaciais como a quadra urbana, o bairro, o distrito, a comunidade. Neste sentido, apresenta-se uma extensa revisão bibliográfica, com aspectos de revisão sistemática da literatura, auxiliada por uma análise bibliométrica, que apoia esta fundamentação teórica. Para este fim, empregam-se diversos termos de busca como: *Zero-Energy Communities*, *Zero-Energy Districts*, *Zero-Energy Neighbourhoods*, *Zero-Energy City Blocks*. Adicionalmente, realiza-se um estudo de áreas correlatas que podem

contribuir com o tema, além de um panorama geral sobre o conceito básico de *Zero-Energy Building*. Assim, o presente capítulo está dividido em 3 principais seções:

- i. **Panorama geral de *Zero-Energy Building***, com uma visão histórica do desenvolvimento do conceito, princípios fundamentais e investigação de principais trabalhos dentro de um contexto climático tropical;
- ii. **Aprofundamento na aplicação de *Zero-Energy Building* na escala urbana**, realizado especialmente por meio de uma análise bibliométrica com os programas Bibliometrix e VosViewer que apresentam os principais trabalhos e autores, evolução temática do tema, entre outros;
- iii. **Contextualização de áreas temáticas correlatas** que podem contribuir para a fundamentação do trabalho, como planejamento urbano solar, *Urban Building Energy Modeling* de estudos sobre eficiência energética relacionados à forma urbana.

2.1 ZERO-ENERGY BUILDINGS

A gestão dos recursos energéticos está intimamente ligada as diversas pautas de sustentabilidade e se encontra na raiz do desenvolvimento sustentável, pois almeja conciliar a continua demanda por desenvolvimento econômico¹¹ – movido a base de energia com grandes impactos ambientais dentro do contexto atual – com a preservação ambiental. Isso engloba não somente a energia para uso final, para operação, mas toda energia embutida em todos os processos de do meio.

¹¹ Não se busca questionar se essa abordagem desenvolvimentista é o único caminho ou melhor caminho, apenas aponta-se que o desenvolvimento econômico é a forma que pauta as ações humanas pelo menos desde o início da modernidade e que esse modelo demanda extração contínua de energia

produção, desde a produção de alimentos, transportes, indústrias de transformação e manufatura, entre outros. Todos esses processos são movidos por alguma forma energética, como aponta Smil (Smil, 2010) em sua análise de *prime-movers*¹² na história humana ou Odum (Odum, 1994) em sua análise não somente da atividade humana, mas dos sistemas ecológicos como um todo, na teoria de Princípios de Sistemas Energéticos em Sistemas Ecológicos. Sob essa perspectiva, a atividade de produção humana extrai energia do meio natural, que assim se caracteriza como seu meio de suporte. Entretanto, especialmente a partir da revolução industrial, a atividade humana é maior do que a capacidade de suporte do meio natural, que assim não consegue mais se regenerar (Daly, 2015). Essa visão energética holística da relação dos meios de produção econômicos e o ambiente natural, como aponta Georgescu-Roegen (Georgescu-Roegen, 1971), evidencia a necessidade de melhor gestão dos recursos energéticos para um futuro mais sustentável.

A eficiência energética, em termos gerais, refere-se à medida de trabalho ou energia preservada em um processo – ou transformação –, uma razão entre *output* e *input* (Goh; Ang, 2020). Usualmente, o emprego do termo eficiência energética se relaciona a uma melhoria dessa proporção, com o aumento do valor dessa razão, o que pode significar aumentar o *output* com mesmo *input* ou manter o *output* com um menor *input*. Contudo, normalmente, refere-se à segunda opção, no sentido de desempenhar uma mesma atividade ou função com uma menor quantidade de energia, até por razões de conservação dos recursos econômicos e ambientais.

¹² Ou força motriz primária em tradução livre para o português, ou aquilo que transforma combustível em trabalho. No sentido que Smil (2010) utiliza significa as fontes energéticas que impulsionam as

Esse tipo de análise pode ser realizado em qualquer modelo de sistema energético e historicamente possui grande relevância em campos como física e ecologia, mas também em sistemas ou equipamentos como, por exemplo, o sistema de iluminação artificial ou lâmpadas, ou aparelhos de refrigeração. Dessa forma, a definição do limite do sistema é essencial para caracterização de sua eficiência, pois somente assim é possível definir os *inputs* e *outputs*. No estudo das edificações ou arquitetura, pode-se avaliar um sistema específico – como o sistema de iluminação artificial mencionado anteriormente – ou mesmo avaliar a edificação como um todo. Entretanto, ao analisar uma edificação, por se tratar de um sistema complexo, é necessário atentar-se a diversos aspectos e não somente à relação entre energia consumida e trabalho realizado. Dessa forma, eficiência energética nas edificações considera a redução do consumo energético sem prejudicar as condições de conforto e qualidade ambiental (Lamberts; Dutra; Pereira, 2014). Essa compreensão é importante na avaliação da eficiência energética das edificações, pois caso haja somente redução de consumo energético sem atenção aos demais aspectos, como o atendimento mínimo da qualidade e conforto ambiental e habitabilidade, não há de fato a realização do mesmo trabalho ou desempenho. Neste caso, o que ocorre é um processo de racionamento energético e não de eficiência energética.

Com a revolução industrial, a dependência energética para realização dos processos produtivos se torna mais marcante, especialmente com o uso de combustíveis fósseis, inicialmente com carvão mineral, muito empregado na Inglaterra do século XIX. Já nessa época, Jevons (Jevons, 1866) aponta os perigos

atividades de produção humana em cada época.

em fundamentar o desenvolvimento econômico em recursos não-renováveis como o carvão. Além disso, o mesmo autor indica que o emprego de soluções mais eficientes não traz necessariamente a redução do consumo, visto que a magnitude acaba por crescer, como percebeu à época com a máquina a vapor de James Watt fenômeno este que ficou conhecido como paradoxo de Jevons. Esse aumento de consumo decorrente do aumento de eficiência energética dos processos empregados pode ser notado contemporaneamente em edificações normalmente denominado de efeito rebote. Nesse sentido, a questão energética não é somente sobre eficiência como aponta Jevons, mas é da relação das atividades humanas com o ambiente natural que lhe fornece suporte – e, consequentemente, energia.

Esse desajuste entre relação das atividades humanas e questão energética pode ser observado historicamente, em que diversas sociedades na história humana sofreram com crises relacionadas com a oferta e demanda energética. Já na antiguidade diversas civilizações tiveram problemas que atualmente seriam caracterizados como questões de sustentabilidade relacionadas a degradação ambiental, inclusive com falta e racionamento de madeira para construção, aquecimento das casas e como combustível para diversos processos produtivos na Grécia Antiga e posteriormente na Europa, especialmente na Alemanha, do século XVIII (Du Pisani, 2006). Entretanto, esses casos estão mais atrelados a questões ambientais, ou à capacidade de suporte do meio natural, até pelas características das sociedades dessas épocas, que dependiam mais diretamente do meio natural imediato.

O início dos anos 1970 marca muitas das ações e políticas de eficiência energética, como apontam Keller e Burke (Keller; Burke, 2010), especialmente nos Estados Unidos da América com *Low Income Weatherization Assistance Program* (WAP), mas também no Brasil com programas como o Pró-Álcool. No campo da arquitetura, a virada da década de 1970 para 1980 é marcada por um crescente número de publicações para lidar com essa demanda de eficiência energética, especialmente a respeito de *Design Solar Passivo*, com destaque para “*The Passive Solar Energy Book*”, de Mazria (Mazria, 1979). Contudo, essas ações estão mais relacionadas a questões geopolíticas do que de preservação ambiental, especificamente a crise da *Organization of the Petroleum Exporting Countries*¹³ (OPEC), de 1973, e o embargo às nações que apoiavam o Estado de Israel por países árabes. Nesse sentido, as ações de eficiência energética possuem conotação muito mais econômica do que ambiental.

Desde então, diversas iniciativas têm sido implementadas em resposta à crise ambiental, que se intensificou desde a crise da OPEC. Notavelmente, as Conferências das Partes (COP) têm sido fundamentais na elaboração de acordos internacionais, como a Agenda 2030 e o Tratado de Paris, este último com intuito de limitar o aumento da temperatura global abaixo de 2° C. Tais compromissos têm impulsionado a adoção de políticas e regulamentações mais rígidas para reduzir as emissões de gases de efeito estufa. No contexto da eficiência energética das edificações, esses eventos geraram uma pressão crescente para a implementação de padrões mais rigorosos de eficiência energética, como por exemplo no caso

¹³ Em português, Organização dos Países Exportadores de Petróleo.

brasileiro o processo de etiquetagem PBEfifica (INMETRO, 2013) e a Norma de Desempenho 15.575 (ABNT, 2024).

2.1.1 Da arquitetura solar ao Zero-Energy Building

A história da arquitetura solar pode ser compreendida como a história da arquitetura em si, visto que antes do advento de sistemas mecânicos de condicionamento, tanto para aquecimento como para resfriamento, a própria arquitetura sempre foi o elemento responsável por condicionar os ambientes, por meio da mediação com o clima e especialmente com o sol. Perlin (Perlin, 2013) indica que a história da arquitetura solar pode ser traçada desde há 6.000 anos, na antiga China, em que aspectos morfológicos e de orientação eram essenciais para o aquecimento das edificações, especialmente devido à escassez de madeira para aquecimento em virtude do desmatamento.

A título de exemplo, a falta de madeira para aquecimento das edificações é uma situação frequente durante toda a antiguidade até pelo menos o século XVIII (Du Pisani, 2006), o que demandava que a arquitetura conseguisse usufruir do sol adequadamente. Inclusive, na Roma antiga houve a publicação e a distribuição de livros que ensinavam técnicas de uso de energia solar nas edificações para economizar madeira para aquecimento (Perlin, 2013).

Em seu tratado, Vitruvius já recomendava que as edificações fossem orientadas ao sul¹⁴ de forma a aproveitarem a insolação. Também tecia recomendações sobre layout da edificação e disposição de determinados

¹⁴ Isso no hemisfério norte, o que representa a orientação equatorial, que no hemisfério sul é a orientação norte.

ambientes, como a sala de jantar de inverno, que deveria receber a insolação de fim de tarde no inverno, enquanto a sala de jantar de verão deveria estar localizada no quadrante norte para se proteger da radiação. Nas edificações romanas era inclusive comum o emprego de solários ou *heliocaminus*¹⁵, ambientes envidraçados normalmente voltados ao sul para captação e conservação da radiação solar, de tal forma que no século II d.C., foi necessário deliberar legislação urbanística para proteger os direitos solares e evitar que novas edificações bloqueassem a insolação nos *helicaminus* já construídos (Perlin, 2013).

No século XIX existiram diversas iniciativas na Alemanha para consolidar conhecimentos sobre arquitetura solar, conhecimentos que se perderam durante a Idade Média na Europa. Em 1822, Bernard Christoph Faust lançou o livro “Princípios Solares das Edificações”, no qual aponta que as edificações deveriam estar orientadas ao sol do meio-dia. O livro apresenta os ângulos e alturas solares para a cidade de Munique, na Alemanha, e explicava como aquecer passivamente no inverno e resfriá-la no verão. Essa iniciativa teve desdobramentos como a criação da *Königlichen Baugewerksschule*, escola de arquitetura com ênfase em construções solares em Munique por Gustav Vorherr e apoio de Faust, o que, junto com o escritório governamental de edificações da Baviera, administrado por Vorherr, possibilitou a construção de diversas edificações fundamentadas nos princípios solares (Perlin, 2013).

Contudo, o advento dos sistemas mecânicos de condicionamento para aquecimento no século XIX (Fernández-Galiano, 2000) e posteriormente de resfriamento, já no século XX (Siry, 2021), representam o enfraquecimento da

¹⁵ Significa literalmente “forno solar”, em tradução livre.

relação entre o clima e a arquitetura – sua orientação, morfologia, envoltória e layout. A partir desse processo de inovação tecnológica dos sistemas de condicionamento – junto a novas técnicas construtivas, como aço e fachadas cortinas de vidro –, possibilita-se o desenvolvimento do tipo ícone da arquitetura moderna e do estilo internacional, o arranha-céu envidraçado. Essa mudança de paradigma possui diversos desdobramentos, como aponta Banham (Banham, 1969), pois os arquitetos abdicam de resolver as questões de conforto ambiental ao optarem por sistemas leves e altamente envidraçados, com perda de massa dos sistemas construtivos – e consequentemente sua capacidade de regulação térmica –, e assim relegam o conforto térmico aos sistemas mecânicos.

De fato, os sistemas mecânicos de condicionamento representam mais do que uma mera mudança tecnológica, mas também possuem desdobramento socioculturais relevantes. Fernández-Galiano (Fernández-Galiano, 2000) indica que a proximidade entre a forma de aquecimento – seja ela proveniente da relação da arquitetura com as condicionantes climáticas ou mesmo sistema de aquecimento como a lareira ou forno – criava um vínculo entre usuário e a condição térmica. Nesse contexto, o usuário possuía uma aceitabilidade e flexibilidade maior às variações térmicas, inclusive com ambientes específicos para determinadas condições climáticas, como os solários e as varandas – este último no caso com intuito de resfriamento. Assim, com o distanciamento do sistema de aquecimento para os porões das casas, a partir da segunda metade do século XIX, há uma crescente demanda por homogeneidade térmica e a supressão de ambientes específicos para lidar com as diferentes condições climáticas. Esse processo de distanciamento se consolida de tal forma que no modernismo nem mesmo as tubulações para condicionamento são mais perceptíveis aos usuários em muitos ambientes.

Apesar desse distanciamento, durante o modernismo, há uma busca pelo resgate, ou releitura, do que seria uma arquitetura solar de acordo com os seus próprios paradigmas, mais especificamente de um ponto de vista funcionalista, a partir das inovações tecnológicas da época. Assim, a busca por maiores áreas envidraçadas acarreta o desenvolvimento de alguns experimentos de fachadas duplas para equacionar a baixa resistência térmica dos sistemas de envidraçamento. No início do século XX, em 1903, em Giengen, na Alemanha, há a construção da fábrica de brinquedo *Steiff*. Em Viena, na Áustria, entre 1904 e 1912, Otto Wagner constrói a sede da Caixa Econômica dos Correios Postais de Viena, que possui claraboia com vidro duplo. Na década de 1920, Le Corbusier propõe a utilização de fachadas duplas, o que denominou de *mur neutralisant*, nos projetos *Centrosoyus*, *Cité de Refuge* e *Immeuble Clarté*, apesar de não empregarem esse sistema nas obras construídas (Crespo, 1999). Adicionalmente, o sistema de Parede Trombe também é desenvolvido no início do século XX por Félix Trombe, ao aprimorar o sistema concebido por Edgar Morse no século anterior (Boake *et al.*, 2003).

Essa ênfase em soluções embasadas em tecnologia de vidros também se refletiu nos Estados Unidos da América, com o desenvolvimento de uma série de edificações que conciliam orientação, sombreamento, isolamento, armazenamento térmico e panos duplos de vidro, a partir da década de 1930, como indica Barber (Barber, 2016). Destaque para George Fred Kech, um dos primeiros arquitetos a explicitamente se dedicar a casas solares – principalmente para aquecimento –, que projetou a Casa do Futuro na Feira Mundial do Século do Progresso em Chicago, em 1933. Apesar de não ser uma casa solar em si, essa edificação inicia a trajetória do arquiteto em direção da arquitetura solar. Assim, a edificação é marcada pela planta de 12 lados iguais e o emprego do que havia de

mais inovador em iluminação artificial, condicionamento e, especialmente, envidraçamento – especificamente de painéis de vidro duplo insulado. Sua produção posterior inclui diversos projetos de residências solares suburbanas, como *Sloan House* (1939) e *Duncan House* (1941), em Illinois e *William Kellet House* (1939), em Winsconsin, além de um modelo pré-fabricado, a *Green's Ready to built House* (1943). Nesses projetos, há amplo emprego de grandes fachadas envidraçadas voltadas ao sul, com beirais cuidadosamente calculados e armazenamento térmico no piso e paredes internas. Entretanto, essas edificações se mostraram pouco efetivas e com grandes perdas térmicas, especialmente devido a infiltração (Barber, 2016).

Contudo, os principais avanços no desenvolvimento da arquitetura solar ocorrem a partir da criação do Fundo de Energia Solar que apoiou diversas pesquisas no *Massachusetts Institute of Technology* (MIT) por mais de 50 anos. Parte das pesquisas possibilitou a construção de uma série de residências solares no campus da universidade, com início em 1939, com a *Solar House #1*, parte da pesquisa desenvolvida pelo químico Hoyt Hottel¹⁶. A edificação experimental possuía diversos tipos de painéis para captação de radiação solar colocados na empena da fachada sul e um sistema de distribuição por água e armazenamento de calor em tambores metálicos com isolamento colocados no porão. Na década seguinte, os protótipos *Solar House #2* (1947) e *Solar House #3* (1948) são construídos no MIT com grande sucesso. Isso se deve especialmente por conseguirem melhor equacionar questões de perda de calor e inclinação ótima de coletores. Um dos grandes marcos dessa iniciativa é o desenvolvimento

tecnológico de armazenamento térmico químico com Sal de Glauber¹⁷, um dos primeiros materiais de mudança de fase utilizado em edificações, que foi empregado tanto na *Solar House #2*, como na *Dover Sun House* (1948), ambos da arquiteta Eleanor Raymond, em parceria com a engenheira do MIT Maria Telkes (Barber, 2016).

Apesar dos avanços técnicos que ocorreram nas décadas seguintes, a demanda pela redução do consumo energético em virtude da redução de oferta energética ocasionada pela crise do petróleo, aliada aos avanços em geração de energia fotovoltaica, resultou em maiores esforços para a popularização de soluções de eficiência energética, o que leva à concepção das edificações de balanço energético nulo ainda no final da década de 1970 e início da década seguinte. A residência na cidade dinamarquesa de Lyngby (Figura 1), desenvolvida pelos pesquisadores Torben Esbensen e Vagn Korsgaard em 1975 é o primeiro experimento a empregar o termo *Zero-Energy* apesar do balanço energético estar relacionado exclusivamente ao sistema de aquecimento que emprega sistema de coletor solar e tanque de armazenamento de água quente em uma edificação altamente isolada e com vedação hermética – com baixas taxas de infiltração (Esbensen; Korsgaard, 1977).

¹⁶ Até aquele momento, como menciona Barber, não havia intenção da participação de pesquisadores da Arquitetura e Urbanismo visto que a escola ainda estava no contexto de *Beux Arts*.

¹⁷ Sulfato de sódio hidratado - $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$.

Figura 1 – *Zero-Energy Home* em Lyngby



Fonte: O’Riain (2021)

Anos depois, em 1977, há o desenvolvimento da *Saskatchewan Conservation House*, no Canadá, que também é uma edificação com esquadrias herméticas para reduzir a infiltração, vidro triplo para evitar perdas por condução, alto valor de resistência térmica do envelope opaco – resistência térmica de 40 m²K/W nas vedações verticais e 60 m²K/W nas vedações horizontais – e orientação para captação da radiação durante o inverno. De forma semelhante, esse protótipo possuía propósitos de pesquisa e foi desenvolvido pela equipe de Harold Orr, pesquisador do *Saskatchewan Research Council* (SRC), com o financiamento do governo provincial (Orr, 2014).

No início dos anos 1980 esses conceitos de edificações com alta eficiência energética, baseada em princípios da arquitetura solar passiva, são aliadas aos avanços em geração de energia fotovoltaica. Um marco neste processo é a Casa Carlisle, projetada por Steven Strong, em Massachusetts, nos Estados Unidos,

considerada por muitos o primeiro *Zero-Energy Building* (Perlin, 2013). Apesar de alguns projetos experimentais terem sido realizados nos anos seguintes, como a Casa Autônoma de Brenda e Robert Vale no Reino Unido, em 1993, o edifício *Heliotrope* de Rolph Disch, em Freiburg, na Alemanha, em 1994 - que gera entre 4 e 6 vezes mais energia do que consome - e a sede do Instituto Fraunhofer na Alemanha, também em 1994 (Ionescu *et al.*, 2015), somente no início do século XXI que o conceito de *Zero-Energy Building* se estabelece como campo de pesquisa e elemento de política pública de forma mais rigorosa.

2.1.2 *Zero-Energy Buildings*

Nas últimas décadas, especialmente a partir do início do século XXI, os estudos a respeito de *Zero-Energy Buildings* têm se consolidado com rebatimento em diversos programas e iniciativas que visam promover os *Zero-Energy Buildings*. Na Europa, EPDB (*Energy Performance of Buildings Directive*) é um instrumento legislativo supranacional que teve sua primeira versão em 2002 e, dentre outros elementos, institui a necessidade de que todos os novos edifícios fossem *Zero-Energy Buildings* até o final de 2018 e todas as edificações públicas europeias fossem *Zero-Energy Buildings* até o final de 2020 (EU, 2002). Nos Estados Unidos da América a necessidade de *Zero-Energy Building* está contemplada pela normativa ASHRAE 90.1 (ASHRAE, 2019), elemento que já está incorporado em códigos e legislações de diversas esferas, como no *Title 24* da Califórnia e é reforçado pelo compromisso da AIA (*American Institute of Architects*) por meio do *AIA 2030 Commitment* (AIA, 2006), que pressupõe que todas as novas edificações sejam *Zero-Energy Buildings* até 2030. Similarmente, a China possui normativa específica de eficiência energética que contempla a exigência do padrão *Zero-Energy Building* para novas edificações (MOHURD, 2005). No Brasil, o Procel e a

Eletrobras promoveram edital em 2019 para financiar a execução de edificações de balanço energético nulo¹⁸ e o novo processo de etiquetagem, a INI-C (Instrução Normativa do Inmetro), lançado em 2021, contempla os *Zero-Energy Buildings*.

Apesar da popularização do termo, diversas definições para *Zero-Energy Building* são empregadas na literatura, que não necessariamente possuem o mesmo significado. Em linhas gerais, um *Zero-Energy Building* é uma edificação de baixo consumo energético que possui um balanço energético nulo em um determinado intervalo de tempo, habitualmente de um ano, com a compensação do consumo por meio de geração de energia de fonte renovável (Athienitis; O'Brien, 2015; Li; Yang; Lam, 2013; Torcellini; Pless; Deru, 2006). Essa ideia de balanço é elemento central em grande parte das definições mais comumente empregadas – o que resulta no emprego do prefixo líquido, ou *net* em inglês, *net-ZEB* – e está associada à conexão à rede pública de energia. Adicionalmente, há também o emprego dos prefixos *near* ou *nearly* – ou, em tradução direta para o português, próximo ou aproximadamente –, que muitas vezes são empregados com somente a letra *n*, como em *nZEB*, e que indica a proximidade ao balanço energético nulo, apesar de não conseguir alcançar tal marca.

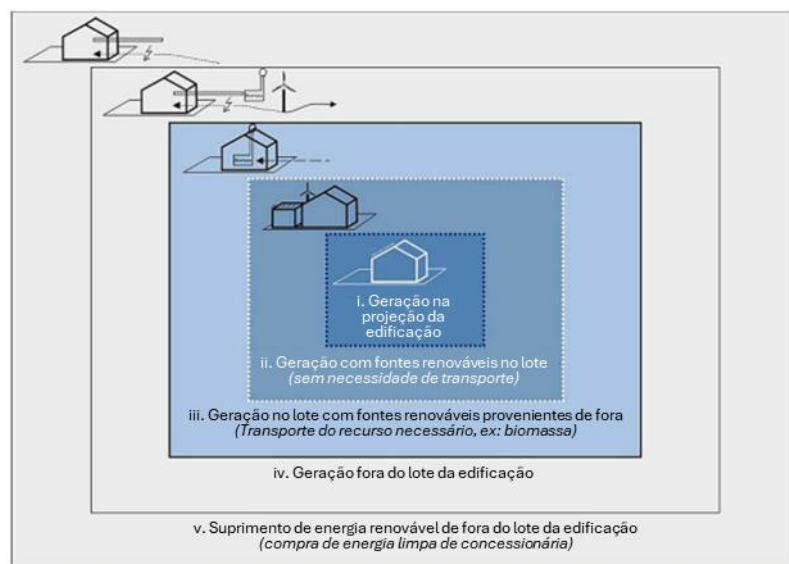
As principais diferenças nas definições estão relacionadas a como o balanço energético é calculado, suas métricas ou unidades empregadas e dos limites dos sistemas de energia. Torcellini e coautores (Torcellini *et al.*, 2006; Torcellini; Crawley, 2006) definem quatro diferentes métricas para se avaliar a energia consumida: *Net zero source energy Building*; *Net zero site energy building*; *Net zero energy cost Building*; e *Net zero energy emissions Building*. Essa distinção

demonstra as diferenças da quantidade de energia consumida no sítio, ou na edificação em si, com a energia gerada na usina, o que é especialmente relevante ao considerar diferentes fontes energéticas e seus fatores de conversão que não são necessariamente padronizados. Adicionalmente, essas fontes possuem impactos ambientais diferentes que podem ser avaliadas pelas emissões de gás carbônico equivalente, algo que também não é padronizado. E por fim, também existem as diferenças tarifárias que podem deixar a avaliação do balanço ainda mais complexa. Habitualmente percebe-se uma predominância pela energia consumida no sítio em virtude da maior facilidade de obtenção desse dado por meio dos programas de simulação ou medição *in loco*.

Já do lado da oferta, ou geração energética, a definição dos limites também pode ser concebida de formas distintas, como indicam Marszal e coautores (Marszal *et al.*, 2011) – conforme apresenta a Figura 2 com indicação das definições com numeração romana. Eles afirmam que a geração pode ocorrer na edificação (i), no sítio, mas fora da edificação (ii), que também pode demandar de matéria-prima externa (iii), ou pode ocorrer fora do sítio sem demanda de matéria-prima externa (iv) ou com suprimento externo (v).

18

Figura 2 – Diagrama de estratégias de geração energética e os limites de seus sistemas



Fonte: adaptado de Marszal *et al.* (2011)

Para um maior aprofundamento, os trabalhos de Marszal e coautores e Torcellini e coautores realizam uma vasta compilação e discussão sobre as definições e métodos de cálculo de *Zero Energy Buildings* (Marszal *et al.*, 2011; Torcellini *et al.*, 2006).

i. Conservação, Eficiência e Geração Energética

Demanda e oferta energética são dois polos mais evidentes da concepção de um *Zero-Energy Building*, contudo, a estruturação de estratégias de projeto pode ser mais bem detalhada a partir de uma distinção do tripé: conservação; eficiência; e geração energética – em que conservação e eficiência estão relacionadas à demanda energética, enquanto a geração está atrelada à oferta. Apesar de ambas diminuírem o consumo energético, conservação e eficiência energética possuem abordagens diferentes. Enquanto eficiência energética ajusta o *input*, a conservação energética foca na regulação do *output*, com a eliminação ou redução do uso de processos ativos.

Diversos esquemas de hierarquização e definição já foram elaborados para auxiliar o processo de desenvolvimento de *Zero-Energy Buildings*, ou mesmo edificações de alto desempenho ambiental. O diagrama em pirâmide de prioridades ou hierarquia energética(s) é vastamente popular apesar de sua origem e autores serem incertos¹⁹, como o diagrama de Behling posteriormente aperfeiçoado por Abalos, Snetkiewicz e Ortega (Abalos; Snetkiewicz; Ortega, 2015), que prioriza a forma arquitetônica, depois as estratégias passivas, e, por fim, os sistemas ativos. Habitualmente, compreende-se como primeiro passo fundamental as medidas de conservação (i), especialmente por meio de estratégias passivas, na sequência, as medidas de eficiência energética dos sistemas ativos (ii) e só posteriormente compensar²⁰ a demanda reduzida com a geração energética com fontes renováveis (ii), algo que corresponde ao impacto

¹⁹ Especula-se que tenha sido inspirado na pirâmide ecológica que apresenta a relação dos níveis tróficos.

²⁰ Emprega-se o termo compensar no sentido do inglês *offset*, parte do tripé de hierarquia de mitigação: *avoid, mitigate and offset*, ou em português, evitar, mitigar e compensar.

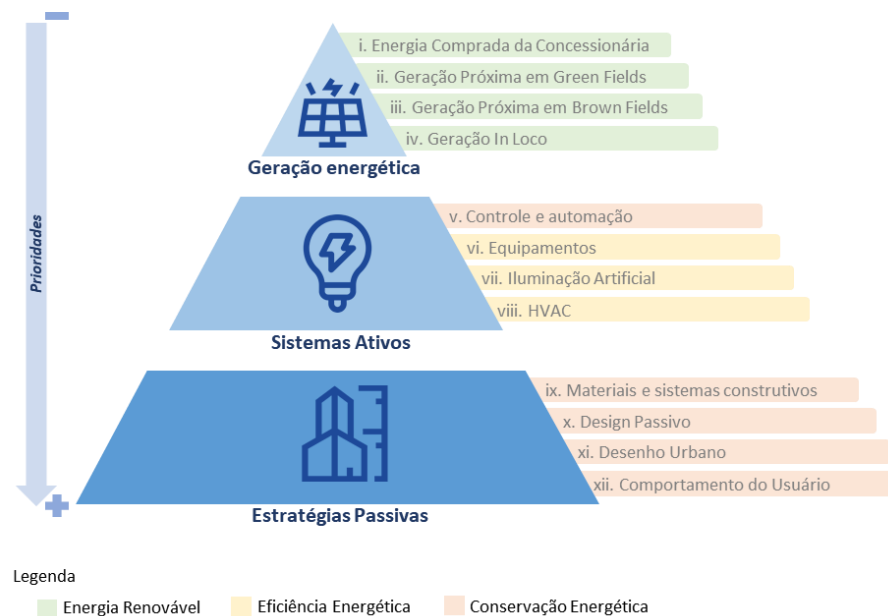
dessas medidas, posição que corrobora os apontamentos de Steemers e Baker (Baker; Steemers, 2016) a respeito do impacto das estratégias passivas e ativas na eficiência energética. A Figura 3 apresenta uma versão mais detalhada desses três níveis hierárquicos com desmembramentos internos, porém em vez de conservação e eficiência energética, prefere-se a nomenclatura de estratégias passivas e de sistemas ativos, respectivamente, visto que é possível haver medidas de conservação dos sistemas ativos como ocorre com o controle e automação. A organização da ordem das medidas dentro de cada dimensão segue as prováveis significâncias de impacto e facilidade e flexibilidade de implementação. As medidas de conservação energéticas possuem de certa forma uma ordem de escala, mas especialmente seguem de facilidade e flexibilidade de implementação. No mais, considera-se o comportamento do usuário como base de todo plano de gestão energética. Já as medidas de eficiência energética se organizam a partir da relevância de cada uso final mais comumente encontrado, com maior impacto dos sistemas de condicionamento, seguidos pela iluminação artificial e posteriormente pelos demais equipamentos. As medidas de controle e automação são a última da escala pois são medidas opcionais que podem complementar um plano de gestão de energética. Por fim, as medidas de geração energética seguem a ordem de prioridades apresentada pelos pesquisadores da *National Renewable Energy Laboratory* (NREL), Carlisle, Geet e Pless (Carlisle; Geet; Pless, 2009).

ii. ZEB Tropical

Vista a importância das estratégias passivas no desenvolvimento de um *Zero-Energy Building* não se pode ignorar o contexto climático. Contudo, mais do que as diferenças climáticas e seus desdobramentos no projeto, existe uma grande diferença de realidade entre os países desenvolvidos - em climas temperados - e

os países em desenvolvimento – predominantemente em climas tropicais. Nesse sentido, além do clima, há toda uma questão social, cultural e econômica que distingue as práticas de desenvolvimento da arquitetura, engenharia e construção e, conseqüentemente, o desenvolvimento de *Zero-Energy Building*.

Figura 3 – Diagrama de hierarquia energética de *Zero-Energy Building*



Fonte: Autor, adaptado de Marszal *et al.* (2011); Torcellini *et al.* (2006), Carlisle, Geet e Pless (2009) e Abalos, Snetkiewicz e Ortega (2015)

É notório que a vasta produção a respeito de *Zero-Energy Building* possui ênfase em países desenvolvidos, seus contextos climáticos e desafios legais e técnicos. Contudo, especialmente nos últimos anos, é possível perceber a

expansão de pesquisas na temática além do eixo América do Norte–Europa, além da China. Singapura, Austrália e França – não continental – são países que, apesar da realidade econômica mais privilegiada que países em desenvolvimento, têm realizado iniciativas importantes no desenvolvimento de ZEBs em climas tropicais.

Garde liderou o projeto nacional de pesquisa francês iniciado em 2007, que desenvolveu investigação a respeito de ZEB para os climas com verões quentes dos Territórios Franceses Ultramarinos, especificamente na Ilha Reunião, no oceano Índico (Garde *et al.*, 2007, 2011; Garde; Ottenwelter; Bornarel, 2012; Kerr; Baccei; Hammon, 2007; Lenoir; Thellier; Garde, 2011). O projeto desenvolveu um edifício educacional na Ilha Reunião em 200, capaz de gerar mais energia do que consome, com emprego de estratégias passivas como: orientação; tipologia em pátio; sombreamento; ventilação natural; e iluminação. Avaliação pós-ocupação demonstrou que com o emprego de ventilação natural, temperaturas de até 29° C foram consideradas confortáveis pelos usuários. Além disso, os autores destacam a importância de normativas compulsórias para a melhoria do desempenho ambiental e energético das edificações no contexto climático ultramarino francês, algo que não ocorria até então.

Em Singapura, Lan, Wood e Yuen (Lan; Wood; Yuen, 2019) avaliaram o potencial de implementação de padrão ZEB em edifícios residenciais e indicam a maior facilidade de obtenção desse objetivo em edifícios horizontais, entretanto demonstram a possibilidade de obtenção de ZEB até 19 andares em casos com atenção a estratégias passivas e o equilíbrio entre condicionamento e iluminação natural. No mais, chamam a atenção para a importância do emprego de módulos fotovoltaicos em fachadas, além da cobertura.

Em estudo realizado em cinco diferentes contextos climáticos australianos, Alawode e Rajagopalan (Alawode; Rajagopalan, 2022) demonstraram a viabilidade de adequação um edifício de 26 andares em padrão ZEB, especialmente em climas mais próximos ao temperado, como Sydney e Melbourne. Para isso, destacam a importância de estratégias passivas como sombreamento, orientação e redução da área de abertura, além de maior resistência térmica do envelope. Em climas mais quentes, como em Darwin, indicam o emprego de sistema híbrido de ventilação, apesar de enfatizarem os desafios decorrentes da alta umidade que ocorre em épocas do ano. No mais, também destacam a importância de se contemplar o emprego adicional de módulos fotovoltaicos em fachadas.

Bano e coautores (Bano; Sehgal; Tahseen, 2020) realizaram estudo de viabilidade de adaptação para ZEB de três edifícios comerciais entre 3 e 8 andares construídos recentemente na Índia e Malásia, todos reconhecidos pela alta eficiência energética. O estudo demonstra a viabilidade do *retrofit*, especialmente com a implementação de um sistema híbrido de condicionamento, com a redução da área condicionada. Até pelo alto desempenho já existente nas três edificações, a melhoria da eficiência dos sistemas ativos demonstrou melhores resultados.

Nove localidades asiáticas com climas quente e úmido foram analisadas por Haase e Amato (Haase; Amato, 2006) que constataram a que a ventilação natural é capaz de reduzir em até 50% o consumo energético para condicionamento. Quanto à geração energética, os autores indicam a importância do emprego de módulos fotovoltaicos nas fachadas e que questões morfológicas das edificações são significativas, com maior produção por metro quadrado de

área construída em edifícios com plantas menos profundas e com gabaritos mais baixos.

Tecnologias específicas para lidar com os desafios particulares de climas quentes e úmidos também são investigados, como o uso de sistemas dessecantes solares. O estudo realizado por Dezfouli e coautores (Dezfouli *et al.*, 2022) em ambientes escolares na Malásia demonstrou que o emprego de sistema dessecante de dois estágios possibilitou a redução de 37% do consumo de energia do sistema de condicionamento.

O potencial de ZEB também tem sido investigado em países africanos com climas quentes, como Nigéria e Gana. Kwag e coautores (Kwag; Adamu; Krarti, 2019) avaliaram medidas de conservação e eficiência energética e o potencial de geração de energia em tipologia residencial unifamiliar em três cidades da Nigéria. Os resultados indicam maior impacto dos sistemas ativos na redução do consumo, enquanto a geração obtida somente com a utilização da cobertura para instalação dos módulos fotovoltaicos possibilita uma produção excedente a demanda.

Já Ohene e coautores (Ohene; Hsu; Chan, 2022) avaliaram o potencial de *retrofit* para atingir ZEB de tipologia unifamiliar de dois pavimentos em quatro condições climáticas em Gana. O estudo indicou que o emprego de estratégias passivas como ventilação natural, sombreamento, iluminação natural e envoltória mais hermética possibilitaram a redução de 50% do consumo total das edificações, enquanto o sistema de geração fotovoltaico possibilitou a geração de energia excedente e com *payback* entre 6 e 10 anos.

A aplicação de práticas para a obtenção de ZEB também é investigada no norte da África e nos países do Oriente Médio por Al-Saeed e Ahmed (Al-Saeed; Ahmed, 2018). Os autores indicam o potencial para obtenção desse nível de

eficiência energética por meio de melhoria do envelope, com destaque para soluções mais herméticas e menor infiltração que possibilitaram maiores reduções do consumo energético, enquanto, de forma até previsível, módulos fotovoltaicos com maior eficiência possibilitaram a geração de excedente energético. Adicionalmente, o artigo discute a necessidade de incorporação do conceito ZEB nos códigos de eficiência energética locais.

Por sua vez, na América Latina, Litardo e coautores (Litardo *et al.*, 2021) avaliaram medidas de conservação e eficiência energética para uma unidade de apoio estudantil em Guayaquil no Equador. Os resultados apontam que controle e automação das luminárias de acordo com a iluminação natural possibilitaram a maior redução no consumo, seguidos por vidros *Low-E* e melhoria da eficiência dos sistemas ativos, com potencial de redução de 35% do consumo total da edificação. Além disso, a geração fotovoltaica instalada na cobertura possibilitou compensar a demanda energética da edificação com excedente.

De fato, existem diversas experiências no contexto latino americano, porém ainda dispersas, como apontam Austin e coautores (Austin; Chung-Camargo; Mora, 2021) que, além de um estudo realizado para o Panamá, realizam revisão de literatura das iniciativas ZEB na América Latina com considerações interessantes, como a predominância de estudos em tipologias residenciais. Adicionalmente sugerem que ainda falta maturidade para as regulamentações de eficiência energética na região, pois há grande variação de valores de transmitância em um mesmo contexto climático. Entretanto, indicam que medidas de conservação energética com melhorias da envoltória são as mais investigadas.

2.1.3 Design regenerativo

A crise climática e ambiental é provavelmente o maior desafio que a humanidade possui para as próximas décadas. A perda de biodiversidade, a extinção em massa, a poluição e os danos ambientais são cada vez mais evidentes. Os principais estudos a esse respeito, como indica o relatório do *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) (Ürge-Vorsatz *et al.*, 2014), apontam para a urgente necessidade de mudanças drásticas nos padrões de consumo e produção da sociedade na presente década para se evitar um colapso climático e ambiental.

Entretanto, o conflito entre a desenvolvimento humano e a proteção da capacidade regenerativa da natureza não é um evento novo (Du Plessis, 2012). Esse conflito já pode ser encontrado na crise madeireira do século XVIII na Alemanha, ou mesmo nas civilizações da antiguidade, como egípcios, mesopotâmios, gregos e romanos, com problemas ambientais como desmatamento, salinização e perda de fertilidade do solo (Du Pisani, 2006). Contudo, devido à magnitude e intensidade da presente situação a partir da Revolução Industrial, a crise se tornou existencial e coloca em xeque a própria existência humana em escala global, o que está no centro dos anseios da sustentabilidade.

Apesar da crescente atenção dada às questões da sustentabilidade nas últimas décadas, diversas críticas são realizadas aos modelos e abordagens empregadas. As estratégias formuladas nas esferas governamentais e corporativas para buscar um desenvolvimento sustentável muitas vezes são tratadas como uma lista de desejos, mais próximos de uma utopia (Du Plessis, 2012). Isso acaba por não oferecer alternativas práticas que engajem a sociedade para uma mudança

efetiva, especialmente por focar exclusivamente no problema, o que passa uma mensagem negativa, o que pode ser paralisante, ao invés de uma proposta de visão de mundo inspiradora em que as pessoas possam realmente acreditar (Robinson; Cole, 2015). Além disso, um dos principais pontos é que as estratégias formuladas perpetuam o modelo desenvolvimentista e não alteram os princípios estruturantes da sociedade que são responsáveis pela própria crise em si (Du Plessis, 2012).

Diversos autores chamam a atenção para o fato de que as iniciativas sustentáveis têm enfoque na redução de danos (Du Plessis, 2012; Naboni; Havinga, 2019; Robinson; Cole, 2015), muitas vezes apoiadas no tripé, mitigar, compensar e reparar. Isso parte do pressuposto de que as ações humanas são inevitavelmente prejudiciais e de uma visão de destacamento e distanciamento do ser humano em relação à natureza. Para enfrentar o desafio da crise ambiental e climática, é fundamental repensar o impacto das atividades humanas no sistema em que está inserido.

O conceito de *Design Regenerativo* busca alterar a perspectiva da sustentabilidade exclusivamente enfocada na redução de danos, em direção à possibilidade de impactos positivos das intervenções humanas, comumente expressada pela máxima “*from less bad to more good*” – ou, em português, “do menos ruim para o melhor”. Assim, ao invés de se pensar somente em neutralizar os impactos ambientais ou as emissões de gases do efeito estufa, busca-se uma abordagem com desdobramentos positivos ao meio ambiente. Dessa forma, o *Design Regenerativo* se propõe a reverter os danos já existentes, mas também restaurar o ecossistema e mais, possibilitar que prospere e se manifeste em sua plenitude (Naboni; Havinga, 2019). Nas palavras de Du Plessis (Du Plessis, 2012),

o paradigma regenerativo fornece uma alternativa que é explicitamente projetada para se envolver com o mundo

vivo através de sua ênfase em uma parceria cocriativa com a natureza baseada em estratégias de adaptação, resiliência e regeneração (Du Plessis, 2012, p. 1, tradução livre).

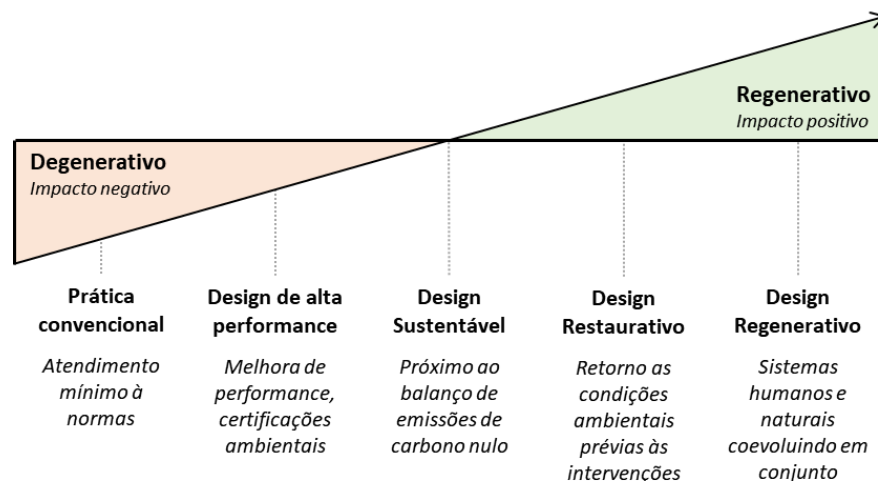
Sob essa ótica, o *design* regenerativo seria um avanço em cima do conceito de sustentabilidade comumente empregado, pois, mais do que reduzir impactos negativos ou buscar um balanço nulo, o *design* regenerativo se propõe a propiciar impactos positivos. Dentro do contexto do paradigma sustentável, Brown, Naboni e Havinga (Brown; Naboni; Havinga, 2019b) propõem 5 níveis de impacto ambientais de intervenções em projeto: desde as (i) práticas convencionais com o maior impacto ambiental negativo; (ii) para um nível superior de *design* de alta performance, ou edifícios verdes; (iii) em seguida, o *design* sustentável, que se encontra no limite entre os impactos negativos e positivos, para posteriormente haver os dois níveis de impacto positivo; (iv) o *design* restaurativo que possibilita a restauração das condições ambientais a um estado anterior à intervenção; e (v) o *design* regenerativo em que os sistemas humanos coevoluem em conjunto com os sistemas naturais. O diagrama da Figura 4 apresenta a relação entre as intervenções convencionais, sustentáveis e regenerativas.

Essa mudança de perspectiva da relação dos seres humanos com a natureza é central na mudança de paradigma do *design* regenerativo. Isso pode ser percebido na passagem a seguir de Du Plessis:

Esta visão de mundo representa uma mudança da perspectiva do planeta como um sistema determinístico no qual os seres humanos estão separados da natureza para vê-lo como um sistema socioecológico fundamentalmente interconectado, complexo, vivo e adaptável que está constantemente em fluxo. Nesse sistema, os seres humanos são vistos como parte integrante da natureza e parceiros nos processos de co-criação e coevolução, em vez de serem

meros usuários ou clientes de diversos serviços ecossistêmicos (Du Plessis, 2012, p. 11, tradução livre).

Figura 4 – Diagrama do nível de impacto ambiental das diferentes abordagens de projeto de acordo com a filosofia de *Design Regenerativo*



Fonte: Autor, adaptado de Naboni; Havinga (2019).

Essa mudança de paradigma para uma abordagem restaurativa implica em três pontos importantes, segundo Du Plessis (Du Plessis, 2012). Primeiramente, existe a necessidade de alinhamento de um modelo de desenvolvimento humano com os esforços criativos da natureza. Para isso, a autora aponta duas estratégias: primeiro, projetar com o emprego de sistemas naturais e ecológicos para atender às necessidades humanas, em vez de soluções artificiais, como no caso de infraestrutura azul e verde em detrimento de infraestrutura cinza. Já a segunda estratégia corresponde ao emprego do *design* ecológico, que se espelha nos

processos dos sistemas naturais, no processo de transformação de energia e matéria de forma sinérgica (Kibert, 2012).

Adicionalmente, a mesma autora (Du Plessis, 2012) aponta a necessidade de compreensão da natureza como um elemento mutável, dinâmico e imprevisível, e não como algo estático. Isso está intrinsecamente relacionado com a flexibilidade, adaptabilidade, robustez e resiliência dos sistemas naturais. Dessa forma, as intervenções humanas também deveriam se pautar nesses aspectos.

Similarmente, Brown, Naboni e Havinga (Brown; Naboni; Havinga, 2019b) propõem um enquadramento conceitual para o entendimento do *design* regenerativo baseado no tripé Ego-Eco-Seva. Nessa perspectiva, Ego corresponde ao paradigma dominado pelo ego, em que os seres humanos simplesmente usufruem dos recursos e capacidade de absorção da natureza, padrão marcante a partir da Revolução Industrial. Eco se relaciona à necessidade de preservação da natureza, concepção dominante dos anseios da preocupação atual da sustentabilidade, enquanto Seva representa o paradigma regenerativo de um processo sinérgico e coevolutivo com os sistemas naturais.

Para que as intervenções arquitetônicas e urbanísticas possam realmente se inserirem dentro de um sistema que maximize os potenciais da natureza, é necessária uma abordagem que englobe diversas dimensões e não exclusivamente questões de eficiência energética. Naboni e Havinga (Naboni; Havinga, 2019) indicam uma abordagem holística, baseada em três pilares: clima e energia; carbono e ecologia; e saúde e bem-estar. Dessa forma, aspectos de conforto e bem-estar do usuário devem ser contemplados, o que inclui tanto o ambiente interno quanto o externo. Nesse sentido, o estudo da forma urbana e do envelope

são elementos centrais, pois servem de ponte entre o ambiente interno e o ambiente urbano, uma conexão entre interior e exterior.

2.2 ZEB NA ESCALA URBANA: ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA

Análises bibliométricas são um conjunto de técnicas de mapeamento de produção científica baseada em técnicas estatísticas e de ciências de dados para melhor compreender produção científica de forma sistemática, especialmente adequadas para conjuntos de pesquisa volumosos, fragmentados e controversos (Aria; Cuccurullo, 2017). Dessa forma, essa técnica se mostra bastante apropriada para análise da literatura de *Zero-Energy Building* na escala urbana, visto especialmente seu volume e fragmentação – como é demonstrado nesta seção.

A análise bibliométrica sobre a *Zero-Energy Building* na escala urbana apresentada a seguir foi realizada a partir de levantamento de dados bibliométricos extraídos na plataforma Scopus no dia 20 de julho e atualizado em 19 de outubro de 2020. O principal objetivo dessa análise é compreender o escopo geral do campo de pesquisa, seus padrões e categorias. O Quadro 2 abaixo apresenta a *string* de busca utilizada na extração dos dados bibliométricos.

Quadro 2 – *String* de busca empregada na base de dados Scopus

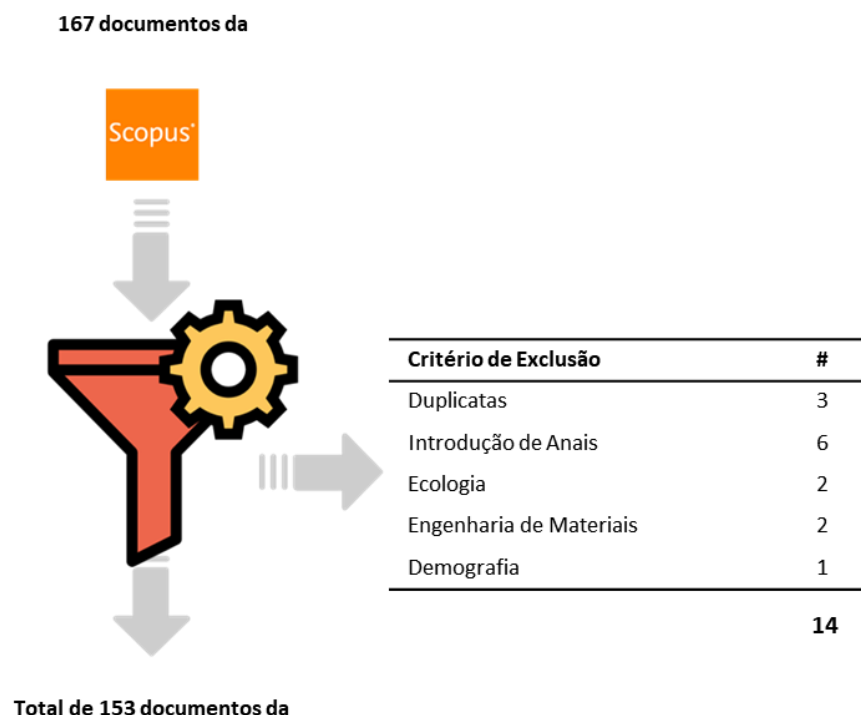
```
TITLE-ABS-KEY ((low OR zero) W/0 energy W/0 (community OR neighborhood OR district OR city OR village OR "building stock" OR "urban planning" OR "urban design" OR "urban block" OR "city block" OR campus))
```

Os termos empregados na *string* de busca só incidiram sobre títulos, resumos e palavras-chave, conforme disponível na plataforma Scopus, de modo que os termos fossem centrais aos trabalhos selecionados. A construção da *string* de busca é dividida em três elementos principais: o termo “zero” ou “baixo” (2) próximo ao termo energia (1) – que caracterizam o perfil energético –, e um termo final representando a escala ou objeto (11). O uso do conector booleano *within* (W) permite pesquisar o termo por proximidade, e o número 0 define o número de palavras que podem existir entre os termos. Portanto, essa única *string* de busca gera 22 combinações diferentes.

A busca resultou em 167 documentos, dos quais, após análise inicial dos títulos e resumos, excluiu-se 14 por diversos motivos, como por duplicidade, documentos de introdução a anais de congresso, ou temas não aderentes. Ao final do processo de exclusão, restaram 153 documentos aderentes ao escopo da revisão de literatura.

Um arquivo tipo bibtext foi gerado para análise bibliométrica no programa bibliometrix para R por meio de sua interface em HTML biblioshiny (Aria; Cuccurullo, 2017). Além disso, gerou-se um arquivo tipo csv. do mesmo conjunto de dados para ser empregado no VOSviewer (Eck; Waltman, 2007) para realização de representação da análise relacional dos dados bibliométricos, como um acoplamento bibliométrico de documentos e coocorrência para palavras-chave.

Figura 5 – Processo de triagem de artigos



Fonte: Autor, ícones de Freepik (2021)

2.2.1 Visão geral do campo

Dos 153 documentos obtidos na pesquisa, 421 autores contribuíram para esse corpo da literatura, a maioria escrito em colaboração, mas em alguns casos com autor único. Nesse conjunto de literatura, empregam-se 1.294 palavras-chave indexadas pelo Scopus, e 476 palavras-chave utilizadas livremente pelos autores. Além disso, 93 fontes, como revistas, livros e conferências, estão presentes. O

período de publicação desses documentos abrange desde 1995 até a realização da extração de dados – no final de 2020. A Tabela 1 resume os dados descritivos dos documentos analisados.

Tabela 1 – Descrição geral do corpo da literatura

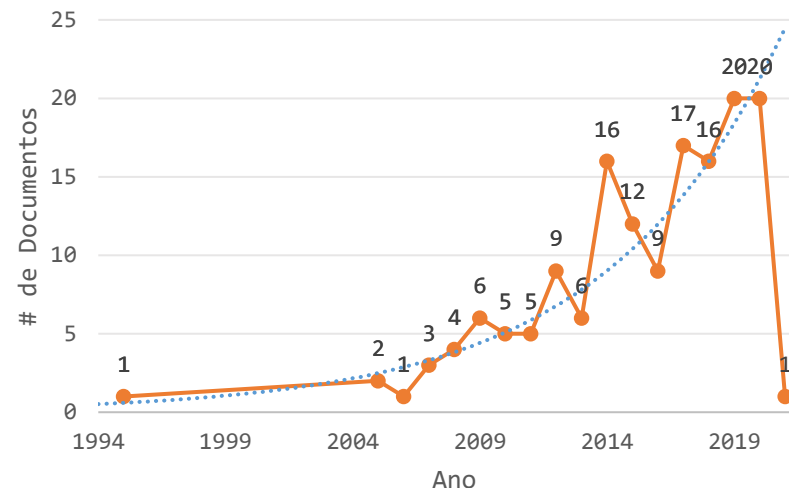
Descrição	Resultados
Documentos	153
Fontes	93
Palavras-chave Plus (ID)	1294
Palavras-chave do autor (DE)	476
Período	1995 - 2021
Citações médias por documentos	9.059
Autores	421

Fonte: Autor (2021), adaptado de Bibliometrix / Biblioshiny (Aria; Cuccurullo, 2017)

Como pode ser notado pelo Gráfico 1, o interesse pelo assunto cresceu significativamente nos últimos 25 anos. Apesar da primeira publicação sobre ZEB na escala urbana ocorrer em meados dos anos 90, o assunto não teve grande adesão no século passado. Apenas em meados dos anos 2000, o assunto começa a se destacar com um crescimento constante, com ênfase para o período entre o início e meados da década de 2010.

Gráfico 1- Evolução e tendência do número de publicações

Evolução do Número de Publicações



Fonte: Autor (2021), adaptado de Bibliometrix / Biblioshiny (Aria; Cuccurullo, 2017)

Pode-se especular que a primeira menção do ZEB na escala urbana nos anos 90 seja relativa ao aumento da relevância da sustentabilidade nos campos de Arquitetura, Engenharia e Construção. No entanto, o aumento significativo de publicações no início dos anos 2000 coincide com o crescimento em pesquisa da ZEB. Um novo aumento na década seguinte pode estar relacionado com a ampliação da pesquisa de ZEBs devido à necessidade de superar barreiras, especialmente da escala de análise.

Apesar de algumas pequenas variações, o crescimento ao longo do tempo é evidente. A linha de tendência no Gráfico 1 tem um padrão exponencial. Em 10

anos (de 2010 a 2019), há um aumento significativo, de aproximadamente 300%. Portanto, é razoável considerar a importância de que o campo de pesquisa de ZEB na escala urbana se mantenha em um padrão de crescimento de publicações semelhante para os anos seguintes.

2.2.2 Fontes de publicação

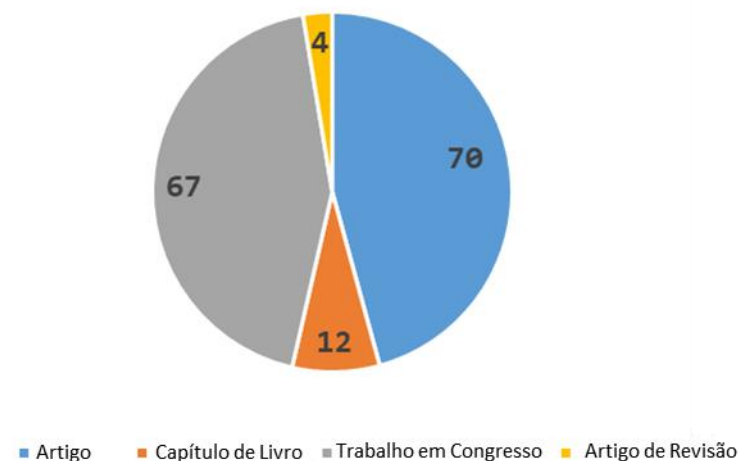
A maioria dos documentos está publicada em periódicos como artigos (70) ou em anais de conferência (67), em contraste com a menor quantidade de capítulos de livros (12) e artigos de revisões (4)²¹. O Gráfico 2 apresenta estas informações.

É interessante salientar que há uma predominância de artigos de conferência em um primeiro momento do campo de pesquisa, no início dos anos 2000, enquanto na década seguinte mais artigos de pesquisa em periódicos são encontrados. Isso pode significar que a pesquisa realizada no início do século amadureceu, ou o campo de pesquisa como um todo amadureceu, uma vez que a maioria dos autores tem apenas um artigo – como é mostrado mais à frente no item 2.2.3. Autores, página 33 – pode significar que o campo de pesquisa em si vem desenvolvendo investigações mais sólidas recentemente.

²¹ Apesar de serem publicados também em revistas, as revisões são consideradas diferentes dos artigos de pesquisa.

Gráfico 2 – Documentos publicados por tipo de fonte

Tipos de Documentos



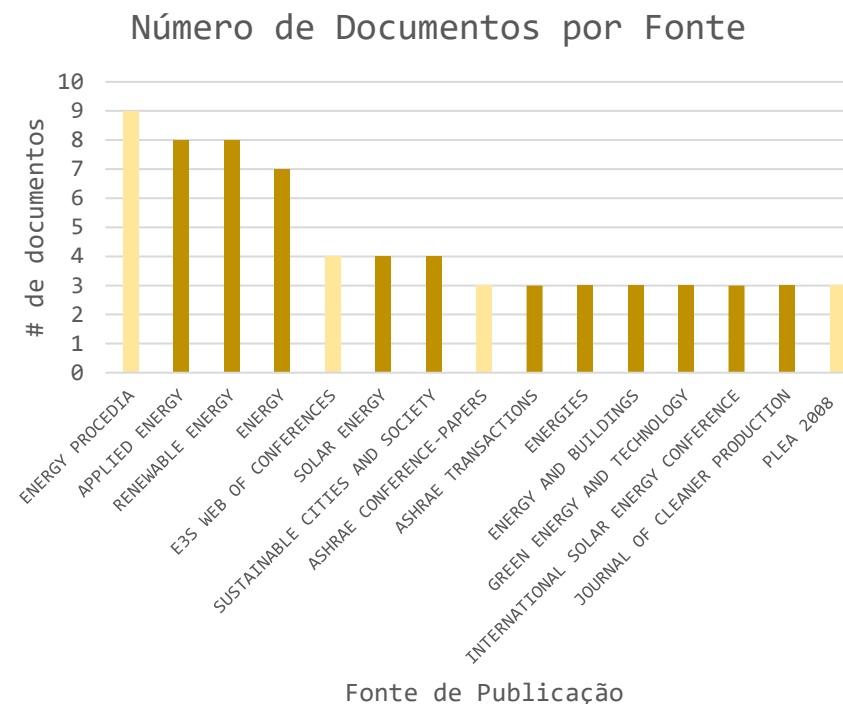
Fonte: Autor (2021), adaptado de Bibliometrix / Biblioshiny (Aria; Cuccurullo, 2017)

No geral, a produção da pesquisa está fortemente espalhada por muitas fontes, como pode ser visto no Gráfico 3. A fonte mais produtiva, a *Energy Procedia*, possui apenas 9 documentos, o que representa menos de 6% de toda a produção de campo de pesquisa. Apesar de a fonte principal ser uma compilação de artigos de conferência, três periódicos têm números similares e se destacam: *Applied Energy*; *Renewable Energy*; e *Energy*. Em geral, há uma predominância de periódicos, especialmente aqueles relacionados à energia, e com ênfase em

energia renovável, solar, limpa e verde. Apenas *Sustainable Cities and Societies* parece uma exceção. Quanto às conferências, periódicos que compilam trabalhos de conferência de muitos eventos como *Energy Procedia* e *E3S Web of Conferences* são fontes importantes. No entanto, anais de eventos isolados da ASHRAE e PLEA²² também apresentam número significativo de documentos no tema de ZEB na escala urbana.

Quanto ao impacto dessas publicações, o cenário muda significativamente, com a prevalência de periódicos, e especificamente uma revista, *Energy*, que claramente é a fonte mais impactante em termos de citação de seus artigos. O Gráfico 4 apresenta o número de citações dos documentos por fonte. Dentre as 15 fontes mais bem ranqueadas, apenas duas são dedicadas a trabalhos de conferência – *Energy Procedia* e *ASHRAE Transactions* –, todas as demais são periódicos tipos *journal* ou revistas acadêmicas. Quatro periódicos são proeminentes, com mais de 100 citações cada: *Renewable Energy*, *Applied Energy*, *Energy & Buildings* e *Energy*, com 117, 117, 130 e 410 citações, respectivamente. Somente os artigos da revista *Energy* têm mais citações do que os outros três periódicos mais bem ranqueados combinados, o que evidencia a significativa relevância desse periódico no campo de ZEB na escala urbana.

Gráfico 3 – Documentos por fonte

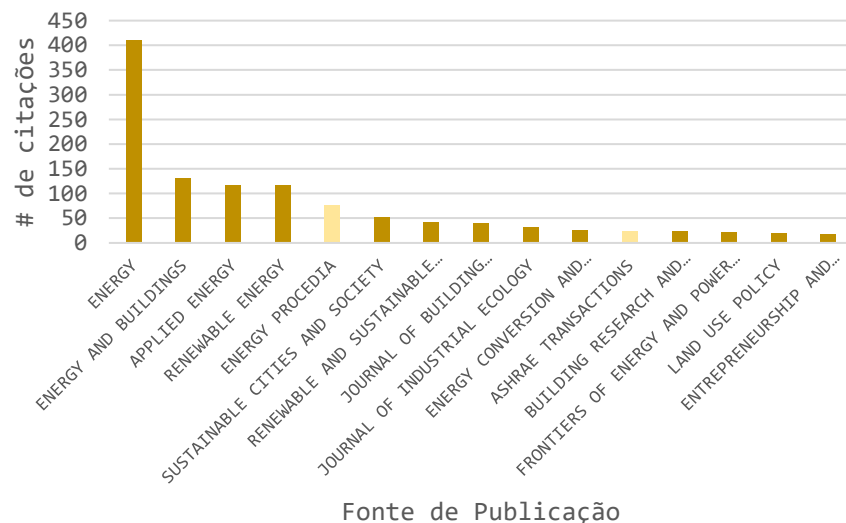


Fonte: Autor (2021), adaptado de Bibliometrix / Biblioshiny (Aria; Cuccurullo, 2017)

²² No Gráfico 3 apenas a edição PLEA 2008 é contabilizada, no entanto, outros PLEAs têm papel sobre o ZEB na escala urbana Assunto.

Gráfico 4 – Número de citações dos documentos por fonte

Número Total de Citações por Fonte de Publicação



Fonte: Autor (2021), adaptado de Bibliometrix / Biblioshiny (Aria; Cuccurullo, 2017)

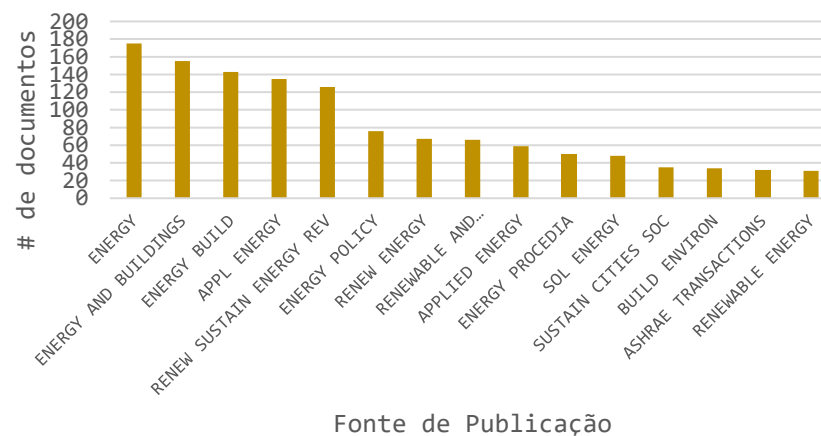
No entanto, o número de documentos citados na lista de referência de todo corpo da literatura também pode indicar as melhores fontes de pesquisa, pois mostra quais fontes são mais usadas para fundamentar o desenvolvimento da literatura. Conforme apresentado no Gráfico 5, a maioria dos periódicos com mais citações são também os mais citados²³. *Energy and Buildings* aparece com dois nomes no gráfico – com seu nome completo e abreviado, *Energy Build* –, e,

²³ Mais citados se refere aos dados do Gráfico 4, relativo ao número de citações de todos os documentos de determinado periódico que fazem parte da análise bibliométrica. Já os periódicos mais citações se referem ao número de documentos de determinado periódico que são citados – ou estão na lista de

portanto, é a fonte com mais documentos utilizados, com 298 artigos no total. As revistas *Energy* e *Applied Energy* também são outras das principais fontes com mais artigos empregados, e possuem respectivamente 175 e 135 artigos utilizados como referência. Entre as fontes que mais têm artigos utilizados como referência, apenas a revista *Renewable Sustainable Energy Reviews* não aparece na lista da fonte com artigos mais citados, com 126 artigos utilizados como referência na literatura analisada.

Gráfico 5 – Fontes por documentos citados na lista de referência

Número de Documentos da Lista de Referências por Fonte de Publicação



Fonte: Autor (2021), adaptado de Bibliometrix / Biblioshiny (Aria; Cuccurullo, 2017)

referências – no corpo de literatura da análise bibliométrica, referente ao Gráfico 5.

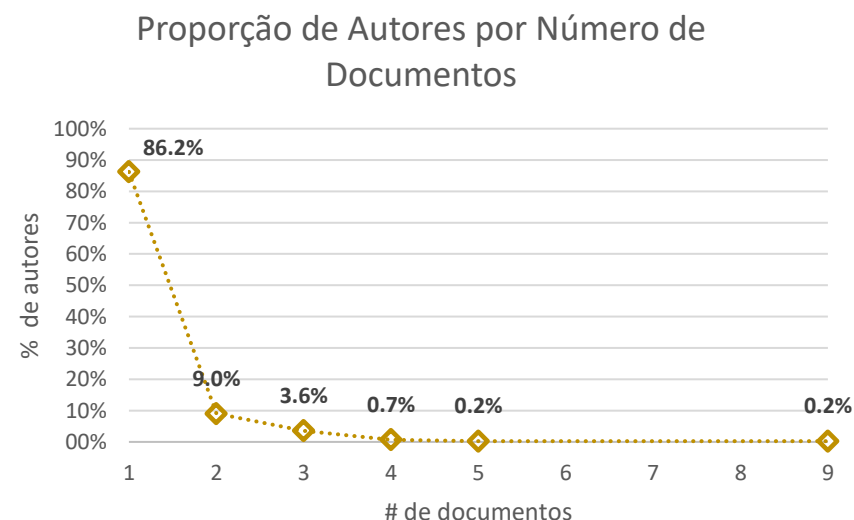
2.2.3 Autores

Como já mencionado anteriormente - no item 2.2.1 Visão geral do campo, na página 28 -, 421 autores publicaram os 153 documentos no assunto ZEB na escala urbana. No entanto, o elevado número de autores em relação ao número de documentos sugere que o ZEB na escala urbana não é um tema central na pesquisa desses autores. A maioria dos autores analisados apenas ocasionalmente publicou sobre a questão do ZEB na escala urbana, com impressionantes 95% dos autores com somente um ou dois documentos publicados. De fato, 86% dos autores publicaram apenas um único documento sobre o tema ZEB na escala urbana. Menos de 5% dos autores – 19 autores – publicou 3 ou mais documentos, conforme pode-se observar no Gráfico 6²⁴. Isso demonstra que, apesar do aumento do interesse no campo, a ZEB na escala urbana ainda é um tópico secundário ou periférico para a maioria dos pesquisadores e que não ganhou tração suficiente com maturidade e autonomia próprias.

O Gráfico 7 apresenta com mais detalhes os autores mais produtivos do ZEB na escala urbana arquivados. O autor mais produtivo é Svendsen, professor da Universidade Técnica da Dinamarca, com 9 documentos publicados. No entanto, ele não figura como principal autor em nenhum desses documentos, pois foi o orientador de Tol, Dalla Rosa e Li, outros três dos autores mais produtivos. De fato, esses autores configuram um agrupamento próprio de um tópico nichado – redes urbanas de aquecimento – no campo ZEB na escala urbana por um período específico – início dos anos 2010 –, como é mostrado mais adiante. Mesmo com a maior produtividade – e maior impacto, com maior número de citações conforme

Gráfico 8 –, o grupo de autores não tem ZEB na escala urbana como uma questão central, o que torna evidente a natureza de ainda formatação do campo de pesquisa.

Gráfico 6 – Porcentagem de autores por número de documentos

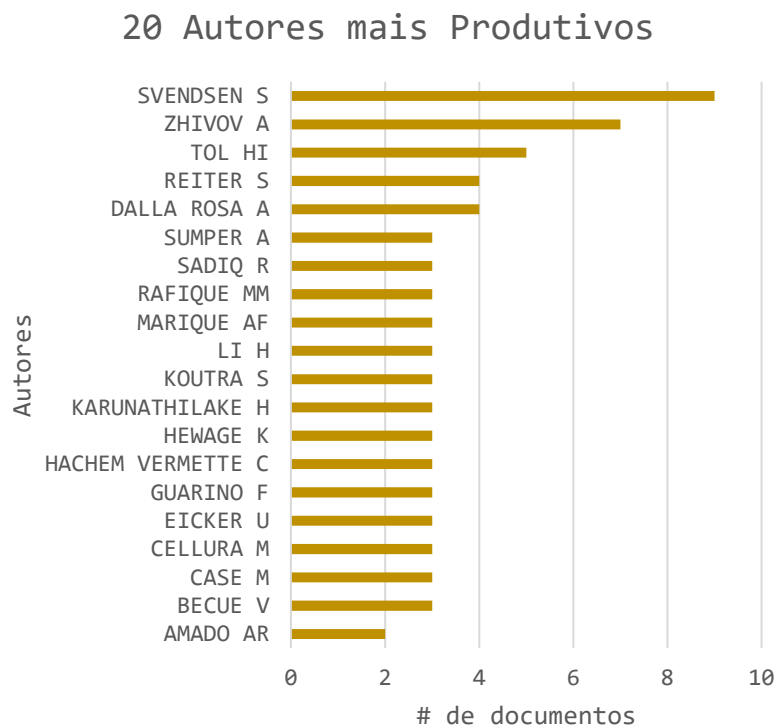


Fonte: Autor (2021), adaptado de Bibliometrix / Biblioshiny (Aria; Cuccurullo, 2017)

²⁴ 15 autores publicaram 3 documentos, 3 autores têm 4 documentos e um autor tem 3 documentos publicados, assim como outro autor que publicou 9, que totalizam 20 autores. No entanto, dois deles

eram homônimos, então são apenas 19 autores.

Gráfico 7 – Autores mais produtivos – número de documentos



Fonte: Autor (2021), adaptado de Bibliometrix / Biblioshiny (Aria; Cuccurullo, 2017)

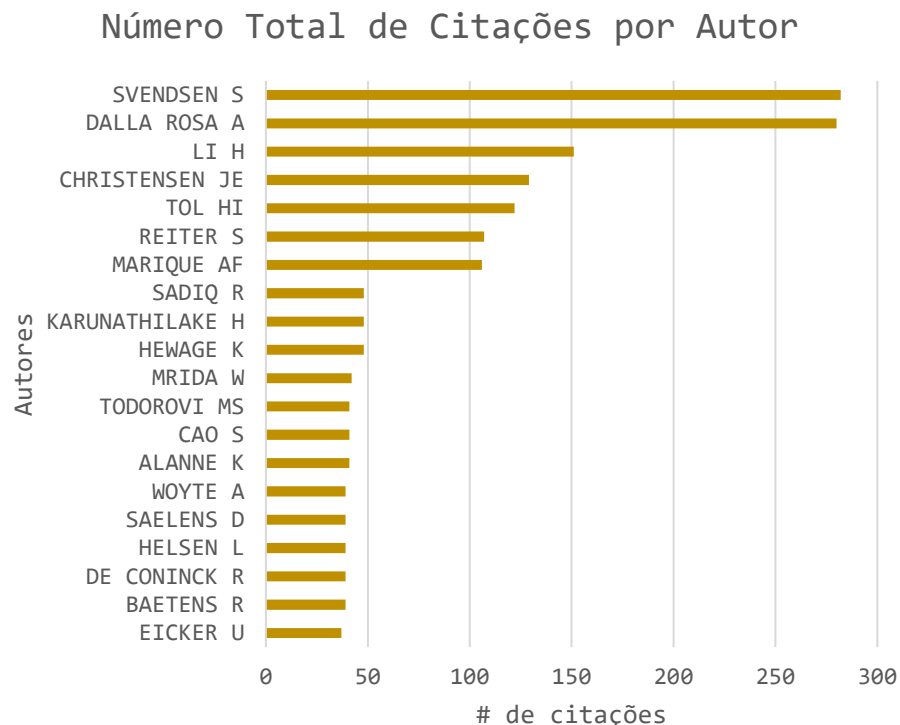
No entanto, o segundo grupo mais produtivo de autores está, talvez, já mais consolidado em torno da ZEB na escala urbana, que é o setor de infraestrutura do Exército dos EUA, liderado por Zhivov e Case, juntamente com muitos outros coautores. Uma vez que o Exército dos EUA tem um enorme parque construído, e a segurança e a resiliência energéticas são questões importantes para seus campi e instalações, o principal foco das pesquisas é avaliar esses campi

e instalações e desenvolver metodologias, estrutura e ferramentas para alcançar o padrão *Zero-Energy*. Para esse fim, o Exército dos EUA tem colaborado com o *Department of Energy* (DOE) estadunidense durante a maior parte da década passada e seus esforços não parecem ter sido cessados.

Recentemente, novos autores têm voltado seus esforços para o campo ZEB na escala urbana, desde meados da década de 2010. Há grande diversidade de enfoques, como sistemas fotovoltaicos, *smart grids*, armazenamento de energia, planejamento urbano, entre outros. Contudo, essas pesquisas mais recentes têm uma compreensão mais clara e mais bem fundamentada das questões, desafios e aspectos do ZEB na escala urbana, com uma visão mais abrangente e compreensiva. Isso pode ser um indício de amadurecimento e consolidação desse campo de pesquisa.

Quanto ao impacto da produção do autor, avaliado pelos autores com maior número de citações de seus documentos, há grande sobreposição com os mais produtivos. As únicas exceções são os pesquisadores, Zhivov e coautores, que não aparecem entre os 20 autores mais citados, conforme apresentado no Gráfico 8. Uma razão que pode explicar o impacto relativamente menor da pesquisa de Zhivov e coautores é o fato de que a maioria de seus documentos foi publicada em anais de conferências, com exceção de apenas um, e principalmente em conferências realizadas nos EUA. Essa concentração geográfica e de formato de publicação pode limitar sua disseminação e influência.

Gráfico 8 – Autores mais impactantes - número de citações

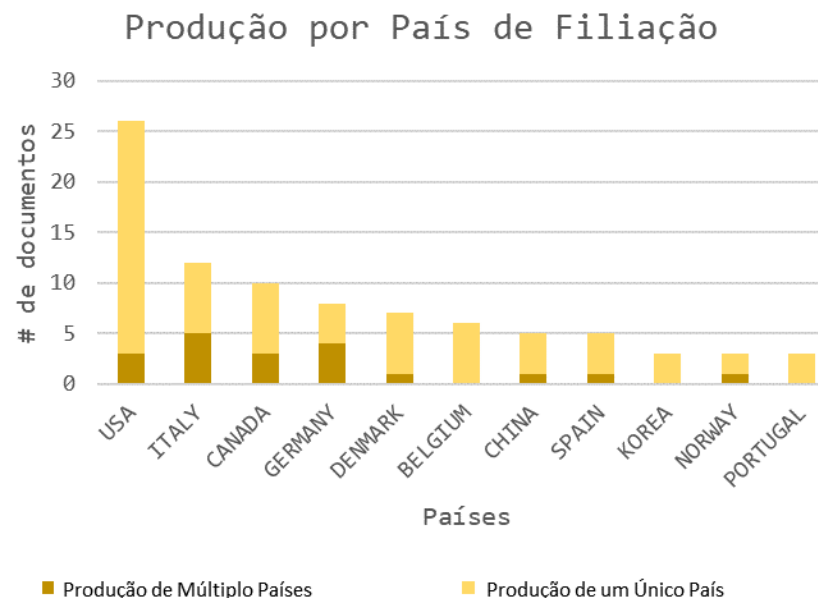


Fonte: Autor (2021), adaptado de Bibliometrix / Biblioshiny (Aria; Cuccurullo, 2017)

Consistentemente com a produção, o grupo dinamarquês de pesquisadores é o mais prolífico, bem como o com maior impacto geral, com significativamente mais citações. Todos os cinco autores com mais citações são desse grupo – incluindo Christensen, que tem apenas um documento e não aparece na lista de produção. Além disso, Reiter e Marique se destacam entre os demais do grupo com mais de 100 citações, especialmente por causa de sua

colaboração. Diferentemente do grupo dinamarquês, as duas pesquisadoras Belgas possuem maior ênfase em questões de planejamento urbano.

Gráfico 9 - Países mais produtivos – número de documentos



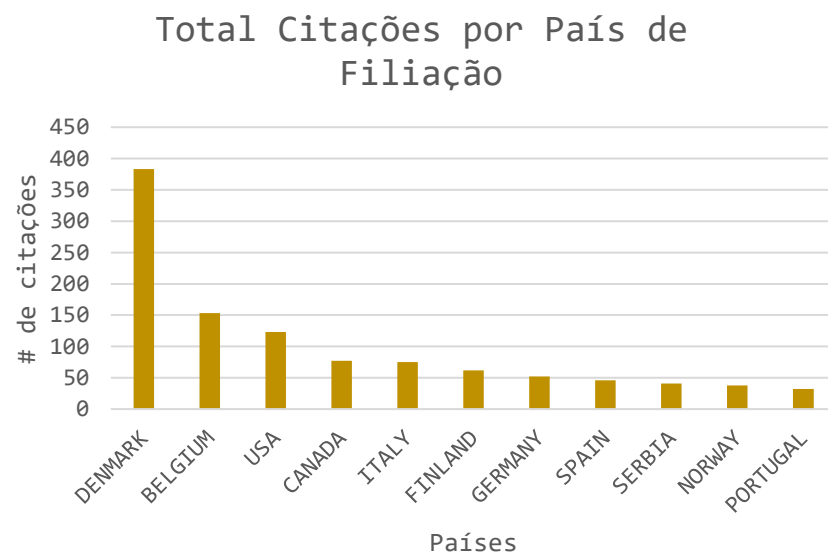
Fonte: Autor (2021), adaptado de Bibliometrix / Biblioshiny (Aria; Cuccurullo, 2017)

Curiosamente, os EUA são de longe o país com instituições com mais documentos publicados, mais que o dobro do segundo colocado, Itália, como pode ser observado no Gráfico 9. Há uma predominância de países europeus, juntamente com os EUA e o Canadá na América do Norte e China e Coreia do Sul na Ásia. Isso mostra uma predominância do clima – em sua maioria temperado – e

de nível socioeconômico – países desenvolvidos – nas pesquisas realizadas atualmente. Além disso, vale ressaltar que há uma clara tendência de a pesquisa ser desenvolvida dentro de um único país. Isso mostra uma falta de colaboração nos estudos.

Essa liderança na produção pelos EUA não se traduz em impacto no campo da pesquisa, no qual é apenas o terceiro mais bem ranqueado, como mostra o Gráfico 10. A Dinamarca lidera, seguida pela Bélgica, impulsionada pela produção do Svendsen e coautores e de Reiter e Marique, respectivamente. Além disso, a Finlândia e a Sérvia, que não estão na lista dos países mais produtivos, aparecem na lista de países com maior impacto.

Gráfico 10 – Países de afiliação com a maioria das citações



Fonte: Autor (2021), adaptado de Bibliometrix / Biblioshiny (Aria; Cuccurullo, 2017)

2.2.4 Documentos principais

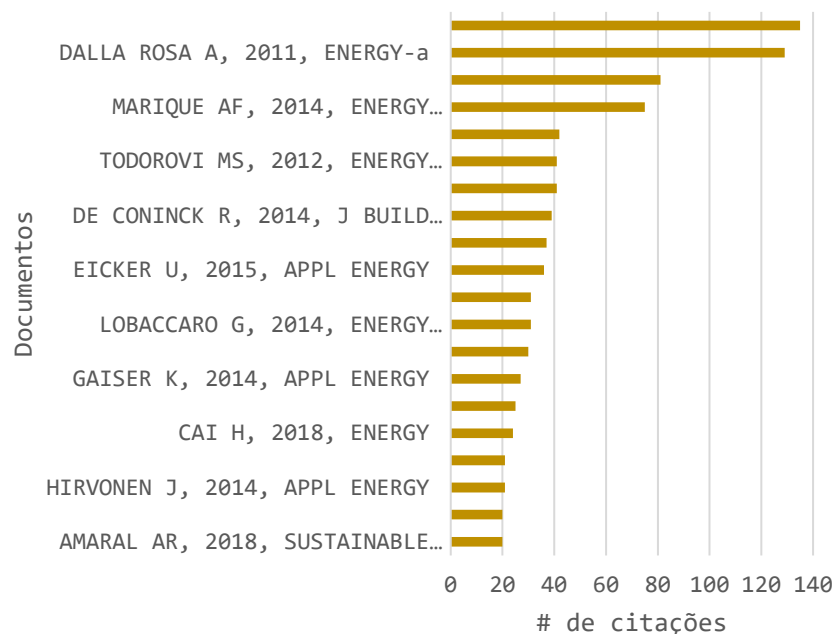
Os documentos mais impactantes estão alinhados com os autores mais produtivos e impactantes. O grupo dinamarquês tem quatro artigos entre os 20 com a maior número de citações, inclusive os 3 documentos mais citados, como mostra o Gráfico 11. Tanto Dalla Rosa e Christensen (2011) e Dalla Rosa, Li e Svendsen (2011) se destacam de forma significativa dos demais, com mais de 100 citações cada. Tol e Svendsen (2012) e Marique e Reiter (2014) também se sobressaem com mais de 60 citações.

No entanto, como já mencionado em item anterior, apesar da produção prolífica dos pesquisadores do Exército dos EUA, seus documentos (Case *et al.*, 2014; Hartranft *et al.*, 2009; Liesen *et al.*, 2015; Zhivov *et al.*, 2013, 2014; Zhivov; Case, 2017) não têm impacto condizente, o que pode ser explicado pela regionalidade e nível de importância dos locais de publicação.

Além disso, alguns trabalhos entre os mais citados desenvolvem panoramas gerais sobre ZEB na escala urbana. Todorović (Todorović, 2012) realiza um balanço das próprias pesquisas realizadas sob a perspectiva de ZEB na escala urbana, que, apesar de extremamente endógeno, o documento apresenta contribuições anedóticas interessantes. Por sua vez, Amaral e coautores (Amaral *et al.*, 2018) realizam vasta revisão de literatura sobre o tema e desenvolvem esquema de classificação interessante para ZEB na escala urbana.

Gráfico 11 – Documentos mais impactantes

20 Documentos com mais Citações



Fonte: Autor (2021), adaptado de Bibliometrix / Biblioshiny (Aria; Cuccurullo, 2017)

A análise de acoplamento bibliográfico²⁵ apresenta a relação dos artigos em conformidade com o número de referências que compartilham. Na análise desenvolvida no VosViewer, apresentada na Figura 6, todos os documentos do corpo da literatura são considerados, e apresenta um *cluster* principal com 93 dos 153 artigos, enquanto os demais estão completamente isolados. Isso indica uma

²⁵ Tradução livre de *bibliographic coupling*.

baixa conectividade e alta fragmentação dentro do corpo da literatura, com dispersão de referências fundamentais. Dos documentos analisados, 60 – o que representa 39% – não compartilham referência em comum com nenhum outro documento da literatura. Basicamente, muitos artigos fundamentam suas pesquisas em diferentes conjuntos de literatura, o que pode ser atribuído à diversidade de subtemas dentro do campo de pesquisa, frequentemente especializados. Portanto, o campo de pesquisa em ZEB na escala urbana carece de unidade, coerência e articulação característica de um campo maduro.

A análise do conjunto principal de documentos - quadro em destaque na Figura 6 – revela a articulação de subtemas. No topo, em verde, nota-se o *cluster* de redes urbanas de aquecimento com proeminente contribuição dinamarquesa. Enquanto à direita, em amarelo, se encontram os documentos sobre ferramentas e melhores práticas sobre ZEB na escala urbana, com destaque para os pesquisadores do Exército dos EUA. Em vermelho, há o subtema mais central, sobre rede e sistema energéticos de forma geral, com especial ênfase na viabilidade econômica. Abaixo há dois *clusters* em azul que tratam sobre planejamento urbano, um com foco na eficiência energética dos edifícios, e outro com ênfase no conforto térmico do pedestre. Já à esquerda, o *cluster* lilás aborda tendências sobre a rede fotovoltaica em países em desenvolvimento. Por fim, o *cluster* laranja também trata sobre rede e sistema energéticos de forma geral, mas a partir do uso de Sistemas de Informação Geográficas (SIG ou GIS, em inglês).

O diagrama temporal da rede de citações diretas²⁶ (Figura 7, página 39) gerado pela interface biblioshiny do programa bibliometrix, apresenta os 50

²⁶ Tradução livre de *historical direct citation network*.

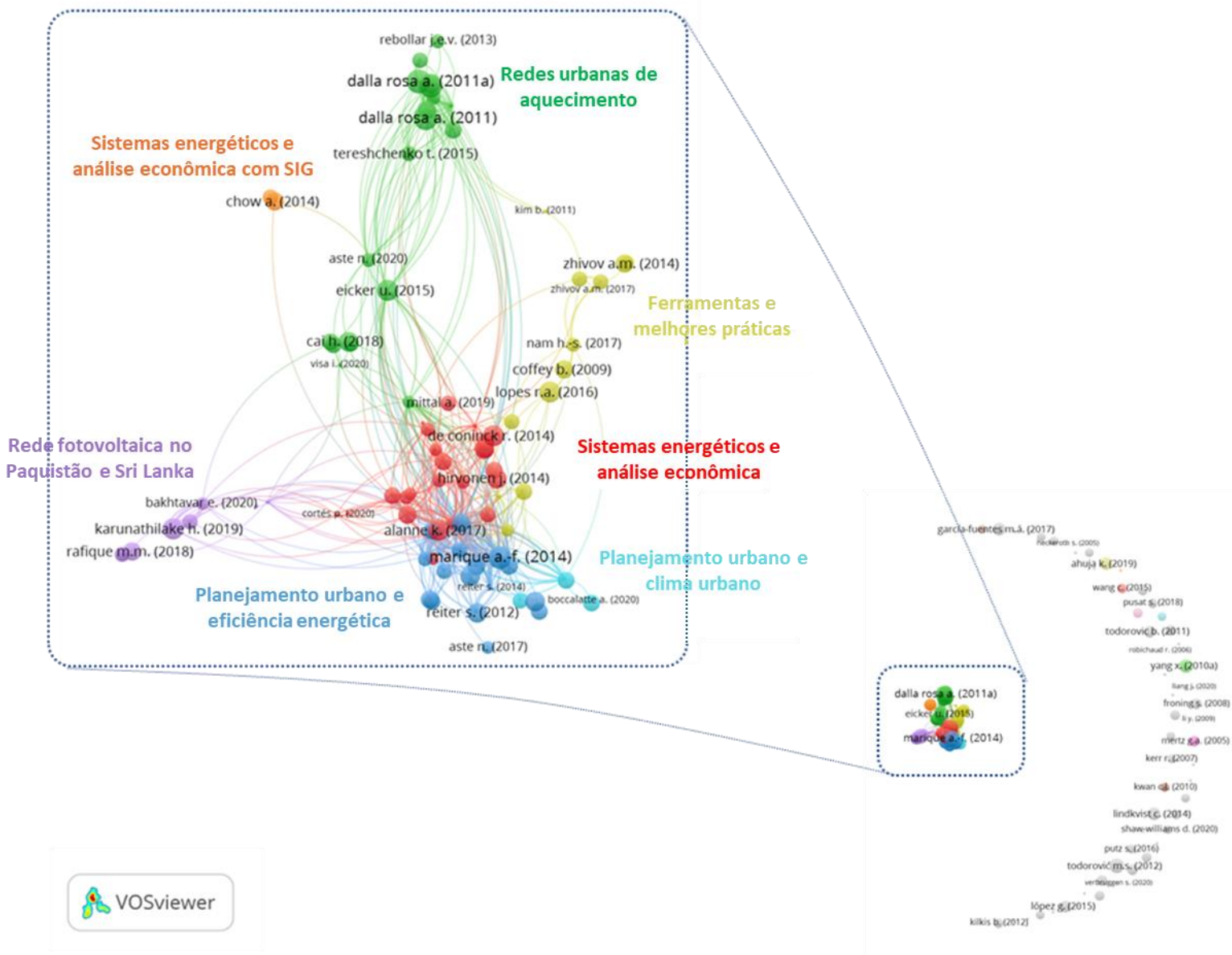
artigos mais relevantes no corpo da literatura e indica citação entre documentos por meio de linhas. Esta análise apresenta os mesmos cluster da análise de acoplamento bibliográfico, porém, como cores diferentes. É perceptível os estudos dinamarqueses de redes urbanas de aquecimento no início do período, em azul, assim como um *cluster* principal em vermelho referente à rede e ao sistema energéticos, além de *cluster* menor em verde, que trata eficiência energética em edifícios e planejamento urbano. Em laranja, representa a contribuição do Exército dos EUA²⁷. Mais recentemente, desde 2016, três *clusters* aparecem no topo da rede, um sobre planejamento urbano, com *design* paramétrico, e, em marrom, uma abordagem de avaliação holística, principalmente no Oriente Médio, e os outros dois – roxo e rosa – sobre energia solar e fotovoltaica, especialmente no Paquistão e Siri Lanka.



²⁷ Observe que as cores significam diferentes clusters em cada rede.

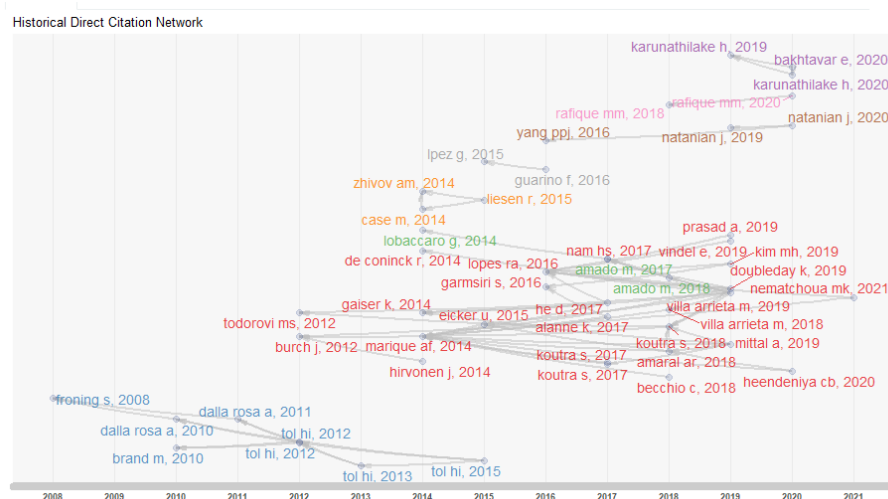
1

Figura 6 – Diagrama de rede relacional de acoplamento bibliográfico de documentos



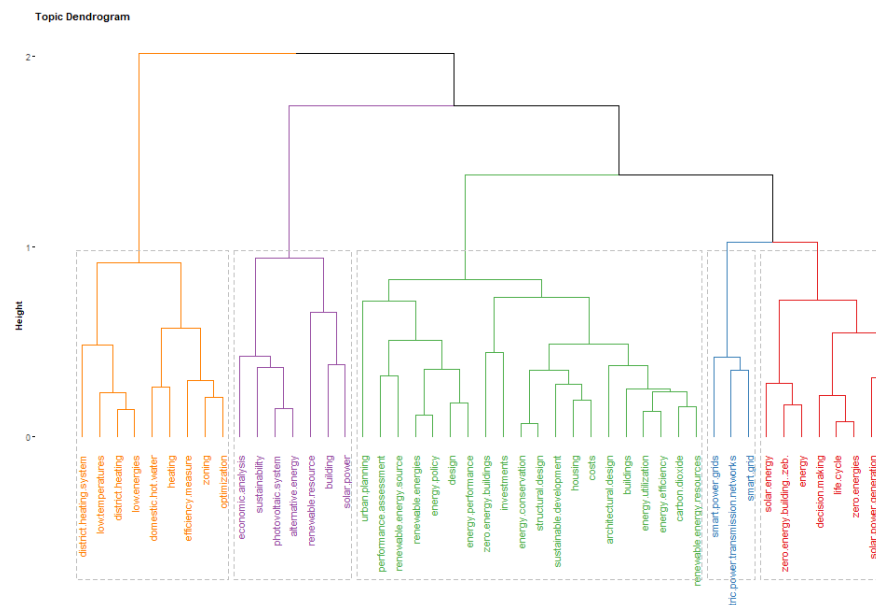
1

Figura 7 – Diagrama temporal da rede de conexão direta histórico



Fonte: Autor (2021), adaptado de Bibliometrix / Biblioshiny (Aria; Cuccurullo, 2017)

Figura 8 – Dendrograma da estrutura conceitual



Fonte: Autor (2021), adaptado de Bibliometrix / Biblioshiny (Aria; Cuccurullo, 2017)

2.2.5 Principais temas

Conceitualmente, algumas tendências surgem no corpo da literatura. Desenvolvidas no bibliometrix, as Figura 8 e Figura 9 mostram uma análise fatorial dos principais temas – palavras-chave – presentes e sua estrutura em um dendrograma. Nesse sentido, a mesma análise é apresentada de diferentes formas. Enquanto o dendrograma da Figura 8 apresenta a relação dos temas em uma estrutura de árvores de dados, semelhante à estrutura de uma árvore genealógica, o mapa de estrutura conceitual da Figura 9 demonstra a proximidade por meio de um gráfico de dispersão.

Na presente análise, os temas são categorizados em 5 grupos, com alguma correspondência com análise temática anterior no item – 2.2.4 Documentos principais. Primeiramente, pode-se notar *cluster* de redes urbanas de aquecimento como o primeiro a se diferenciar no dendrograma, o que mostra não só a diferença histórica em relação ao resto do corpo da literatura, mas também a diferença temática. Os outros quatro *clusters* compartilham algumas semelhanças, de alguma forma, estão próximos aos temas de eficiência energética, viabilidade e

energia renovável²⁸. No entanto, vale a pena mencionar algumas especificidades. Há um pequeno grupo a respeito de *smart grids*, o que parece ser uma tendência. Aspectos relacionados a temas econômicos e de viabilidade, como investimento, ciclo de vida e tomada de decisão, estão presentes no geral, mas parecem ser periféricos em cada *cluster*. Por outro lado, energia renovável, energia solar ou recurso, sistemas fotovoltaicos e termos semelhantes estão presentes mais fortemente no geral e mais centrais em cada aglomerado. Pelo menos o conceito de eficiência energética é central, como se poderia esperar.

Como forma alternativa de visualização da mesma análise fatorial dos dados da bibliometria, apresenta-se na Figura 10 uma rede de co-ocorrência temática desenvolvida no VosViewer.

Figura 9 – Mapa da estrutura conceitual

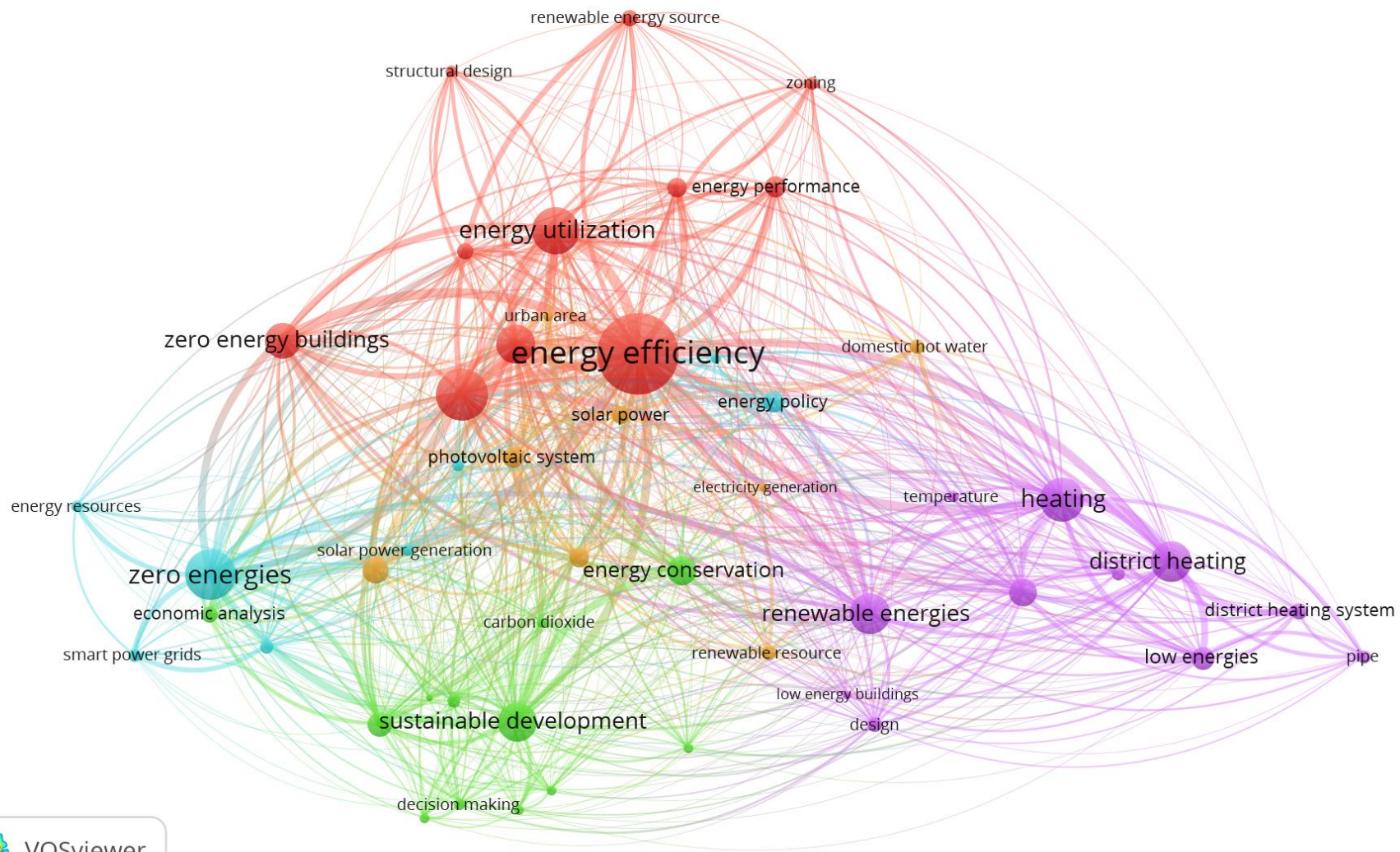


Fonte: Autor (2021), adaptado de Bibliometrix / Biblioshiny (Aria; Cuccurullo, 2017)

²⁸ Por default, a análise fatorial separou somente o primeiro grupo – que contempla o tema de redes urbanas de aquecimento – dos demais, o que mostra o nível de diferenciação deste grupo. Entretanto

para efeito de análise, optou-se por flexibilizar o processo para obter maior número de grupos.

1 **Figura 10 – Rede de co-ocorrência temática baseada na análise fatorial**



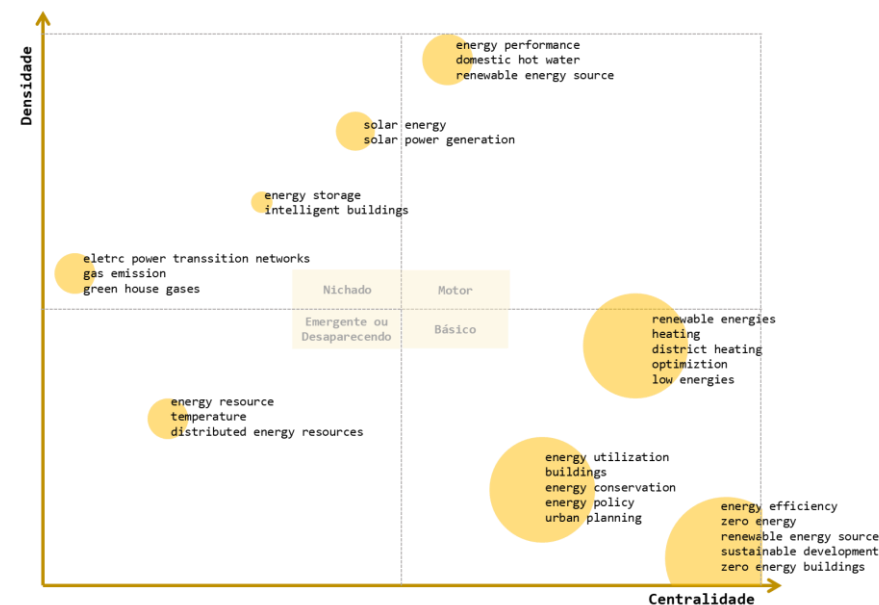
2

Adicionalmente, realiza-se o desenvolvimento de Mapas Temáticos que oferecem uma abordagem visual para compreender a distribuição e a importância relativa de diferentes temas ou conceitos do corpo de literatura. Divididos em quatro quadrantes distintos, esses mapas classificam os temas de acordo com sua densidade e centralidade e fornecem compreensão sobre a natureza e a interconexão dos tópicos abordados. O quadrante superior direito, indica resultados mais centrais e mais densos, são considerados os temas motores, movem o conjunto de literatura analisado. Já o quadrante inferior direito, ainda tem um perfil central, mas menos denso, e os *cluster* localizados nesse quadrante são considerados os temas básicos do campo de pesquisa. Por sua vez, o quadrante inferior esquerdo tem como característica baixa centralidade e densidade e desta forma são considerados os temas emergentes ou em declínio. E, por fim, no quadrante superior esquerdo há temas de nicho ou especializados, temas menos centrais, mais periféricos, porém densos (Aria; Cuccurullo, 2017).

A Figura 11 apresenta o mapa temático referente às palavras-chave dos documentos analisados para todo o corpo da literatura. Somente as 500 palavras-chave mais relevantes estão incluídas na análise. Para identificação de cada *cluster* são indicadas entre 2 e 5 temas mais importantes. Como pode ser observado no gráfico, temas como eficiência energética, *Zero-Energy*, desenvolvimento sustentável e energia renovável funcionam como base conceitual do corpo da literatura. No entanto, o núcleo do quadrante motor está de alguma forma vazio. Os dois *clusters* que estão no quadrante são marginais e têm relação com redes urbanas de aquecimento. Isso mostra o impacto desta pesquisa, embora sejam extremamente específicas e diferentes de grande parte do corpo da literatura. De certa forma, é difícil definir o que vem movimentando o campo da pesquisa.

Por outro lado, temas visivelmente claros são *clusters* muito nichado, relacionados à *smart city*, como redes de transmissão de energia, armazenamento de energia e *smart buildings*. Além disso, a energia solar destaca-se como *cluster* mais denso e central dos nichados. Nesse sentido, possivelmente seja um dos temas motores que impulsionam o campo de pesquisa em um futuro próximo.

Figura 11 – Mapa temático



Fonte: Autor (2021), adaptado de Bibliometrix / Biblioshiny (Aria; Cuccurullo, 2017)

Sobre os temas em declínio ou emergentes, há somente um *cluster* relacionado a energias renováveis. Apesar de não ser possível identificar se um tema é emergente ou está em declínio, a questão das energias renováveis parece

estar bem estabelecida no conjunto de literatura analisada, uma vez que muitas referências ao termo aparecem em todo o mapa temático.

No entanto, como o campo de pesquisa está em formação, os primeiros anos podem ter um padrão significativamente diferente do cenário atual. Portanto, uma análise dos anos mais recentes pode representar um melhor retrato da atual direção do campo de pesquisa. Assim, a Figura 12 mostra um mapa temático apenas do corpo da literatura dos últimos 5 anos da análise, de 2016 a 2020. Dessa forma, ainda assim as palavras-chave como a *Zero-Energy Building* e as energias renováveis são os temas básicos que sustentam todo o campo de pesquisa, porém é mais evidente o que está movendo o campo nos últimos anos. Temas abrangentes, como desenvolvimento sustentável, eficiência energética e *Zero-Energy* não estão apenas centrais, mas também densos, o que indica que esses termos funcionam como força motriz no campo da pesquisa. Além disso, as energias alternativas, especialmente a energia solar e a maioria de seus sinônimos também têm papel importante como temas motores.

Por outro lado, aspectos especializados ou nichados da energia renovável, principalmente relacionados à rede, demonstram que tem se configurado como um tema nichado no campo da pesquisa. Isso está intimamente relacionado com a consolidação da temática de *smart-city*, mais especificamente com a *smart grid*, assunto que tem crescido em relevância. No entanto, aspectos relacionados à viabilidade econômica, ao investimento e à tomada de decisões não são, em sua maioria, densos nem centrais, o que corrobora com a análise já realizada no decorrer deste capítulo. De alguma forma, esses aspectos estão presentes de modo periférico e esparso. Além disso, o mapa temático apresenta um *cluster*

temático que não aparecia anteriormente, a respeito de planejamento urbano, e dessa forma pode ser considerado um tema emergente.

Figura 12 – Mapa temático de 2016 a 2020



Fonte: Autor (2021), adaptado de Bibliometrix / Biblioshiny (Aria; Cuccurullo, 2017)

2.2.6 Extração de dados

Para maior compreensão do corpo da literatura, é realizado um processo de extração de dados que se assemelha ao procedimento de revisão sistemática

da literatura (Gough; Oliver; Thomas, 2012). Esse procedimento é realizado por meio de uma leitura preliminar dos títulos e resumos dos documentos e eventualmente também uma inspeção adicional no restante do documento para sanar qualquer ambiguidade. A análise se fundamenta em quatro categorias principais:

- i. Tipo de pesquisa:** relacionada principalmente ao método de investigação: 1. estudo qualitativo; 2. levantamento com medição *in loco*; 3. avaliação de caso de estudo com modelos e simulação; 4. desenvolvimento de metodologias para avaliação com modelos e simulação; e 5. estudos secundários. Embora algumas pesquisas possam empregar mais de uma das abordagens mencionadas, os meios para alcançar o objetivo final da pesquisa são considerados na definição do tipo de pesquisa.
- ii. Foco de pesquisa:** Refere-se à principal atividade analisada em cada pesquisa, que está relacionada principalmente tanto à oferta ou geração energética (1) quanto à demanda de energia. Para abordar a demanda de energia, utiliza-se a classificação de Amaral e colaboradores sobre os usos finais (Amaral *et al.*, 2018) nos seguintes setores: no edifício (2), setor produtivo (3), transporte (4) e infraestrutura (5). Além disso, aspectos urbanos – morfologia urbana e microclima urbano – podem ter impacto em muitas das categorias de demanda e na resiliência urbana e são avaliados (6). Outros aspectos, especialmente relacionados à IoT, comunicação, *smart grids* e cidades inteligentes também são classificados (7). Cada documento pode ser categorizado em mais de uma categoria.
- iii. Clima do estudo (se houver):** cada estudo também é categorizado de acordo com o clima para a localização do estudo. No caso de mais de um

estudo avaliado no documento, todos os locais são contabilizados. Os tipos de climas empregados são uma simplificação da classificação Köppen, com: 1. frio; 2. temperado; 3. mediterrâneo; 4. tropical; 5. quente e úmido; e 6. quente e seco. Em pesquisas que não há estudo em um contexto climático, ou sem local específico, considera-se “não aplicável” (7).

- iv. Tipo de modelo de análise empregado para a avaliação (somente se aplicado):** para os estudos que utilizaram algum tipo de simulação – estudos de caso ou estudos metodológicos –, o tipo de análise é classificado em: 1. *Energy Management System* (EMS), 2. *Building Performance Simulation* (BPS), 3. Avaliação Tecno-Econômica, 4. Microclima, entre outros. Embora algumas pesquisas possam empregar mais de uma das abordagens mencionadas, os meios para alcançar o objetivo final da pesquisa são considerados na definição do tipo de modelo predominante ou mais relevante.

i. Tipo de pesquisa

O corpo da literatura analisado tem a maioria dos documentos com pesquisas que contemplam a análise de cenários, seja com casos de estudo – empregando simulações ou medições no local – ou com o desenvolvimento de metodologias de avaliação – que empregam o uso de algum caso de estudo para contextualizar –, com três quartos de todos os documentos, como se pode observar no Gráfico 12. Há predominância de pesquisas baseadas em simulação, que inclui, mas não se restringem, ao lado da demanda energética, como BPS – BEM, UBEM, solar, iluminação – e o lado da oferta – que inclui distribuição – relacionados à rede ou geração. Além disso, outros tipos de modelos, relacionados

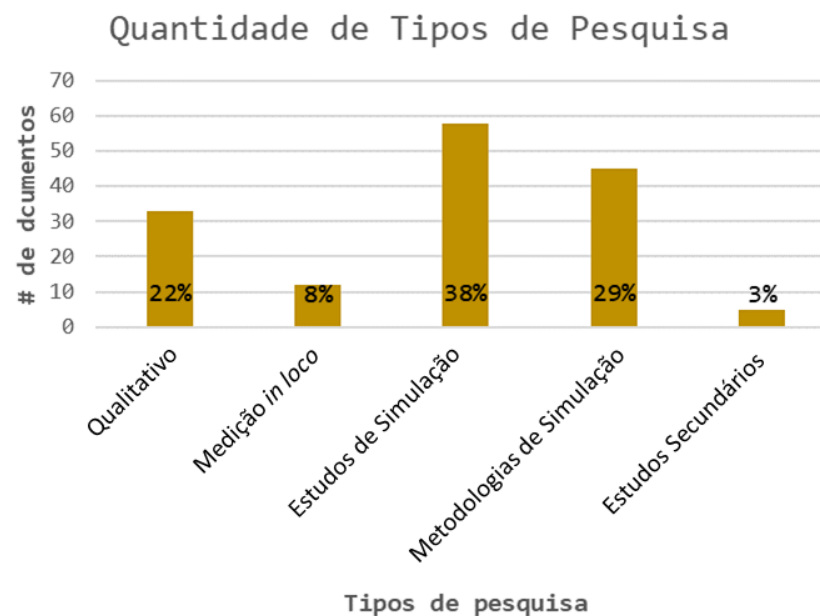
à IoT, transporte, SIG, modelos estatísticos, modelos de tomada de decisão ambiental e tecno-econômica e cálculos analíticos também estão incluídos.

Pesquisas que avaliam dados exclusivamente medidos ocorrem em menor número com apenas 8% dos documentos. Eles estão relacionados principalmente à análise do consumo global de energia e qualidade ambiental dos edifícios (Castagna *et al.*, 2008; Eicker *et al.*, 2011; Guyot *et al.*, 2020; Kerr; Baccei; Hammon, 2007; Kim *et al.*, 2011; Yang *et al.*, 2010), no entanto, aspectos específicos da operação das edificações também são estudados, como sobre comportamento dos usuários a respeito do sombreamento (Verbruggen *et al.*, 2020). Além disso, sistemas de fornecimento de energia, como redes urbanas de aquecimento (Brand *et al.*, 2010; Skriver, 2012), aspectos tecno-econômicos dos sistemas fotovoltaicos (Lu *et al.*, 2019) e aspectos da carga de demanda e oferta energéticas – *load match* –, como resolução temporal desses dados, são outros tópicos investigados (Sørnes *et al.*, 2017).

Há pequena parcela dedicada exclusivamente à pesquisa secundária, correspondente a apenas 3% dos documentos analisados. Esse esforço limitado para consolidar o conhecimento do campo pode auxiliar a explicar as razões de baixo consenso e padronização de terminologia no campo de pesquisa. Algumas revisões são mais específicas no escopo, com ênfase no impacto de uma economia baseada em hidrogênio (Alanne; Cao, 2017) ou o impacto arquitetônico e paisagístico do PV (Scognamiglio; Garde, 2016). Amaral *et al.* (2018), Heendeniya, Sumper e Eicker (2020) e Reiter e Marique (2014) têm o escopo mais amplo, com o objetivo de caracterizar o campo, seus aspectos, limites e consolidar o corpo de pesquisa. Além disso, Koutra e coautores (Koutra *et al.*, 2017, 2018) realizam

revisão sobre ferramentas de análise e Todorović (2012) faz revisão do potencial do BPS a partir da perspectiva de seus trabalhos anteriores.

Gráfico 12 - Tipos de pesquisa empregados



Fonte: Autor (2021).

Além disso, há mais de um quinto dos documentos (22%) que são estudos qualitativos, que não contam com coleta quantitativa de dados. Em muitos casos, são trabalhos de embasamento teórico (Hawkes, 1995; Heckerth; Heckerth, 2005), que ressaltam a importância do tema. Também há documentos que relatam iniciativas ou estudos de caso, como aqueles relacionados a edifícios sustentáveis

e vilas ecológicas (Bakshi; Vale; Vale, 2014; Roberto; Chávez, 2008), ou mesmo competições, como o *Solar Decathlon* (Robichaud, 2006). Outros documentos desta categoria apresentam caso de estudos ou metodologias de avaliação diretamente relacionadas ao ZEB na escala urbana (Castagna *et al.*, 2008; García-Fuentes; de Torre, 2017; Machline; Pearlmutter; Schwartz, 2018; Zhivov *et al.*, 2014). Além disso, alguns documentos também analisam aspectos socioeconômicos, como sobre as disparidades geográfica de disponibilidade de energia (Smith; Gill; Forest, 2008).

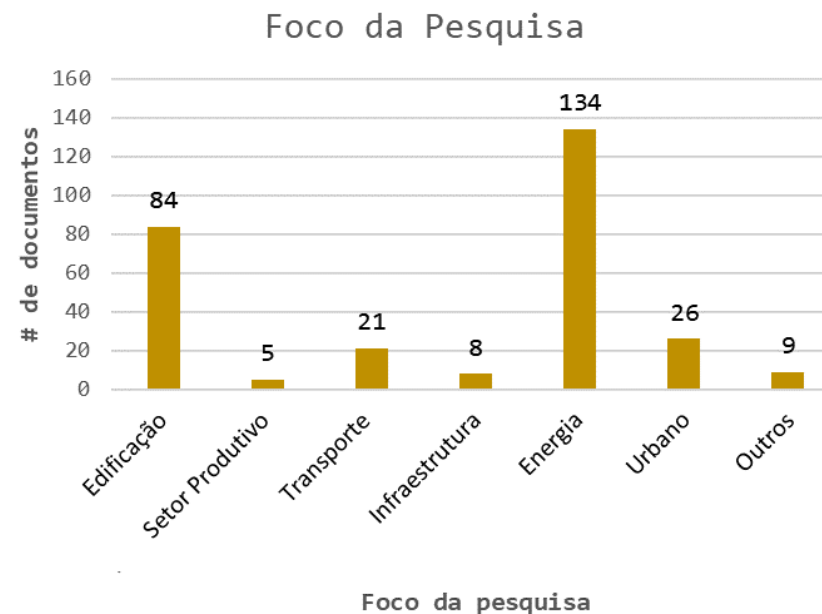
ii. Foco da pesquisa

Os documentos são classificados de acordo com os focos de pesquisa da ZEB na escala urbana, a partir de uma adaptação das categorias globais de Amaral *et al.* (2018), mencionado anteriormente. Cada documento pode ser classificado em mais de uma categoria, de acordo com o escopo da pesquisa.

Entre o corpo da literatura, o foco da pesquisa está no lado da oferta e distribuição de energia, com 134 documentos analisando esse aspecto, conforme apresentado no Gráfico 13. Eles variam de geração de energia renovável (Karunathilake *et al.*, 2019; Liang; Shirsat; Tang, 2020; Rafique; Rehman, 2020; Scognamiglio; Garde, 2016), matriz energética, cogeração e trigerção (Aste *et al.*, 2020; Shareefdeen *et al.*, 2015), armazenamento de energia (Liang; Shirsat; Tang, 2020), incluindo alguns relacionados aos transportes (Alanne; Cao, 2017; Yu *et al.*, 2019), aspectos de distribuição e grade (Ajaei *et al.*, 2019), distribuição de calor, especialmente aquecimento distrital (Tol; Dincer; Svendsen, 2013; Tol; Svendsen, 2012) para correspondência de carga (Doubleday *et al.*, 2019; Gaiser; Stroeve, 2014; Yu *et al.*, 2019), só para mencionar alguns. Algumas pesquisas têm um vasto escopo, apresentando estudos de caso que possuem muitas tecnologias e recursos

(Aste *et al.*, 2020; Li; Fu; Jie, 2009; Marco; Daniele; Roberto, 2016; Zhivov *et al.*, 2014; Zhivov; Case, 2017).

Gráfico 13 – Foco de pesquisa



Fonte: Autor (2021).

Já do lado da demanda energética, destaca-se a análise do consumo de energia dos edifícios, com 84 documentos, mais do que todas as demais categorias combinadas. Geralmente, há maior ênfase em soluções ativas como equipamentos, HVAC, iluminação, aquecimento de água (Eicker *et al.*, 2015; Koutra; Becue; Ioakimidis, 2017; Mertz *et al.*, 2005). A respeito de estratégias

passivas, o foco está no isolamento do envelope (Eicker *et al.*, 2015), enquanto alguns se dedicam à ventilação natural e à iluminação natural (Bucking; Cotton, 2015; Gonzalez *et al.*, 2012; Zhang *et al.*, 2009). Os aspectos comportamentais são estudados de forma limitada dentro dessa categoria (Dalla Rosa; Christensen, 2011). Além disso, ainda há a análise de edifícios únicos ou pelo menos um número limitado de edifícios. No entanto, há alguma abordagem estatística *top-down* que propicia alguma generalização (Coffey *et al.*, 2009) e até mesmo UBEM (Haneef *et al.*, 2020).

Recentemente, aspectos urbanos como forma urbana, vegetação e microclima têm ganhado destaque, embora em menor proporção, com 26 documentos. Desde meados de 2010, alguns documentos avaliam o impacto da forma urbana na geração e consumo de energia, principalmente relacionada à escala de quadras da cidade (Eicker *et al.*, 2015; Marique; Reiter, 2014a; Natanian; Aleksandrowicz; Auer, 2019; Natanian; Auer, 2020), que em parte está relacionada às limitações de processamento computacional. Outros avaliam o microclima urbano em si, em uma abordagem mais holística ao ZEB na escala urbana, que contempla também a qualidade do clima urbano, enquanto outros avaliam o impacto do microclima na qualidade térmica e no consumo de energia dos espaços internos (Castaldo *et al.*, 2018; Kassim; Latip; Fauzi, 2017; Natanian; Auer, 2020).

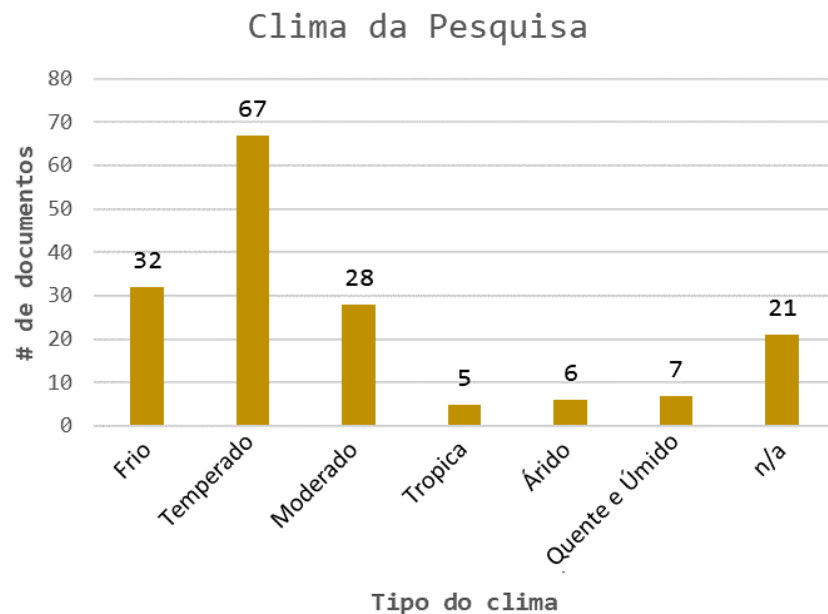
Outros aspectos do lado da demanda energética que fazem parte da concepção de um ZEB na escala urbana – como transporte, infraestrutura, setor produtivo – indústria e agricultura – são estudados em menor escala, com 21, 8 e 5 documentos, respectivamente. Aspectos de infraestrutura – como iluminação pública, água e espaço público, principalmente relacionados à vegetação – são investigados especialmente em sua relação com o consumo energético. No

entanto, existem algumas sinergias que podem ser exploradas, especialmente no uso de resíduos para geração de energia. No mais, os transportes ganharam alguma atenção, especialmente sob a perspectiva de veículos elétricos. Em parte, isso pode ser entendido para integrá-los ao aspecto de fornecimento de energia, uma vez que também pode funcionar como uma bateria. Outros temas também são mencionados, especialmente relacionados à IoT e à comunicação e *smart grid* – relacionados ao conceito de *smart city* –, com 9 documentos.

iii. Clima do caso do estudo

Como apresenta o Gráfico 14, relativo ao clima do local de pesquisa, há uma predominância de climas frios, temperados e mediterrâneo, especialmente em países em desenvolvimento na Europa, América do Norte e Ásia. Além disso, um número significativo de artigos visa mais especificamente análise de sistemas e tecnologias e, portanto, não possuem lugar específico. No geral, estudos em climas mais quentes ainda são a exceção, com apenas 18 documentos, o que representa cerca de 11% de todos os documentos avaliados. Isso pode estar relacionado aos aspectos socioeconômicos dos países em climas tropicais. No entanto, é importante ressaltar que os estudos recentes em tais condições climáticas têm crescido em número, como Natanian e coautores (Natanian; Auer, 2020; Natanian; Aleksandrowicz; Auer, 2019) em Israel, Rafique e coautores (Rafique; Rehman, 2020; Rafique; Rehman; Alhems, 2018) no Paquistão, e Karunathilake e coautores (Acre *et al.*, 2020; Bakhtavar *et al.*, 2020; Karunathilake *et al.*, 2019) no Sri Lanka.

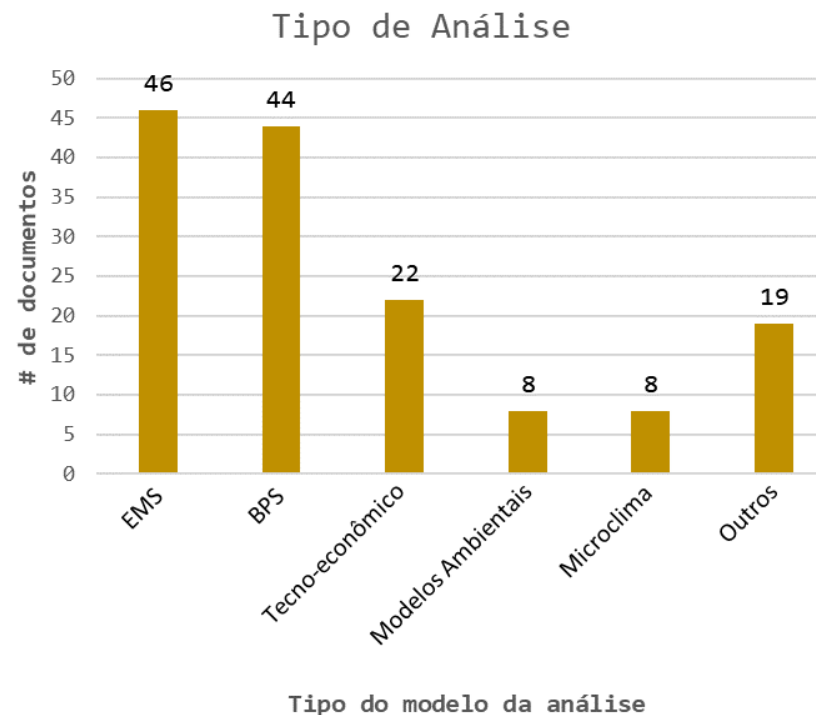
Gráfico 14 - Tipos de climas avaliados



Fonte: Autor (2021).

(ACV), e modelagem do microclima têm destaque ainda menor, com apenas 8 documentos a respeito de cada categoria.

Gráfico 15 - Tipos de modelos empregados



Fonte: Autor (2021).

iv. Tipo de Modelo de Análise

Para o tipo de análise realizada nas pesquisas, conforme apresentado no Gráfico 15, a maioria dos documentos se concentra em análises de *Energy Management System* (EMS) – com 46 documentos –, com foco na rede energética e geração, e em *Building Performance Simulation* (BPS) – com 44 documentos –, principalmente na demanda energética. A análise tecno-econômica, especialmente em termos de viabilidade econômica, é menos comum, com apenas 22 documentos. Modelos de impacto ambiental, como Análise do Ciclo de Vida

2.3 MAIS DO QUE ZEB NA ESCALA URBANA

Apesar da relevância e abrangência atual de ZEB na escala urbana, a temática de desempenho ambiental e energético de conjuntos urbanos é algo explorado por um escopo maior de pesquisas. Nesse sentido, é importante se aprofundar nessas pesquisas correlatas, pois podem agregar visões, estratégias e soluções para pesquisa de ZEB na escala urbana. A seguir são apresentados tópicos relevantes sobre o assunto.

2.3.1 Planejamento urbano solar

O planejamento urbano pautado pelas condicionantes ambientais, e especificamente diretrizes solares, está intrinsecamente relacionado à própria história do planejamento urbano – como mencionado anteriormente neste capítulo, no item 2.1.1 Da arquitetura solar ao *Zero-Energy Building*, na página 16 – e pode ser remetido à antiguidade, leis de direitos solares na Roma antiga ou mesmo as cidades chinesas da antiguidade, 6.000 anos atrás. Contemporaneamente, diversos autores seminais têm indicado relações entre forma urbana e a qualidade ambiental, como Olgyay, Dekey, Littlefair, Sanatmouris, Steemers, Baker, Romero, entre outros (Baker; Steemers, 2016; Dekay, 2012; Littlefair *et al.*, 2000; Olgyay, 1963; Romero, 2013).

No início do século XX, com a intenção de se construir ambientes mais saudáveis, com melhores condições ambientais como ventilação e luz natural, os anseios modernistas culminaram em propostas como a *Ville Radieuse*, de Le Corbusier. Nesse mesmo período, Walter Gropius estudou a relação da distância

e a altura de prédios em fita orientados no eixo Leste-Oeste, formação denominada por ele de *Zielenbau*, e definiu parâmetros angulares que variavam de 17°50' a 30°, a depender da altura das edificações e concluiu que edificações de 8 andares possibilitavam melhor custo-benefício entre qualidade ambiental e ocupação e densidade (Savvides; Vassiliades, 2017).

O direito solar, ou o acesso solar, pode ser compreendido com a disponibilidade contínua de luz do sol em determinada superfície e assim limita a construção de novas edificações ou elementos que possam vir a obstruir esse acesso (Kettles, 2008). Diversos códigos urbanísticos e instrumentos legais atualmente contemplam alguma forma de garantia ao acesso à insolação, ou leis de acesso solar. Basicamente, existem duas abordagens para definir o acesso solar: (i) o método prescritivo, que define um volume máximo de ocupação; ou (ii) o método de desempenho que define requisitos mínimos de insolação ou radiação a serem preservados nas edificações do entorno (Capeluto *et al.*, 2006).

Municipalidades como Londres, Nova Iorque e São Francisco possuem regulamentação para garantir acesso solar para espaços públicos (Fernández; Gentili; Campo, 2022). No início do século passado, a partir de 1906, a Inglaterra já possuía a lei de luz anciã²⁹, que define como direito adquirido o acesso à luz solar após determinado tempo em que a propriedade usufrui da luz solar (Kettles, 2008). Com a crise energética dos anos 1970, aliada à intensa urbanização, há uma intensificação de estudos sobre propostas de acesso a luz solar (Arumi; Dodge, 1977; Grout, 1979; Günel, 2014; McGregor, 1979), especialmente com intuito de

²⁹ Tradução literal de *Ancient Light Law*, em inglês

possibilitar melhor desempenho de coletores solares para aquecimento e geração elétrica com módulos fotovoltaicos.

Nessa época, Ralph Knowles, professor da *University of Southern California* (USC), desenvolveu o envelope solar, modelo geométrico que funciona com um parâmetro urbanístico e define um volume possível de ocupação dentro do lote para controle da exposição solar (Knowles, 1981). Desde então diversas técnicas foram como o Envelope de Diretos Solares (*Solar Rights Envelope*), o Envelope de Recolhimento Solar (*Solar Collection Envelope*) e o Volume Solar (*Solar Volume*).

Há pelo menos duas décadas técnicas computacionais são utilizadas para auxiliar o desenvolvimento do envelope solar. No final da década de 1990, Capeluto e coautores (Capeluto *et al.*, 2006) desenvolveram o programa SustArch, capaz de gerar a geometria do envelope solar. Em um estudo de caso de planejamento urbano de um novo distrito comercial em *Tel Aviv*, os mesmos autores calcularam o envelope solar para preservar os direitos solares das edificações existentes, assim como entre as edificações propostas, além de empregar análise de CFD com o programa FLUENT para avaliar a ventilação e assim preservar os direitos de vento nas edificações existentes no entorno. Em outra pesquisa também em *Tel Aviv*, os mesmos autores realizaram estudo paramétrico de diferentes configurações urbanas com SustArc. Ao avaliarem a orientação, altura das edificações e distâncias entre prédios, concluíram que a orientação das vias nos sentidos Nordeste-Sudoeste e Leste-Oeste possibilitam maior densidade sem comprometer o acesso solar das edificações e do pedestre.

Por se caracterizar com procedimento algorítmico de cálculo de geometria, a técnica de envelope se alinha com os programas de *design*

paramétrico, como o Grasshopper, que tem se popularizado na última década. Atualmente, o *Ladybug Tools*, até o momento somente na sua versão *Legacy*, possui técnicas de cálculo de envelope solar, baseada na técnica de cálculo de Neimasz, Sargent e Reinhart (Niemasz; Sargent; Reinhart, 2013), similar à abordagem de Capeluto e coautores (Capeluto *et al.*, 2006).

Desde então, há uma expansão dos estudos de envelopes solares com auxílio de ferramentas computacionais. De Luca, Dogan e Sepúlveda (De Luca; Dogan; Sepúlveda, 2021) desenvolveram um método de Envelope Solar Reverso (*Reverse Solar Envelope*), que é particularmente eficiente no desenvolvimento de estudos de massas em contextos urbanos densos. O método se mostrou capaz de prover maior área construída com acesso solar por meio de um processo computacional subtrativo de células (De Luca; Dogan; Sepúlveda, 2021).

De fato, a questão da geração de energia renovável tem pautado as iniciativas de planejamento urbano solar, muito em virtude pela demanda pela redução de consumo de combustíveis fósseis, apesar de atuar no lado do suprimento e pouco na demanda. Isso pode ser notado no conceito de cidade solar, nomenclatura e abordagem empregadas especialmente por Byrne e coautores em uma série de publicações (Byrne *et al.*, 2015, 2016, 2017), que almeja o desenvolvimento de uma cidade sustentável – dentro de um paradigma de cidade compacta, densa –, alimentada somente por energia renovável, especialmente geração de energia em coberturas. Entretanto, a avaliação do potencial de geração de energia fotovoltaica na escala da cidade é um campo de investigação amplo que com produção prolífica. Por outro lado, apesar de em número reduzido, investigações a respeito do impacto de estratégias de condicionamento solar passivo dentro de um contexto urbano, como telhados

frios na Austrália são desenvolvidas, especialmente por Santamouris (Santamouris, 2014).

A *International Energy Agency* (IEA) e a *Solar Heating and Cooling* (SHC) têm em curso a *Task 51 – Solar Energy in Urban Planning*, que busca auxiliar os planejadores no desenvolvimento de planos urbanos que incorporem a energia solar. Apesar do maior enfoque nos desafios de incorporação de soluções fotovoltaicas em projetos na escala urbana, o projeto também contempla medidas passivas, relacionadas ao conforto ambiental, especialmente na interface que podem ter com os sistemas ativos, como *Building Integrated Photovoltaics* (BIPV), por exemplo, módulos fotovoltaicos como elementos de sombreamento.

Métodos computacionais generativos também já foram empregados para o desenvolvimento de desenho urbano pautado pela influência solar há pelo menos três décadas. O arquiteto e artista computacional Watanabe (Watanabe, 1995) desenvolve o “*City of The Sun God*”, uma proposta de implantação urbana gerada pela exposição solar. O algoritmo desenvolvido realiza um procedimento subtrativo de um volume de forma a possibilitar todas as fachadas com uma quantidade mínima de insolação. Dessa forma, o arquiteto argumenta que é possível desenvolver uma forma variada rica, com diversidade de arranjos externos, aliada à qualidade ambiental e que quebra a monotonia das propostas tradicionais padronizadas.

Métodos agregativos de composição são vastamente empregados a diversos propósitos em *design* computacional voltado à arquitetura e ao urbanismo. Zandavali (Zandavali, 2019) empregou o procedimento celular autômato para geração da geometria de uma quadra urbana em Porto Alegre, que posteriormente era avaliada pela condição de exposição de insolação da fachada.

Os avanços em inteligência artificial, especialmente nos processos de aprendizagem de máquina, também já são empregados para auxiliar processo de desenvolvimento de arquitetura solar. Ng e coautores (Ng *et al.*, 2022) desenvolveram um *workflow* que emprega avaliação de método agregativo de celular autômato, otimização da radiação com algoritmo evolutivo e aprendizado de máquina com *Generative Adversarial Networks* (GAN) pela exposição da radiação. Mais do que possibilitar a obtenção de um resultado sub-ótimo proveniente da otimização de um único objetivo, o processo de aprendizado de máquina por imagem com GAN possibilita a geração de famílias de soluções para posterior análise humana.

2.3.2 UBEM: ainda um campo em expansão

Urban Building Energy Modeling (UBEM) é um campo crucial dentro da modelagem energética de edifícios que se concentra na previsão do uso de energia e das condições ambientais para grupos de edifícios dentro de um ambiente urbano. Essa abordagem de modelagem abrange várias escalas espaciais, de um quarteirão a uma cidade inteira, permitindo uma avaliação abrangente do desempenho energético em escala urbana. O UBEM integra modelos energéticos de edifícios baseados na física para estimar o uso operacional de energia, as condições ambientais internas e externas e o fluxo de energia entre edifícios para fins de planejamento (Reinhart; Cerezo Davila, 2016).

Além disso, o UBEM desempenha um papel significativo nos processos de planejamento urbano, facilitando a integração de aspectos multidisciplinares relacionados com questões energéticas, contribuindo assim para o desenvolvimento de ambientes urbanos energeticamente eficientes. O uso do UBEM, muitas vezes integrado com Sistemas de Informação Geográfica (SIG),

auxilia na avaliação do comportamento energético do ambiente construído e apoia as políticas energéticas urbanas, fornecendo perfis detalhados de demanda de energia dos edifícios. No geral, o UBEM serve como uma ferramenta poderosa para avaliar o desempenho energético, explorar a segurança energética e orientar a tomada de decisões para desenvolvimentos urbanos mais sustentáveis e resilientes (Ferrari *et al.*, 2021).

Christoph Reinhardt, juntamente com seu grupo de pesquisa no MIT, contribuiu significativamente para o avanço do *Urban Building Energy Modeling* (UBEM). A pesquisa de Reinhardt tem sido fundamental na formação do campo da UBEM, ao se concentrar no desenvolvimento de modelos de energia de construção baseados na física para ambientes urbanos. No início da década passada, ao apresentar o programa desenvolvido a partir das pesquisas em parceria com a empresa Solemma – desenvolvedora dos programas Diva e *ClimateStudio* –, o *Urban Modeling Interface* (UMI), os autores enfatizam que *Urban Building Energy Modeling* (UBEM) é um campo nascente, com grande potencial de crescimento. Uma das grandes vantagens do UMI é que permite a geração semi-automática e a simulação de UBEM com base em conjuntos de dados da cidade, o que possibilita a análise de *retrofit* de edifícios na escala de cidade (Reinhart; Cerezo Davila, 2016).

Em estudo realizado em Boston, empregou-se o UMI para estimar a demanda de energia de toda a cidade – 83.541 edifícios – a partir de conjunto de dados SIG fornecido pela administração local. Para caracterização das edificações, empregou-se um esquema de arquétipos construtivos, a partir de edificações de referências representativas. Ao todo, empregaram-se 52 arquétipos de características construtivas e de usos. Apesar de ser um estudo específico, o artigo tem perfil de apresentação metodológica e os resultados indicam melhorias com

maior impacto no consumo de energia, assim como no potencial de geração energética (Cerezo Davila; Reinhart; Bemis, 2016).

Mais recentemente, o grupo de pesquisa desenvolveu uma solução em nuvem para UBEM que assim não demanda instalação nem potência computacional pelo usuário, a UBEM.io. Dessa forma, visa facilitar o acesso a ferramentas de UBEM, algo essencial para os gestores e planejadores urbanos avaliarem padrões de consumo de energia, priorizarem medidas de conservação de energia e projetarem estratégias de desenvolvimento urbano sustentável (Ang *et al.*, 2022).

O programa *City Energy Analyst* (CEA), desenvolvido na *ETH Zurich*, é outra ferramenta para análise do desempenho energético do parque construído. De forma semelhante ao UMI, é projetada como uma plataforma de simulação de conjuntos urbanos com baixa pegada de carbono e alta eficiência e possui integração com SIG. O programa permite a análise e otimização de sistemas de energia de edifícios em bairros e distritos urbanos, fornecendo um *framework* abrangente para modelagem de energia em escala urbana. O CEA tem sido utilizado para diversos propósitos, que inclui a determinação da variabilidade espaço temporal dos serviços energéticos em ambientes urbanos, a realização de simulações energéticas de distritos urbanos e a avaliação do impacto de medidas de eficiência energética em ambientes urbanos (Shi; Fonseca; Schlueter, 2017).

Dentro dos conjuntos de ferramentas do *Ladybug Tools* destaca-se o grupo específicos para análise de *Urban Building Energy Modeling* (UBEM), o *Dragonfly*, que permite utilizar os recursos do programa *URBANOpt* desenvolvido pelo *Department of Energy* (DOE) dos Estados Unidos (Charan *et al.*, 2021; Kontar *et al.*, 2020). Uma de suas grandes vantagens é a integração à interface de

programação visual do programa *Rhinoceros3D*, o *Grasshopper*, que assim permite o desenvolvimento de *design* paramétrico – e consequente automação de processos – e a interoperabilidade com outros diversos recursos, como algoritmos de busca para otimização e mesmo os recursos das demais ferramentas do *Ladybug Tools*.

2.3.3 Morfologia urbana e energia

A morfologia urbana influencia significativamente a eficiência energética das edificações e consequentemente das cidades. Pesquisas têm demonstrado que fatores como densidade, layout das ruas e padrões de uso do solo desempenham um papel crucial no impacto do consumo de energia. Estudos têm enfatizado a importância de considerar a morfologia urbana em vários aspectos, desde a capacidade de geração de energia fotovoltaica integrada a edifícios – *Building Integrated Photovoltaics* (BIPV) – à demanda de energia e regulação do microclima.

A relação da morfologia urbana e a geração de energia renovável, especialmente energia solar, têm se destacado, o que demonstra a necessidade de incorporar características morfológicas no planejamento energético e no projeto urbano. Um exemplo dessa questão é estudo realizado por Freitas e coautores (Freitas *et al.*, 2020), que foca na utilização de ferramentas de *design* paramétrico, especificamente os a tríade *Rhinoceros3D*, *Grasshopper* e *Ladybug* para modelar e avaliar *Building Integrated Photovoltaics* (BIPV) no setor comercial de Brasília. A pesquisa destaca a eficácia do uso de ferramentas de *design* paramétrico para

otimizar o projeto de envelopes BIPV, além do grande potencial de integração de módulos fotovoltaicos nas fachadas das edificações estudadas.

No entanto, a investigação sobre a relação entre a forma urbana e a demanda energética remonta, pelo menos, à década de 1960. Em “*Design with Climate*”, Olgyay (Olgyay, 1963) já realiza uma compilação sobre o impacto da orientação para diferentes tipologias de plantas em relação à exposição à radiação direta. Nessa passagem, o autor indica a preferência por plantas alongadas no sentido Leste-Oeste – com maiores fachadas expostas às orientações Norte e Sul. Adicionalmente, há questionamentos importantes sobre o impacto do layout interno em relação a implantação e orientação. Olgyay indica que em plantas com unidades em lados opostos³⁰ edificação alongadas no sentido Leste-Oeste não são os cenários mais recomendados, já que algumas unidades ficam prejudicadas em relação ao acesso à insolação. Nesse sentido, ele demonstra por meio de cálculos que para a cidade de Nova Iorque uma orientação com o eixo da edificação mais próxima ao Noroeste-Sudeste seria mais recomendada.

Mais recentemente novos meios de análise, especialmente com os avanços de técnicas computacionais, possibilitaram uma nova abordagem sobre o tema de eficiência energética da forma urbana. Ratti, Baker e Steemers (Ratti; Baker; Steemers, 2005) investigam a relação entre a textura urbana e o consumo de energia em ambientes urbanos por meio de metodologia própria, denominada *Digital Elevation Models* (DEM). Os resultados da pesquisa apontam que duas características da forma urbanas, a distância entre fachadas e a relação superfície-

³⁰ Com unidades de gaveta, com aberturas em somente uma fachada ao invés de unidades vazadas ou de canto.

volume urbana, são fatores cruciais na determinação dos padrões de consumo de energia.

A pesquisa realizada por Martins e coautores (Martins *et al.*, 2016; Martins; Bittencourt; Krause, 2012; Martins; Bonhomme; Adolphe, 2013) representa um marco importante, especialmente para o contexto brasileiro, inclusive com distinções, como o Prêmio CAPES de Tese. A pesquisa tem enfoque na realização da análise de sensibilidade auxiliada por processo de otimização dos fatores morfológicos urbanos em relação à irradiação solar nas envoltórias de edifícios no contexto tropical brasileiro, especificamente Maceió, capital de Alagoas. A pesquisa emprega *design* paramétrico com a interface de programação visual *Grasshopper*, que permite variação morfológica e o *plug-in Ladybug* para realização dos estudos de radiação. As principais conclusões da vasta pesquisa destacam o impacto significativo da forma urbana na exposição solar e no desempenho energético de edifícios, especialmente altura das edificações, orientação das fachadas e distanciamento entre as edificações.

Com abordagem semelhante, a pesquisa conduzida por Birck e Amorim (Birck; Amorim, 2020) tem enfoque nas condicionantes solares como princípio orientador para a forma urbana, com um estudo de caso contextualizado no Distrito Federal. O método utilizado inclui a classificação de formas urbanas no ArcGIS, definição e cálculo do desempenho solar para 67 cenários com uso do DIVA e *Grasshopper*. A análise tem como indicadores principais a análise de iluminância e irradiância para otimizar formas urbanas. A pesquisa destaca o papel fundamental das condicionantes solares na moldagem da forma urbana e enfatiza a importância da integração de princípios solares no desenho urbano para aprimorar a eficiência energética e a sustentabilidade no Distrito Federal. O estudo

aponta a dificuldade de obter níveis de iluminância satisfatórios especialmente em lotes com dimensões reduzidas em ambientes urbanos densos. Adicionalmente, sugere uma melhor integração entre desenho de lotes e parâmetros urbanísticos como taxa de ocupação e número de pavimentos.

Já a pesquisa de Santana e coautores (Santana *et al.*, 2019) aborda a influência da geometria de edifícios – especificamente unidades habitacionais de interesse social isoladas no lote – no desempenho térmico de acordo com o programa brasileiro de etiquetagem. O estudo tem como objetivo avaliar como diferentes geometrias de edifícios impactam na eficiência térmica, de acordo com os parâmetros do RTQ-R. Por meio de simulação termoenergética avalia-se parâmetro de Graus-Hora para Resfriamento, com especial atenção ao Fator Forma da edificação. O estudo indica o impacto significativo da altura do pé-direito no desempenho térmico das edificações, assim como o volume e área das unidades que apresentaram melhorias de desempenho especialmente nos períodos mais críticos, no verão.

2.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

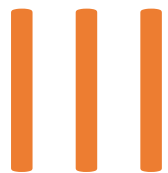
O estudo de ZEB na escala urbana não é um campo de pesquisa nascente, como colocaram Reinhart e Cerezo Davila há quase uma década a respeito de UBEM (Reinhart; Cerezo Davila, 2016), mas um campo de pesquisa em formação, consolidação e amadurecimento. Dessa forma, ainda há necessidade de alinhamentos teóricos e melhor definição de terminologia, além de procedimentos metodológicos, porém, a literatura disponível tanto no assunto em si, como de áreas correlatas apresenta um futuro promissor.

De fato, diversas iniciativas têm ocorrido no intuito de equacionar as questões da crise ambiental provenientes da relação desequilibrada entre atividades humanas e natureza, em que a energia possui papel central. A busca por maior eficiência energética, especialmente de um campo de significativa demanda energética como o ambiente construído, mostra que os avanços no desenvolvimento *Zero-Energy Buildings* (ZEB) é passo fundamental nessa direção. Apesar de apresentar menor produção do que em países desenvolvidos com climas frios e temperados, os avanços em estudos de ZEB em países em desenvolvimento, com contextos socioeconômicos e climáticos – predominantemente tropical – distintos, são significativos e indicam um cenário de maior ênfase em estratégias passivas. Adicionalmente, uma visão de abordagem de *design* regenerativo agrega questionamentos sobre a exclusividade de análises pautadas pela eficiência energética, com a necessidade de contemplar conforto e bem-estar, que assim demandam abordagens mais abrangentes e holísticas, o que inclui outros tipos de indicadores ou métricas de análise, como também escopos espaciais que incluam o ambiente urbano.

A análise bibliométrica do tema de *Zero-Energy Buildings* (ZEB) na escala urbana destaca que é um campo de pesquisa em consolidação e amadurecimento, com diversas abordagens metodológicas e terminológicas. A fragmentação é notável, com muitos documentos sem referências compartilhadas e a maioria dos autores com no máximo 2 documentos. No entanto, o tema tem ganhado relevância, com um aumento significativo na publicação, especialmente em revistas acadêmicas. A evolução temática revela uma mudança de foco ao longo do tempo, de uma abordagem ampla nos anos 2000 para uma concentração em sistemas de energia renovável e redes urbanas de aquecimento desde os anos 2010, impulsionados pela necessidade de uma matriz energética diversificada e

pelo advento da IoT e das *Smart Cities*. Embora a pesquisa ainda seja predominantemente conduzida em países desenvolvidos, há também iniciativas em países periféricos.

Outro ponto de destaque do tema de *Zero-Energy Buildings* (ZEB) na escala urbana é a aderência às questões de projeto urbanístico e desenho urbano, bastante relevantes ao campo da arquitetura e urbanismo. Diversas pesquisas, desde meados da década passada, têm esse enfoque, com destaque para as pesquisadoras belgas Reiter e Marique, assim como Natanian e coautores que trabalham num contexto climático mediterrâneo, de Israel. Apesar de possuírem escalas bastante variáveis, desde estudos de quadras urbanas até a escala da cidade, e métodos também diversos, com diferentes técnicas de análise, métricas de avaliação e parâmetros de projeto, os estudos desse subtema possuem uma visão mais alinhada à concepção de projeto existente no campo da arquitetura e urbanismo. Por fim, ao se observar áreas correlatas de planejamento urbano com eficiência energética, ferramentas computacionais para simulação de conjuntos urbanos e estudo da forma urbana e eficiência energética pode-se notar o potencial de crescimento do campo de pesquisa.



MATERIAIS E MÉTODOS

O presente capítulo de Materiais e Métodos apresenta as atividades e recursos empregados para analisar o potencial de obtenção de *Zero-Energy Building* na escala urbana de diferentes tipologias de quadra urbana com uso exclusivamente residencial em clima tropical de altitude, especificamente no contexto climático de Brasília. Para este fim, realiza-se uma pesquisa de natureza quantitativa e abordagem de coleta de dados com emprego de simulação computacional. Adicionalmente, este capítulo também busca embasar as decisões metodológicas e explicar conceitos gerais pertinentes a execução da atividade de pesquisa. Desta forma, o capítulo está estruturado a partir das 4 principais categorias de estudo metodológico:

- i. **Metodologia:** seção que trata do estudo do método e aborda conteúdos que embasam as atividades práticas de pesquisa, e

assim, apresentam-se o panorama de técnicas de *design* computacional, o estudo de tipologias de quadra e o processo de *benchmark* dos algoritmos de busca;

- ii. **Método:** seção que corresponde ao método em si, que apresenta um panorama geral da organização da pesquisa e suas etapas;
- iii. **Materiais:** seção que apresenta os recursos empregados na realização da pesquisa, voltada especificamente aos programas e *plug-ins* utilizados no processo de *design* computacional;
- iv. **Procedimentos:** seção que detalha as atividades de pesquisa, que corresponde a caracterização dos modelos paramétricos das tipologias de quadras, caracterização das simulações de desempenho e processo de otimização e cálculo dos indicadores, além dos procedimentos de tratamento e análise dos dados.

3.1 METODOLOGIA

A metodologia visa propiciar fundamentação para os aspectos práticos de desenvolvimento da pesquisa, os materiais, métodos e procedimentos. Neste sentido, a presente seção de metodologia apresenta três itens que auxiliam a fundamentar o desenvolvimento do método de pesquisa:

- i. **Design computacional,** que apresenta um panorama dos elementos que fundamentam o tripé de *design* computacional: *design* paramétrico, simulação computacional e otimização;

- ii. **Tipologias de quadras urbanas**, estudo que visa caracterizar as tipologias de quadras urbanas, com ênfase em estudos de desempenho ambiental ou voltados à eficiência energética;
- iii. **Benchmarking dos algoritmos de otimização**, que apresenta um estudo comparativo entre diferentes algoritmos de busca para definição do método empregado na pesquisa.

3.1.1 Design computacional

O projeto arquitetônico auxiliado por computador é uma área de pesquisa em rápido desenvolvimento e os resultados de recentes esforços de pesquisa e desenvolvimento estão agora começando a encontrar uma aplicação prática generalizada. No entanto, o campo frequentemente apresenta o aparecimento de uma mistura confusa de conceitos teóricos desconectados e projetos *ad hoc* de implementação de sistemas (...) se o objetivo é obter algo ainda inexistente, como a prova de um teorema ou o projeto de um edifício, (...) podemos construir um sistema generativo que pode então ser operado para produzir uma variedade de soluções potenciais (Mitchell, 1975, pag. 127-128).

Dada toda repercussão em torno do *Design* Paramétrico, Computacional e Generativo e suas definições ainda muitas vezes vaga, a passagem poderia facilmente ser considerada recente. Entretanto, as palavras de Mitchell (1975) de quase meio século evidenciam a dificuldade na compreensão do tema. Em seu artigo seminal, Mitchell (1975) explora as relações da disciplina de soluções de problemas com a tarefa de projeto, e a define como um problema perverso ou complexo³¹, por se tratar de um tipo de problema com difícil formulação, com

complexos sistemas, múltiplos objetivos e de difícil mensuração. Essa perspectiva está atrelada ao processo de projeto, um processo criativo, que por essência possui um caráter generativo, de desenvolver algo que ainda não existe. E de fato, como aponta Mitchell (1975), esta discussão em torno de sistemas generativos precede inclusive o desenvolvimento de ferramentas computacionais e é tão antiga quanto o próprio processo criativo, como, oportunamente, demonstra a reflexão de Aristóteles acerca da constituição da cidade em seu tratado “Política”.

Esta busca por ferramentas capazes de explorar soluções ainda desconhecidas permeia toda a história humana e em sua essência está vinculada ao processo criativo, de exploração do universo de soluções e a forma de realizar esta exploração. Para esse fim, entende-se o *Design* Generativo como uma abordagem baseada em regras ou algoritmos³² (Agkathidis, 2015). Desta forma, este processo de desenvolvimento de projeto pode ser interpretado como relacional (Asanowicz, 2017; Cantrell; Mekies, 2018; Tedeschi, 2014), associativo (Tedeschi, 2014) ou procedural (Stasiuk, 2018). Assim, o projetista desenvolve a lógica interna de construção, operação, funcionamento capaz de gerar o objeto de forma explícita. Isso representa uma mudança de paradigma, como define Kolarevic (Kolarevic, 2003), pois o processo de projeto deixa de ser um desenvolvimento de uma forma – *form-making* – e passa a ter uma maior ênfase em encontrar uma solução formal no universo de soluções projetuais possíveis – *form-finding*.

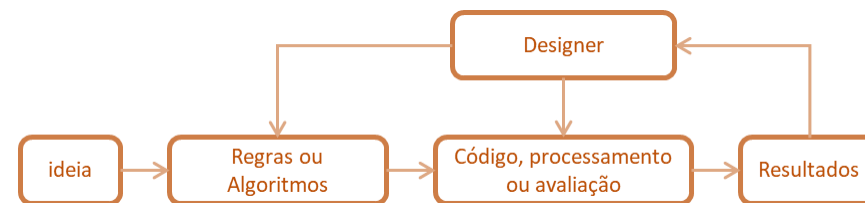
³¹ No inglês, *wicked problem*.

³² Um conjunto de instruções claras e não ambíguas para realização de tarefas.

Soddu (Soddu, 1994) caracteriza o processo de projeto como morfogênico³³, em que algoritmos podem ser processados para geração de resultados a serem avaliados em um sistema não linear, algo semelhante aos processos evolutivos encontrados na natureza. Assim o processo generativo de projeto é uma atividade cíclica e iterativa. Este processo inicia com a identificação de um problema e a concepção de uma ideia abstrata, que é formalizada em regras e algoritmos. Essas regras são então traduzidas em código-fonte para gerar resultados que podem ser avaliados pelo projetista, o que assim reinicia o ciclo.

Essa perspectiva de processo cíclico de projeto (Figura 13) concebida por Bohnacker e coautores (Bohnacker *et al.*, 2012) evidencia o potencial que ferramentas computacionais possuem no processo de desenvolvimento de projeto e tomada de decisão, além da automação e gestão. Esse processo de projeto se assemelha com a formulação itinerante de Lawson (Lawson, 1980) composto por problema, análise, síntese e avaliação, que reinicia o ciclo. Este processo está mais fundamentado no processo de *design thinking* e concepção e resolução de problemas, ao invés do paradigma modernista em que o arquiteto possui dons criativos únicos, como no mito do gênio solitário.

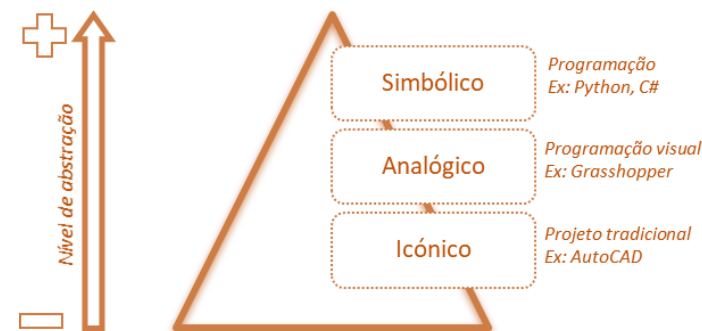
Figura 13 – Processo de desenvolvimento de *design generativo*



Fonte: adaptado de Bohnacker *et al.* (2012)

Pode-se perceber este processo na própria natureza das ferramentas computacionais de projeto. Mitchell (Mitchell, 1975) aponta três níveis de abstração na geração de projeto: icônico, analógico e simbólico, como mostra a Figura 14.

Figura 14 – Hierarquia dos níveis de abstração empregados nos modelos computacionais



Fonte: Autor, adaptado de Celani e Vaz (2011)

³³ Do grego, relativo à forma e a gênese, ao nascimento ou à concepção. Nesse sentido trata-se do nascimento da forma.

No nível mais baixo de abstração, os modelos icônicos são caracterizados pela representação do objeto a ser construído, como no processo de representação de projeto tradicional, com planos verticais e horizontais – planta, corte e fachada – e uso de modelos reduzidos. Nesse tipo de modelo, a representação possui caráter estático, em que o modelo é somente a representação do objeto projetado. No uso inicial das ferramentas computacionais na prática de projeto, como no uso do AutoCAD e ferramentas de modelagem 3D, o paradigma icônico se mantém mesmo nos meios digitais, o que pode ser caracterizado como um esquemorfismo³⁴, como aponta Celani e Vaz (Celani; Vaz, 2011).

Já o nível analógico representa um estágio intermediário de abstração em que os modelos desenvolvidos representam propriedades ou características do objeto projetado e por meio de representações de controles. Neste caso existem relações dinâmicas entre as partes e assim a alteração dos controles interfere no objeto projetado. Um exemplo desse tipo de solução é o empregado de modelos invertidos de catenárias com barbantes e sacos de areia de Antoni Gaudí, que representam os esforços das estruturas. Apesar de não haver menção explícita por Mitchell (Mitchell, 1975), os diagramas, ou definições lógicas de ferramentas de Programação Visual, como o *Grasshopper*, podem ser caracterizados como ferramentas analógicas, como apontam Celani e Vaz (Celani; Vaz, 2011).

Por fim, os modelos simbólicos possuem um alto nível de abstração e são caracterizados por palavras, números, operações matemáticas e possuem fundamentação lógica. No campo do desenvolvimento de projeto, ferramentas de

programação para desenvolvimento de programas e scripts são um exemplo de uso direto de modelos simbólicos (Celani; Vaz, 2011).

Kolarevic (Kolarevic, 2003) associa essas mudanças no desenvolvimento de projeto, de uma visão mais representativa dos planos construtivos., para uma visão mais abstrata, fundamentada nos aspectos geradores e constituintes de projeto a mudanças estruturais na sociedade, especificamente da passagem da modernidade para a pós-modernidade. Ele enfatiza a transição do padrão de universalidade e singularidade, reconhecido no ser humano médio ideal da era da máquina e da fábrica, para uma visão mais centrada na diversidade e multiplicidade da era digital. Isso implica uma mudança da produção em massa de produtos padronizados para uma produção flexível e customizada de serviços e produtos.

Existem diversas perspectivas para classificar as características do *design* generativo. Oxman e Oxman (Oxman; Oxman, 2013) compreendem seis modelos dominantes no processo de geração de forma de acordo com seu elemento gerador: matemático, tectônico, material, natural, fabril e performativo. Já segundo Celani e Vaz (Celani; Vaz, 2011), as mais importantes estratégias do projeto generativo são as combinações, as substituições, a parametrização, as restrições de contexto, a aleatoriedade, a emergência, a otimização e a combinação de duas ou mais delas.

Entretanto, alguns autores, como Stasiuk (Stasiuk, 2018), criticam o uso de forma abrangente e flexibilizada do termo *design* generativo. Ele aponta que o conceito é bem definido em outras áreas do conhecimento e não deve ser aplicado

precisariam das características ou ornamentos de seus antecessores.

³⁴ Referente a produtos ou objetos que mantem características ou ornamentos de seus antecessores mesmo quando são desenvolvidos com novas técnicas ou tecnologias e não necessariamente

a qualquer processo de *form-finding*. Ele indica três níveis de processos de projeto procedural: paramétrico, computacional e generativo. O *design* paramétrico corresponde ao processo de construção de projeto relacional mais básico, em que o projetista é responsável pela alteração dos parâmetros e da exploração das soluções de projeto. Já o *design* computacional – que difere do processo computadorizado – corresponde a um processo paramétrico em que o computador tem autonomia de explorar o universo de soluções, entretanto dentro dos limites estabelecidos pelo projetista no modelo paramétrico. Por fim, o *design* generativo engloba todos os processos anteriores, porém o sistema computacional tem autonomia inclusive de expandir e definir o universo de soluções. Nesse sentido, ele é capaz de redefinir e alterar o próprio modelo paramétrico.

No atual contexto, com a popularização das ferramentas de programação visual, especialmente do *Grasshopper*, a combinação do tripé *design* paramétrico, simulação computacional e otimização tem se destacado no campo do *design* computacional (Figura 15). Nessa combinação, as ferramentas paramétricas possibilitam a definição das regras ou algoritmos que permitem a exploração do universo de soluções de projeto. Já as simulações computacionais proporcionam a análise de indicadores de desempenho das soluções investigadas. E por sua vez, o algoritmo de otimização permite inspecionar o universo de soluções em busca de resultados que melhor atendam aos indicadores de desempenho.

Figura 15 – Ilustração dos pilares do *Design* Computacional



Fonte: Autor, ícones de *Freepik* (2023)

iii. *Design* paramétrico

O *design* paramétrico é uma das peças fundamentais da mudança de paradigma projetual do *design* computacional mencionada anteriormente. De forma objetiva, no *design* paramétrico, ao invés de se projetar o objeto em si, como no modelo tradicional icônico, o foco recai na exploração explícita da lógica relacional entre as propriedades, atributos e dimensões do objeto a ser projetado (Barrios, 2005). Davis (Davis, 2013, p. 31) define *design* paramétrico como "um conjunto de equações que expressam informações sobre a implantação de um sistema de informações arquitetônicas, como funções explícitas de uma série de parâmetros".

A etimologia do termo paramétrico, como aponta Jabi (Jabi, 2013), provém do grego *para* que denota ao lado, antes, ao invés, e *metron* que significa a medida. Dessa forma, paramétrico corresponde a algo que está ao lado ou explica a medida – ou atributo –, mas não é a medida em si. Nesse sentido, esse processo de desenvolvimento de projeto pode ser entendido como relacional

(Asanowicz, 2017; Cantrell; Mekies, 2018; Tedeschi, 2014), associativo (Tedeschi, 2014) ou procedural (Stasiuk, 2018).

O termo paramétrico em relação ao *design* ou projeto foi apropriado³⁵ pelo arquiteto italiano Luigi Moretti em 1939, em seu estudo intitulado "As Relações entre as Dimensões Dependentes de Vários Parâmetros", como apresenta (Tedeschi, 2014). A partir de seus estudos, Moretti desenvolveu diversos protótipos de estádios e arenas em que as formas possuíam relação diretas com os parâmetros dos ângulos de visão dos espectadores e questões de viabilidade financeira (Tedeschi, 2014).

Contudo, historicamente, o uso de práticas relacionais para o desenvolvimento de projeto pode ser traçado até Vitruvío. Em seu tratado *De Architectura*, não se conhecem hoje as gravuras que devem ter compostos os dez livros, contudo, como disserta Cache (Cache, 2009), ao analisar com maior profundidade o décimo livro sobre maquinário de guerra, atividade que Vitruvío provavelmente mais se dedicou na carreira, evidencia-se uma forma de projetar relacional, baseada em módulos e equações paramétricas que definem os atributos dos objetos.

Contudo, tradicionalmente o processo de projeto por meio de desenho se baseia em um processo aditivo, em que signos são colocados camada a camada em um desenho, seja ela em uma folha de papel ou em uma interface digital. Nesse tipo de abordagem, o processo criativo de concepção do projeto e o elemento projeto – os desenhos - estão desassociados. Isso acarreta inclusive na não necessidade de contemplar parâmetros essenciais na definição de projeto, como

aspectos físicos, como na máxima do *atelier*: o papel aceita tudo. Neste processo icônico de projetar, não há como garantir, auditar ou reproduzir este processo de criação ao analisar o projeto – no sentido de representação, desenho ou modelo. Não há como garantir a consistência entre o meio projetual – a representação – e o processo projetual. A garantia da qualidade do processo criativo, do atendimento aos requisitos físicos, legais, funcionais, entre outros ocorre exclusivamente na confiança na figura do projetista e não no seu trabalho (Tedeschi, 2014).

Por outro lado, o processo de projeto paramétrico se fundamenta na lógica relacional, associativa ou procedural entre as partes. Mais do que um objeto, ou uma representação gráfica, o projeto é a representação explícita da lógica que possibilita a geração desse objeto. Nesse sentido a representação, seja um modelo ou desenho, possui associação com as “estruturas de conhecimento, informações, propriedades de desempenho e procedimentos automáticos que podem ajudar o projetista a construir cenários rápidos durante o projeto” (Andia; Spiegelhalter, 2015, p. 21). É essa natureza associativa entre propriedades a atributos que possibilita a maior – e mais sistemática – exploração do universo de soluções projetuais e o processo de encontro da forma – ou *form-making*. Assim, cria-se um processo interativo entre a forma, elementos que a constitui e os indicadores de desempenho como “estrutura do edifício, eficiência energética, exposição solar, localização, acústica ou aerodinâmica” (Asanowicz, 2017), ou como coloca Barrios (Barrios, 2005), “modelos inteligentes capazes de interagir e responder às variáveis locais e globais impostas pelo ambiente e pelo projetista”.

Modelos paramétrica e algoritmicamente construídos podem reagir com alta fidelidade (...) quando submetidos não apenas às mudanças de parâmetros geométricos, mas

³⁵ No sentido que já era um termo empregado em outras áreas como a matemática.

também às forças estruturais, comportamento material e variações térmicas e de iluminação, bem como condições contextuais. Por representarem com precisão a lógica de construção interna da estrutura em questão, os modelos paramétricos também podem ser desdobrados ou traduzidos em geometrias que podem ser fabricadas digitalmente. Este poderoso fluxo de trabalho digital de forma paramétrica que é influenciado pelas intenções de projeto, bem como análise de desempenho e lógica de fabricação digital, é uma das características definidoras da prática arquitetônica digital atual (Jabi, 2013, p. 9)

Como aponta Jabi (Jabi, 2013) na passagem acima, o emprego desse processo de projeto paramétrico no contexto atual está estritamente vinculado a popularização das ferramentas computacionais, que tem possibilitado um maior emprego desta lógica associativa ou relacional no desenvolvimento de projeto, exatamente pela sua natureza lógica e grande capacidade de armazenamento e processamento de dados. Além disso, o ambiente digital possibilita a automação de processos que são flexíveis e facilmente se adaptam a mudança contextual. Inclusive, isso já pôde ser visto desde a primeira ferramenta CAD (*Computer Aided-Design*), o *Sketchpad*, de Ivan Sutherland, em 1963, em que a representação se adaptava às mudanças de contexto (Woodbury, 2010). Essa capacidade seria mais tarde base para os programas CAD futuros, como no próprio AutoCAD, que possuem a possibilidade de implementação de lógicas associativas, apesar de serem usados quase que exclusivamente como uma representação do processo de desenho na prancheta só que em ambiente virtual (Tedeschi, 2014).

Assim, o processo de projeto paramétrico se assemelha ao desenvolvimento de *software*, ao desenvolvimento algorítmico, num conjunto explícito de instruções para a solução de um problema. Essa proximidade entre o processo de projeto e a construção algorítmica, ou de desenvolvimento de *software* pode levar a considerações importantes. Schumacher (Schumacher,

2009) aponta quatro temas fundamentais do *design* paramétrico: versionamento, iteração, customização em massa e diferenciação contínua.

Versionamento refere-se à capacidade de geração de diversas versões de um objeto – ou projeto – por meio de alteração em diversos parâmetros – atributos, variáveis de projeto, indicadores de desempenho, entre outros. Nesse sentido, o objeto não é mais um elemento estático, pronto e acabado, mas um produto dinâmico, múltiplo, proveniente das relações existentes, o que permite adaptação ao seu contexto.

Semelhantemente, a **iteração** se relaciona ao processo de repetição de passos cíclicos, o que está relacionado a variação de objeto como um todo, ou a suas partes. Isso possibilita a automatização de processos repetitivos, como também para geração de versões que possibilitam a exploração do universo de soluções projetuais, especialmente com o uso de métodos de otimização.

Já a **customização em massa** está vinculada a mudança de paradigma de produção na quarta revolução industrial, em contraposição a padronização em massa. Em virtude do emprego de tecnologias de fabricação e *design* digital, a diferença entre desenvolver e produzir inúmeras peças iguais ou diferentes se torna irrisória.

Por fim, a **diferenciação contínua** é um termo proveniente da disciplina do cálculo matemático e que permeia os três temas anteriores. Nesse sentido, o *design* paramétrico não deve se pautar na diferenciação pela diferenciação aleatória e sem critério. Entre uma versão e outra há a necessidade de haver uma continuidade, aspecto essencial para haver uma coesão de conjunto, assim como para sistematizar a exploração do universo de soluções projetuais.

Para possibilitar uma melhor exploração do universo de soluções projetuais de forma mais rigorosa e sistemática, Jabi (Jabi, 2013) especifica quatro características básicas do *design* paramétrico que a maioria dos sistemas paramétricos possuem em comum: orientação a objeto, classes ou famílias, métodos e parâmetros.

Sistema de *design* paramétrico se organizam por meio de **programação orientada** a objeto, que é um paradigma que se fundamenta na capacidade de objetos – no sentido computacional – serem capazes de armazenar algum tipo de informação em um banco de dados. Todo objeto possui valores que definem atributos deste objeto. Jabi usa como exemplo o objeto círculo, que pode possuir raio e centro como atributos, que necessitam possuir valores específicos para que sejam representados. A capacidade dos valores de serem definidos por constantes ou funções é um dos pilares que possibilita o potencial de variação de alternativas de soluções projetuais assim como a flexibilidade do sistema de se adequar a novos contextos (Jabi, 2013).

Para facilitar a organização desses objetos, eles habitualmente são classificados em **classes ou famílias**. Essa abordagem possibilita aos objetos herdarem, ou compartilharem, certos atributos, o que facilita a alteração de um conjunto de objetos (Jabi, 2013).

Por sua vez, os **métodos** são as funções ou algoritmos, ou de forma mais simples, a estratégia, utilizada para modificar um objeto. Na abordagem orientadas a objeto, o método utilizado para sua definição é encapsulado no próprio objeto, o que significa que o método faz parte do objeto em si. No caso do círculo mencionado anteriormente, o método consiste na definição do centro e raio (Jabi, 2013).

Por fim, não seria possível abordar *design* paramétrico sem seu elemento mais representativo, o **parâmetro**. Como explica Jabi, no campo do *design* paramétrico, um parâmetro é uma variável de uma equação que define um valor de algum aspecto do modelo paramétrico. Nesse sentido, o parâmetro se distingue de uma constante, pois é capaz de assumir diferentes valores dentro de um domínio pré-determinado. É exatamente essa capacidade de assumir valores diversos que permite a variabilidade do objeto arquitetônico e, conseqüentemente, a capacidade de explorar o universo de soluções projetuais, um dos aspectos mais atrativo no *design* paramétrico (Jabi, 2013).

Definitivamente, o *design* paramétrico é uma mudança de paradigma no processo de desenvolvimento de projeto, com a migração do enfoque do objeto para o processo. De forma geral, Stasiuk (Stasiuk, 2018) sintetiza o processo de *design* paramétrico em três componentes básicos abordados neste item (Figura 16): os parâmetros, o algoritmo e os resultados. Os parâmetros são os elementos variáveis de projeto, que podem assumir diversos valores ou atributos, o que possibilita a variação do objeto arquitetônico. Eles são compreendidos como variáveis independentes do algoritmo, ou da função que define o objeto arquitetônico. Os parâmetros são os *inputs* (ou dados de entrada) – ou os genes, em uma analogia ao processo biológico de formação de um ser – do algoritmo, o processo que define o objeto arquitetônico. Assim, o modelo paramétrico em si não é o objeto arquitetônico, mas o modelo do processo de concepção desse objeto. E por fim esse algoritmo produz resultados ou *outputs* (dados de saída), que são a expressão do algoritmo, ou numa analogia biológica, o fenótipo desse conjunto de genes. Sob o ponto de vista matemático, eles são as variáveis dependentes da função. Entretanto é essencial compreender que este resultado é muito mais do que somente a expressão geométrica, como enfatiza Stasiuk

(Stasiuk, 2018), mas também diversos tipos de valores e informações sobre o modelo, inclusive métricas e indicadores, ponto este essencial para o emprego de ferramentas de simulação e otimização.

Figura 16 – Diagrama dos componentes da modelagem paramétrica



Fonte: Adaptado de Stasiuk (2018).

iv. Modelos e simulação

Simulação é o processo de tentar compreender e prever acontecimentos por meio de modelos, uma aproximação de sistemas, processos ou comportamentos reais. Nesse sentido, uma simulação é uma simplificação, ou mesmo imitação, dos complexos sistemas existentes na realidade prática (Banks; *et al.*, 2001). Elas são ferramentas analíticas que permitem uma melhor compreensão da realidade e, conseqüentemente, auxiliam no planejamento de ações e tomadas de decisões.

Apesar do grande vínculo que possuem com processos computacionais, a concepção de modelos e a especulação por meio de simulação fazem parte de praticamente qualquer anseio científico. Isso pode ser traçado até a antiguidade, como por exemplo, os modelos matemáticos de Pitágoras e Tales de Mileto, que buscavam maior compreensão geométrica para resolver problemas práticos de

arquitetura e construção, há 7 séculos A.C (Vasileiadou; Kalligeropoulos; Karcianas, 2003).

Por se tratar de uma representação da realidade, modelos não podem ser considerados como a própria realidade, mas sim como imitações ou simplificações dela. Isso tem implicações práticas, se observa na famosa frase do matemático e estatístico George Box, que “todos os modelos estão errados, mas alguns são úteis” (Box, 1979, p. 202). O que se busca destacar é o perigo na crença irrestrita nos modelos, pois eles nunca são capazes de representar os sistemas reais em sua totalidade. Entretanto, se concebidos de forma consciente, ao contemplar de forma explícita as relações de causa e efeito, os modelos e simulações podem ser úteis na compreensão dos fenômenos e servir como ferramentas analíticas para o planejamento e para a tomada de decisão.

A qualidade das hipóteses empregadas no modelo também é aspecto essencial para garantir sua capacidade como ferramenta de análise, porque está estritamente relacionada com a qualidade dos resultados, ou dados de saída, o que muitas vezes é expressa pela máxima “*garbage in, garbage out*”. Por isso, a compreensão das incertezas e confiança do modelo deveriam ser apresentadas, apesar dessa prática ainda não ser consolidada no campo da arquitetura, engenharia e construção, como apontam Hopfe, Augenbroe e Hensen (Hopfe; Augenbroe; Hensen, 2013).

Atualmente, empregam-se ferramentas de simulação do desempenho no campo da arquitetura, engenharia, construção e operação de edifícios, apesar de que simulações relacionadas as cargas térmicas já serem empregadas desde os anos 1960, como apontam Hensen e Lamberts (Hensen; Lamberts, 2011). Entretanto, segundo os mesmos autores, o emprego de ferramentas de simulação

do desempenho do ambiente construído ainda é tímido no setor. Para eles, simulação do desempenho da edificação pode ser entendida como:

A modelagem e simulação computacional do desempenho de edificação (...) é multidisciplinar, orientada a problemas e amplo escopo. Ela assume condições de limite dinâmicas (e contínuas no tempo) e é normalmente baseado em métodos numéricos que visam fornecer uma solução aproximada de um modelo realista de complexidade no mundo real (Hensen; Lamberts, 2011, p.3)

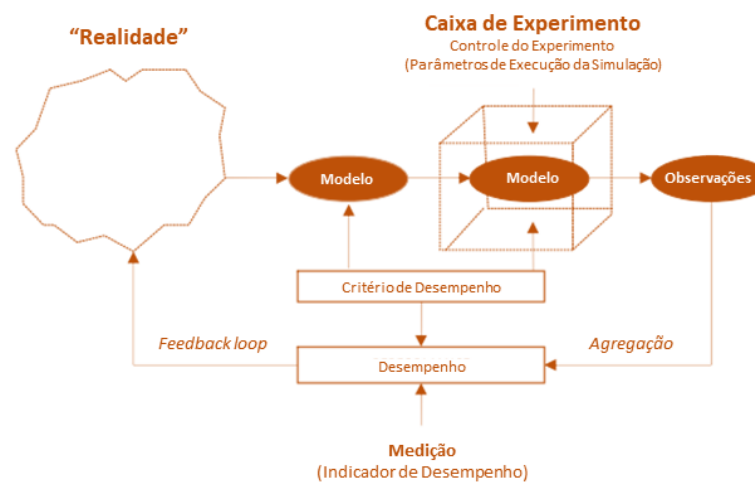
Apesar da limitação dos modelos e ferramentas de simulação como instrumentos de precisão para previsão de cenários, comportamentos e processos, seu uso tem se consolidado entre usuários mais experientes no campo da arquitetura, engenharia, construção e operação de edifícios. Segundo Bellinger (Bellinger, 2004), ferramentas de simulação não são capazes de fornecer respostas ou soluções, entretanto servem para melhorar o entendimento de cenários, comportamentos e processos. Assim, se caracteriza como uma ferramenta de análise e não uma ferramenta de predição. Desta forma, o mais adequado não é confiar irrestritamente nos resultados provenientes de ferramentas de simulação, mas perceber as indicações e as direções que estes resultados indicam a partir do comportamento dos fenômenos analisados. Portanto, as ferramentas servem como uma guia, uma forma de orientação para informar a tomada de decisão.

Para melhor compreender esse direcionamento que o comportamento dos resultados das simulações pode oferecer, Augenbroe (Augenbroe, 2011) sugere abordar a modelagem e simulação do desempenho da edificação como um experimento virtual. Nesse sentido, o experimento serve como uma oportunidade controlada para observar comportamentos, que, assim, podem auxiliar na tomada de decisão de projeto. Dessa forma, a simulação em si é uma etapa de um processo de análise de um problema de projeto. Augenbroe (Augenbroe, 2011) propõe uma

série de etapas para a concepção desses experimentos virtuais com emprego de simulação conforme a Figura 17.

Primeiramente, traduz-se a realidade em um modelo que seja coerente com os critérios de desempenho, suas métricas e indicadores e os parâmetros, ou variáveis de projeto, a serem analisados. Em seguida realiza-se o experimento em si na “caixa de experimentos”, que corresponde a ferramenta de simulação adequada. Posteriormente, observa-se os resultados dos indicadores de desempenho sob essas circunstâncias. Com o conhecimento adquirido, retorna-se a analisar a realidade concreta e redefinir o modelo para avaliar alternativas, em um processo itinerante. Dessa forma, o experimento é um processo comparativo entre cenários avaliados com condições e erros semelhantes.

Figura 17 – Diagrama do conceito de simulação como experimento



Fonte: Autor, adaptado de Augenbroe (2011)

A respeito da natureza das ferramentas de simulação, elas podem ser classificadas de acordo com alguns parâmetros. A respeito da condição de contorno, podem ser estáticas, o que significa que representam uma condição específica no tempo e espaço, ou dinâmicas, que variam conforme o tempo, e se assemelham a uma série de simulações estáticas que se retroalimentam. Também podem ser classificadas de acordo com o comportamento de suas variáveis, entre determinísticas, que sempre são as mesmas, ou estocásticas, em que seus valores são probabilísticos e variam. Além disso, podem ser classificadas de acordo com o funcionamento de seu algoritmo, entre *black box*, *gray box* e *white box*. Sob esse ponto de vista, modelos *white box* utilizam equações que representam deliberadamente a causa e efeito dos fenômenos. Enquanto modelos *black box* não se baseiam em equações que almejam ser aproximações dos processos físicos em sua completude, mas são modelos heurísticos que apenas buscam expressar e relação entre *inputs* e *outputs*. Por sua vez os modelos *gray box* são uma combinação dos modelos *white* e *black box*.

As ferramentas de simulação também podem ser classificadas de acordo com o tipo problema que se propõem a analisar. Nesse sentido, podem ser simulações relacionadas ao desempenho ambiental, como iluminação natural e artificial, desempenho térmico, qualidade acústica e fluido dinâmica, como também a questões energéticas, como consumo ou geração de energia. Também podem estar atreladas a pegada de carbono, como por meio de análise de ciclo de vida. Entretanto, podem estar relacionadas a outros domínios, como desempenho

estrutural ou comportamento de fenômenos físicos, como gravidade e atrito. Ou estar relacionadas ao deslocamento e fluxos, como análise sintática.

Com a popularização das ferramentas computacionais, a variedade de ferramentas analíticas de simulação cresce em resposta à demanda por soluções específicas para problemas de projeto. No contexto do *design* computacional, as análises realizadas por ferramentas de simulação são peças centrais para a avaliação de alternativas de projeto. Aliadas a recursos paramétricos, é possível automatizar a realização das análises com simulação, o que é fundamental para exploração do universo de soluções pelo computador, especificamente para realização de processos de otimização.

v. Otimização

No contexto do *design* computacional, o uso de ferramentas de simulação possibilita analisar determinadas alternativas de projeto por meio de critérios objetivos de desempenho, enquanto o *design* paramétrico possibilita a geração de uma diversidade de alternativas, ou um universo de soluções de projeto possíveis. Entretanto, a maneira de explorar este universo de soluções pode ser um desafio.

Uma possibilidade para explorar universo de soluções pode ser a simulação de todos os cenários possíveis, e posteriormente realizar o seu ranqueamento, processo denominado de busca por força bruta – *brute force search*. Entretanto, a depender da extensão do universo de soluções – ou número de estados que o modelo paramétrico pode assumir – e pelo custo computacional³⁶ do processo de simulação, o número de cenários a ser avaliado pode tornar-se

³⁶ Custo neste contexto se refere ao tempo para a realização do processo de simulação.

inexequível. Desta forma, é fundamental possuir estratégias adequadas para melhor explorar o universo de soluções projetuais.

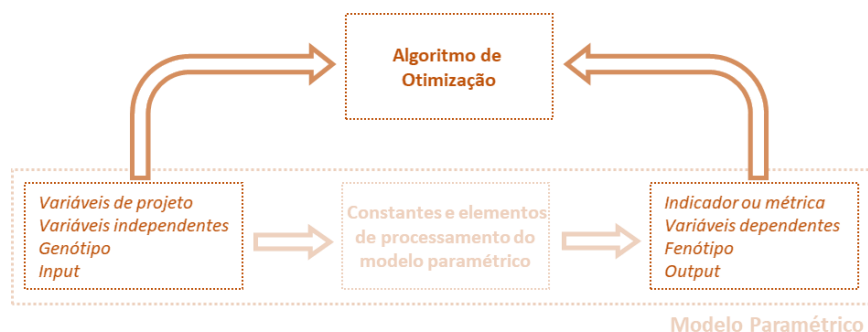
Existem diversas técnicas para se explorar o universo de soluções de projeto, entretanto, os termos e definições são muitas vezes utilizados no campo da arquitetura, engenharia e construção sem o mesmo rigor e clareza que nos seus campos de origem, habitualmente da matemática, estatística e ciências da computação. Nguyen, Reiter e Rigo (Nguyen; Reiter; Rigo, 2014) apresentam em sua extensa revisão de literatura sobre métodos de otimização no campo da arquitetura, engenharia e construção que o termo otimização é empregado para diversos processos iterativos de melhoria de desempenho, como no uso de simulação para obter sub-ótimos. Essas técnicas variam desde métodos estatísticos como análise de sensibilidade; *design* de experimento – *Design of Experimente* (DoE) –; algoritmos de busca, como busca por força bruta – que eventualmente também é simplesmente denominado de método paramétrico de simulação –; *expert-based optimization*; entre outros. Contudo, estes não são métodos matemáticos de otimização.

De forma simplificada, otimização é uma técnica do campo da matemática que busca encontrar a melhor alternativa dentro de um universo de soluções possíveis com algum critério mensurável específico (Wortmann; Nannicini, 2017). Segundo Wortmann e Nannicini (Wortmann; Nannicini, 2017), a popularização do emprego de otimização do projeto arquitetônico – *Architectural Design Optimization* (ADO) – não se deve somente a disponibilidade do *design* paramétrico e das ferramentas de simulação. Para eles, isso ocorre porque diversos problemas de projeto são fundamentalmente problemas de otimização, de conciliar diversas demandas muitas vezes divergentes – apesar de nem sempre

serem concebidos como um problema matemático de otimização. Dessa forma, as ferramentas computacionais só atendem a uma necessidade intrínseca de projeto (Wortmann; Nannicini, 2017).

Os modelos de otimização podem ser compreendidos em três partes básicas: *inputs* ou variáveis de projeto; *outputs* ou objetivos e restrições; e o algoritmo de otimização em si. A Figura 18 apresenta a relação dessas três partes dentro da concepção do *design* paramétrico.

Figura 18 – Diagrama do processo de otimização do paradigma de modelagem paramétrica



O algoritmo de otimização realiza o procedimento de busca no universo de soluções projetuais possíveis. Ele funciona como um modelo *black-box*, pois não avalia os procedimentos de cálculo das simulações, apenas avalia os *inputs* e *outputs* do modelo paramétrico, como demonstra a Figura 18.

Já as variáveis de projeto, também denominadas como variáveis independentes, constituem os *inputs* do modelo paramétrico do processo de

otimização. Habitualmente, são denominados de genes ou genoma, em virtude da predominância de algoritmos de otimização evolutivos ou genéticos no campo da otimização do projeto arquitetônico.

Por fim, os *outputs* são normalmente os resultados das simulações, que são as variáveis dependentes do modelo paramétrico, e dentro do contexto da analogia a genética, são denominados de fenótipo, ou as características observáveis de um determinado genoma. Nos algoritmos de otimização, esses *outputs* são os elementos caracterizados como objetivos a serem maximizados ou minimizados, o que direciona o processo de busca do algoritmo de otimização. Além disso, os *outputs* também podem ser caracterizados como restrições, valores mínimos ou máximos, que um critério de desempenho necessita possuir para ser aceito.

Contudo, o desenvolvimento de estudos de otimização do projeto arquitetônico começa antes mesmo da otimização em si. Em linhas gerais, o processo de formulação de um estudo de otimização do projeto arquitetônico pode ser categorizado em três etapas: pré-processamento, computação da otimização e pós-processamento (Nguyen; Reiter; Rigo, 2014).

A etapa de pré-processamento da otimização do projeto arquitetônico possui características semelhantes a etapa de concepção de modelo dos estudos de simulação do desempenho da edificação, visto que a otimização do projeto arquitetônico se fundamenta em estudos de simulação do desempenho da edificação. Desta forma, é necessário definir claramente o problema a ser investigado, para assim definir uma abordagem de simulação com critérios, métricas e indicadores de desempenho adequados – os *outputs* – e um modelo paramétrico que defina um universo de soluções de projeto – os *inputs* – que seja

relevante ao problema. Além disso, é fundamental escolher o algoritmo mais adequado ao problema, assim como configurá-lo.

O processo de otimização computacional ocorre quando um algoritmo é empregado para realizar iterações na busca de resultados ótimos, geralmente alcançados através da avaliação dos resultados obtidos. Entretanto, a finalização da otimização também pode ocorrer de acordo com outros parâmetros, como número de iterações, tempo de execução, ou a obtenção de um valor específico. Nessa etapa podem existir diversas rodadas de testes, para detectar erros ou falhas na simulação, o que demanda de ajustes no modelo paramétrico ou nas configurações do algoritmo.

Por fim, a etapa de pós-processamento consiste na interpretação e análise dos resultados. Isso é especialmente relevante no caso de otimizações de múltiplos objetivos, que podem possuir um conjunto de resultados ótimos, o que demanda da análise humana para a escolha do cenário mais adequado.

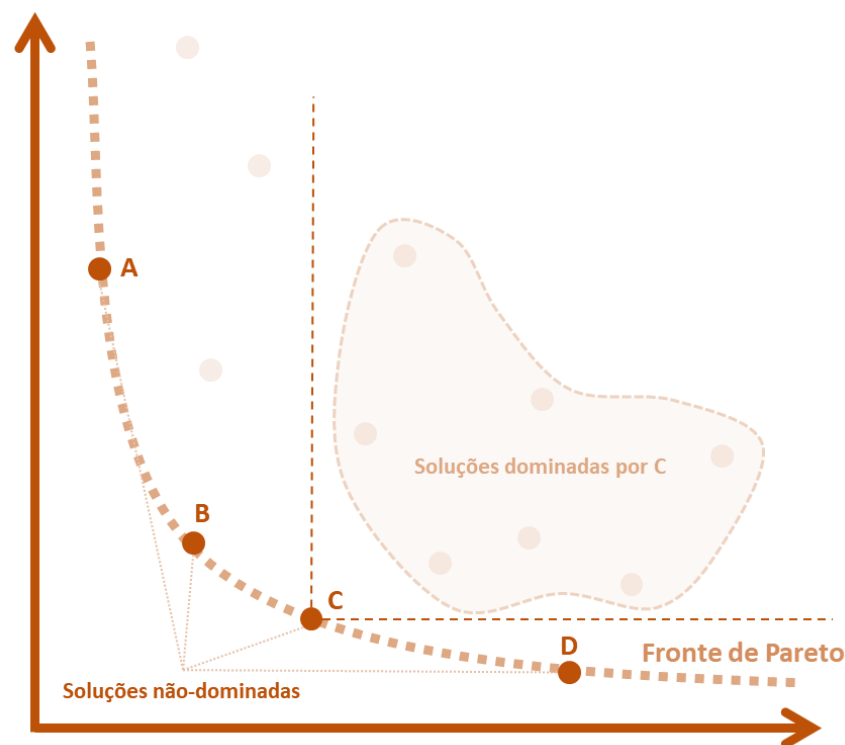
Nguyen, Reiter e Rigo (Nguyen; Reiter; Rigo, 2014) apresentam sete classificações quanto aos tipos de problemas de otimização, que podem ser a respeito do: i. número de variáveis de projeto; ii. Natureza das variáveis de projeto; iii. Tipos de variáveis de projeto; iv. Número de funções de objetivos; v. natureza das funções de objetivos; vi. Presença e natureza de restrição e; vii. Domínio dos problemas.

Essas características são fundamentais para melhor entender a paisagem, ou relevo, do universo de soluções projetuais, que concilia os resultados – ou critérios de desempenho ou *outputs* – com o universo de soluções projetuais – as variáveis de projeto ou os *inputs*. Este aspecto possui impactos na capacidade do algoritmo de otimização de encontrar os resultados ótimos. Quanto maior, mais

acidentada e menos contínua for a paisagem do universo de soluções projetuais, mais difícil é para o algoritmo encontrar os resultados ótimos. Assim, o algoritmo pode ficar preso a máximos ou mínimos locais dessa paisagem e não nos máximos ou mínimos globais. Esse aspecto evidencia que os resultados das otimizações não necessariamente trazem os melhores resultados, mas uma aproximação, ou pelo menos um ótimo local.

Um dos pontos mais evidentes e relatados é relativo à quantidade de objetivos contemplados pela otimização, que podem ser mono-objetivos ou multiobjetivos. No caso de otimizações mono-objetivos, é possível obter um único valor ótimo. No caso de otimizações multiobjetivo, estas não buscam extrair um único cenário ótimo, pois, por possuírem múltiplos objetivos, não há necessariamente como comparar os resultados entre critérios diferentes. Dessa forma, há sempre um *trade-off*³⁷ entre os diferentes objetivos. O que se normalmente obtém de uma otimização multiobjetivo são resultados não-dominantes, em que nenhum outro resultado tem valores superiores simultaneamente em todos os objetivos. O conjunto de resultados não-dominantes define a Frente de Pareto, que no caso de dois objetivos se caracteriza por uma curva, de três objetivos em uma superfície e assim sucessivamente (Figura 19).

Figura 19 – Exemplo gráfico da Frente de Pareto e soluções dominadas e não-dominadas



Fonte: Autor (2022).

³⁷ Optou-se pela expressão em inglês pela dificuldade em traduzi-la. Nesse sentido, significa que há uma divergência de difícil balanceamento entre os diferentes objetivos, uma situação de perde-e-ganha. Melhor em um critério ou objetivo significa a perda parcial da qualidade de outro critério ou objetivo.

Quadro 3 – Definição da Frente de Pareto e Volume Dominado

Fronte de Pareto & Volume Dominado

Uma das principais formas de definir um conjunto de soluções sub-ótimas em um processo de otimização, especialmente – mas não de forma exclusiva – em algoritmos de busca evolutivo é o Fronte de Pareto, composto pelo conjunto de soluções não-dominadas. Uma solução não-dominada é aquela que não possui outra solução na amostra que seja simultaneamente superior em todos os objetivos da otimização. A Figura 19 apresenta um cenário fictício com a representação gráfica do Fronte de Pareto o Volume Dominado – no caso bidimensional, uma área – em que as soluções ali localizadas são consideradas dominadas. Dessa forma, quanto maior esse Volume Dominado melhor é o resultado, especialmente de forma balanceada entre os objetivos.

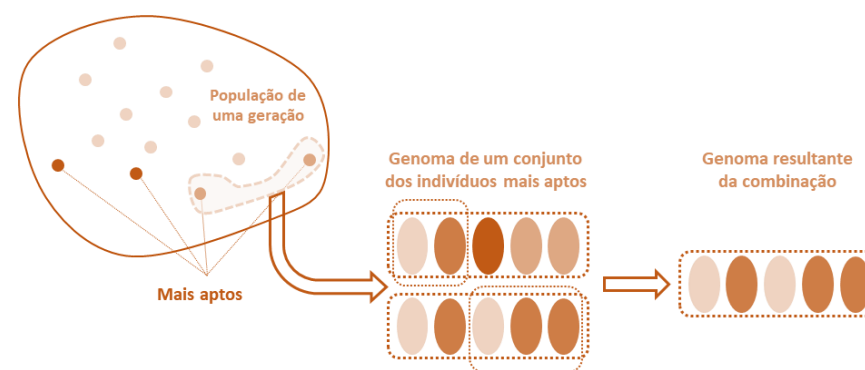
Fonte: Autor (2022).

Desta forma, nota-se uma diferença fundamental de finalidade entre otimizações com um ou múltiplos objetivos. No caso de otimizações mono-objetivos, o que se almeja é a definição de um único cenário que melhor atenda um determinado critério. O que não é o caso das otimizações multiobjetivos, que almejam vasculhar o universo para posterior escolha manual, ao invés de necessariamente definir um único resultado ótimo (Wortmann; Nannicini, 2017).

Entretanto, o aumento do número de objetivos acarreta maior dificuldade da aproximação da Frente de Pareto real. Nesse sentido, há a necessidade de se conciliar um maior número de objetivos – o que representa melhor um problema de projeto real – e a capacidade ou eficácia do processo de otimização de encontrar os resultados ótimos – a Frente de Pareto. Como alternativa, para tornar os problemas de múltiplos objetivos numa busca mais objetiva, é possível simplificar ou equacionar os objetivos por meio de funções ponderadas e obter um meta-objetivo – ou um indicador único que representa um agregado de todos os objetivos.

O algoritmo evolutivo, ou algoritmo genético, é o mais popular no campo da otimização do projeto arquitetônico. Possui funcionamento de maneira análoga à seleção natural, em que cada resultado é considerado um indivíduo, com um genoma próprio – as variáveis de projeto ou *inputs* – e um fenótipo – seus indicadores de desempenho ou *outputs*. Em um primeiro momento, gera-se uma população de indivíduos de forma aleatória na primeira geração. Os indivíduos são ranqueados de acordo como seus indicadores de desempenho e os indivíduos mais aptos – *fittest* – servem como reprodutores da geração seguinte, o que significa que seus genes são recombinados para geração dos indivíduos da nova geração (Figura 20). Para evitar que a busca se prenda a um máximo ou mínimo local há uma taxa de mutação, que insere genes fora do reservatório genético dos reprodutores mais aptos. Esse processo ocorre repetidamente até uma convergência de resultados ou definição do Fronte de Pareto.

Figura 20 – Exemplo gráfico do processo de combinação de genes dos indivíduos mais aptos no processo de otimização com algoritmo evolutivo ou genético



Fonte: Autor (2022).

Apesar de serem os algoritmos mais empregados em estudos de otimização no campo da arquitetura e urbanismo, Wortmann e Nannicini (Wortmann; Nannicini, 2017) apontam a limitações dos Algoritmos Evolutivos para determinados tipos de problemas. Inclusive, os autores mencionam que nos campos da Ciência da Computação, da Matemática e da Estatística, de onde os algoritmos de otimização são oriundos, normalmente os Algoritmos Evolutivos não são os mais empregados.

O ponto principal apontado por estes autores é o custo computacional que algoritmos evolutivos demandam para conseguir encontrar resultados ótimos. Para serem eficazes na busca dos resultados ótimos ou da aproximação da Fronte de Pareto, algoritmos evolutivos demandam muitas iterações para vasculharem o universo de soluções. Dessa forma, problemas de otimização que possuem simulações que demandem mais do que alguns segundos se tornam inexecutáveis, ou ao menos ineficientes (Wortmann; Nannicini, 2017).

Entretanto, os autores recomendam o uso de algoritmos evolutivos em casos de busca de diversidade de soluções, visto que este é uma premissa explícita desse tipo de algoritmo. Assim, otimizações multiobjetivo em que se busca avaliar os *trade-offs* e os custos computacionais não sejam altos, algoritmos evolutivos seriam opções adequadas.

Diferentemente dos algoritmos com métodos heurísticos como os algoritmos evolutivos, algoritmos com métodos iterativos – como *Direct Search* e métodos baseados em modelos – criam funções matemáticas para poder explorar de forma mais consciente o universo de soluções projetuais. O “algoritmo *Direct Search* pesquisa um conjunto de pontos em torno do ponto atual, procurando um

onde o valor da função de custo é menor do que o valor no ponto atual” (Wortmann; Nannicini, 2017, p. 266). Assim, parte-se de um ponto – ou cenário inicial – e avaliam-se diversos cenários vizinhos. Com estes valores, é possível criar diversas funções que são avaliadas para indicar o sentido dos melhores resultados. A cada iteração, o algoritmo explora mais profundamente o entorno e prioriza as funções que indicam maior melhora nos resultados. Já o método baseado em modelos desenvolve *surrogate models* – ou modelo substituído em tradução para o português –, uma técnica de aprendizagem de máquina, que usa os *inputs* e *outputs* para treinar um modelo, ou função matemática, que então é usado para prever o comportamento do sistema e assim vasculhar com maior orientação o universo de soluções. A cada iteração o *surrogate model* é recalculado com os novos dados de treinamento e assim obtém uma orientação ainda melhor para encontrar os resultados ótimos (Wortmann; Nannicini, 2017).

Ao analisarem diversos estudos, Wortmann e Nannicini (Wortmann; Nannicini, 2017) concluem que ambos os métodos demonstraram resultados consideravelmente superiores aos algoritmos evolutivos. Por exemplo, em estudos de otimização estrutural e iluminação natural, com um número limitado de iterações – de 200 e 100 respectivamente –, ambos algoritmos iterativos possuíram desempenho consideravelmente superior a algoritmo evolutivo. Além disso, eles apontam que otimizações com um único objetivo com métodos iterativos são capazes de obter resultados superiores a Frontes de Pareto de otimizações com múltiplos objetivos (Wortmann; Nannicini, 2017).

3.1.2 Benchmark dos algoritmos de busca

O processo de *benchmark* busca comparar a eficiência e efetividade de diferentes algoritmos de busca por meio de um estudo de referência com o mesmo

problema de otimização. Para esse fim, avaliam-se três algoritmos de busca neste *benchmark*:

- i. **Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II (NSGA-II)**, um dos algoritmos de busca evolutivo mais populares, empregado no *plug-in* para *Grasshopper Wallacei X*;
- ii. **Radial Basis Function (RBF)**, algoritmo de busca que baseado em *surrogate model* desenvolvido por aprendizagem de máquina, disponível no *plug-in* para *Grasshopper Opossum*;
- iii. **Tree-Structured Parzen Estimator (TPE)**, que também é um algoritmo de busca que baseado em aprendizagem de máquina que emprega a biblioteca *Optuna*, disponibilizado no *Grasshopper* pelo *plug-in Tunny*.

Como estudo de base, emprega-se a primeira rodada de otimização de tipologias – tipologia de quadra com torre isolada – investigada na pesquisa central deste trabalho. O modelo possui cinco variáveis, Número de Andares, Profundidade da Edificação, Dimensão da Quadra em os ambos eixos e Azimute. A otimização de múltiplos objetivos possui três indicadores de desempenho: Índice de Sombra Médio Ponderado (IS) para o conforto térmico do pedestre, *spatial Daylight Illuminance* (sUDI) para qualidade ambiental da iluminação natural em espaços internos e *Load Cover Factor* (LCF) para o balanço energético das edificações. Para esse fim, emprega-se o *Ladybug Tools* e *Ladybug Legacy* que possibilitam acesso aos motores de cálculo *Radiance*, para iluminação natural, *Energyplus*, para consumo energético e *PVWatt*, para geração de energia fotovoltaica, além da capacidade de calcular as horas de insolação. Maiores detalhes dos indicadores, ferramentas de simulação e seu processo de

modelagem, assim como da modelagem paramétrica são apresentados posteriormente neste capítulo de Materiais e Métodos, nos itens 3.3 MATERIAIS e 3.4.2 Caracterização dos procedimentos de simulação, com início nas páginas 85 e 90, respectivamente.

Para padronizar os processos de otimização, configuram-se todos os três algoritmos para realizarem 300 iterações. Para o NSGA-II, adicionalmente define-se probabilidade de *crossover* de 90%, probabilidade de mutação de $1/n$ e 20 gerações com população de 15 indivíduos. Já o algoritmo RBF possui processo de caracterização da otimização mais simples, somente com o número máximo de iterações, enquanto a quantidade de rodadas sem melhoria do Volume Dominado manteve-se desabilitada. Por fim, para o algoritmo TPE, define-se número inicial de teste de 10, com peso inicial de 1.0, e número dos melhores indivíduos considerados para geração de novos indivíduos igual a 24.

Para o presente *benchmark*, avalia-se a eficácia, relativa ao valor do resultado sub-ótimo alcançado, e a eficiência, relativa à velocidade ou número de iterações necessárias para se alcançar o resultado sub-ótimo. Observam-se essas duas características para os três objetivos da otimização – Índice de Sombra (IS), *spatial Useful Daylight Illuminance* (sUDI) e *Load Cover Factor* (LCF) –, além do Volume Dominado, elemento responsável pela definição do conjunto de soluções ótimas da Fronte de Pareto, que corresponde ao espaço matemático de dominação ou superioridade de determinada solução – mais informações vide Quadro 3 – Definição da Fronte de Pareto e Volume Dominado na página 73.

Em virtude de os três indicadores de desempenho serem objetivos maximizados e possuírem intervalos semelhantes, de 0 a 100, por serem

porcentagens, o Volume Dominado é definido pela multiplicação dos três indicadores, conforme a Equação 1 a seguir:

Equação 1 – Cálculo do Volume Dominado (VD)

$$VD = IS \times sUDI \times LCF$$

Em que:

VD: Volume Dominado (un^3)

IS: Índice de Sombra Médio (%)

sUDI: *spatial Useful Daylight Illuminance* (%)

LCF: *Load Cover Factor* (LCF) (%)

i. Melhores resultados

Os gráficos da Figura 21 a Figura 24 apresentam a evolução dos resultados de cada um dos algoritmos para os três objetivos e o Volume Dominado. As abscissas representam o número de iterações, enquanto as ordenadas os indicadores de desempenho. Apresentam-se os resultados para cada iteração, assim com o resultado máximo alcançado até aquela iteração da otimização para cada um dos algoritmos de busca, representados por uma linha contínua.

Observa-se que há uma tendência à conversão dos resultados nos três algoritmos de busca, uma vez que alcançam resultados próximos, se não idênticos, em praticamente todos os critérios. A única exceção é o NSGA-II para o Índice de Sombra, que possui resultado ótimo visivelmente inferior aos outros dois algoritmos de busca.

Nas avaliações individuais para cada objetivo, percebe-se que o RBF é o algoritmo de busca que converge para o resultado ótimo de forma mais rápida em

dois dos objetivos – Índice de Sombra Médio Ponderado (IS) e *spatial Useful Daylight Illuminance* (sUDI) –, enquanto o TPE é mais eficiente para um dos objetivos – *Load Cover Factor* (LCF). Os dois algoritmos de busca baseados em aprendizagem de máquina se mostram mais eficientes, pois obtêm resultados ótimos com menores custos computacionais – e menor número de iterações do que o modelo heurístico do algoritmo evolutivo do NSGA-II. Isto corrobora a perspectiva da literatura (Wortmann; Nannicini, 2017). A única exceção fica para *spatial Useful Daylight Illuminance* (sUDI) em que o NSGA-II alcança o resultado ótimo antes que TPE.



Figura 21 – Gráfico da Evolução do IS para os Algoritmos de Busca

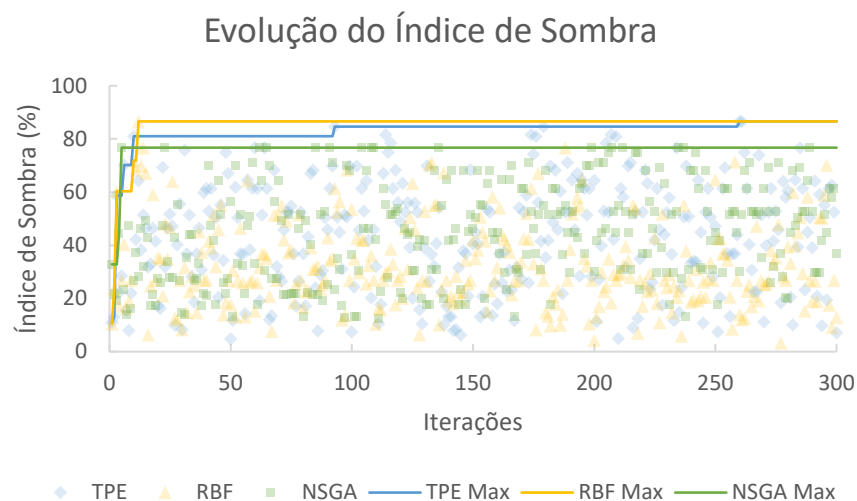


Figura 23 - Gráfico da Evolução do LCF para os Algoritmos de Busca

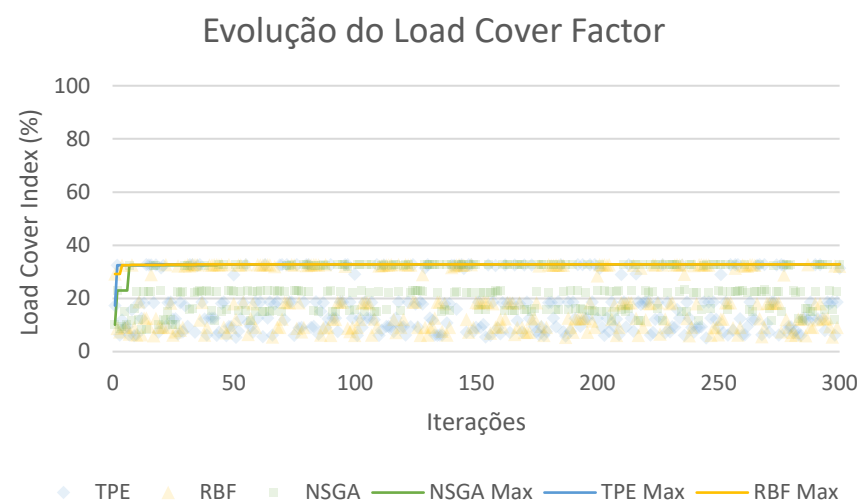


Figura 22 - Gráfico da Evolução do sUDI para os Algoritmos de Busca

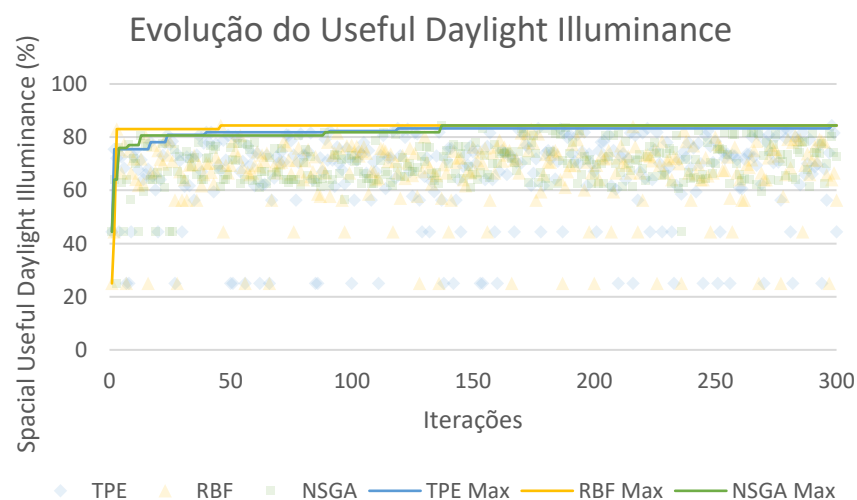
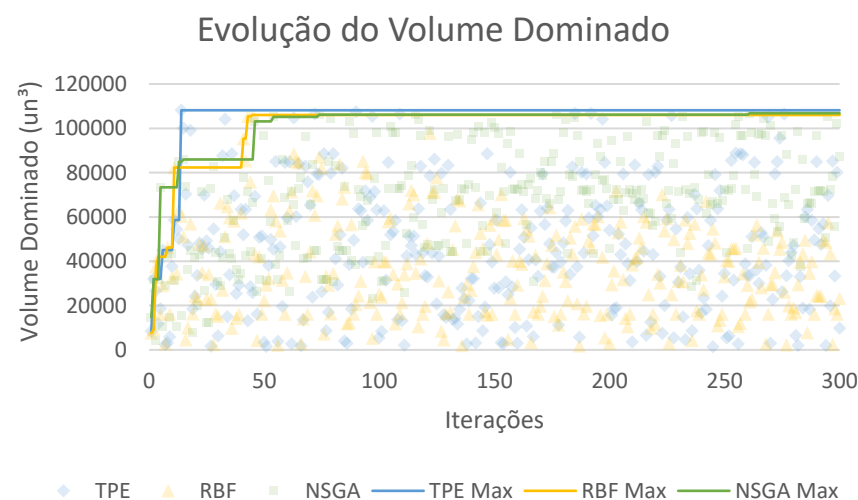


Figura 24 - Gráfico da Evolução do VD para os Algoritmos de Busca



Nesse sentido, percebe-se que mesmo em um modelo simples, mas com indicadores de desempenho com custos computacionais consideráveis, os algoritmos de busca baseados em aprendizagem de máquina são mais eficientes e mais eficazes, inclusive na avaliação conjunta de múltiplos objetivos – Volume Dominado. Contudo, é importante ressaltar que esses resultados não representam a descrédito aos algoritmos evolutivos, que são reconhecidos pela capacidade de gerar resultados com maior diversidade, porém com custos computacionais significativamente superior, como apontam autores como Wortmann e Nannicini (Wortmann; Nannicini, 2017). Dessa forma, os resultados do *benchmark* corroboram com estes autores que apontam que em estudos com motores de cálculo como *EnergyPlus* e *Radiance* – que demandam rodadas mais longas do que milissegundos ou poucos segundos – algoritmos de busca com emprego de aprendizagem de máquina são mais recomendados enquanto algoritmos de busca evolutivos devem ser adotados com cautela.

Dentre os algoritmos de busca baseados em modelos de aprendizagem de máquina no presente estudo de *benchmark*, em linhas gerais, o RBF se mostra mais eficaz, ao alcançar resultados ótimos com menor número de iterações, enquanto o TPE demonstra-se mais eficiente, ao alcançar desempenhos superiores. Contudo, é importante observar que especificamente na análise de valores ótimos para os objetivos individuais desta otimização de múltiplos objetivos, ambos algoritmos de busca apresentaram eficácia semelhante, senão idênticas.

3.1.3 Tipologias de quadras urbanas

A forma urbana é ponto de partida ao estudo tanto da arquitetura, como do urbanismo, seja do ponto de vista analítico ou projetual. Neste contexto as quadras urbanas são elementos essenciais na arquitetura e no desenho urbano,

pois servem como unidades fundamentais de construção das cidades. De certa forma, as quadras urbanas se configuram como uma das unidades básicas de planejamento de urbano. O estudo da tipologia de quadras urbanas auxilia na compreensão da morfologia, pois simplifica alguns aspectos e cria condições mais generalizáveis e assim são empregadas em estudos de diversos fenômenos urbanos.

Para auxiliar as definições sobre os cenários investigados na presente pesquisa, apresenta-se a seguir um levantamento metodológico das classificações tipológicas de quadras urbanas mais pertinentes à análise ambiental e às questões energéticas.

i. Classificação tipológica de quadra urbana

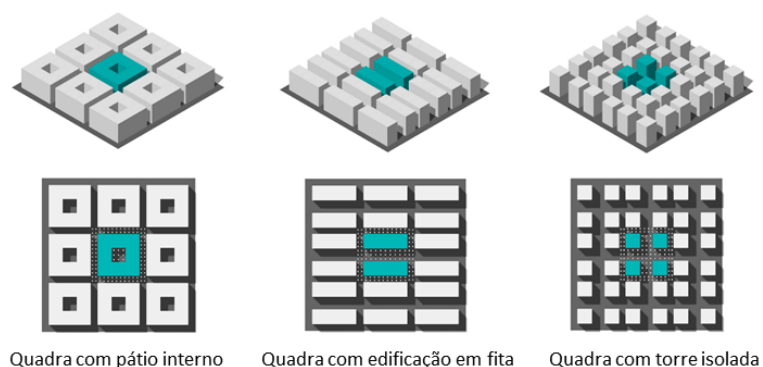
Encontram-se na literatura diversas abordagens para classificação das tipologias de quadras urbanas. Essas classificações podem variar bastante, algo atrelado a finalidade da análise que tais classificações se propõem a realizar. Aspectos que são relevantes para uma determinada análise – por exemplo, de apropriação dos espaços públicos – não necessariamente são relevantes para outro tipo de análise – por exemplo, análise de sintaxe espacial, que demanda ênfase em outros aspectos.

No campo específico da análise ambiental e estudos energéticos, questões fundiárias, de circulação, entre outras, possuem menor relevância. Aspectos morfológicos e arranjo espacial são mais importantes para caracterização das condições de exposição aos elementos climáticos. Desta forma, apesar de algumas variações, diversos estudos (Ibrahim *et al.*, 2021; Natanian; Aleksandrowicz; Auer, 2019; Natanian; Auer, 2020; Ratti; Raydan; Steemers, 2003)

empregam predominantemente de três tipologias, apresentadas na Figura 25 e listadas abaixo:

- i. Quadra com torre isolada;
- ii. Quadra com edificações em fita;
- iii. E quadra com pátio interno.

Figura 25 – Tipologias de quadras usualmente empregadas em análises ambientais



Fonte: adaptado de (Ibrahim *et al.*, 2021)

Existem classificações mais abrangentes que visam atender demandas de análise diversas, como é o caso da classificação de Tarbatt e Tarbatt (Tarbatt; Tarbatt, 2020). Os autores apresentam uma minuciosa classificação com 5 categorias principais (Figura 26) que possuem variações, além de uma categoria de

casos especiais. Contudo, ao analisar esta classificação é possível perceber pontos de semelhança com a classificação em três tipologias recém mencionada.

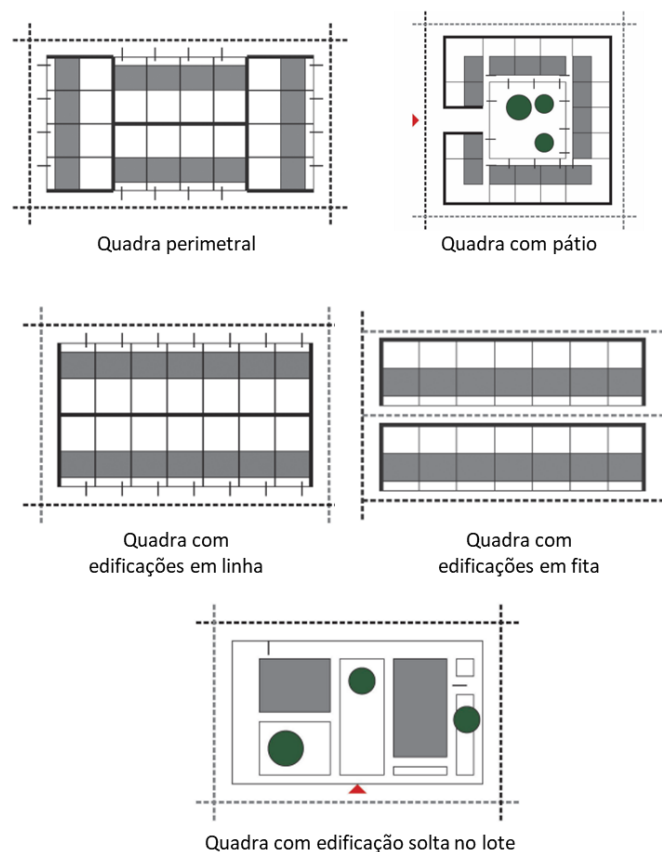
Primeiramente, Tarbatt e Tarbatt (Tarbatt; Tarbatt, 2020) fazem distinção entre quadras com ocupação perimetral e quadras com pátio interno, algo que está mais associado a questões fundiárias e morfologicamente são bastante semelhantes. Inclusive, do ponto de vista morfológico, relacionado ao desempenho ambiental, o conceito de “ocupação perimetral” e de “pátio interno” se complementam.

Adicionalmente, os próprios autores (Tarbatt; Tarbatt, 2020) mencionam que as quadras com edificações em fita são uma variação da quadra com edificações em linha³⁸, com principal distinção a questão de orientação e implantação no lote, com espelhamento nas quadras com edificações em linha e situação idêntica no caso das quadras com edificações em fita. Essas características possuem implicações maiores a respeito de questões fundiárias e circulação.

Por fim, os autores também apresentam uma categoria de edificações isoladas, ou soltas, dentro da quadra. Esta tipologia pode assumir diversas expressões, entretanto sua forma mais marcante é o caso de torres isoladas ou soltas na quadra, solução bastante criticada pela falta de integração com o contexto urbano.

³⁸ Os autores usam os termos em inglês *row* e *ribbon* que aqui estão traduzidos como linha e fita respectivamente.

Figura 26 – Tipologias de quadras segundo classificação de Tarbatt e Tarbatt



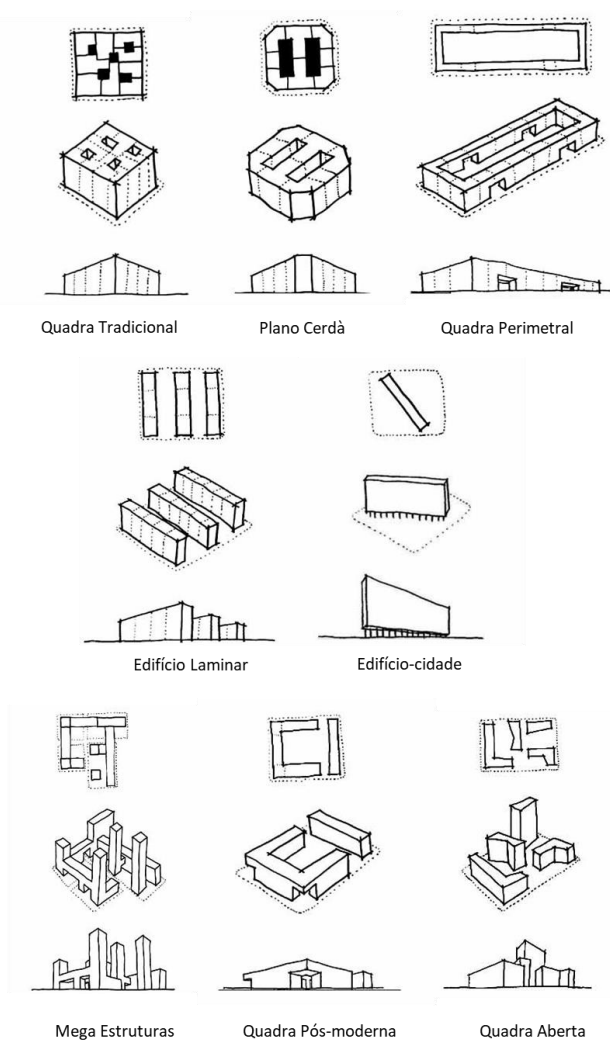
Fonte: Adaptado de Tarbatt e Tarbatt (2020)

De forma similar, Figueroa (Figueroa, 2006) desenvolve mais abrangente sobre quadras urbanas com enfoque na relação entre habitação coletiva e as tipologias e quadras urbanas a partir da interpretação dos conceitos de Christian de Portzamparc, em “A terceira era da cidade” (Portzamparc, 1992) . Neste

sentido, desenvolve-se uma classificação com 8 tipologias, como se observa na Figura 27. Esta classificação tem especialmente uma abordagem histórica sobre a questão da habitação e a quadra urbana, com ênfase em novas expressões formais vinculadas à pós-modernidade.

Parte-se da tipologia de quadra das cidades tradicionais (i), com habitações sem recuos laterais e frontais, alta ocupação do interior da quadra, com poucos vazios internos. Adicionalmente, apresentam-se soluções modernistas – ou pelo menos protomodernistas –, como a quadra do plano Cerdà (ii), com pátios internos, quadra com ocupação perimetral (iii) – solução bastante empregada em Amsterdã e Viena a partir do início do século XX –, quadra com edifícios laminares paralelos (iv) – expressão marcante do modernismo – e sua variação com edifícios em *pilotis* – denominada por Figueroa (2006) de edifício-cidade (v), que representa a síntese do pensamento de Le Corbusier, e inclusive se manifesta de forma marcante em Brasília. Por fim, destacam-se três tipologias com abordagem mais contemporânea: a quadra com megaestruturas (vi), a quadra pós-moderna contextualista (vii) e a quadra aberta (viii).

Figura 27 – Tipologias de quadras segundo Figueroa



Fonte: Adaptado de Figueroa (2006)

Essa contextualização histórica auxilia a evidenciar uma mudança na relação das edificações com a quadra e o contexto urbano. Desde a disseminação de edifícios laminares ou em fita, a partir de meados do século XX, praticamente todas as tipologias de quadra – com exceção da quadra pós-moderna contextualista – possuem baixa articulação com o contexto urbano, especialmente com a rua, algo característico dos contextos urbanos mais tradicionais. Esse distanciamento ao contexto urbano é duramente criticado por autores, como Jencks (Jencks, 1973), Arantes (Arantes, 2015) e Jacobs (Jacobs, 1961), que assim embasam iniciativas de resgate da relação das edificações e quadra com a cidade, no caso da quadra pós-moderna contextualista.

Adicionalmente, a configuração formal, morfológica destas tipologias, podem ser simplificadas, ou agrupadas, de forma semelhante as classificações anteriormente mencionadas a respeito da análise ambiental e estudos energéticos da seguinte forma:

- i. **Quadras com edificações perimetrais e pátios internos:** apesar das variações, preservam estes dois aspectos – ocupação perimetral e interior aberto, algo presente na quadra tradicional, na quadra do plano Cerdà, na quadra perimetral e na quadra pós-moderna contextualista;
- ii. **Quadras com edifícios laminares ou em fita:** assim como na quadra aberta ou com edifícios soltos, possuem pouca articulação com o contexto urbano, porém possuem morfologia mais específica, linear, como se observa nos casos da quadra com edifícios laminares paralelos e da quadra edifício cidade – que são edifícios laminares com *pilotis*;

- iii. **Quadras abertas ou com edifícios soltos:** soluções com baixa articulação com o contexto urbano, em que os edifícios possuem pouco diálogo com a rua, aspectos que se observam na quadra aberta e na quadra com megaestruturas

3.2 MÉTODOS

O método, dentro da visão de Groat e Wang (Groat; Wang, 2013), se caracteriza conjunto de um conjunto de procedimentos e técnicas sistemáticas utilizadas para coletar, analisar e interpretar dados relevantes em pesquisa. Neste sentido, o método explica a forma de realização da pesquisa num nível estratégico, uma visão abrangente de como as atividades se relacionam para responder os objetivos e o problema de pesquisa.

Desta forma, a pesquisa presente nesta tese possui um método com caráter quantitativo, com emprego de recursos de simulação computacional para realização da coleta de dados, uma das 7 categorias de métodos segundo Groat e Wang (Groat; Wang, 2013). Neste contexto, compreende-se simulação computacional todas as técnicas de *design* computacional, o que não se restringe as ferramentas de simulação do desempenho ambiental, como *EnergyPlus*, *Radiance* e *PVWatt*. Assim, os recursos de modelagem paramétrica e o algoritmo de busca que se emprega na otimização também são considerados métodos de simulação computacional.

A Figura 28, na página 84, apresenta uma visão geral do método da pesquisa com suas etapas, processo e procedimentos. O método estrutura-se em quatro etapas gerais:

- i. **Estudo da forma urbana**, etapa prévia a coleta de dados, relativa à caracterização dos cenários estudados e assim possui caráter de **delineação da pesquisa**;
- ii. **Processo de otimização**, que contempla a modelagem e simulação do desempenho ambiental além do próprio processo de otimização e possui caráter de **coleta de dados**;
- iii. **Tratamento dos dados**, que como o próprio nome menciona aborda o **tratamento dos dados** coletados na etapa anterior, assim como as **análises desses dados** tratados, que são os resultados principais desta pesquisa;
- iv. **Desdobramentos dos resultados**, que se relaciona mais a atividade de **discussão dos resultados** e visa responder as questões de pesquisa mais qualitativas, algo que cria um processo de retroalimentação das questões de pesquisa.

A primeira etapa, o estudo da forma urbana, tem como principal enfoque delinear e caracterizar os cenários investigados. Na presente pesquisa, analisam-se três tipologias de quadras urbanas:

- i. Quadra com Torre Isolada (QTI);
- ii. Quadra com Edificações em Fita (QEF);
- iii. Quadra com Pátio Interno (QPI).

Para cada tipologia de quadra de uso exclusivamente residencial, definem-se as variáveis morfológicas e seus níveis ou valores que podem assumir, atividade fundamental para a modelagem paramétrica. Neste sentido, também se delimita o universo de soluções projetuais possíveis, ou o número de cenários

existentes decorrentes das combinações dessas variáveis projetuais. O item 3.4.1 Caracterização das variáveis de projeto das tipologias de quadra, na página 87, referentes ao detalhamento dos procedimentos, realiza caracterização mais aprofundada.

E segunda etapa do método, trata de todos os processos e atividade referentes à coleta de dados por meio de ferramentas computacionais. Esta etapa contempla a realização da modelagem paramétrica, as simulações de desempenho e o processo de otimização realizados para cada uma das três tipologias.

Realiza-se a modelagem paramétrica no *Grasshopper*, o que possibilita a automação da geração dos cenários de quadra. Este processo de modelagem paramétrica possibilita a compilação e coleta de diversas informações a respeito dos cenários, desde as variáveis de projetos que funcionam com *inputs*, como também outros indicadores referentes as questões morfológicas como Índice de Aproveitamento (IA), Taxa de Ocupação (TO), Fator H/W, entre outros.

Há também no processo de otimização a necessidade da definição dos *outputs* que são maximizados, denominados de objetivos da otimização, marcados em destaque no diagrama do método (Figura 28). Para esse fim, utilizam-se ferramentas de simulação computacional do desempenho ambiental, especificamente o *EnergyPlus*, para análise termoenergética, *Radiance*, para análise da iluminação natural, e o *PVWatt*, para geração de energia fotovoltaica. Acessam-se estes recursos por meio do *Ladybug Tools*, *plug-in* para *Grasshopper* para realização de análises ambientais e que serve de interface para os referidos programas. A partir destas ferramentas de cálculo, definem-se os três objetivos de otimização a serem maximizados:

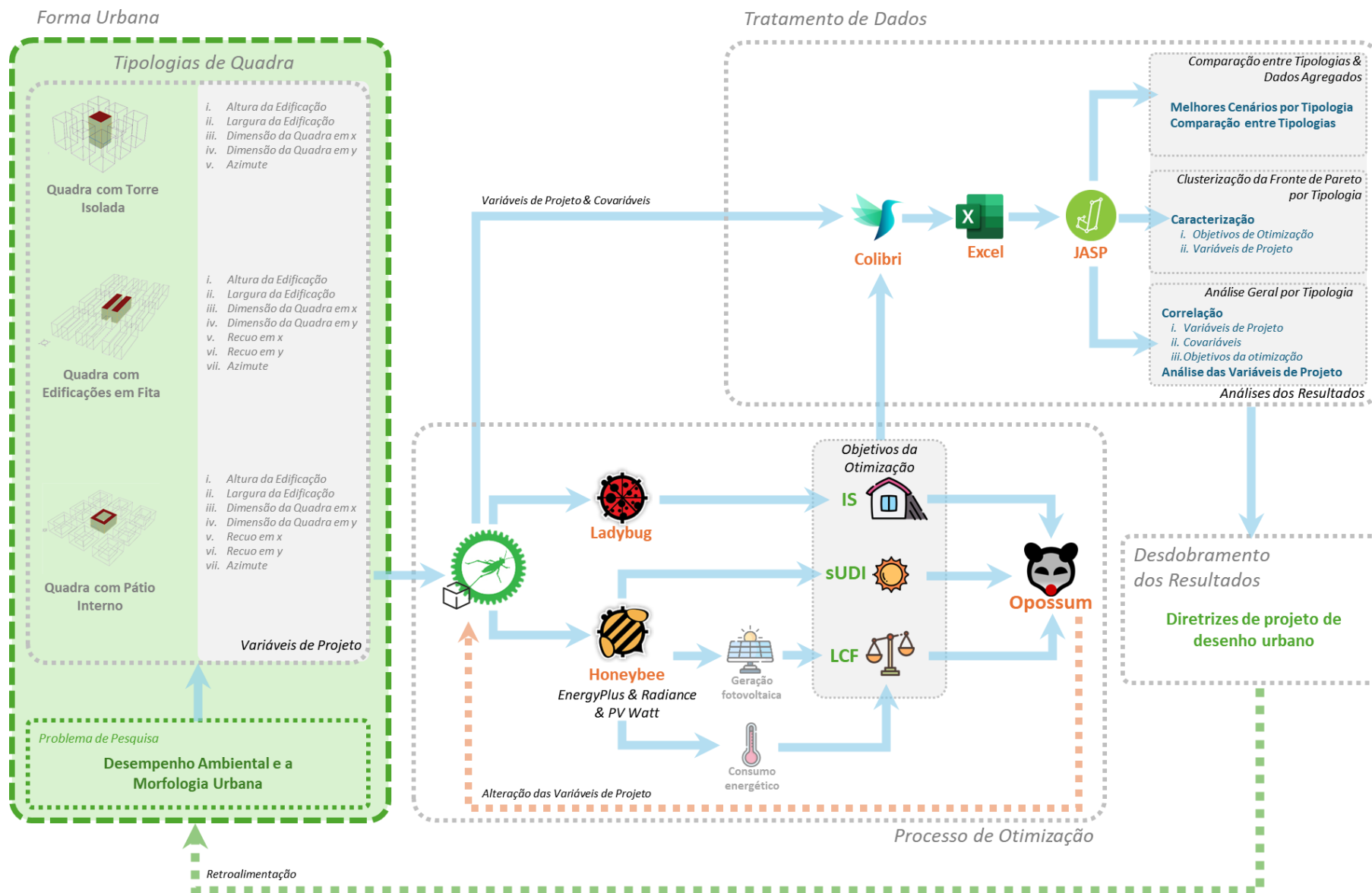
- i. Índice de Sombra Médio Ponderado (IS);
- ii. *Spatial Useful Daylight Illuminance* (sUDI);
- iii. *Load Cover Factor* (LCF).

Todos os três objetivos de otimização visam a maximização e possuem o mesmo intervalo – pois são porcentagens –, o que elimina a necessidade de normalização e outros ajustes para o melhor desempenho do processo de otimização. Adicionalmente, o *Load Cover Factor* (LCF) é um indicador que expressa o balanço energético e agrega os dados de geração e consumo de energia, provenientes do *PVWatt* e *EnergyPlus*, respectivamente.

Por fim, na etapa de Processo de Otimização, caracteriza-se o processo de otimização em si. Este processo utiliza o *plug-in Opossum*, que emprega o algoritmo de busca RBF, que usa técnicas de aprendizagem de máquina no processo de investigação dos melhores cenários.

Já a terceira etapa, realiza o tratamento dos dados coletados na etapa anterior, com o emprego do *plug-in Colibri*, que exporta os dados para planilhas eletrônicas. Estrutura-se a etapa de tratamento e análise dos dados em três sub-etapas ou atividades: i. Análise geral por tipologia; ii. Análise dos *clusters* da Frente de Pareto por tipologia; e iii. Análise comparativa entre tipologias e dos dados agregados.

Figura 28 – Digrama geral do método



Fonte: Autor (2022).

Na análise geral por tipologia busca-se investigar as relações gerais e padrões dentro da amostra para cada tipologia. Assim, realiza-se um estudo de correlação, com auxílio de uma matriz de correlação de r-Pearson das variáveis de projeto, covariáveis e objetivos de otimização. Também se investiga o desempenho dos objetivos de otimização para os diferentes níveis de cada variável de projeto.

Já a análise dos *clusters* da Fronte de Pareto para cada tipologia visa compreender o desempenho e características dos melhores cenários da otimização. Para isso realiza-se a definição da Fronte de Pareto – no Microsoft Excel – e posterior processo de clusterização – realizado no programa de análise estatística JASP – para agrupar esta frente em grupos mais com maior semelhança de resultados. A partir disso, realiza-se uma análise descritiva de cada um dos *clusters* das três tipologias.

Por fim na etapa de tratamento de dados, realiza-se uma agregação dos dados de todas as tipologias com intuito de comparação tipológica. Para isso, realiza-se a plotagem de gráficos *boxplot* com divisão de grupos pela tipologia para cada um dos três objetivos de otimização. Adicionalmente, realiza-se também um ranqueamento dos melhores cenários para os três objetivos de otimização, além do Volume Dominado, indicador relativo ao equilíbrio – ou *trade-off* – entre os objetivos

Na última etapa do método, realiza-se uma análise qualitativa dos resultados, que visa responder as questões de pesquisa mais qualitativas, referentes a problematização do tema de pesquisa sobre a forma urbana e o desempenho ambiental de forma mais abrangente e holística, que cria um processo de retroalimentação das questões de pesquisa. Neste sentido, esta etapa

está estritamente vinculada a discussão dos resultados, especial referente a forma urbana e o desempenho ambiental em si, a políticas urbanas e o emprego de técnicas computacionais para responder estas questões.

3.3 MATERIAIS

Neste item, apresentam-se os principais recursos empregados na pesquisa, especialmente os programas de modelagem e simulação.

3.3.1 *Grasshopper*

Grasshopper é um *plug-in Visual Programming Language (VPL)* ou *Interface (VLI)* para o programa de modelagem *Rhinoceros 3D*, que permite o desenvolvimento de *design* paramétrico. O *Grasshopper* funciona como um ambiente em que todos os passos e dados do modelo são exibidos. Isso permite o acesso ao histórico do modelo, bem como seus dados e, portanto, muitas automações e processos generativos. Desta forma, o *Grasshopper* permite a interoperabilidade entre diferentes ferramentas, através dos muitos complementos disponíveis. Dessa forma, funciona como uma caixa de ferramentas de projeto (Mackey; Sadeghipour Roudsari, 2017).

3.3.2 *Ladybug*

O *Ladybug Tools* é um conjunto de ferramentas complemento de análise ambiental para *Grasshopper*, e o que o torna uma das ferramentas mais populares para o *Grasshopper* porque é gratuito, de código aberto e flexível (Roudsari; Pak, 2013). Assim, o *Ladybug Tools* permite o acesso a muitas ferramentas ambientais, desde o acesso a dados ambientais, importação de arquivos *EnergyPlus Weather*

File (epw), suas visualizações, até a integração de *EnergyPlus* e *OpenStudio* para análise de energia, *Radiance* e *Daysim* para análise de luz do dia, *OpenFoam* para dinâmica dos fluidos – *Computational Fluid Dynamics* (CFD) –, *Therm* para análise de troca de calor, ENVI-met para análise de microclima³⁹, entre outros.

3.3.3 *EnergyPlus*

Com mais de 20 anos de existência, o programa de análise energética *EnergyPlus* é uma solução *open-source* desenvolvida pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos (Crawley *et al.*, 2001) nasce a partir da experiência acumulada em projetos anteriores, como DOE e BLAST. Altamente popular, o *EnergyPlus* representa o estado da arte de programa de simulação de análise energética (Wetter *et al.*, 2015). Contudo, é um programa estritamente de simulação, com interação exclusivamente textual, o que torna sua manipulação mais complexa e de mais difícil visualização (Crawley *et al.*, 2001). Para lidar com esta situação, diversos programas são empregados com interface gráfica ao *EnergyPlus*, como é o caso do *Ladybug Tools*, que o acessa indiretamente por meio do *OpenStudio*.

3.3.4 *Radiance*

De forma semelhante ao *EnergyPlus*, o *Radiance* é uma das soluções mais populares, porém para simulação da iluminação, com mais de 40 anos de existência. Desenvolvido e mantido pelo *Lawrence Berkeley National Laboratory* (LBNL), o *Radiance* é um programa *open-source* e possui vasta comunidade que

contribui com o seu aprimoramento. Dessa forma, emprega técnicas robustas da simulação física dos fenômenos óticos, capaz de fornecer dados quantitativos sobre a iluminação, como níveis de iluminância, uniformidade da luz e probabilidade de ofuscamento (Ward, 1994). Também de forma semelhante ao *EnergyPlus*, diversos programas são empregados com interface gráfica ao *Radiance*, como é o caso do *Ladybug Tools*.

3.3.5 *PVWatt*

O *PVWatts* é uma ferramenta desenvolvida pelo *National Renewable Energy Laboratory* (NREL) dos Estados Unidos, projetada para estimar a produção de energia elétrica de sistemas fotovoltaicos por meio de dados meteorológicos, características do sistema fotovoltaico e parâmetros de localização. Se caracteriza por ser uma ferramenta *web* que possui interface amigável, acessível e de fácil uso, contudo o mesmo código foi implementado dentro da versão *Legacy* do *Ladybug*.

3.3.6 *Opossum*

O *Opossum* é um *plug-in* para *Grasshopper*, uma plataforma de modelagem paramétrica para a realização de análise e otimização de desempenho de edificações. Desenvolvida por Wortmann e sua equipe na Universidade de Stuttgart, a ferramenta de otimização possibilita o emprego de diversos algoritmos de busca, além dos tradicionais algoritmos evolutivos empregados em outras soluções de otimização no campo da arquitetura. Dentre as opções disponíveis no *Opossum*, tem-se o algoritmo RBF, mais comumente empregado no campo da

³⁹ A interface para o ENVI-met só está disponível na versão *Legacy* do *plugin Ladybug*.

ciência da computação, que utiliza aprendizagem de máquina, por meio de *surugate model*, para guiar o processo de busca (Wortmann, 2017).

3.3.7 Versões dos principais programas e plug-ins

Apresentam-se as versões dos programas empregados na modelagem e simulação dos cenários investigados nesta pesquisa no Quadro 4.

Quadro 4 – Versões dos programas empregadas na modelagem e simulação

Programa	Versão
<i>Rhinoceros 3D</i>	7.34
<i>Grasshopper</i>	1.0
<i>Opossum</i>	3.0
<i>Ladybug Tools</i>	1.5
<i>Ladybug Legacy</i>	0.0.69
<i>EnergyPlus</i>	22.1
<i>OpenStudio</i>	3.4
<i>Radiance</i>	5.4
PVWatt	1.0

3.4 PROCEDIMENTOS

O procedimento funciona como um detalhamento adicional do método, explica as atividades em maiores detalhes, com intuito de auxiliar sua replicabilidade. Neste sentido, enquanto o método apresenta uma visão mais geral, ou estratégica da pesquisa, os procedimento tem um olhar mais tático, como sugerem Groat e Wang (Groat; Wang, 2013). Desta forma, esta seção organiza-se da seguinte forma:

- i. **Caracterização das variáveis de projeto das tipologias de quadra**, que explica a configuração do modelo paramétrico das três tipologias e conseqüentemente os cenários possíveis;
- ii. **Caracterização dos procedimentos de simulação**, que detalha as configurações da modelagem de simulação dos indicadores de desempenho, além dos procedimentos de cálculo;
- iii. **Caracterização dos procedimentos de otimização**, que apresenta as configurações empregadas no algoritmo de busca;
- iv. **Caracterização dos outros indicadores ou covariáveis**, que apresenta e explica o procedimento de cálculo desses indicadores que não são caracterizados nem como *input* – as variáveis de projeto – nem como *outputs* – objetivos de otimização –;
- v. **Caracterização do tratamento e análise dos dados**, que explica as atividades realizadas no tratamento de dados.

3.4.1 Caracterização das variáveis de projeto das tipologias de quadra

Cada tipologia de quadra de uso exclusivamente residencial caracteriza-se por um conjunto específico de variáveis de projeto relacionadas aos aspectos morfológicos, que podem ser caracterizadas como os *inputs* ou *genes* do processo de otimização. essas características morfológicas variáveis são os elementos básicos da modelagem paramétrica e o que permite a criação automatizada dos diversos cenários de quadras urbanas. A seguir, detalham-se as variáveis

morfológicas de projeto para cada tipologia de quadra, assim como seus respectivos níveis, ou valores que podem assumir.

i. Quadra com torre isolada

A quadra com torre isolada e planta quadrada é a morfologia mais simples das tipologias de quadras estudadas, o que explica o número de variáveis e níveis reduzidos. Isso acarreta um número de cenários possíveis, ou universo de soluções projetuais, reduzidos, inferior as demais tipologias. A Figura 29 apresenta as cinco variáveis de projeto e seus respectivos níveis, assim como os valores iniciais e finais, além do número total de cenários possíveis resultantes da combinação das variáveis.

O Número de Andares da Edificação varia de 5 a 30 andares, em incremento de 5 andares, e desta forma possui 6 níveis. Já a Profundidade da Edificação possui 7 níveis, que variam de 10 a 40 metros também em incrementos de 5 metros. As dimensões de quadra em ambos os eixos – x e y – são idênticas, com cinco níveis que variam de 40 a 100 metros em incrementos de 20 metros. Não há um *input* de recuo, visto que essa característica é consequência da relação entre profundidade da edificação e dimensão das quadras.⁴⁰ Por fim, tem-se o azimute, que para a tipologia de quadra com torre isolada assume somente dois valores, ou níveis, 0° e 45°, visto que outros valores em incrementos de 45°⁴¹ criam situações idênticas já obtidas pelos dois primeiros azimutes. Isto é consequência direta da morfologia, com os quatro lados iguais. A combinação de todas as variáveis e seus respectivos níveis possibilita a criação de 1.344 cenários, número

⁴⁰ A modelagem da torre parte do ponto central da quadra, então o recuo lateral em cada eixo pode ser calculado pela subtração da dimensão da quadra daquele eixo pela Profundidade da Edificação e posterior divisão por 2.

relativamente baixo, que assim possibilitaria simular todos os cenários ao invés do emprego de processo de otimização.

Figura 29 – Variáveis morfológicas de projeto e seus níveis para tipologia de quadra com torre isolada



ii. Quadra com edificações em fita

A tipologia de quadra com Edificações em Fita possui o maior número de cenários possíveis na presente tese. A Figura 30 apresenta as 7 variáveis de projeto

⁴¹ Na pesquisa emprega-se incremento de 45° para variáveis de projeto azimute em todas as tipologias.

e seus respectivos níveis, assim como os valores iniciais e finais, além do número total de cenários possíveis resultantes da combinação das variáveis.

O Número de Andares da Edificação varia de 5 a 30 andares, em incremento de 5 andares, e desta forma possui 6 níveis, características idênticas a tipologia de quadra com torre isolada. Já a Profundidade da Edificação possui cinco níveis, que variam de 10 a 30 metros também em incrementos de 5 metros. Esta tipologia não possui um *input* específico para as dimensões da quadra, pois essas características são conseqüências de outras variáveis de projeto⁴². O Comprimento da Edificação possui quatro níveis de 40 metros a 100 metros em incrementos de 20 metros. Por sua vez, a Largura Adicional da Quadra, que funciona como um recuo lateral, possui 6 níveis que variam de 0 a 25 metros em incrementos de 5 metros. A distância Frontal entre as Edificações, se refere a distância entre a edificação em fita com o bloco da quadra vizinha, enquanto a Distância Posterior entre as Edificações se refere a distância entre edificações em fita dentro da quadra. Em ambos os casos estas variáveis possuem 7 níveis que variam de 10 a 80 metros com incrementos de 10 metros. Por fim, o azimute possui quatro níveis, em incrementos de 45° e assim variam de 0° a 135°. Desta forma, a combinação de todos os noveis das respectivas variáveis acarreta 141.120 cenário possíveis.

Figura 30 – Variáveis morfológicas de projeto e seus níveis para tipologia de quadra com edificação em fita



141.120 combinações

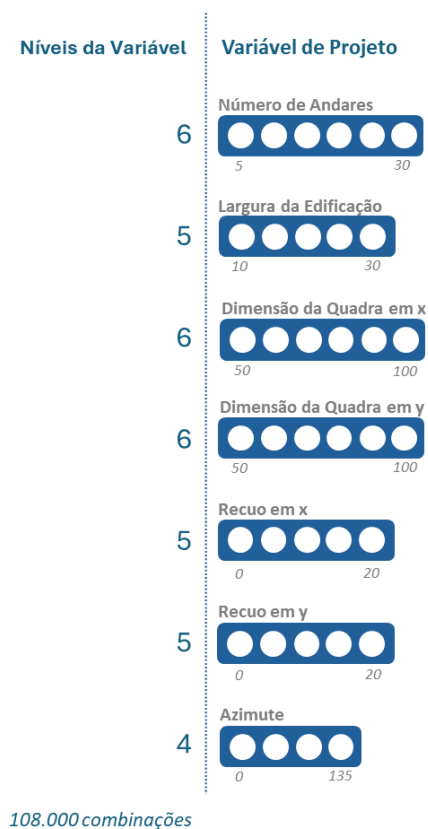
⁴² As dimensões de quadra podem ser calculadas pela soma do Comprimento da Edificação e Largura Adicional da Quadra em um sentido, e pelo somatório de duas Profundidades da Edificação com as duas Distâncias entre Edificações. Essas características são capazes de caracterizar melhor a morfologia, o

que evidência como este tipo de tipologia tem menor relação com a questão da quadra e da rua, como mencionado a respeito da crítica ao urbanismo modernista no item

iii. Quadra com pátio interno

A Figura 30 apresenta as 7 variáveis de projeto e seus respectivos níveis, assim como os valores iniciais e finais, além do número total de cenários possíveis resultantes da combinação das variáveis da tipologia de quadra com pátio interno.

Figura 31 - Variáveis morfológicas de projeto e seus níveis para tipologia de quadra com pátio interno



O Número de Andares da Edificação varia de 5 a 30 andares, em incremento de 5 andares, e desta forma possui 6 níveis, características idênticas a as demais tipologias de quadra. Já a Profundidade da Edificação possui cinco níveis, que variam de 10 a 30 metros também em incrementos de cinco metros – mesma caracterização da tipologia de quadra com edificações em fita. As dimensões de quadra em ambos os eixos – x e y – são idênticas, com 6 níveis que variam de 50 a 100 metros em incrementos de 10 metros. Os recuos entre as edificações e o limite das quadras também possuem caracterização idênticas entre si para cada um dos dois eixos – x e y –, com cinco níveis que variam de 0 a 20 metros e assim têm incremento de 5 metros. Por fim, o azimute possui quatro níveis, em incrementos de 45° e assim variam de 0° a 135°. Desta forma, a combinação de todos os níveis das respectivas variáveis acarreta 108.000 cenários possíveis.

3.4.2 Caracterização dos procedimentos de simulação

A seguir apresentam-se os procedimentos de modelagem e simulação dos indicadores de desempenho. Assim, apresentam-se os indicadores de desempenho do conforto térmico do pedestre, especialmente o Índice de Sombra e suas variantes, para iluminação natural que emprega o *spatial Useful Daylight Illuminance* (sUDI), além do consumo energético e geração fotovoltaicas, que são as bases para o cálculo do balanço energético, como o *Load Cover Factor* (LCF).

i. Simulação conforto térmico do pedestre

A análise do conforto térmico do pedestre é um procedimento complexo, pois envolve diversas variáveis. A análise do conforto térmico do ambiente urbano é um campo específico de pesquisa e possui uma vasta diversidade de indicadores. Habitualmente, há grande apreço pela alta fidelidade desses indicadores, que

almejam equacionar de forma adequada todos os fenômenos presentes do conforto térmico do pedestre. Contudo, no caso da simulação destes fenômenos, isso está atrelado a altíssimos custos computacionais. Desta forma, há um crescente interesse por soluções simplificadas, com menor custo computacional, que possam servir de *proxy*, ou aproximação destes indicadores de conforto térmico do pedestre (Natanian; Auer, 2020; Natanian; De Luca; Naboni, 2022). Neste sentido há crescente interesse por indicadores, como o Índice de Sombra, que podem ser calculados com grande agilidade e lidam principalmente o desconforto por calor – elemento especialmente importante em países tropicais e com o aumento das temperaturas globais – e está alinhado com a alta influência da radiação solar e do céu (Mackey *et al.*, 2015). Estes indicadores, apesar de analisar diretamente somente o período diurno, também contribui para a condição de conforto no período noturno, visto que parte do efeito de ilha de calor noturno se deve ao ganho de calor proveniente da carga térmica de radiação direta.

A seguir neste item, realiza-se a caracterização do processo de simulação do Índice de Sombra e suas variantes; que inclui o processo de modelagem e simulação, além da forma de agregação dos dados e fórmulas utilizadas.

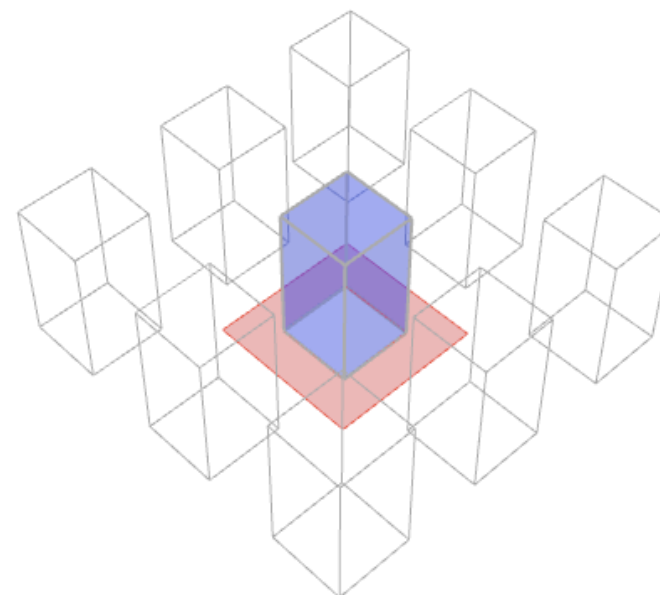
a. Caracterização geral do modelo

O estudo de sombras realiza-se por meio do componente do *Ladybug Tool SunHours* que calcula a insolação direta em um plano ou malha de pontos. Como não é contabilizada a reflexão dos raios de luz, não há definição dos materiais superficiais. Dessa forma, o cálculo considera a morfologia geral das quadras e edificações.

Para esse fim, define-se a área de avaliação a insolação na área da quadra – descontadas as superfícies da projeção das edificações – assim como fração

equivalente da caixa da rua e calçadas – até o eixo central –, área demarcada em vermelho na Figura 32.

Figura 32 – Área de avaliação do Índice de Sombra da quadra central

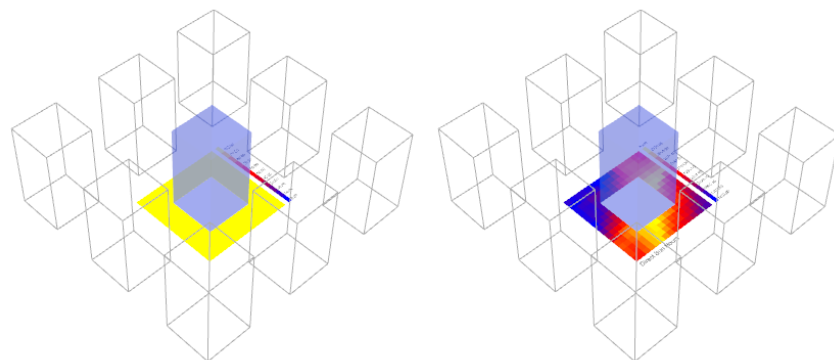


Dois indicadores de Índices de Sombras são calculados no presente trabalho: Índice de Sombra Médio e Índice de Sombra Ponderado, método semelhante ao empregado por Natanian e coautores (Natanian; Aleksandrowicz; Auer, 2019; Natanian; Auer, 2020; Natanian; De Luca; Naboni, 2022).

b. Índice de Sombra Médio

O Índice de Sombra Médio (ISm) contempla todas as horas com insolação do ano, sem distinção da condição de conforto térmico – se há desconforto por frio ou calor. Dessa forma, o cálculo de insolação é realizado duas vezes: uma sem obstrução do entorno, para definição do total de horas possíveis de insolação, e outra com o entorno, para obtenção dos valores reais de insolação. Emprega-se um *grid* de pontos com espaçamento de 5,0 m, adequado a modulação da modelagem paramétrica. A Figura 33 apresenta mapa plotado com as duas condições de insolação.

Figura 33 – Exemplo comparativo entre horas de insolação com e sem obstrução



A diferença entre o total de horas com insolação sem obstrução e as horas com insolação com o entorno fornece a quantidade de horas de sombra em

determinado ponto. Dessa forma o Índice de Sombra para um ponto é calculado pela divisão dessa diferença pelo total de horas com insolação sem obstrução e multiplicado por 100 para transformação em porcentagem, como demonstra a equação a seguir. Esses valores podem ser plotados de forma semelhante aos mapas anteriores, conforme apresenta a Figura 34, com em escalas de cinza.

Equação 2 - Fórmula do Índice de Sombra para cada ponto

$$IS = \frac{HLS_D - HLS_C}{HLS_D} \times 100$$

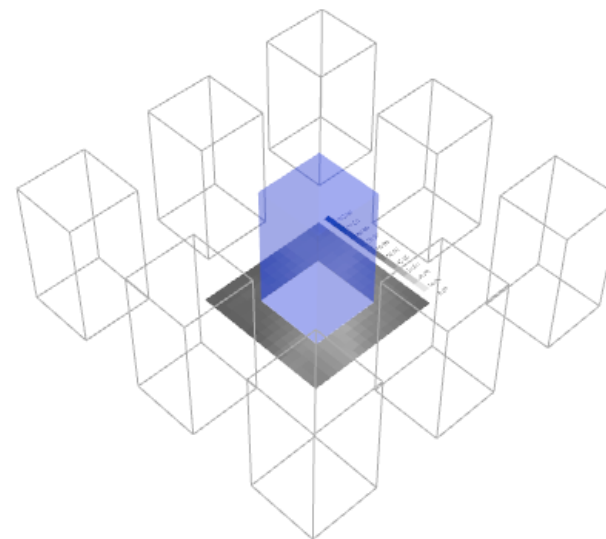
Em que:

IS: Índice de Sombra (%)

HLS_D: Horas de Luz Solar (direta, sem contexto) (h)

HLS_C: Horas de Luz Solar (com contexto) (h)

Figura 34 – Mapa exemplo do Índice de Sombra



Por fim, para obtenção de um indicador único para o cenário é calculada a média do Índice de Sombras de cada ponto, denominado Índice de Sombra Médio (IS_m), conforme fórmula da Equação 3 a seguir.

Equação 3 – Fórmula do Índice de Sombra Médio

$$IS_m = \frac{\sum_n IS}{n}$$

Em que:

IS_m: Índice de Sombra Médio (%)

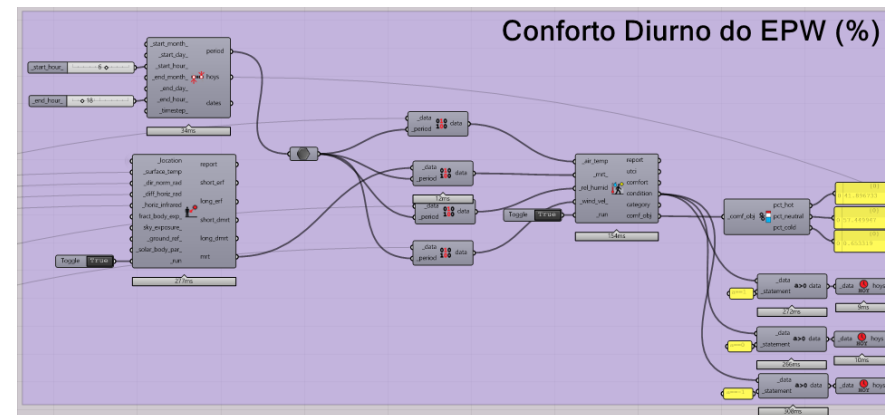
IS: Índice de Sombra (%)

n: número total de pontos avaliados

c. Índice de Sombra Ponderado

Já o Índice de Sombra Ponderado (ISp) busca contemplar a influência das condições climáticas na sua equação. Dessa forma, avaliam-se somente as horas de insolação em que existe desconforto por calor ou frio de acordo com o *Universal Thermal Comfort Index* (UTCI) para os dados do arquivo climático. Para esse fim, emprega-se a temperatura do ar, umidade relativa e velocidade do vento disponível no arquivo climático. Já para o cálculo da temperatura radiante média, considera-se equilíbrio térmico entre a temperatura superficial e temperatura do ar, além de empregar irradiação solar normal direta, irradiação solar horizontal difusa e radiação infravermelho horizontal. De forma semelhante ao cálculo do Índice de Sombra Médio (IS_m) avaliam-se somente os horários diurnos, das 6 h às 18 h. A Figura 35 apresenta a definição de *Grasshopper* com *Ladybug Tools* empregada.

Figura 35 – Definição do *Grasshopper* do cálculo da ponderação de desconforto por frio e calor



A partir da definição das horas do ano em que ocorre desconforto por frio ou calor realiza-se procedimento semelhante ao Índice de Sombra Médio (IS_m), só que para os dois contextos, de desconforto por calor e frio. Assim, calcula-se o total de horas possíveis de insolação sem contexto tanto para desconforto por frio e calor e as horas insolação reais, com contexto, para os dois tipos de desconforto. A Equação 4 apresenta o cálculo do Índice de Sombra para períodos de desconforto por calor e frio. De forma semelhante ao estudo de Índice de Sombra Médio, emprega-se uma malha de pontos de 5 metros.

Equação 4 – Fórmula do Índice de Sombra para frio ou calor para cada ponto

$$IS_{C \text{ ou } F} = \frac{HLS_D - HLS_C}{HLS_D} \times 100$$

Em que:

$IS_{C \text{ ou } F}$: Índice de Sombra para desconforto por calor ou frio (%)

HLS_D : Horas de Luz Solar (direta, sem contexto) para frio ou calor (h)

HLS_C : Horas de Luz Solar (com contexto) para frio ou calor (h)

Parte-se do princípio de que o sombreamento é desejável em situações de desconforto por calor, enquanto o inverso é preferível para o desconforto por frio. Dessa forma, o Índice de Sombra para as horas de calor para cada ponto possui sinal positivo, enquanto para as horas de frio o sinal é negativo. Assim, o Índice de Sombra Ponderado para cada ponto é obtido por meio da divisão do total de horas avaliadas pela diferença entre o Índice de Sombra de calor e frio, como apresenta a Equação 5 a seguir.

Equação 5 – Fórmula do Índice de Sombra Ponderado

$$IS_{pp} = \frac{IS_C - IS_F}{H_C + H_F}$$

Em que:

IS_{pp} : Índice de Sombra Ponderado por ponto (%)

IS_C : Índice de Sombra para desconforto por calor (%)

IS_F : Índice de Sombra para desconforto por frio (%)

H_C : Horas Totais em desconforto por calor (h)

H_F : Horas Totais em desconforto por frio(h)

Por fim, para obtenção de um indicador único para o cenário calcula-se a média do Índice de Sombras Ponderado de cada ponto (Eq), denominado Índice de Sombra Médio Ponderado (IS_{mp}), com fórmula na Equação 6 a seguir.

Equação 6 – Fórmula do Índice de Sombra Médio Ponderado

$$IS_{mp} = \frac{\sum_n IS_{pp}}{n}$$

Em que:

IS_{mp} : Índice de Sombra Médio Ponderado (%)

IS_{pp} : Índice de Sombra Ponderado por ponto (%)

n: número total de pontos avaliados

ii. Simulação iluminação natural

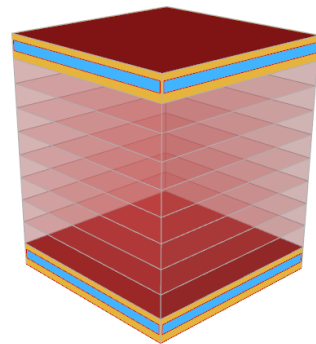
Este item apresenta a caracterização da simulação da iluminação natural, que emprega o programa *Radiance*. Para este fim, apresenta-se a caracterização do modelo, dos materiais, processos de simulação. Além disso apresenta-se o procedimento de cálculo para definição do indicador de desempenho da iluminação natural, especificamente o *spatial Useful Daylight Illuminance* (sUDI).

a. Caracterização de geral do modelo

Para a avaliação da iluminação natural anual, emprega-se o método de duas fases que permite a avaliação de indicadores baseados no clima, como o *Useful Daylight Illuminance* (UDI). Contudo, em virtude do custo computacional de simulações anuais baseadas no clima no *Radiance*, avaliam-se somente as duas condições extremas de exposição, o primeiro e último andares dos edifícios analisados – como mostra a Figura 36, com o exemplo do cenário de uma torre de 10 andares. Dentro de cada andar não subdivisões espaciais com paredes internas.

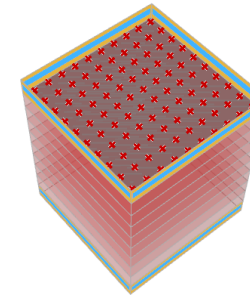
As janelas são contínuas, com peitoril de 1,0 m e altura de 1,2 m, o que caracteriza um percentual de abertura de fachada de 40%, valor máximo permitido em normas internacionais, como ASHRAE 90.1 (ASHRAE, 2019).

Figura 36 – Andares avaliados pela simulação da iluminação natural



O plano de análise encontra-se a 0,8 m de altura em relação ao piso e o *grid* de sensores possui espaçamento de 2,5 metros, modulação compatível com as dimensões das edificações, que têm módulo de 5,0 metros, como pode ser visto na Figura 37.

Figura 37 – Disposição do *grid* de sensores em um andar



b. Caracterização dos materiais

Os materiais superficiais das paredes internas, externas, piso, teto e telhado do modelo simulado foram caracterizados de forma idêntica, com cor intermediária, com refletância de 0,4 para as três bandas (vermelho, verde e azul), ou uma absorvância de 0,6. A especularidade e rugosidade desse material mantem-se nos valores *default* do *Ladybug Tools*, em 0,0 para ambos, valores típicos de materiais denominados plásticos⁴³ no *Radiance*, que contemplam grande parte das tintas empregadas na construção civil.

De forma semelhante, o entorno é caracterizado com o mesmo material superficial. A Tabela 2 apresenta o resumo da caracterização dos materiais opacos.

⁴³ Os materiais denominados plásticos no *Radiance* contemplam grande parte dos materiais opacos e habitualmente possuem valores baixos de especularidade e rugosidade, próximos a zero, diferentemente dos materiais denominados metálicos.

Tabela 2 – Caracterização das propriedades óticas das superfícies opacas

Superfícies	Refletância em RGB	Especularidade	Rugosidade
Parede Interna	0,4	0,0	0,0
Parede Externa	0,4	0,0	0,0
Piso Interno	0,4	0,0	0,0
Teto	0,4	0,0	0,0

Já as aberturas possuem vidro simples de 3 mm, comumente empregado na construção civil brasileira, com transmissão luminosa de 0,87. O índice de refração aplicado é de 1,52, valor *default* do *Ladybug Tools*. A Tabela 3 a seguir apresenta essas características.

Tabela 3 - Caracterização das propriedades óticas dos elementos translúcidos

Componente Construtivo	Transmissão Luminosa (W/W)	Índice de Refração
Vidro Simples 3 mm	0,87	1,52

c. Caracterização do período de análise

A avaliação se restringe ao período diurno para todos os dias da semana. De forma semelhante a proposta de revisão da avaliação de desempenho lumínico da NBR 15.575, avaliam-se 10 horas diárias, das 8 h às 18 h.

d. Caracterização da simulação

Por ser uma simulação anual com a geração do céu a partir de arquivo climático, emprega-se a técnica de *flux transfer matrix* (rfluxmtx) que por realizar

um registro dos raios que chegam às superfícies, evita cálculos redundantes e agiliza o processo de computação (Ward, [s. d.]).

Em virtude de ser um estudo de projeto preliminar, assim como para reduzir os custos computacionais, emprega-se o nível de detalhe baixo de configuração dos parâmetros de simulação, com três reflexões por raio e 5.000 subdivisões do ambiente. A Tabela 4 detalha os parâmetros empregados no *Radiance*.

Tabela 4 – Parâmetros de configuração de simulação do *Radiance*

Parâmetro	Valor
<i>ambient bounces (-ab)</i>	3
<i>ambient divisions (-ad)</i>	5000
<i>ambient super-samples (-as)</i>	128
<i>direct certainty (-dc)</i>	0.25
<i>direct pretest density (-dp)</i>	64
<i>direct relays (-dr)</i>	0
<i>source substructuring (-ds)</i>	0.5
<i>direct thresholding (-dt)</i>	0.5
<i>limit reflection (-lr)</i>	4
<i>Limit weight (-lw)</i>	2e-06
<i>specular threshold (-st)</i>	0.85

Para padronizar os dados climáticos utilizados, empregou-se somente o arquivo climático indicado pela norma de desempenho (ABNT, 2021), do Instituto

Nacional de Meteorologia (INMET) para a cidade de Brasília, pertencente ao clima tropical de altitude.

e. Indicador de iluminação

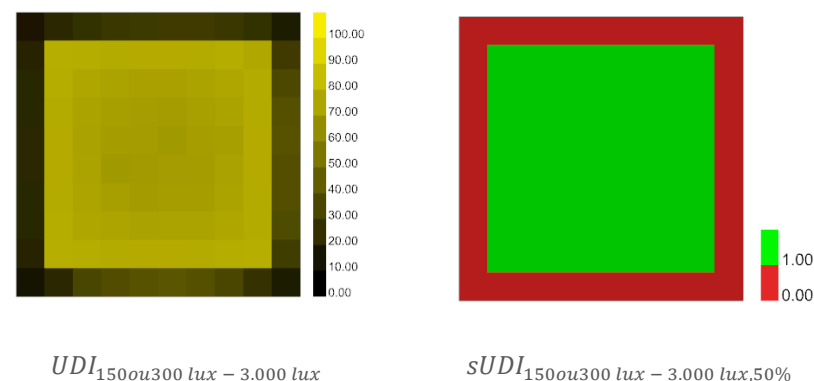
Emprega-se o indicador baseado no clima *Useful Daylight Illuminance* (UDI) para a avaliação da iluminância para os períodos diurnos de todos os dias de um ano típico. Esse indicador baseado no clima (*Daylight Climate-based Metrics*) desenvolvido por Nabil e Mardaljevic (Nabil; Mardaljevic, 2006) calcula a porcentagem de horas que determinado sensor (ou ponto) recebe uma quantidade de iluminância dentro de um intervalo específico. Diferentemente do *Daylight Autonomy* (DA) que possui apenas um limite inferior de iluminância aceitável, o UDI possui dois limites, inferior e superior, e assim avalia não só a iluminância insuficiente, como também a iluminância excessiva, que pode estar acarretar ofuscamento e superaquecimento. Nesta pesquisa, os valores empregados para o UDI são de 150 lux para o limite inferior e 3.000 lux para o limite superior, conforme apresenta a Tabela 5. O limite superior é baseado na orientação de Mardaljevic (Mardaljevic *et al.*, 2012), autor do indicador, enquanto os limites inferiores seguem valores de iluminância para sala de estar de acordo com a NBR/CIE 8.995 (ABNT, 2013).

Tabela 5 – Valores dos limites de iluminância de UDI

Tipo de Uso	Limite inferior (lux)	Limite superior (lux)
Residencial	150	3.000

Entretanto, os valores de UDI representam resultados para um único ponto ou sensor e assim não representam um indicador para o ambiente. Dessa forma, adota-se uma abordagem semelhante à utilizada no conceito de *spatial Daylight Autonomy* (sDA), que estabelece um limiar mínimo de tempo para considerar um determinado sensor como aceitável. A partir disso, calcula-se a porcentagem da área do piso considerada com autonomia de iluminância. No caso do presente estudo, emprega-se o valor de 50% do período avaliado, semelhante as metodologias de *spatial Daylight Autonomy* (sDA) da versão atualizada da NBR 15.575 (ABNT, 2021) e do LEED (LEED, 2019), para a determinação do indicador que neste trabalho denomina-se *spatial Useful Daylight Illuminance* (sUDI), abordagem semelhante a Fela e coautores e Mohammadi e coautores (Fela *et al.*, 2019; Mohammadi; Mofidi; Tahbaz, 2020). A Figura 38 apresenta a comparação entre o mesmo cenário analisado com UDI e sUDI.

Figura 38 – Exemplo de mapa comparativo entre UDI e sUDI



iii. Simulação geração fotovoltaica

O presente item trata da simulação do potencial de geração fotovoltaica por meio do programa PVWatt. Para este fim, apresenta-se a forma de definição das superfícies com potencial para instalação de módulos fotovoltaicos, caracterização dos módulos fotovoltaicos e detalhamento dos dados de simulação e procedimento de cálculo do indicador de geração de energia fotovoltaica. Além disso apresenta-se o procedimento de cálculo para definição do dado normalizado de geração de energia fotovoltaica.

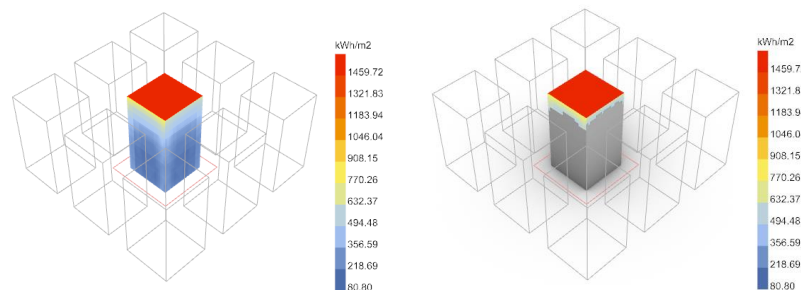
a. Definição das superfícies

Para a definição das superfícies da envoltória passíveis de receberem módulos fotovoltaicos é realizado um estudo de radiação simples para todo o ano que contempla o sombreamento das edificações do entorno. A avaliação da radiação incidente nas edificações da quadra central é realizada por meio do *Ladybug Tools* que permite o cálculo da radiação direta, do sol e do céu somente, com auxílio da matriz acumulativa do céu. No presente estudo emprega-se o modelo de céu de Tregenza (Tregenza, 1987), com 64 fragmentos. O *grid* de análise é de 2 metros e o albedo é de 0,2 W/W.

Todos os pontos com irradiação incidente igual ou superior a 800 kW/m².ano são considerados aptos para geração fotovoltaicas, valor de referência empregado em outros estudos semelhantes (Natanian; De Luca; Naboni, 2022). Realiza-se este processo de filtragem de forma automática pelo componente *Threshold Selector* do *Ladybug Tools*. A Figura 39 apresenta um estudo de irradiação incidente direta (à direita) e somente as superfícies selecionadas (à esquerda). Contudo, esta técnica de filtragem de superfícies só se mostrou viável na tipologia de quadra com torre isolada em virtude da fragmentação das superfícies do *mesh*

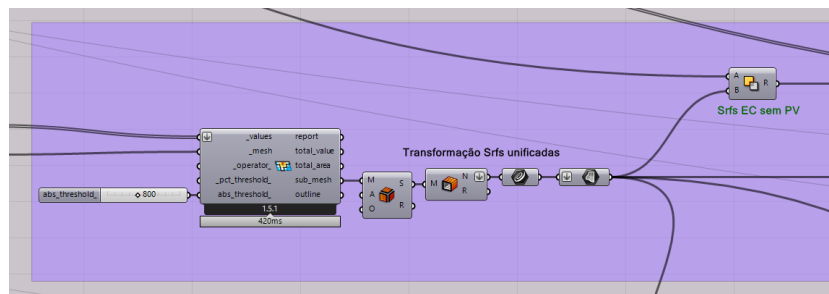
e da quantidade variável de superfícies de cobertura. Desta forma, nas outras duas tipologias de quadra – quadra com edificação em fita e quadra com pátio interno – considera-se somente a cobertura para instalação de módulos fotovoltaicos.

Figura 39 – Estudo de irradiação e seleção das áreas com valores mínimos de irradiação



Para evitar o grande número de pequenas faces a serem simuladas nas etapas subsequentes, realiza-se um processo de agregação das faces contínuas por meio da definição apresentada na Figura 40, que emprega componentes do *plugin Pufferfish*. Também para obter superfícies mais limpas e menos fragmentadas em virtude dos custos computacionais, ignoram-se as áreas envidraçadas. Entretanto, estas áreas que não recebem módulos fotovoltaicos são descontadas posteriormente no processo de simulação do PVWatt.

Figura 40 – Determinação de Grasshopper para agregação das faces acima do limite de irradiação



b. Caracterização do sistema fotovoltaico

O sistema fotovoltaico empregado consiste em módulos monocristalinos de silicônio (c-Si) com eficiência de 15%. A Tabela 6 apresenta o resumo destas informações.

Tabela 6 - Caracterização do sistema de geração fotovoltaico

Tipo do Módulo	Eficiência do Módulo (%)	Coefficiente de Temperatura (%/°C)	Fator de Rebaixamento DC/AC (%)
Monocristalino de Silicônio (c-Si)	15	-0,5	85

c. Caracterização da Simulação

Emprega-se o programa PVWatt para realização dos cálculos de potencial de geração fotovoltaica, que considera as condições climáticas e espaciais. Para isso, o programa considera uma porcentagem da superfície para a instalação dos

módulos fotovoltaicos. Assim, em virtude de aspectos técnicos e legais, não se considera a ocupação total da superfície com módulos fotovoltaicos, portanto, assume-se que o cobrimento seja de 90%. Entretanto, nas fachadas é necessário descontar a área envidraçada que é de 40%. Dessa forma, nas fachadas a taxa de cobrimento é de 54%, relativo ao desconto de 10% aos 60% de área remanescente após a redução da área envidraçada. Estes valores para cobertura e fachadas estão descritos na Tabela 7.

Tabela 7 – Porcentagem de cobrimento de módulos fotovoltaicos por tipo de sistema de vedação

Sistema de Vedação	Porcentagem de Cobrimento de Envolória por Módulos (%)
Cobertura	90
Fachadas	54

Para padronizar os dados climáticos utilizados, empregou-se somente o arquivo climático indicado pela norma de desempenho (ABNT, 2021), do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) para a cidade de Brasília, pertencente ao clima tropical de altitude.

d. Caracterização do coeficiente de sombra

Para contabilizar o impacto de elementos do entorno na geração de energia fotovoltaica, o PVWatt realiza um cálculo de coeficiente de sombra baseado na trajetória solar. Realiza-se este procedimento com uma precisão geral de sombreamento de 50, o que corresponde a 2.500 análises de sombra por vetor

de insolação. Consideram-se os volumes das edificações do entorno, assim como as superfícies sem módulos fotovoltaicos como elementos de sombreamento. Ao invés de se analisar o coeficiente de sombras para as superfícies com módulos fotovoltaicos, analisam-se um *grid* de pontos espaçados a cada 10 m. O emprego das próprias superfícies acarretou num número excessivo de pontos de análise devido a fragmentação do *mesh* no processo de conversão, e assim a um tempo de computação elevado. Dessa forma, a geração do *grid* de pontos de forma separada trouxe maior controle e menor tempo de computação.

e. Indicador de Energia Gerada Normalizada

Para possuir um indicador que viabilize a comparação entre cenários neste estudo, é necessário que a energia gerada seja normalizada. Dessa forma, o total de energia renovável gerada pelos módulos fotovoltaicos instalados nas coberturas e fachadas é normalizado pela área construída das edificações da quadra, conforme apresenta Equação 7. Esse indicador pode ser agregado tanto a cada hora como para o ano todo a depender do método de cálculo do balanço energético.

Equação 7 – Fórmula da normalização da Energia Gerada pela Área Construída

$$Eg = \frac{E_{gt}}{A_c}$$

Em que:

Eg: Energia Gerada Normalizada (kWh/m².h ou kWh/m².ano)

Egt: Energia Gerada Total (kWh/h ou kWh/ano)

Ac: Área Construída Total da Quadra (m²)

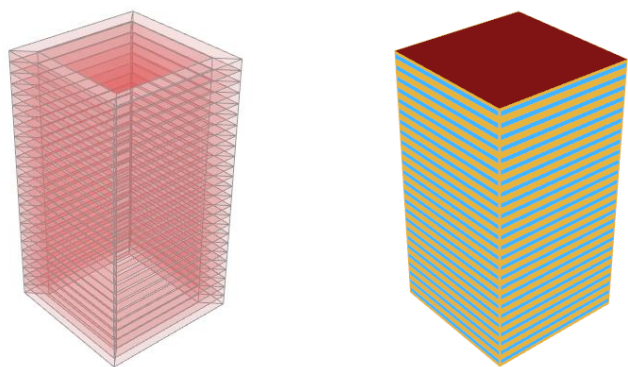
iv. Simulação do consumo energético

Este item apresenta a caracterização da simulação do consumo energético, que emprega o programa *EnergyPlus*. Para este fim, apresenta-se a caracterização geral da modelagem termoenergética, desde questões morfológicas, dos materiais até das zonas térmicas, com suas cargas e rotinas. Além disso apresenta-se o procedimento de cálculo para definição do balanço energético.

a. Caracterização geral

A modelagem termoenergética parte dos aspectos morfológicos das edificações para definição das zonas térmicas, que seguem o padrão da ASHRAE 90.1 (ASHRAE, 2019), com zonas perimetrais e centrais divididas por paredes de ar (*air walls*) para cada andar. A Figura 41 apresenta a representação com as cores tradicionais dos modelos termoenergéticos do *OpenStudio* e *Ladybug*, assim como uma representação da divisão das zonas térmicas. No presente estudo empregam-se as zonas perimetrais com valor máximo de profundidade, de 5,0 metros. No caso específico das tipologias de quadra com pátios internos também há uma subdivisão adicional nas arestas dos modelos para evitar superfícies não convexas. Já as aberturas seguem o mesmo padrão da simulação da iluminação natural, com janelas são contínuas, com peitoril de 1,0 m e altura de 1,2 m, o que caracteriza um percentual de abertura de fachada de 40%, valor máximo permitido em normas internacionais como ASHRAE 90.1 (ASHRAE, 2019). Além disso, caracterizam-se as edificações do entorno como *shading*.

Figura 41 – Geometria do modelo de *EnergyPlus* e a divisão em zonas térmicas



b. Caracterização dos sistemas construtivos

A caracterização termofísica dos sistemas construtivos opacos segue padrão construtivos nacionais de acordo com a NBR 15.220 (ABNT, 2005) , com parede de alvenaria de bloco cerâmico de 15 cm e laje com vigota e preenchimento de EPS de 12 cm. A Tabela 8 apresenta os dados de entrada empregados no *EnergyPlus* e estão de acordo com estudo de camada equivalente desenvolvido pelo LabEEE (Weber *et al.*, 2017).

Tabela 8 - Propriedades termofísicas dos componentes construtivos opacos

Componente Construtivo	Espessura (mm)	Densidade (Kg/m ³)	Calor Específico (J/Kg.K)	Condutividade Térmica (W/m.K)	Resistência Térmica (m ² .K/W)	
Parede de Alvenaria	<i>Reboco</i>	25,0	2000	1000	1,15	-
	<i>Cerâmica</i>	13,4	1600	920	0,90	-
	<i>Cavidade de Ar</i>	64,2	-	-	-	0,175
	<i>Cerâmica</i>	13,4	2000	1000	1,15	-
	<i>Reboco</i>	25,0	2000	1000	1,15	-
Piso (Térreo)	40,0	2200	1000	1,75	-	
Lajes	<i>Concreto</i>	40,0	2200	1000	1,75	-
	<i>EPS</i>	70,0	373	1000	223	-
	<i>Reboco</i>	25,0	2000	1000	1,15	-

Já os elementos translúcidos da envoltória possuem vidro simples de 3 mm, com caracterização termofísica e ótica de acordo com a Tabela 9.

Tabela 9 - Propriedades termofísicas e óticas do vidro

Componente Construtivo	Fator Solar (W/W)	Transmissão Luminosa (W/W)	Transmitância Térmica (W/m ² .K)
Vidro Simples 3 mm	0,87	0,87	5,3

c. Caracterização rotinas e cargas

Em virtude de os andares não possuírem detalhamento de *layout* – com subdivisão somente de zona central e perimetrais de acordo com a ASHRAE 90.1 – não é possível atribuir usos específicos, cargas e rotinas específicas. Dessa forma, emprega-se um padrão que represente em linhas gerais uma média de cargas e rotinas para ambientes residenciais e comerciais.

As cargas térmicas das zonas com uso residencial são baseadas no *template* do *EnergyPlus pre_1980::MidriseApartment::Apartment* com adaptações de acordo com o Regulamento Técnico de Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais (RTQ-R) para ambientes de estadia prolongada (INMETRO, 2013).

A Densidade de Potência Instalada (DPI) é de 6,0 W/m², enquanto a carga de tomadas é de 1,5 W/m², valores de acordo com o Regulamento Técnico de Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais (RTQ-R) para ambientes de estadia prolongada (INMETRO, 2013).

Já a densidade de ocupação é de 0,1 pessoa/m², o que representa 1 pessoa a cada 10 m², ou uma família de 4 pessoas em unidade habitacional de 40

m². Este valor pode ser considerado alto, mas busca-se melhor retratar a realidade da habitação popular, assim representar uma situação mais crítica de superaquecimento⁴⁴. A taxa metabólica é de 120 W/pessoa de acordo com o *template* do *EnergyPlus pre_1980::MidriseApartment::Apartment*.

A Tabela 10 a seguir apresenta o resumo da caracterização das cargas térmicas internas.

Tabela 10 – Caracterização das cargas internas

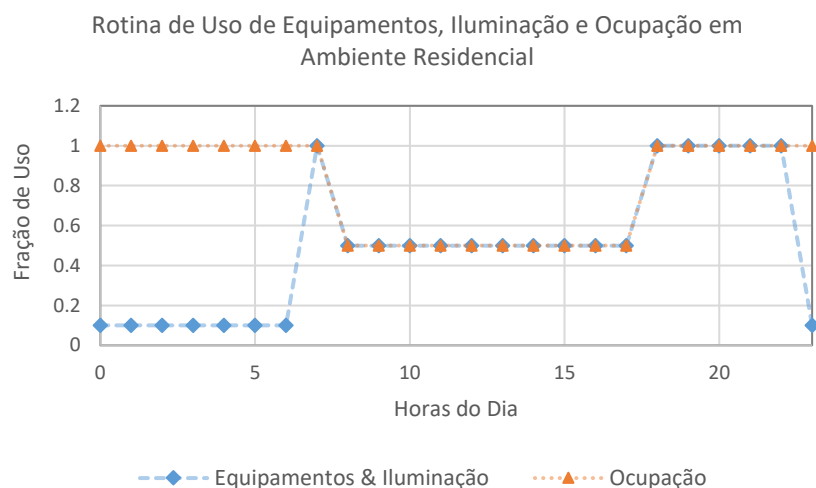
Ambiente	Ocupação (pessoas/m ²)	Taxa Metabólica (met)	Densidade de Potência Instalada (W/m ²)	Carga de Tomadas (W/m ²)
Residencial	0,1	120	6,0	1,5

As rotinas dos ambientes residenciais seguem uma ocupação e uso completa durante a noite, porém ao invés da baixa ocupação durante o dia – como atribuído no *template* do *EnergyPlus* – atribui-se um valor intermediário – de 50% – durante o dia, como mostra a Figura 42. Essa alteração visa refletir um padrão de uso e ocupação mais próximos ao existente pós-pandemia. Ademais, durante a madrugada, o consumo dos aparelhos – cargas de tomada – e iluminação é considerado baixo, mas não nulo, da mesma forma que é apresentada no *template*.

elevada acarreta um cenário mais crítico.

⁴⁴ A maior densidade de pessoas acarreta maior carga térmica de refrigeração, aspecto mais relevante na grande maioria dos contextos climáticos brasileiros. Dessa forma, uma taxa de densidade mais

Figura 42 – Gráfico de rotina de uso e ocupação diária para ambientes residenciais



Por fim, a taxa de infiltração é de $0,0006 \text{ m}^3/\text{s}$ por metro quadrado de fachada, valor considerado alto para padrões internacionais⁴⁵, com rotina constante.

d. Caracterização do condicionamento artificial e controle da iluminação artificial

O sistema de condicionamento artificial emprega o modelo *Ideal Loads* – a ou cargas ideais em tradução direta para o português – que representa os valores de carga térmica a serem retirados ou adicionados de acordo com os *setpoints* de

aquecimento e resfriamento. Este modelo de sistema de condicionamento virtual não contempla tipo de sistema de condicionamento nem níveis de eficiência. Dessa forma, para equacionar um Coeficiente de Performance (CoP) médio, realiza-se um cálculo simples de proporção.

No presente estudo, considera-se o Coeficiente de Performance (CoP) médio do aparelho de ar-condicionado de $3,6 \text{ W/W}$, valor de referência para etiqueta nível A para o ProcelEdifica (INMETRO, 2013), e de 1 W/W para o sistema de aquecimento. O *setpoint* de resfriamento é de 24° C , enquanto para o sistema de aquecimento é de 18° C e não há *setback*.

A iluminação artificial é controlada por sensores de forma aproximar o comportamento do usuário que desligaria as luzes enquanto houver iluminação natural suficiente. Os sensores são localizados no centro de cada zona térmica e o valor limite de referência é o mesmo do valor do limite inferior de UDI, de 150 lux para ambientes residenciais.

e. Arquivos climáticos

Para padronizar os dados climáticos utilizados, empregou-se somente o arquivo climático indicado pela norma de desempenho (ABNT, 2021), do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) para a cidade de Brasília, pertencente ao clima tropical de altitude.

f. Energia Consumida Normalizada

Total de energia consumida pelas edificações da quadra – o que inclui refrigeração, aquecimento, iluminação artificial e cargas de tomada – normalizada

como da norma *PassivHaus*, considerado nesse contexto hermético.

⁴⁵ O próprio *Ladybug Tools* indica três níveis de infiltração: hermético (*tight*) médio (*average*) e vazado (*leaky*). As construções brasileiras se encontram abaixo dos padrões de construções realizados em outros países, considerado o médio, que por sua vez é inferior a padrões construtivos mais exigentes,

pela área construída das edificações da quadra, conforme apresenta Equação 8. Esse indicador pode ser agregado tanto a cada hora ou para o ano todo a depender do método de cálculo do balanço energético.

Equação 8 – Fórmula da Energia Consumida Normalizada

$$E_c = \frac{E_{ct}}{A_c}$$

Em que:

Eg: Energia Consumida Normalizada (kWh/m².h ou kWh/m².ano)

Egt: Energia Consumida Total (kWh/h ou kWh/ano)

Ac: Área Construída Total da Quadra (m²)

v. Definição do Balanço Energético

a. Balanço Energético Simples

Um edifício com balanço energético nulo é comumente definido como um edifício de baixo consumo energético e que compensa este consumo com a geração de energia renovável em um intervalo de um ano⁴⁶. Dessa forma, pode-se assumir que a subtração da energia consumida pela gerada deve ser nula, ou zero. O balanço energético simples calcula a porcentagem da energia gerada em relação a energia consumida para um determinado intervalo, que no caso específico deste trabalho é um ano, conforme apresenta a equação:

⁴⁶ A definição do consumo pode variar de acordo com o limite do sistema, que pode contabilizar a energia consumida *in loco*, como também considerar a energia primária empregada na fonte geradora.

Equação 9 – Fórmula do Balanço Energético Simples

$$BEs = \frac{E_g}{E_c} \times 100$$

Em que:

BEs: Balanço Energético Simples (%)

Eg: Energia Renovável Gerada (kWh/m².ano)

Ec: Energia Consumida (kWh/m².ano)

A definição do consumo pode variar de acordo com o limite do sistema, que pode contabilizar a energia consumida *in loco*, como também a energia primária

b. Load Cover Factor

Existe uma série de indicadores para avaliação do balanço energético que contemplam maiores nuances do consumo e geração energética. O *Load Cover Factor* (LCF)⁴⁷ avalia a cobertura da energia gerada em intervalos de tempo (*timestep*) menores, o que permite analisar com maior precisão os picos de geração e consumo, assim como a independência em relação à rede elétrica. Habitualmente, em usos residenciais, percebe-se que o pico de geração, próximo ao meio-dia, é superior ao consumo, enquanto no período noturno não há geração, apesar de momentos com consumo considerável, como no início da noite. Nesse contexto, o *Load Cover Factor* (LCF) considera apenas a energia gerada que é consumida no mesmo momento, o que auxilia na compreensão da efetividade do uso da energia fotovoltaica, devido a sua maior resolução temporal. Desta

⁴⁷ Ou Índice de Cobertura de Carga em tradução direta.

forma é um dos indicadores mais recomendados para análise do balanço energético nulo (Salom *et al.*, 2014). A Equação 10 apresenta a forma de cálculo por meio de uma integral.

Equação 10 – Fórmula do Load Cover Factor

$$LCF = \int \frac{\min[Eg, Ec]}{Ec} \times 100$$

Em que:

LCF: Load Cover Factor (%)

Eg: Energia Renovável Gerada (kWh/m².ano)

Ec: Energia Consumida (kWh/m².ano)

A integral pode ser compreendida pela área existente entre a curva da função da variável e a abscissa. Ao considerar os *timesteps* das ferramentas de cálculo, a área de cada uma das funções pode ser traduzida em gráficos de barras. Assim, a soma de cada barra representa a área do gráfico. No presente trabalho, utiliza-se a simplificação da Equação 10, com a realização de uma operação condicional para cada *timestep*, na presente pesquisa, em intervalos horários. A Equação 11 apresenta a relação lógica que é empregada no *Grasshopper*.

Equação 11 – Relação lógica simplificada do Load Cover Factor

$$LCF = \frac{\sum_n se(Eg > Ec; Ec; Eg)}{\sum_n Ec} \times 100$$

Em que:

LCF: Load Cover Factor (%)

Eg: Energia Renovável Gerada (kWh/m².ano)

Ec: Energia Consumida (kWh/m².ano)

n: número de timesteps

3.4.3 Caracterização dos procedimentos de otimização

A seguir apresenta-se a caracterização dos procedimentos de otimização empregada na presente pesquisa. Desta forma, apresenta-se o algoritmo de busca empregado e sua configuração geral, os indicadores de desempenho que servem de objetivos da otimização, além de explicação sobre a forma de coleta de dados.

i. Aspectos gerais da otimização

Conforme mencionado no item 3.1.2 Benchmark dos algoritmos de busca, na página 74, os algoritmos de busca baseados em aprendizagem de máquina apresentam desempenho superior ao algoritmo evolutivo. Na presente pesquisa emprega-se o algoritmo *Radial Basis Function (RBF)*, do *plug-in* para *Grasshopper Opossum*, especialmente pela sua maior eficiência em obter melhores desempenho com menos iterações.

Na presente pesquisa três indicadores se destacam, pois são os objetivos a serem otimizados – maximizados – pelo algoritmo de busca:

- i. Índice de Sombra Médio Ponderado (ISmp)
- ii. *Spatial Useful Daylight Illuminance (sUDI)*
- iii. *Load Cover Factor (LCF)*

Estes objetivos possuem o mesmo intervalo, de 0 a 100, por se tratar de valores percentuais, o que diminui uma eventual majoração de algum dos objetivos, devido a intervalo de valores em outra escala de grandeza. Desta forma, não há necessidade de normalização dos valores dos objetivos de otimização.

Outro aspecto que não demanda tratamento prévio dos valores dos objetivos é o fato de todos serem maximizados.

Como mencionado anteriormente, o *plug-in Opossum* possui configuração inicial bastante simples, que inclui a escolha do tipo do algoritmo de busca – no caso o RBF –, a forma de otimização – maximização ou minimização - e o número de máximas iterações sem melhoria do melhor cenário de Volume Dominado. A Tabela 11 a seguir indica o número de iterações configuradas para cada uma das tipologias de quadra:

Tabela 11 – Configuração do *Opossum* para cada tipologia de quadra

Tipologia de Quadra	Número de iterações	Número de máximas iterações sem melhoria
Quadra com torre isolada	300	-
Quadra com edificação em fita	600	50
Quadra com pátio interno	600	50

ii. Armazenamento de dados das iterações

O próprio *plug-in Opossum* armazena os dados e permite a exportação dos dados em formato de planilha eletrônica, como extensão .xml. Há um componente próprio para visualização dos resultados, mas que só se aplica a otimizações com um único objetivo.

Entretanto, para o componente de otimização do *Opossum* só registra os dados dos *inputs* – no caso da presente pesquisa denominados também como variáveis de projeto – a os *outputs* – os objetivos de otimização. Para realizar uma

coleta de informações mais extensiva, emprega-se adicionalmente a ferramenta *Collibri do plug-in TT Toolbox* para *Grasshopper*, que registra os resultados dos objetivos de otimização, as variáveis de projeto, assim como outros indicadores – apresentados a seguir no item 3.4.4 Caracterização dos outros indicadores ou covariáveis – de cada iteração em uma planilha eletrônica, para posterior realização do tratamento e análise dos dados.

3.4.4 Caracterização dos outros indicadores ou covariáveis

Além das variáveis morfológicas de projeto e dos indicadores de desempenho, que servem de objetivos de otimização, também existem outros parâmetros ou indicadores que não se encaixam em nenhuma das duas alternativas. Estes indicadores são provenientes do cálculo de aspectos morfológicos, como, por exemplo, a Taxa de Ocupação (TO) e o Índice de Aproveitamento (IA). Por serem um produto das variáveis iniciais – ou *inputs*, referentes as variáveis de projetos –, estes indicadores também são denominados na presente tese de covariáveis.

i. Razão entre Área de Cobertura e Área de Fachada

A razão entre Área de Cobertura (A_{cob}) e Área de Fachada (A_{fach}) é um indicador que aponta para a tendência a horizontalidade e verticalidade de uma edificação, o que está atrelado ao potencial de geração de energia fotovoltaica e conseqüentemente seu potencial para se tornar ZEB. A Equação 12 a seguir apresenta o cálculo realizado.

Equação 12 – Fórmula da Razão entre Área de Cobertura e Área de Fachada

$$A_{cob}/A_{fach} = \frac{A_{cob}}{A_{fach}}$$

Em que:

A_{cob}/A_{fach} : Razão da Área de Cobertura pela Área de Fachada (m^2/m^2)

A_{cob} : Área de Cobertura (m^2)

A_{fach} : Área de Fachada (m^2)

ii. Fator Forma

O Fator Forma (FF) é um indicador empregado em instrumentos como o Regulamento Técnico de Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos (RTQ-C) (INMETRO, 2013) que expressa a razão entre a Área de Envoltória (A_{env}) exposta ao ambiente externo – que não contabiliza superfícies em contato com o solo – e o Volume (V) interno da edificação, como apresenta a Equação 13 a seguir:

Equação 13 – Fórmula do Fator Forma

$$FF = \frac{A_{env}}{V}$$

Em que:

FF: Fator Forma (m^2/m^3)

A_{env} : Área do Envelope da Edificação exposta ao ar (m^2)

V: Volume da Edificação (m^3)

iii. Razão de Compacidade

A Razão de Compacidade (C) clássica é uma característica intrínseca de cada sólido – invariável desde que mantida as proporções – e é definida pela

Equação 14 baseada em Bribiesca (Bribiesca, 2000). É um indicador que normaliza as diferenças entre Área de Superfície (A_s) e Volume (V) ao elevar o primeiro ao cubo e o segundo ao quadrado.

Equação 14 – Fórmula da Razão de Compacidade

$$C = \frac{A_s^3}{V^2}$$

Em que:

C: Razão de Compacidade (m^6/m^6)

A_s : Área de Superfície (m^2)

V: Volume (m^3)

iv. Razão entre Perímetro e Área do Pavimento Tipo

A razão entre o perímetro e área do pavimento tipo (P/A) é outro indicador relacionado a compacidade da forma, mas com enfoque somente nas dimensões horizontais por meio da relação do perímetro do pavimento tipo (P_{pavto}) e área do pavimento tipo (A_{pavto}). A Equação 15 apresenta a fórmula de cálculo deste indicador.

Equação 15 – Fórmula da Razão entre Perímetro e Área do pavimento tipo

$$P/A = \frac{P_{pavto}}{A_{pavto}}$$

Em que:

P/A: Razão entre Perímetro e Área do Pavimento Tipo (m/m^2)

P_{pavto} : Perímetro do pavimento tipo (m)

A_{pavto} : Área do pavimento tipo (m^2)

v. Taxa de Ocupação

A Taxa de Ocupação (TO) na presente tese se diferencia dos indicadores urbanísticos tradicionais encontrados nos Planos Diretores, pois, ao invés da Área do Lote, emprega-se a Área Proporcional da Quadra (A_{Qp}) – que inclui a área proporcional da caixa da rua. A Equação 16 apresenta o cálculo empregado.

Equação 16 – Fórmula da Taxa de Ocupação

$$TOG = \frac{A_{pc}}{A_{Qp}}$$

Em que:

TOG: Taxa de Ocupação Global (m^2/m^2)

A_{pc} : Área Total das Projeções das Edificações da Quadra (m^2)

A_{Qp} : Área da Quadra Proporcional (m^2)

vi. Índice de Aproveitamento

O Índice de Aproveitamento (IA) se diferencia dos Índices de Aproveitamento tradicionais encontrados nos Planos Diretores, pois, ao invés da Área do Lote, emprega-se a Área Proporcional da Quadra (A_{Qp}) – que inclui a área proporcional da caixa da rua. Esse indicador é encontrado comumente na literatura como *Floor to Area Ratio* (FAR) em inglês e está associado a uma grandeza diretamente proporcional a densidade populacional. A Equação 17 a seguir apresenta o cálculo empregado no presente trabalho.

Equação 17 – Fórmula do Índice de Aproveitamento Global

$$IAG = \frac{A_c}{A_{Qp}}$$

Em que:

IAG: Índice de Aproveitamento Global (m^2/m^2)

A_c : Área Construída Total da Quadra (m^2)

A_{Qp} : Área da Quadra Proporcional (m^2)

vii. Taxa de Área Permeável

A Taxa de Área Permeável (TAP) da quadra indica a porcentagem da quadra em que não há impermeabilização da superfície, fator que colabora com a sustentabilidade ambiental. A Equação 18 apresenta o procedimento de cálculo, expressa pela diferença da Área Proporcional da Quadra (A_{Qp}) – inclusive com sua parcela da área de caixa da rua – menos a Área de Projeção da Edificação (A_{pe}) e a Área Proporcional da Caixa da Rua (A_{cxR}) pela área total dividido pela Área Proporcional da Quadra (A_{Qp}) e multiplicado por 100 para transforma o valor em porcentagem.

Equação 18 – Fórmula da Taxa de Área Permeável

$$TAP = \frac{A_{Qp} - A_{pe} - A_{cxR}}{A_{Qp}} \times 100$$

Em que:

TAP: Taxa de Área Permeável (%)

A_{pe} : Área Total das Projeções das Edificações da Quadra (m^2)

A_{Qp} : Área da Quadra Proporcional (m^2)

A_{cxR} : Área da Caixa da Rua proporcional da Quadra (m^2)

viii. Taxa de Infraestrutura

A Área Proporcional da Caixa da Rua (A_{cxR}) possui uma relação diretamente proporcional aos custos de provimento de infraestrutura, como calçamento, drenagem, cabeamento de energia, tubulação de água potável entre outros. Por sua vez, a Área Construída (A_c) pode ser relacionada a quantidade de habitantes (semelhante a lógica do IAG ou FAR). Assim, a Taxa de Infraestrutura (T_{infra}) é um valor em porcentagem que relaciona a Área Proporcional da Caixa da Rua (A_{cxR}) com a Área Construída (A_c), um indicador que está vinculado aos custos por usuário. Essa relação é expressa pela Equação 19.

Equação 19 – Fórmula da Taxa de Infraestrutura

$$T_{infra} = \frac{A_{cxR}}{A_c} \times 100$$

Em que:

T_{infra} : Taxa de Infraestrutura (%)

A_c : Área Total Construída Edificações da Quadra (m^2)

A_{cxR} : Área da Caixa da Rua proporcional da Quadra (m^2)

ix. Fator H/W

O Fator H/W é um dos indicadores mais comumente empregados em estudos de morfologia urbana e representa a razão entre a altura da edificação (H_E) e a distância entre as edificações (W_{EE}). Assim, apresenta uma proporcionalidade do cânion urbano. A Equação 20 apresenta a fórmula do Fator H/W.

Equação 20 – Fórmula do Fator H/W

$$H/W = \frac{H_E}{W_{EE}}$$

Em que:

H/W: Fator H/W (m/m)

H_E : Altura da edificação (m)

W_{EE} : Distância entre edificações (m)

3.4.5 Caracterização do tratamento e análise dos dados

No processo de análise exploratória dos dados, busca-se compreender os padrões e tendências dos dados provenientes do processo de otimização. Essa análise é realizada tanto para cada tipologia de quadra, além de uma comparação entre elas. Adicionalmente, realiza-se a definição da Frente de Pareto dos processos de otimização e a clusterização dessa frente, que visa compreender de forma mais aprofundada o desempenho dos três objetivos de otimização e os aspectos morfológicos dos *clusters* resultantes. Assim, organiza-se o presente item em três partes distintas:

- i. Análise tipológica;
- ii. Análise dos *clusters* da Frente de Pareto;
- iii. Análise entre tipologias.

i. Análise por tipologia

Com intuito de compreender melhor os aspectos que influenciam o desempenho ambiental de cada tipologia, realiza-se uma análise geral da amostra de cada uma das tipologias. Esta etapa também inclui a investigação da relação com as covariáveis. Neste sentido, (i) há uma investigação preliminar da correlação

de r-Pearson entre os objetivos de otimização com as variáveis de projeto e as covariáveis morfológicas, além da correlação entre os objetivos de otimização. Posteriormente, (ii) realiza-se uma análise do comportamento de cada variável de projeto conjuntamente para os três objetivos de otimização. Por fim, com intuito de melhor compreender as características morfológicas mais relacionadas com cada um dos três objetivos de otimização e para o Volume Dominado, (iii) realiza-se uma análise dos cenários com melhores desempenhos para cada um deste critérios.

a. Análise de correlação

Emprega-se a técnica de correlação de r-Pearson com o intuito de identificar associações estatisticamente significativas. Assim, busca-se não apenas identificar associações entre as variáveis, mas também compreender a natureza e a direção dessas relações. Isso permite uma avaliação mais precisa do impacto das variáveis de projeto e covariáveis morfológicas nos objetivos de otimização, bem como a identificação de possíveis padrões ou tendências que possam orientar o processo de tomada de decisão projetual.

Para este fim de identificar as correlações de maior intensidade, procede-se à análise de correlação por meio de uma matriz de correlação de r-Pearson realizadas no programa de análise estatística JASP, que utiliza a linguagem de programação R como algoritmo de cálculo. Nesse contexto, investiga-se a relação dos três objetivos de otimização não só com as variáveis de projeto e covariáveis morfológicas, mas também entre eles próprios. Assinalam-se as correlações significativas, com valor p igual ou inferior 0,05, com asteriscos. A visualização da matriz de correlação é realizada por meio de um *heatmap*, onde as cores representam a intensidade das correlações, em gradiente de vermelho para

correlações positivas e azul para as negativas. Quanto mais saturada a cor, mais forte é a correlação.

Consideram-se as correlações de maior intensidade aquelas com valor absoluto igual ou superior a 0,7, tanto positivas quanto negativas. Estabelece-se este critério para identificar associações estatisticamente relevantes que possam influenciar significativamente os objetivos de otimização. Dessa forma, é possível destacar as relações mais fortes entre as variáveis de projeto, covariáveis morfológicas e objetivos de otimização.

Posteriormente, após a identificação dos pareamentos com correlações de maiores valores absolutos, realiza-se uma análise mais pormenorizadas destas correlações. Para isso, plotam-se os resultados em um gráfico de dispersão, com linha de regressão suavizada. Adicionalmente, apresentam-se as distribuições das densidades para cada uma das variáveis desses gráficos. Observa-se o tipo de relação que se constitui, direta ou inversamente proporcional, assim como se o padrão tem natureza mais linear ou exponencial. Além disso, ao observar a distribuição das densidade, busca-se compreender os efeitos do processo de otimização e/ou a tendência a valores ideais, com maior acumulação de resultados – ou picos.

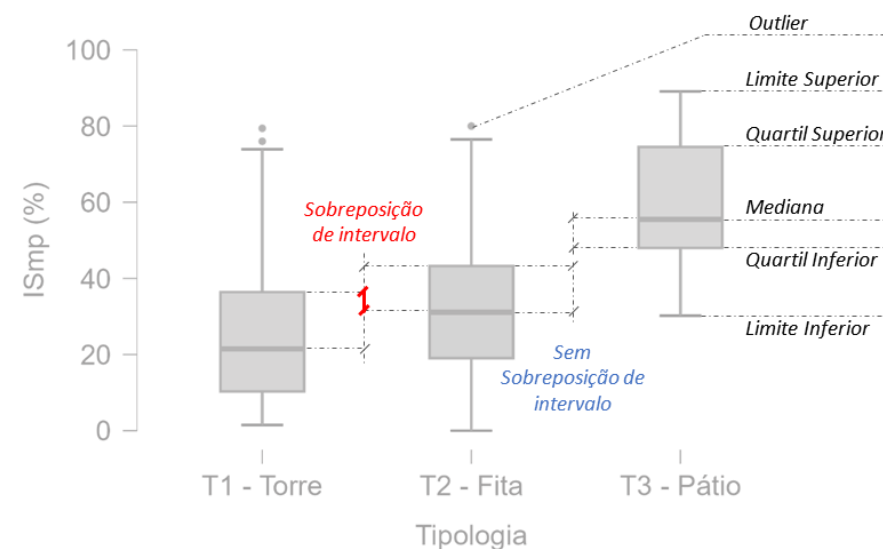
No mais, é relevante ressaltar a observação do impacto das variáveis categóricas em outros indicadores, especialmente no caso das covariáveis. Neste caso, estes indicadores também apresentariam agrupamentos lineares no gráfico, aspecto relacionado aos níveis das variáveis de projeto que tem natureza categórica.

b. Análise das variáveis de projeto

Como mencionado, as variáveis morfológicas de projeto possuem natureza categóricas e, assim, podem ser melhor representadas por meio de gráficos *boxplot*. Desta forma, para melhor entender o impacto de cada variáveis de projeto nos três objetivos de otimização, analisam-se os gráficos *boxplot* dos três objetivos de otimização para cada variável de projeto conjuntamente.

Realiza-se uma análise visual dos gráficos *boxplot*, conforme Wickham e Stryjewski (Wickham; Stryjewski, 2011)⁴⁸, a fim de compreender os padrões e tendências no contexto de uma análise exploratória de dados. Assim, não se realizam análises de variância e testes *post-hoc*. Contudo, parte-se do princípio de que grupos – referentes aos níveis das variáveis – com pequena sobreposição dos intervalos⁴⁹ entre as medidas de tendência central – mediana, quartis e limites – também não devem possuir intervalos confiança com sobreposição – aspecto observado nas análises de variância e testes *post-hoc*. Desta forma, estes grupos demonstram distinções marcantes, o que auxilia a observar tendências, especialmente a identificação de pontos ótimos – de inflexão no padrão – e grupos com distinção marcante de desempenho – com intervalos de valores bem distintos, sem sobreposição alguma. A Figura 43 apresenta de forma gráfica os elementos de tendência central e limites no gráfico *boxplot*, assim como a questão das sobreposições de intervalos entre grupos.

Figura 43 – Explicação dos elementos de tendência central e limites dos gráficos *boxplot* e critérios de sobreposição dos intervalos entre grupos



Fonte: Autor (2024)

c. Análise dos melhores cenários por tipologia

Para melhor compreender os melhores cenários obtidos no processo de otimização, realiza-se um ranqueamento dos cinco cenários com melhor desempenho. Analisam-se os cenários com melhor desempenho em cada um dos objetivos de otimização, bem como para o Volume Dominado. Observam-se as características morfológicas relacionadas às variáveis de projeto, assim como o

⁴⁸ Wickham e Stryjewski (Wickham; Stryjewski, 2011) indicam especificamente os gráficos *boxplot* com a apresentação de *notches*, que indicam o intervalo de confiança no próprio gráfico e assim possibilitam uma inspeção visual, ou simplificada, dos testes *post-hoc*. Contudo, a intenção da análise realizada na presente não é verificar distinção significativa dos grupos – algo que requereria um estudo de variância

mais detalhada que inclui além dos testes *post-hoc*, a caracterização das distribuições e definição dos testes, que na sua maioria seriam não-paramétricos –, mas reconhecer padrões e tendências.

⁴⁹ Também denominados de dominós em partes da tese.

desempenho desses cenários nos demais indicadores de desempenho – os objetivos de otimização e o Volume Dominado.

ii. Análise dos *clusters* da Frente de Pareto por tipologia

Para compreender os melhores resultados do processo de otimização, realiza-se a definição da Frente de Pareto, para cada uma das tipologias. Adicionalmente, para auxiliar esta atividade de caracterização do desempenho e dos aspectos morfológicos, realiza-se um processo de clusterização dessa Frente de Pareto, por meio de algoritmo de aprendizagem de máquina. Assim, busca-se observar as variações do desempenho dos indicadores de desempenho – dos objetivos de otimização – e dos aspectos morfológicos – ligados às variáveis de projeto – dentro da Frente de Pareto.

a. Caracterização do Procedimento da Frente de Pareto

A Frente de Pareto indica os cenários considerados ótimos – ou sub-ótimos – e que, assim, não se encontram no volume dominado de nenhum outro cenário da amostra. Anteriormente apresentado, o item Iv Otimização, na página 69, explica a lógica desse processo em mais detalhes, inclusive de forma gráfica.

Para determinar a inclusão de um cenário na Frente de Pareto, é necessário avaliar se não há nenhum outro cenário na amostra que demonstre um desempenho superior em relação aos três objetivos de otimização simultaneamente. Este processo envolve a realização de testes lógicos comparativos entre o valor de cada cenário com todos os demais para cada um dos objetivos de otimização.

Realiza-se este teste lógico comparativo no editor de planilhas Excel da Microsoft, com o emprego de uma matriz tridimensional, por meio de uma série de planilhas. Pode-se descrever este processo em três etapas:

- i. Primeiro, cada planilha realiza a verificação de um objetivo de otimização. Isso é realizado pela transposição dos valores entre linha e coluna para criação da matriz e realização de teste lógico comparativo de maior e menor;
- ii. Depois, para verificar simultaneidade, agregam-se os valores entre planilhas, algo que é possível pois as comparações entre cenários possuem mesma localização de linha e coluna nos três objetivos. Realiza-se este processo por meio de uma função de soma;
- iii. Por fim, realiza-se uma verificação adicional para identificar se há dentre todas as comparações realizadas para determinado cenário ao menos um outro cenário com desempenho superior nos três objetivos de otimização. Realiza-se este processo por meio de função “conte se”.

Para visualização dos cenários pertencentes à Frente de Pareto, realiza-se a plotagem dos dados em gráfico de dispersão tridimensional na ferramenta *web* de análise de dados, *Plotly Chart Studio*. Cada um dos três eixos corresponde a um dos objetivos de otimização. Demarcam-se os cenários pertencentes à Frente de Pareto coloridos com a cor verde, enquanto os demais cenários aparecem com menor destaque em bege.

b. Caracterização do Processo de Clusterização

Para capturar nuances das variações dentro dos resultados pertencentes à Frente de Pareto, realiza-se um processo de clusterização para segmentar os cenários em grupos distintos com base em características semelhantes. Essa abordagem visa aprimorar a compreensão dos padrões intrínsecos presentes na amostra e facilitar a identificação de tendências.

Assim, por meio do programa de análise estatística JASP, emprega-se o *Fuzzy c-means clustering*, que é um método de agrupamento por similaridade semelhante ao *k-means*. Para determinar o número ideal de *clusters*, utilizam-se os valores *default* do programa, com o método de otimização BIC, que analisa a soma dos quadrados internos, configurado para realizar até 100 iterações máximas e considera a incerteza dos parâmetros – ou *fuziness* em inglês – com valor de dois. Empregam-se simultaneamente os três objetivos de otimização como critérios do processo de clusterização.

c. Análise dos *clusters*

A partir da divisão em *clusters* da Frente de Pareto, empregam-se análises simples para descrever as características de cada *cluster*. Assim, realiza-se uma análise descritiva das amostras de cada *cluster* por meio de gráficos de *boxplot*, a fim de compreender os intervalos e distribuição dos valores, tanto dos objetivos de otimização quanto das variáveis de projeto. Com isso, almeja-se obter uma expressão morfológica desses *clusters* dos cenários ótimos – da Frente de Pareto – que auxiliem na compreensão da relação destes aspectos morfológicos e suas indicadores de desempenho.

iii. Análise comparativa entre tipologias

Realiza-se a análise das amostras de todos os resultados agrupados por tipologias para os três objetivos de otimização, assim como para o Volume Dominado. Esta análise também emprega os critérios de análise visual dos gráficos *boxplot* da análise exploratória dos dados apresentada no item 3.4.5 i Análise por tipologia, subitem b Análise das variáveis de projeto.

3.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

A análise do potencial de *Zero-Energy Buildings* (ZEB) na escala urbana, com critérios holísticos de desempenho, requer considerações específicas. Nesse sentido, este capítulo aborda tanto aspectos de fundamentação, pertencentes a metodologia, quanto os aspectos práticos empregados nesta pesquisa, que incluem o método, os materiais e os procedimentos.

Para melhor compreensão do método empregado, mostra-se necessário delinear os conceitos fundamentais das técnicas computacionais utilizados. Assim, apresentam-se as principais características do tripé: design paramétrico, simulação de desempenho e otimização. Especialmente, conceitua-se a ideia de processo iterativo, com *inputs* e *outputs* no *design* paramétrico, que permite a exploração do universo de soluções projetuais. Apresentam-se os fundamentos das técnicas de simulação de desempenho, baseadas em um processo de caixa experimental e o desenvolvimento de indicadores de desempenho, que são empregados como *outputs*. E por fim explica-se o processo de otimização e algumas de suas principais características, como a Frente de Pareto e o Volume Dominado, aspectos fundamentais para definição dos melhores cenários, ou cenários ótimos.

A seção metodológica também contribui com a definição das tipologias de quadras investigadas. Por meio de levantamento de diversas classificações tipológicas de quadras urbanas, expõe-se um panorama de soluções formais comumente estudadas. Observa-se que três tipologias são mais usualmente empregadas em estudos de desempenho ambiental e eficiência energética: quadra com torre isolada, quadra com edificações em fita e quadras com pátio interno. Mesmo classificações mais abrangentes, com enfoque em outras áreas, também refletem de alguma forma estas três tipologias usualmente estudadas no campo do desempenho ambiental e eficiência energética, apesar de variações.

O *benchmark* demonstra o desempenho dos diferentes algoritmos de busca empregados no processo de otimização da tipologia de quadra com torre isolada. Este processo evidencia o desempenho superior de algoritmos de busca que empregam técnicas de aprendizagem de máquina ao invés de algoritmos evolutivos ou genéticos, mais comumente utilizados. Assim, apresenta-se maior confiança na definição do emprego do algoritmo RBF presente no *plug-in Opossum* para a sequência da pesquisa.

A seção do método apresenta um panorama geral das atividades de pesquisa, que se fundamenta em técnicas computacionais de simulação de desempenho e processo de otimização apoiadas em análise exploratória de dados. Assim, delineiam-se as relações entre os principais aspectos estratégicos da pesquisa, que está estruturada em três etapas: *design* computacional ou processo de otimização; tratamento e análise de dados; e desdobramentos dos resultados

Já a seção de materiais apresenta os principais recursos utilizados na execução da presente pesquisa. Basicamente, apresentam-se os programas empregados, além de características como suas versões.

Por fim, apresentam-se os procedimentos de pesquisa, que detalham aspectos das etapas do método, e assim tratam do nível mais tático da pesquisa. Assim cinco aspectos são detalhados: caracterização da modelagem paramétrica das quadras; os procedimentos de simulação da performance; o processo de otimização; cálculos de outros indicadores e a forma de tratamento e análise de dados.

No processo de caracterização da modelagem paramétrica das quadras apresentam-se as variáveis morfológicas de projeto – os *inputs* do processo de otimização –, assim como a descrição de seus níveis, para cada uma das tipologias. A tipologia de quadra com torre isolada possui cinco variáveis, enquanto as tipologias de quadra com edificações em fita e quadra com pátio interno possuem sete variáveis cada.

Quanto aos processos de simulação, descrevem-se as principais características da modelagem e configuração, além do cálculo dos indicadores de desempenho, os *outputs* ou objetivos de otimização: Índice de Sombra Médio Ponderado (ISmp); *spatial Useful Daylight Illuminance* (sUDI) e *Load Cover Factor* (LCF). Desta forma, este item expõe os detalhes do uso dos programas PVWatt, *EnergyPlus* e *Radiance*.

Na sequência há a apresentação do processo de otimização do *plug-in Opossum* para *Grasshopper*. Na presente pesquisa emprega-se o algoritmo RBF que utiliza um *surrogate model*, uma técnica de aprendizagem de máquina, que possibilita orientar a busca por meio de um meta-modelo. Adicionalmente apresenta-se a configuração do número de rodadas máximas e do número de rodadas sem melhoria do Volume Dominado que acarreta encerramento da otimização.

Além disso, há a caracterização das covariáveis morfológicas, que são outros indicadores de aspectos morfológicos, mas que não são *inputs* do modelo paramétrico. Neste item, além de breve definição, expressa-se a forma de cálculo destes 8 indicadores: Razão entre Área de Cobertura e Área de Fachada (A_{cob}/A_{fach}); Fator Forma (FF); Razão de Compacidade (C); Razão entre Perímetro e Área do Pavimento Tipo (P/A); Taxa de Ocupação (TO); Índice de Aproveitamento (IA); Taxa de Área Permeável (TxAP); Taxa de Infraestrutura (TxInfra); e Fator HW.

Por fim, descrevem-se os procedimentos do tratamento utilizado na análise exploratória de dados. Isso envolve a realização das análises para todos os dados de cada tipologia, o que inclui a análise de correlação de r-Persson de todas as variáveis e covariáveis para os três objetivos de otimização, assim como a análise descritiva dos níveis de cada variável morfológica de projeto também para os três objetivos de otimização. Posteriormente se expõe os procedimentos da análise dos *clusters*, que contempla a definição da Frente de Pareto, o processo de aprendizagem de máquina de clusterização e a análise descritiva das variáveis e projeto e dos objetivos de otimização para cada um dos *clusters*. Além disso, há a análise comparativa entre as tipologias por meio de análise descritiva para cada um dos objetivos e do Volume Dominado.



IV

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados da análise do potencial para obtenção de *Zero-Energy Building* na escala urbana de diferentes tipologias de quadra urbana para o contexto climático de Brasília, estrutura-se de forma semelhante a organização do método. Assim, parte-se da investigação do desempenho das três tipologias de quadras investigadas, cada uma com sua seção própria:

- i. Quadra com torre isolada;
- ii. Quadra com edificações em fita;
- iii. Quadra com pátio interno.

Em cada uma das três seções expõem-se uma análise de correlação entre variáveis de projeto, covariáveis com os indicadores de desempenho que são os objetivos de otimização da pesquisa. Também se apresentam estudos do impacto da variação de cada uma das variáveis de projeto nos objetivos de otimização.

Posteriormente há o estudo específico dos melhores resultados, tanto absolutos para cada um dos objetivos de otimização, como dos cenários pertencentes à Frente de Pareto, por meio de processo de clusterização e posterior descrição dos clusters.

Adicionalmente, a análise dos resultados de cada tipologia, realiza-se uma análise comparativa entre as tipologias, com a agregação dos resultados. Nesta seção exploram-se os melhores cenários para cada um dos objetivos de otimização e do Volume Dominado, além do comportamento global de cada tipologia em relação aos quatro indicadores mencionados.

Por fim, na parte final do presente capítulo, realiza-se a discussão dos resultados. Desta forma, esta seção trata da pertinência dos resultados à luz da literatura específica, implicações práticas e diretas para as questões de projeto urbano específicas ao contexto de Brasília, além de implicações indiretas, relativas as técnicas de *design* computacional no campo do desenho urbano baseado em desempenho.

4.1 QUADRA COM TORRE ISOLADA

Nesta seção, apresentam-se os resultados para a tipologia de quadra com edificações em fita, organizados em cinco partes distintas:

- i. Variáveis de projeto e objetivos de otimização;
- ii. Análise das correlações significativas;
- iii. Análise das variáveis de projeto;
- iv. Clusterização da Frente de Pareto;
- v. Melhores Resultados.

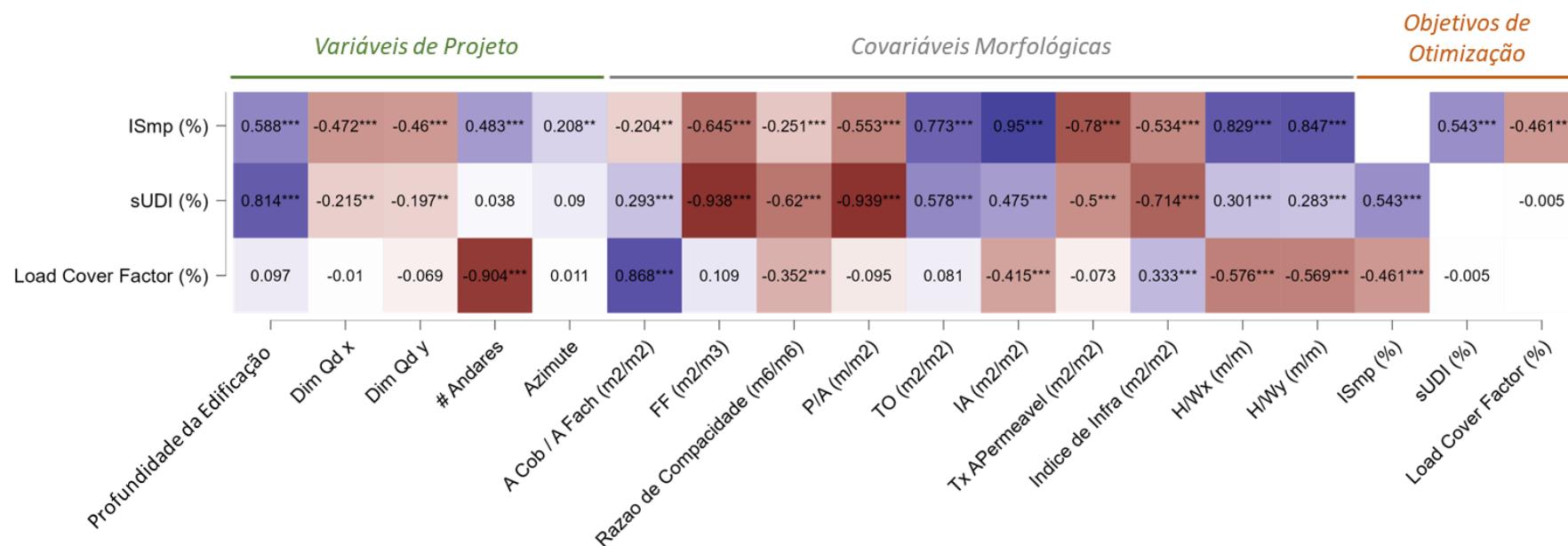
4.1.1 Variáveis de projeto e objetivos da otimização

Para analisar a relação entre variáveis de projeto e os objetivos da otimização, assim como indicadores de desempenho, realiza-se uma análise de correlação. Para melhor visualização dos dados emprega-se uma matriz de correlação com o mapa de calor em que tons de azul e vermelho para correlações

positivas e negativas respectivamente. A intensidade da cor corresponde a intensidade de correlação.

O Gráfico 16 apresenta os resultados dessa correlação por meio de uma matriz de correlação com a mapa de calor. Opta-se por apresentar somente a correlação dos três objetivos da otimização com as variáveis de projeto e as covariáveis.

Gráfico 16 – Matriz de correlação entre os objetivos da otimização e as variáveis e covariáveis de projeto para quadra com torre isolada



Fonte: Autor, desenvolvido em JASP v. 0.17.2 (2024).

Observa-se que o Índice de Sombra Médio Ponderado (ISmp) é o objetivo da otimização que possui maior número de variáveis com correlação alta - maior que 0,7 tanto para positivo quanto para negativo. O principal indicador correlacionado ao Índice de Sombra Médio Ponderado (ISmp) é o Índice de Aproveitamento (IA) ou *Floor to Area Ratio* (FAR), com valor de 0,95. A Altura pela Largura do cânion urbano (H/W) também apresenta alta correlação positiva com valores superiores a 0,8 para as duas variáveis de cada eixo. A Taxa de Ocupação também apresentou correlação positiva. Além disso a taxa de permeabilidade apresentou correlação forte de 0,78, porém com valor negativo, inversamente proporcional. Até por sua natureza de cálculo semelhante, os valores da Taxa de Ocupação (TO) e da Taxa de Área Permeável (Tx AP) são semelhantes, porém com sinal invertido.

Os resultados demonstram uma relação entre o Índice de Sombra Médio Ponderado (ISmp) com aspectos morfológicos e sua relação com como espaço aberto, especialmente às características do cânion urbano e a forma de ocupação do solo para esse tipo de tipologia nesse contexto climático.

Por sua vez o *spatial Useful Daylight Illuminance* (sUDI) possui forte correlação com quatro variáveis ou covariáveis da morfologia urbana. Os dois indicadores com maiores valores de correlação são o Fator Forma (FF) e a Razão do Perímetro pela Área (P/A) com valores superiores a 0,9, porém com relação inversamente proporcional. Os valores semelhantes podem ser explicados pela natureza dos dois indicadores que medem a compacidade da forma (c), para volumes e superfícies, respectivamente. Isso também explica a forte correlação com a Profundidade da Edificação, porém de forma positiva.

Diferentemente do que aponta a literatura, o presente estudo não apresenta os melhores resultados para cenários com plantas menos profundas. Isso está relacionado ao impacto da iluminância excessiva próxima às janelas, que em plantas menos profundas representam uma maior proporção da área total. No mais, este aspecto pode ser amenizado com o emprego de sombreamento adequado. Provavelmente um estudo que empregasse sDA não apresentaria essa característica, pois ignora esse aspecto da iluminância excessiva. Entretanto, é importante ressaltar que essa é uma tendência geral da variável, que está relacionada a estruturação do presente estudo. Além disso, mesmo neste estudo, uma análise mais detalhada demonstra os efeitos prejudiciais à iluminação natural de uma planta mais profunda, como pode ser observado no item 4.1.2 Análise das correlações significativas do presente capítulo.

Outro indicador que possui forte correlação no presente estudo é o Índice de infraestrutura, com um valor negativo de 0,714. Dessa forma, cenários com maior área construída em relação a caixa de rua possuem os melhores resultados de *spatial Useful Daylight Illuminance* (sUDI). Esse traço de melhoria dos resultados com o aumento da área construída pode ser notado em outros indicadores, como Taxa de Ocupação (TO) e Índice de Aproveitamento (IA) e pode ser explicado pelo mesmo motivo dos indicadores anteriores – Fator Forma (FF) e Razão do Perímetro pela Área (P/A) – em virtude do impacto da área com excesso de iluminância próxima às janelas.

Além disso, nesse contexto o estudo não demonstrou relevância da distância entre os edifícios na iluminação natural, algo que pode ser notado nos indicadores H/W. Entretanto, é importante observar que as distâncias entre edifícios são generosas, pois sempre há uma via entre eles.

Por fim, o *Load Cover Factor* (LCF) apresenta somente dois indicadores com forte correlação: Número de Andares e Razão da Área de Cobertura pela Área de Fachada, com valores de -0,904 e 0,868 respectivamente. Ambos os casos estão diretamente relacionados ao número de pavimento em um fenômeno que é vastamente apontado na literatura, pois há o aumento da área construída e a manutenção da área de cobertura, normalmente responsável pela geração de energia fotovoltaica.

4.1.2 Análise das correlações significativas

Para melhor compreender os fenômenos existentes nos casos de correlações significativas apontadas no item anterior apresentam-se os gráficos de densidade e dispersão com uma linha de regressão suavizada. Os gráficos são agrupados por objetivo da otimização para facilitar a análise. Dos três objetivos analisados, tem-se cinco indicadores relevantes para Índice de Sombra Médio Ponderado (ISmp), quatro indicadores relevantes para *spatial Useful Daylight Illuminance* (sUDI) e dois indicadores relevantes para *Load Cover Factor* (LCF).

i. Índice de Sombra Médio Ponderado

Como mencionado anteriormente, dos cinco indicadores, quatro possuem relação diretamente proporcional com o Índice de Sombra Médio Ponderado (ISmp), com a única exceção a Taxa de Área Permeável (Tx AP). Todos esses 5 indicadores – Taxa de Ocupação (TO), Índice de Aproveitamento (IA), Taxa de Área Permeável (Tx AP) e Fatores H/W para o eixo x e y – possuem alta

correlação, o que pode ser notado pela proximidade com a linha de regressão, que em todos os casos se aproxima de uma reta, uma relação linear⁵⁰ (Gráfico 17). Destaque para o Índice de Aproveitamento (IA), com maior correlação e maior proximidade da linha de regressão.

É interessante perceber que há uma concentração de resultados com valores mais baixos de Índice de Sombra Médio Ponderado (ISmp), como se pode observar pelos gráficos de densidade (Gráfico 17). Inclusive, alguns indicadores – Índice de Aproveitamento (IA) e ambos os Fatores H/W – possuem resultados bem concentrado nessa faixa de resultados mais baixa. Nos cinco indicadores é nessa faixa que os resultados mais se aproximam da linha de regressão, enquanto nos valores mais altos de Índice de Sombra Médio Ponderado (ISmp), há uma maior dispersão dos resultados e alguns pontos mais distantes da linha de regressão.

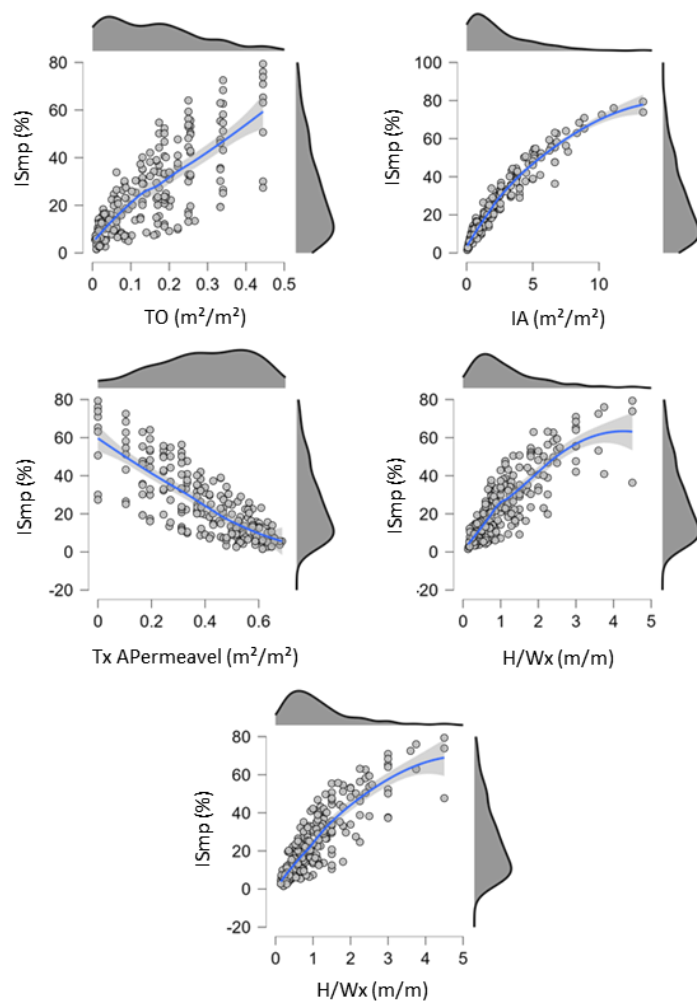
No geral, pode-se compreender que todos os cinco indicadores são capazes de descrever bem o Índice de Sombra Médio Ponderado (ISmp) de forma quase que linear.

Além disso, também é importante ressaltar que o processo de otimização obteve número significativo de cenários com valores de Índice de Sombra Médio Ponderado (ISmp) mais baixo. Isso pode ser um indicativo do funcionamento efetivo do processo de otimização, em que resultados superiores começaram a emergir somente após um determinado número significativo de iterações.

⁵⁰ Apesar de todas as linhas de regressão serem de fato curvas, elas estão muito próximas de retas, especialmente nos casos de Taxa de Ocupação (TO) e Taxa de Área Permeável (Tx AP). Nos demais 3

casos, apesar de maior acentuação das curvas a regressão poderia ser representada por uma reta.

Gráfico 17 – Gráficos de Dispersão da TO, IA, TxApermeavel, H/Wx e H/Wy pelo Índice de Sombra Médio Ponderado (ISmp)



Fonte: Autor, desenvolvido em JASP v. 0.17.2 (2024).

Em linhas gerais, pode-se notar que aspectos morfológicos tem grande impacto na disponibilidade de sombreamento da área urbana. Dessa forma, os cenários explorados pelo processo de otimização demonstram vantagens de cânions urbanos mais fechados, protegidos da insolação. Assim, até de forma esperada, nota-se a tendência a maiores Fator H/W, assim como valores maiores Taxa de Ocupação e Índices de Aproveitamentos. Da mesma forma, porém de sentido inverso, é compreensível que os resultados favoreçam uma menor Taxa de Área Permeável (Tx AP)⁵¹, o que também está atrelado a um cânion urbano mais protegido da insolação.

Adicionalmente, é importante destacar que o Índice de Sombra Médio Ponderado (ISmp) é um indicador conforto térmico urbano mais adequado ao desconforto por calor. De fato, o Índice de Sombra Médio Ponderado (ISmp), embora uma simplificação do conforto térmico urbano, fornece indicações úteis, como a preferência por conjuntos urbanos mais protegidos da insolação, que proporcionam menor exposição à radiação direta aos usuários, assim como aos materiais superficiais – que por sua vez podem ocasionar desconforto devido a temperatura radiante.

ii. *Spatial Useful Daylight Illuminance*

Os quatro indicadores – Profundidade da Edificação, Fator Forma (FF), Razão Perímetro por Área (P/A) e Índice de Infraestrutura – de maior correlação com *spatial Useful Daylight Illuminance* (sUDI) não apresentaram relações lineares, diferentemente dos casos do Índice de Sombra Médio Ponderado (ISmp), como se

procedimento de cálculo de cada indicador com mais detalhes.

⁵¹ É importante destacar que a Taxa de Ocupação não se limita ao lote e engloba fração da área pública, diferentemente da Taxa de Área Permeável (Tx AP), que diz respeito somente a área interna do lote. Dessa forma não são valores complementares. O capítulo 3. Materiais e Métodos apresenta o

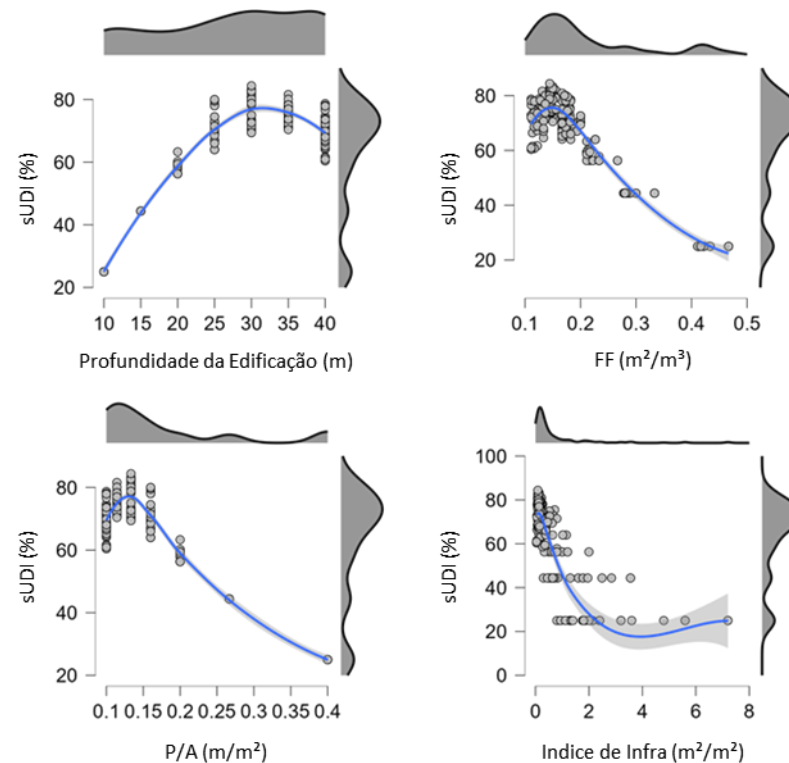
pode observar no Gráfico 18. As curvas mais acentuadas foram mais capazes de traduzir melhor a relação entre as variáveis, ao invés de uma reta.

De forma semelhante ao Índice de Sombra Médio Ponderado (ISmp), há concentração de resultados, especialmente para Índice de Infraestrutura, Fator Forma (FF) e Perímetro pela Área (P/A). Entretanto, diferentemente de Índice de Sombra Médio Ponderado (ISmp), essa concentração ocorre com valores mais altos, na faixa acima de 60% de sUDI. Por outro lado, em algumas das variáveis de projeto, como a Profundidade da Edificação, há uma distribuição mais homogênea dos resultados por todo domínio.

É interessante notar que o efeito das variáveis categóricas – como Profundidade da Edificação – se estendem a outras variáveis, especialmente ao Perímetro pela Área (P/A). Nesses casos é perceptível a formação de grupos de resultados em linhas perpendiculares ao eixo da variável independente (eixo x). Além disso, no caso dessas duas variáveis (Profundidade da Edificação e P/A) há um ponto de inflexão na curva, em que a tendência de melhoria de *spatial Useful Daylight Illuminance* (sUDI) para de ocorrer e dessa forma podem ser considerados como aqueles que propiciam os melhores resultados para essas variáveis

Quanto a Profundidade da Edificação, nota-se que os melhores resultados de *spatial Useful Daylight Illuminance* (sUDI) ocorrem com valores de 30 m de Profundidade da Edificação. Isso pode ser explicado, pois para valores de Profundidade da Edificação inferiores, a faixa de iluminância excessiva, localizada próxima às janelas, tem maior relevância. Por outro lado, valores de Profundidade da Edificação superiores devem possuir núcleo central com valores de iluminância insuficientes.

Gráfico 18 – Gráficos de Dispersão da Profundidade da Edificação, FF, P/A e Índice de Infraestrutura pelo *spatial Useful Daylight Illuminance* (sUDI)



Fonte: Autor, desenvolvido em JASP v. 0.17.2 (2024).

Já para a relação entre Perímetro e Área (P/A), nota-se que os melhores resultados de *spatial Useful Daylight Illuminance* (sUDI) ocorrem com valores próximo a 0,15. De certa forma, esse resultado é um reflexo da Profundidade da Edificação, visto que tanto o perímetro quanto a área podem ser expressos por esta variável. Entretanto, no caso de uma planta quadrada, quanto maior a Profundidade da Edificação, menor a relação entre Perímetro e Área (P/A). Assim,

pode-se inclusive calcular com exatidão o local dos máximos de Perímetro e Área (P/A) em 0,133.

Por fim, para o Índice de Infraestrutura, observa-se que os melhores resultados de *spatial Useful Daylight Illuminance* (sUDI) se concentram em valores de Índice de Infraestrutura inferiores a dois.

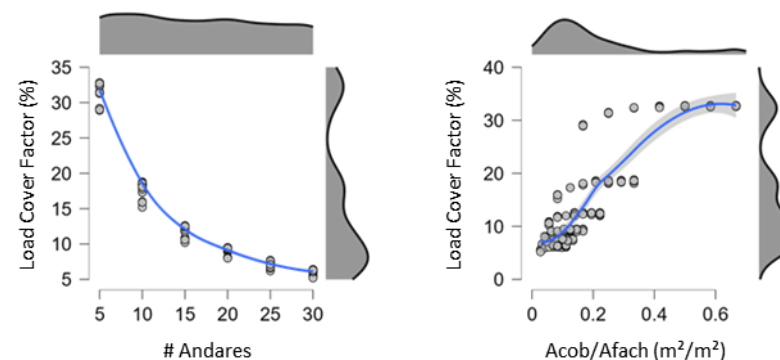
Em linhas gerais, pode-se notar a partir dos cenários explorados pelo processo de otimização que há uma tendência a buscar um equilíbrio na profundidade da planta, pois se muito profundas, há insuficiência de iluminância no núcleo, e se pouco profundas há maior proporção da faixa de iluminância excessiva próxima a janela.

iii. **Load Cover Factor**

Para o *Load Cover Factor* (LCF), os dois indicadores com maior correlação—Número de Andares (# Andares) e Relação Área de Cobertura por Área de Fachada (Acob/Afach) — são mais bem descritas por curvas ao invés de retas. Em ambos os casos, como mencionado anteriormente, a relação com o Número de Andares é a característica que mais influencia o *Load Cover Factor* (LCF).

Para ambos os indicadores, há uma maior densidade de cenários com valores de LCF mais baixos, como se observa no Gráfico 19. Isso pode ser um indicativo do funcionamento efetivo do processo de otimização, em que resultados superiores - na faixa de 30 a 35% de *Load Cover Factor* (LCF) — começaram a emergir somente após um determinado número significativo de iterações.

Gráfico 19 – Gráficos de Dispersão do Número de Andares da Edificação e Relação Área de Cobertura por Área de Fachada (Acob/Afach) pelo *Load Cover Factor* (LCF)



Fonte: Autor, desenvolvido em JASP v. 0.17.2 (2024).

É interessante observar o efeito da variável categórica do indicador Número de Andares (# Andares) da Edificação. Para este gráfico, pode-se notar a relação quase que exponencial e inversamente proporcional da relação de Número de Andares (# Andares) da Edificação com *Load Cover Factor* (LCF). Dessa forma, até de forma esperada, há uma tendência a melhores resultados de *Load Cover Factor* (LCF) com a diminuição do gabarito da edificação.

Quanto a Relação Área de Cobertura por Área de Fachada (Acob/Afach), há uma relação diretamente proporcional, mas que se atenua a partir do valor 0,4 da razão. Entretanto, é importante ressaltar que a correlação é menos coesa, especialmente para os maiores valores de *Load Cover Factor* (LCF), o que demonstra a fragilidade de desta curva como preditora. Por outro lado, todos os cenários com valores mais elevados da Relação Área de Cobertura por Área de Fachada (Acob/Afach) — acima ou igual a 0,4 — possuem os maiores valores de *Load Cover*

Factor (LCF), algo compreensível, visto que isso indica maior presença de área de cobertura o que propicia maior geração energética.

Em linhas gerais, percebe-se a partir dos cenários explorados pelo processo de otimização que há uma tendência a valorizar cenários com menor Número de Andares e maior Relação Área de Cobertura por Área de Fachada. Algo coerente com a ampliação da geração energética que está intimamente atrelada a área de cobertura, enquanto a redução da demanda energética relaciona-se com a redução do Número de Andares – e consequentemente da área construída.

4.1.3 Análise das variáveis de projeto

Para sistematizar melhor os resultados, também se propõe a analisar os resultados a partir das variáveis categóricas de projeto: Profundidade da Edificação, Dimensão da Quadra nos eixos x e y, Azimute e Número de Andares. Ao analisar cada uma das variáveis para os três objetivos de forma conjunta, a partir de gráficos de caixa – ou *boxplot* –, visa-se melhor compreender os efeitos de cada variável de forma geral, o que pode auxiliar a tomada de decisão de projeto.



i. Profundidade da Edificação

A variação da Profundidade da Edificação acarreta comportamento distinto em cada um dos objetivos do processo de otimização – como se observa no Gráfico 20.

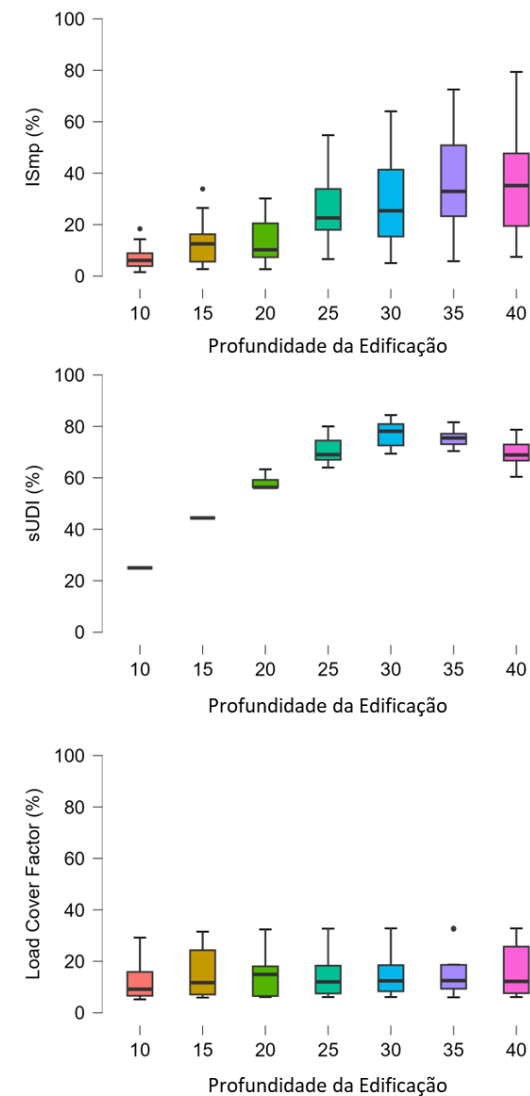
No caso do *Load Cover Factor* (LCF), os diferentes grupos possuem resultados muito semelhantes, com grande sobreposição de domínio dos resultados.

Para o Índice de Sombra Médio Ponderado (ISmp), há uma relação diretamente proporcional. Assim, apesar de grande sobreposição dos domínios dos resultados de grupos adjacentes, há um aumento dos valores de Índice de Sombra Médio Ponderado (ISmp) com o aumento da Profundidade da Edificação. Isso é válido para máximos, mínimos, quartis e medianas.

Já o *spatial Useful Daylight Illuminance* (sUDI) é o objetivo que possui padrão mais definido e capaz de oferecer indicações mais interessantes. Há uma tendência de melhoria do *spatial Useful Daylight Illuminance* (sUDI) com o aumento da Profundidade da Edificação, porém somente até 30 m de profundidade, que pode ser compreendida como profundidade ótima dentro do estudo realizado. Presume-se que com essa dimensão há melhor equilíbrio entre a faixa de iluminância excessiva, localizada próxima às janelas, e a área com iluminância insuficiente, no núcleo central, como mencionado anteriormente.

Dessa forma, ao observar resultados dos cenários investigados para todos os três objetivos, pode-se compreender que uma Profundidade da Edificação com 30 m seja preferível, pois contempla o ponto ótimo para *spatial Useful Daylight Illuminance* (sUDI), aproxima-se dos melhores valores para Índice de Sombra Médio Ponderado (ISmp), além de ser indiferente para *Load Cover Factor* (LCF).

Gráfico 20 – Gráficos *boxplot* de *Load Cover Factor* (LCF), *spatial Useful Daylight Illuminance* (sUDI) e Índice de Sombra Médio Ponderado (ISmp) para Profundidade da Edificação



Fonte: Autor, desenvolvido em JASP v. 0.17.2 (2024).

ii. Dimensão da quadra no eixo x

A variação da Dimensão da Quadra no eixo x não possui influência marcante em *Load Cover Factor* (LCF) e *spatial Useful Daylight Illuminance* (sUDI), enquanto para Índice de Sombra Médio Ponderado (ISmp) há uma relação inversamente proporcional – como se observa no Gráfico 21.

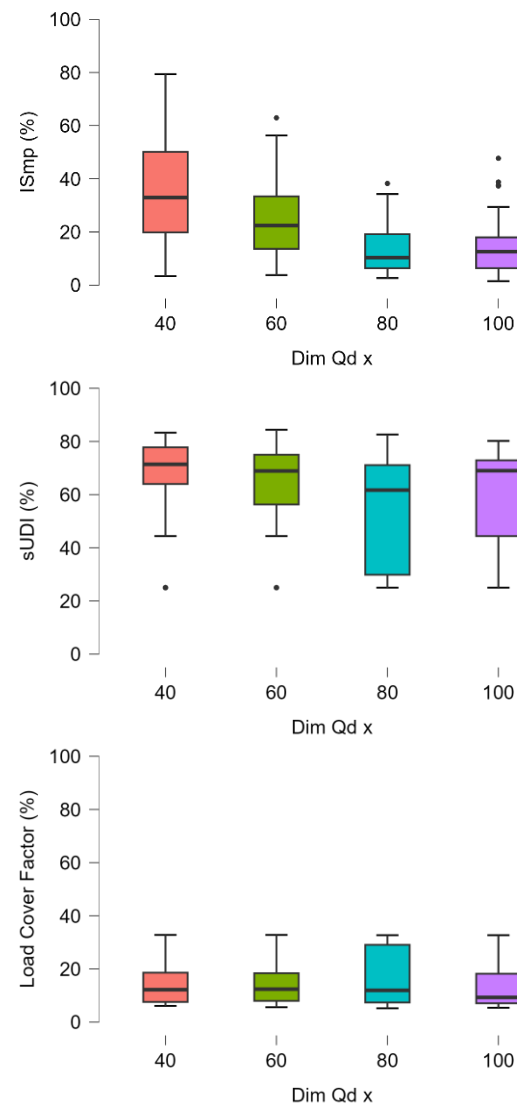
No caso do *Load Cover Factor* (LCF), os diferentes grupos possuem resultados muito semelhantes, com grande sobreposição de domínio dos resultados. Há somente um quartil para o agrupamento de 80 m de Dimensão da Quadra no eixo x que destoa dos demais.

De forma semelhante, não há diferença marcante entre os grupos para *spatial Useful Daylight Illuminance* (sUDI). A grande semelhança entre os grupos, especialmente para o máximo, quartil superior e mediana, entretanto há distinção com relação ao quartil inferior e mínimo. Dessa forma, os menores valores de Dimensão da Quadra no eixo x – os grupos de 40 m e 60 m – possuem melhor desempenho e seriam preferíveis.

Já Índice de Sombra Médio Ponderado (ISmp) é o objetivo que possui padrão mais definido e capaz de oferecer indicações mais interessantes. Com exceção aos mínimos de cada grupo, há clara relação inversamente proporcional, mesmo apesar das sobreposições. Assim, fica claro o benefício de menores valores para a Dimensão da Quadra no eixo x.

Dessa forma, ao observar resultados dos cenários investigados para todos os três objetivos, pode-se compreender que uma Dimensão da Quadra no eixo x reduzida seja preferível, pois apresenta algum benefício para *spatial Useful Daylight Illuminance* (sUDI), mas especialmente para Índice de Sombra Médio Ponderado (ISmp), além de ser indiferente para *Load Cover Factor* (LCF).

Gráfico 21 – Gráficos *boxplot* de *Load Cover Factor* (LCF), *spatial Useful Daylight Illuminance* (sUDI) e Índice de Sombra Médio Ponderado (ISmp) para Dimensão da Quadra no eixo x



Fonte: Autor, desenvolvido em JASP v. 0.17.2 (2024).

iii. Dimensão da quadra no eixo y

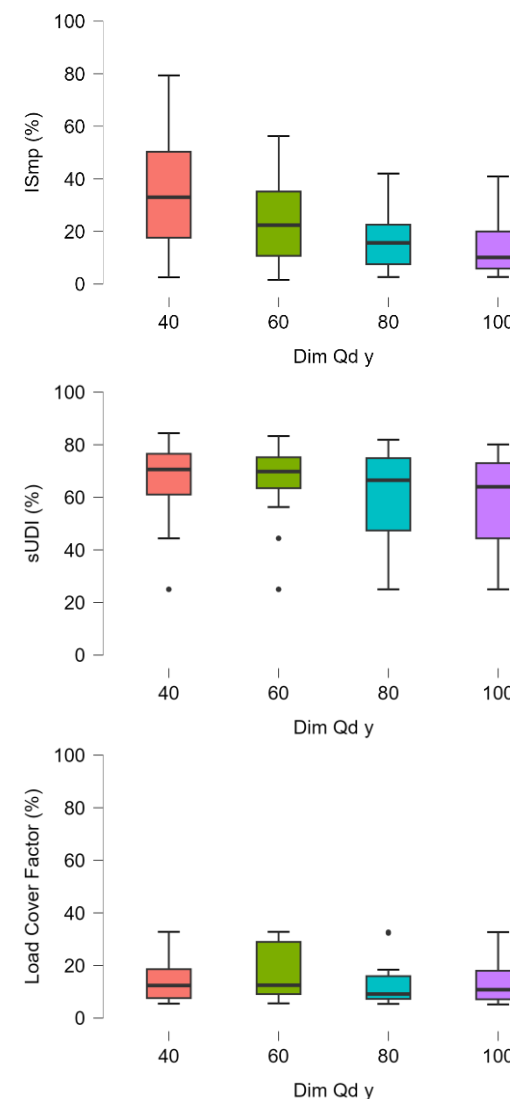
Os resultados para a variação da Dimensão da Quadra no eixo y são muito semelhantes à variação da Dimensão da Quadra no eixo x. Dessa forma, não possui influência marcante em *Load Cover Factor* (LCF) e *spatial Useful Daylight Illuminance* (sUDI), enquanto para Índice de Sombra Médio Ponderado (ISmp) há uma relação inversamente proporcional – como se observa no Gráfico 22.

No caso do *Load Cover Factor* (LCF), os diferentes grupos possuem resultados muito semelhantes, com grande sobreposição de domínio dos resultados. Há somente um quartil para o agrupamento de 60 m de Dimensão da Quadra no eixo x que destoa dos demais – diferente dos resultados na Dimensão da Quadra no eixo x em que esse padrão ocorre no agrupamento de 80 m.

De forma semelhante, não há diferença marcante entre os grupos para *spatial Useful Daylight Illuminance* (sUDI). A grande semelhança entre os grupos, especialmente para o máximo, quartil superior e mediana, entretanto há distinção com relação ao quartil inferior e mínimo. Dessa forma, os menores valores de Dimensão da Quadra no eixo y – os grupos de 40 m e 60 m – possuem melhor desempenho e seriam preferíveis.

Já o Índice de Sombra Médio Ponderado (ISmp) é o objetivo que possui padrão mais definido e capaz de oferecer indicações mais interessantes. Com exceção aos mínimos de cada grupo, há clara relação inversamente proporcional, mesmo apesar das sobreposições. Assim, fica claro o benefício de menores valores para a Dimensão da Quadra no eixo y.

Gráfico 22 – Gráficos *boxplot* de *Load Cover Factor* (LCF), *spatial Useful Daylight Illuminance* (sUDI) e Índice de Sombra Médio Ponderado (ISmp) para Dimensão da Quadra no eixo y



Fonte: Autor, desenvolvido em JASP v. 0.17.2 (2024).

Dessa forma, ao observar resultados dos cenários investigados para todos os três objetivos, pode-se compreender que uma Dimensão da Quadra no eixo y reduzida seja preferível, pois apresenta algum benefício para *spatial Useful Daylight Illuminance* (sUDI), mas especialmente para Índice de Sombra Médio Ponderado (ISmp), além de ser indiferente para *Load Cover Factor* (LCF).

iv. Número de Andares

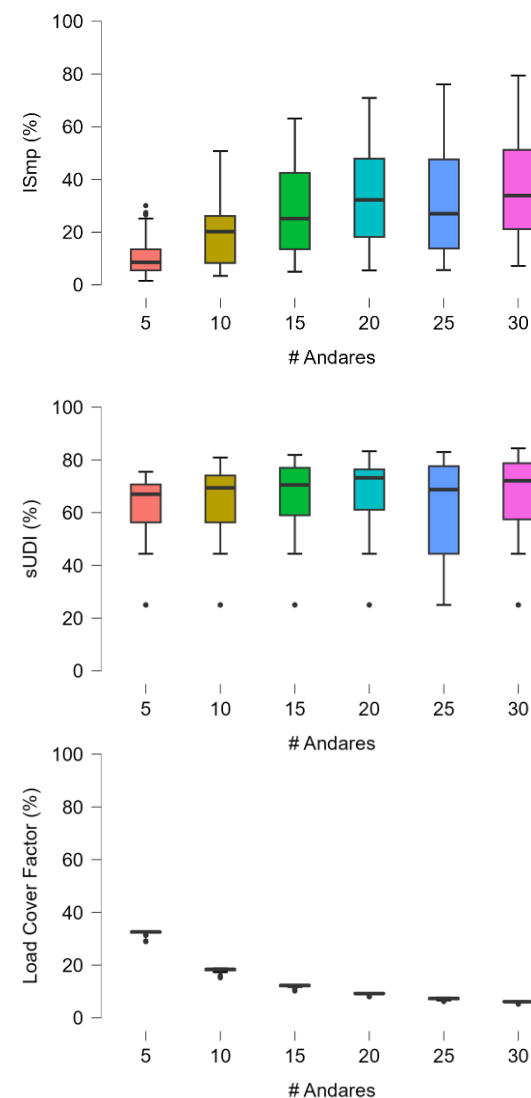
A variação do Número de Andares acarreta comportamento distinto em cada um dos objetivos do processo de otimização – como se observa no Gráfico 23.

No caso do *spatial Useful Daylight Illuminance* (sUDI), os diferentes grupos possuem resultados muito semelhantes, com grande sobreposição de domínio dos resultados. Somente o grupo de 25 andares possui quartil inferior e mínimo com desempenho inferior, porém isso pode ser decorrente de uma amostra maior e inclusão do *outlier*.

O Índice de Sombra Médio Ponderado (ISmp) possui grande sobreposição entre os domínios dos resultados para cada grupo, mas há uma relação diretamente proporcional, especialmente para os valores máximos, quartis superiores e medianas.

Por outro lado, do *Load Cover Factor* (LCF) possui relação inversamente proporcional muito marcante e é o objetivo que possui padrão mais definido e capaz de oferecer indicações mais interessantes. É bastante perceptível o melhor desempenho dos grupos com menores Números de Andares, um efeito quase exponencial. Dentre todas as relações observadas é o caso de indicador e objetivo de otimização com tendência mais marcante e clara distinção entre grupos.

Gráfico 23 – Gráficos *boxplot* de *Load Cover Factor* (LCF), *spatial Useful Daylight Illuminance* (sUDI) e Índice de Sombra Médio Ponderado (ISmp) para Número de Andares da Edificação



Fonte: Autor, desenvolvido em JASP v. 0.17.2 (2024).

Dessa forma, ao observar resultados dos cenários investigados para todos os três objetivos, evidencia-se um conflito de efeitos especialmente entre *Load Cover Factor* (LCF) e Índice de Sombra Médio Ponderado (ISmp). Entretanto, por ser um efeito mais marcante e claro, seja mais vantajoso beneficiar o desempenho do *Load Cover Factor* (LCF) e assim preferir edificações com menor Número de Andares.

v. Azimute – Orientação

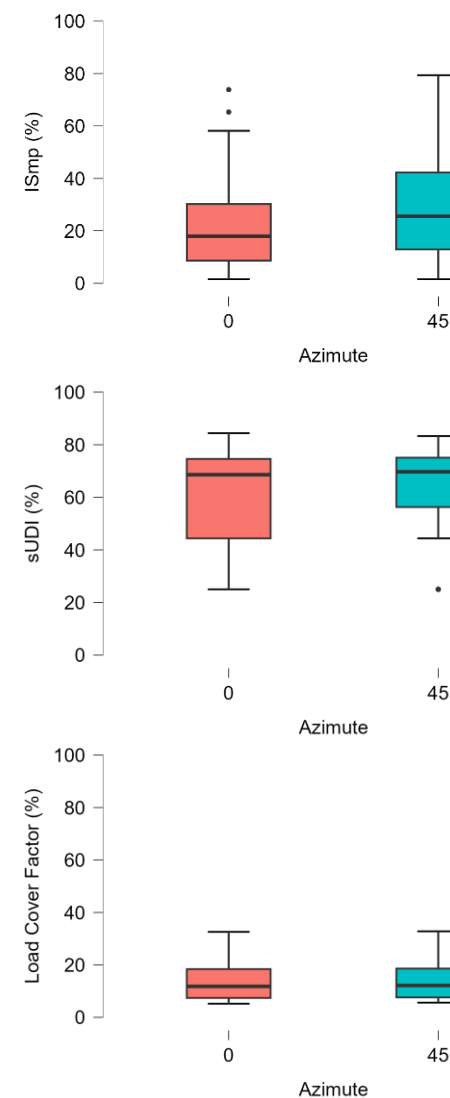
Dentre as variáveis de projeto analisadas para a tipologia Torre, a variação do Azimute é aquele que aparenta ter menor efeito. Aparentemente há pouco efeito no desempenho de cada um dos objetivos do processo de otimização com a variação do Azimute – como se observa no Gráfico 24.

No caso do *Load Cover Factor* (LCF), os diferentes grupos possuem resultados muito semelhantes, com grande sobreposição de domínio dos resultados.

O *spatial Useful Daylight Illuminance* (sUDI) também possui grande sobreposição dos domínios. Entretanto o valor mínimo e quartil inferior do Azimute de 45° apresentam desempenho superior.

Já o Índice de Sombra Médio Ponderado (ISmp) possui situação semelhante ao *spatial Useful Daylight Illuminance* (sUDI), com grande sobreposição dos domínios, mas com o valor máximo e quartil superior do Azimute de 45° com desempenho superior.

Gráfico 24 – Gráficos *boxplot* de *Load Cover Factor* (LCF), *spatial Useful Daylight Illuminance* (sUDI) e Índice de Sombra Médio Ponderado (ISmp) para Azimute



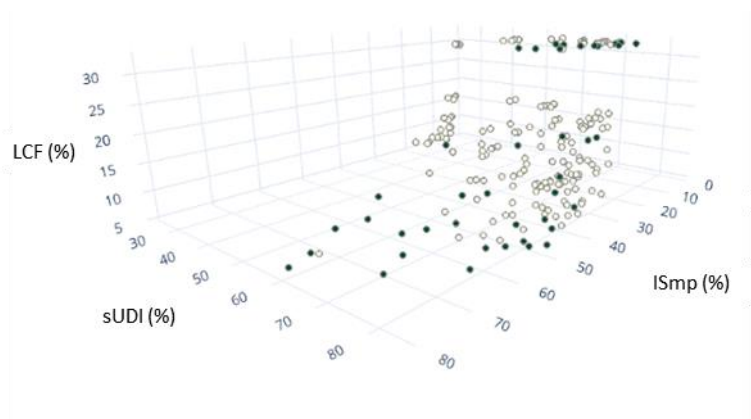
Fonte: Autor, desenvolvido em JASP v. 0.17.2 (2024).

Dessa forma, ao observar resultados dos cenários investigados para todos os três objetivos, apesar das grandes sobreposições de domínio, medianas semelhantes e pouca diferenças entre os dois grupos, pode-se notar um sutil desempenho superior das edificações com Azimute de 45°.

4.1.4 Clusterização da Fronte de Pareto

A definição da Fronte de Pareto é etapa essencial para a avaliação do processo de otimização. Nesse processo define-se os resultados considerados ótimos, ou melhores resultados, pois não existe outro resultado que é superior simultaneamente em todos os objetivos avaliados. No caso da presente otimização com três objetivos, esse Fronte de Pareto se caracteriza como uma superfície não necessariamente plana, como se vê no Gráfico 25, em que os pontos coloridos em verde pertencem à Fronte de Pareto.

Gráfico 25 - Gráfico de dispersão 3D pelos eixos LCF, sUDI e ISmp com indicação da Fronte de Pareto para quadra com torre isolada



Fonte: Autor, produzido em *Plotly Chart Studio* (2023)

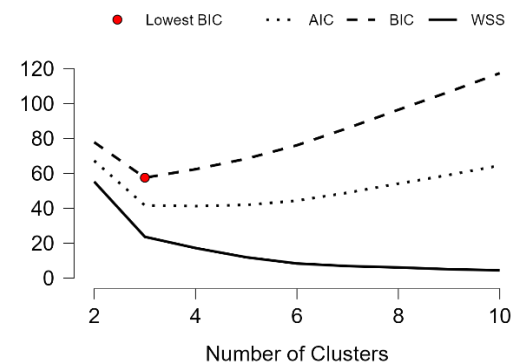
A partir da definição da Fronte de Pareto, realiza-se um processo de divisão em *clusters* destes cenários, definidos a partir da sua proximidade, por meio do processo de *Neighborhood-Based Clustering (C-means)*. No presente estudo, o algoritmo define três *clusters* como condição ideal, como se observa no ponto de inflexão do Gráfico 26 e na Tabela 12 que apresenta o resumo deste processo.

Tabela 12 – *C-Means Clustering* da quadra com torre isolada

Clusters	N	R ²	AIC	BIC	Silhouette
3	43	0,812	41,630	57,480	0,570

Fonte: Autor, desenvolvido em JASP v. 0.17.2 (2024)

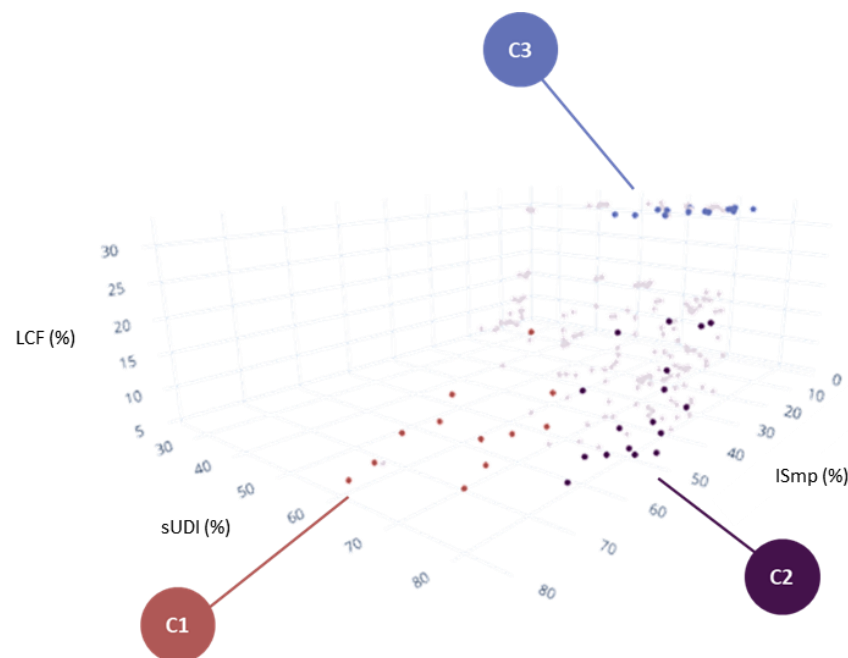
Gráfico 26 – Gráfico de definição da quantidade recomendada de *clusters*



Fonte: Autor, desenvolvido em JASP v. 0.17.2 (2024)

O Gráfico 27 apresenta os três *clusters* da Frente de Pareto com distinção por cores, enquanto os cenários que não se encontram na Frente de Pareto são apresentados por pontos brancos. Estes três *clusters* (C1, C2 e C3) possuem características próprias relativas aos três objetivos, assim como características morfológicas, relativas as variáveis de projeto. Assim, a seguir apresentam-se as caracterizações dos três *clusters* separadamente.

Gráfico 27 – Gráfico de dispersão 3D pelos eixos LCF, sUDI e ISmp com indicação de *clusters* no Fronte de Pareto para quadra com torre isolada

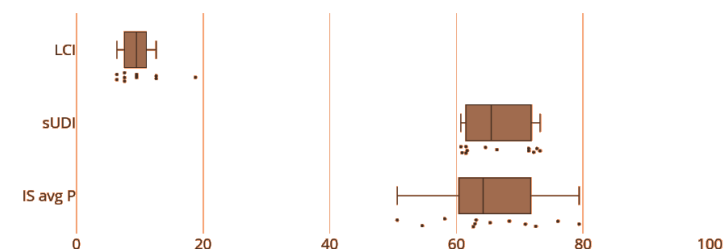


Fonte: Autor, produzido em Plotly Chart Studio (2023)

i. **Cluster 1**

No *Cluster 1* (C1), os resultados revelam que as edificações apresentam um *Load Cover Factor* (LCF) mais baixo, com valores entre 5% e 20%, semelhante ao *Cluster 2*. Além disso, o Índice de Sombra Médio Ponderado (ISmp), varia entre 40% e 90%, o que sugere uma variação considerável na quantidade de sombra projetada no meio urbano, variação significativamente maior do que o *Cluster 2*. Em relação à *spatial Useful Daylight Illuminance* (sUDI), os valores ficam entre 60% e 80%, o que indica que as áreas internas das edificações possuem uma quantidade razoavelmente alta de iluminação natural útil durante o dia.

Gráfico 28 – Gráfico descritivo dos objetivos da otimização do *Cluster 1* da tipologia com torre isolada

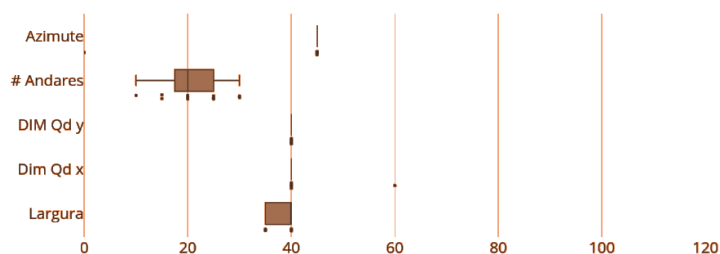


Fonte: Autor, produzido em Plotly Chart Studio (2023)

As edificações do *Cluster 1* apresentam uma profundidade de 35 a 40 metros, enquanto as dimensões da quadra foram consistentemente de 40 metros. Isso sugere uma alta taxa de ocupação. Quanto à altura, esta varia entre 10 e 30 andares. Já o azimute é predominante de 45°. Dessa forma, este *cluster* pode ser

caracterizado morfologicamente como torres com alturas médias a altas e plantas profundas, implantadas em quadras pequenas, o que ocasiona alta taxa de ocupação do solo.

Gráfico 29 – Gráfico descritivo das variáveis de projeto do Cluster 1 da tipologia com torre isolada

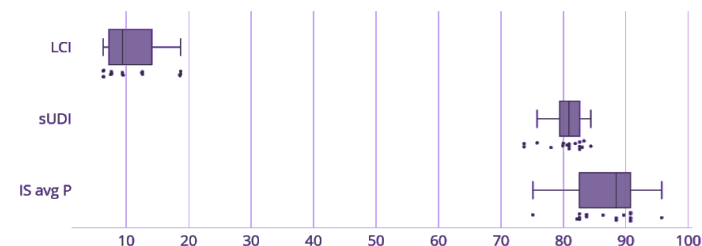


Fonte: Autor, produzido em Plotly Chart Studio (2023)

ii. Cluster 2

No Cluster 2 (C2), as edificações também apresentam um *Load Cover Factor* (LCF) baixo, inferior a 20%. Quanto ao Índice de Sombra Médio Ponderado (ISmp) e à *spatial Useful Daylight Illuminance* (sUDI), o Cluster 2 apresenta os melhores, com resultados máximo semelhantes ao Cluster 1, porém mais concentrados numa faixa de valores mais altos. O Índice de Sombra Médio Ponderado (ISmp) varia de 80% e 95%, enquanto à *spatial Useful Daylight Illuminance* (sUDI) na faixa de 70 e 90%.

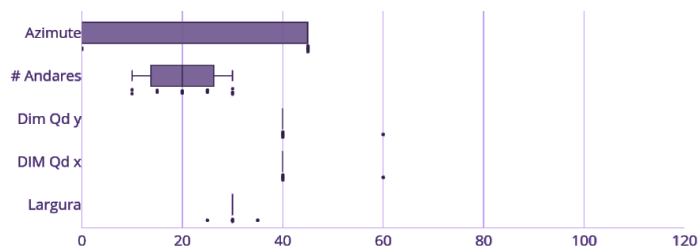
Gráfico 30 – Gráfico descritivo dos objetivos da otimização do Cluster 2 da tipologia com torre isolada



Fonte: Autor, produzido em Plotly Chart Studio (2023)

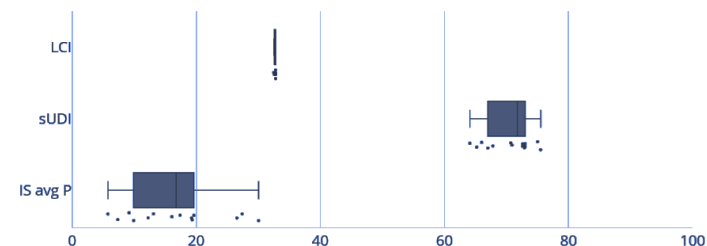
Morfologicamente, o Cluster 2 possui semelhança ao Cluster 1, caracterizado como torres com alturas médias a altas e plantas profundas, implantadas em quadras pequenas, o que ocasiona alta taxa de ocupação do solo. Entretanto, possui profundidade média inferior ao Cluster 1, entre 25 m e 35 m. A faixa da altura mais alta é idêntica, entre 10 e 30 andares e a quadra também é de tamanho reduzido, com dimensões mais habituais de 40 m, menor valor possível dentro do presente estudo. Azimute também é predominante à 45°.

Gráfico 31 Gráfico descritivo das variáveis de projeto do *Cluster 2* da tipologia com torre isolada



Fonte: Autor, produzido em *Plotly Chart Studio* (2023)

Gráfico 32 – Gráfico descritivo dos objetivos da otimização do *Cluster 3* da tipologia com torre isolada



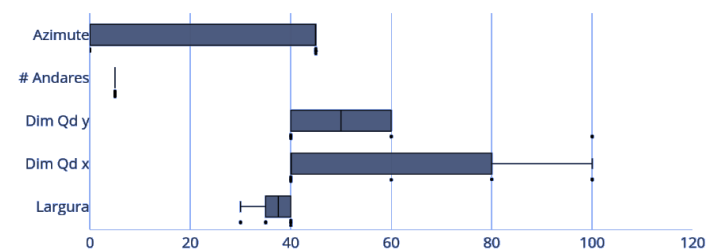
Fonte: Autor, produzido em *Plotly Chart Studio* (2023)

iii. **Cluster 3**

No *Cluster 3* (C3), as edificações apresentam um *Load Cover Factor* (LCF) mais alto que os demais *clusters*, na faixa de 30% a 35%. Já o Índice de Sombra Médio Ponderado (ISmp) é mais baixo em comparação aos outros *clusters*, entre 5% e 30%. O *spatial Useful Daylight Illuminance* (sUDI) permanece com valores mais elevados, porém inferiores aos demais *clusters*, na faixa de 65% a 75%.

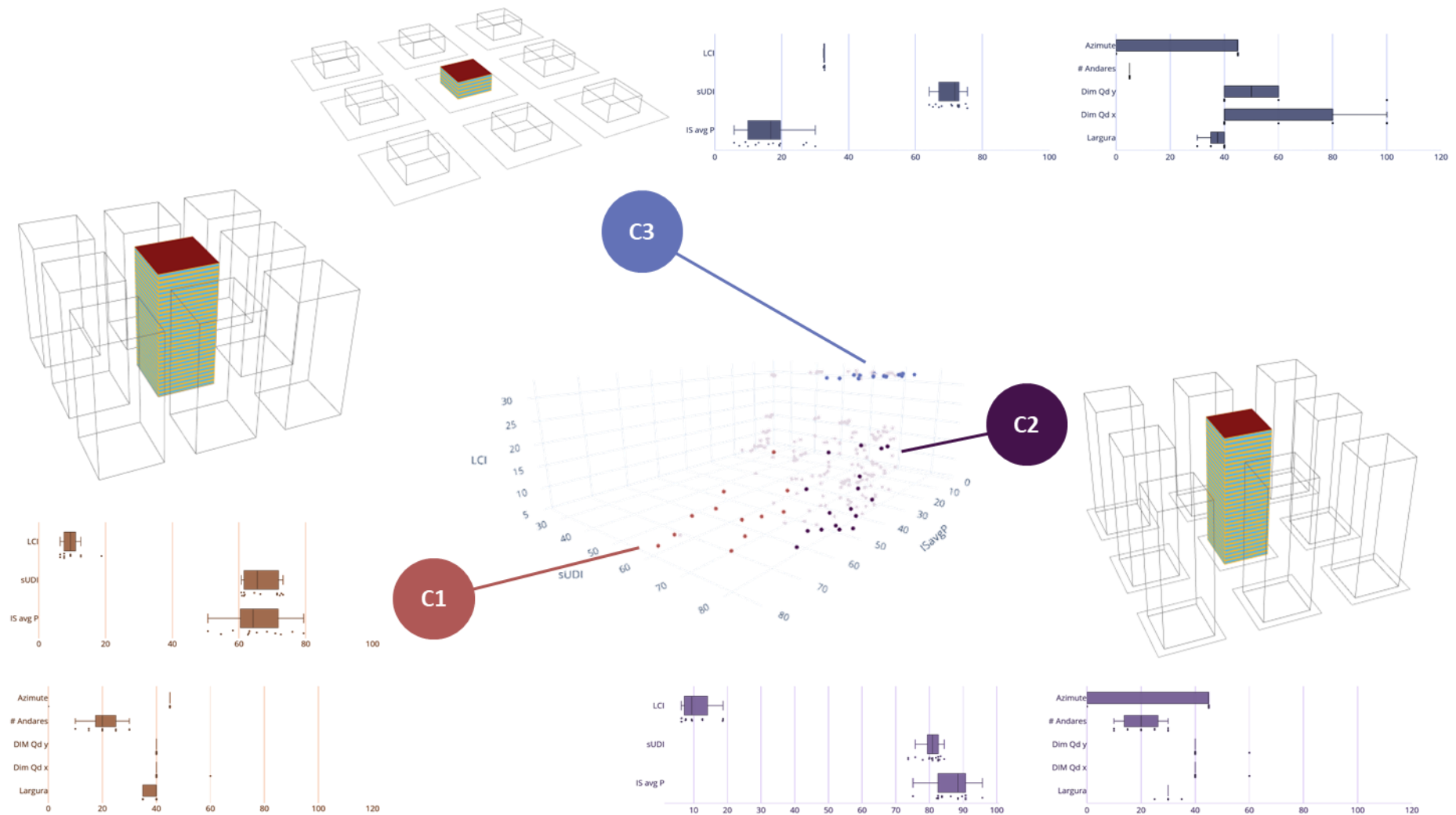
Neste *cluster*, a profundidade das edificações variou de 30 a 40 metros, enquanto a largura das quadras foi mais variada. O azimute também apresenta uma variação maior em comparação aos *clusters* anteriores. Entretanto o ponto de destaque é a altura mais baixa das edificações neste *cluster*, exclusivamente com apenas 5 andares.

Gráfico 33 – Gráfico descritivo das variáveis de projeto do *Cluster 3* da tipologia com torre isolada



Fonte: Autor, produzido em *Plotly Chart Studio* (2023)

Figura 44 – Diagrama geral dos resultados dos cenários pertencentes à Frente de Pareto da tipologia de quadra com torre isolada



Fonte: Autor (2023)

4.1.5 Melhores resultados – quadra com torre isolada

A seguir apresentam-se os cenários com melhor desempenho para cada um dos objetivos da otimização, assim como para o Volume Dominado.

i. Índice de Sombra Médio Ponderado

O ranqueamento dos melhores cinco resultados do Índice de Sombra Médio Ponderado (ISmp) no processo de otimização são apresentados na Tabela 13, enquanto a Figura 45 apresenta uma ilustração dos três melhores resultados. Estes dados evidenciam que o Índice de Sombra Médio Ponderado (ISmp) se beneficia de um contexto urbano mais protegido da insolação, com maiores Fatores H/W e Índices de Aproveitamento (IA), algo que também acarreta maiores gabaritos, como apontado anteriormente.

Adicionalmente, percebe-se que estes cenários não possuem desempenho elevados nos outros objetivos – praticamente todos ranqueados na segunda centena. Enquanto para o Volume Dominado os resultados podem ser considerados intermediários, praticamente todos ranqueados entre 40° e 70°.

Figura 45 – Representação morfológica dos três melhores cenários de Índice de Sombra Médio Ponderado (ISmp) para a quadra com torre isolada

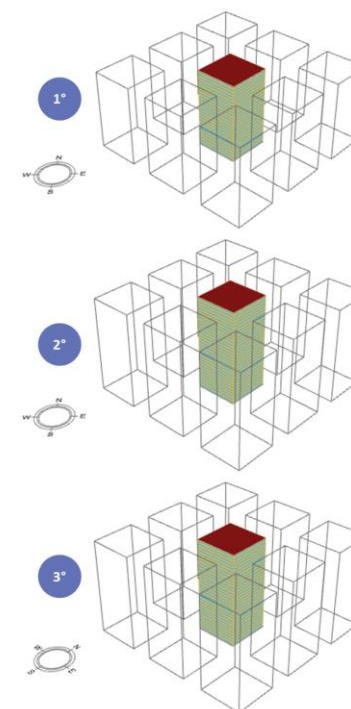


Tabela 13 – Características dos cinco cenários mais bem ranqueados para Índice de Sombra Médio Ponderado (ISmp) da quadra com torre isolada

Iteração	Profundidade Edificação (m)	Dimensão da Quadra em x (m)	Dimensão da Quadra em y (m)	Número de Andares (#)	Azimute (graus)	ISmp (%)	Ranking ISmp	sUDI (%)	Ranking sUDI	LCF (%)	Ranking LCF	Volume Dominado (un³)	Ranking Volume Dominado
179	40	40	40	30	45	79,4	1	60,9	141	6,4	176	30.936,61	59
76	40	40	40	25	45	76,0	2	61,5	139	7,6	153	35.528,67	40
150	40	40	40	30	0	73,9	3	60,4	143	6,4	177	28.555,10	69
10	35	40	40	30	45	72,5	4	72,7	74	6,4	175	33.748,49	43
89	40	40	40	20	45	70,9	5	60,7	142	9,5	117	40.882,66	23

ii. **Spatial Useful Daylight Illuminance**

Os melhores resultados de *spatial Useful Daylight Illuminance* (sUDI) encontrados no processo de otimização obtiveram valores superiores a 80% de *spatial Useful Daylight Illuminance* (sUDI) (Tabela 14). Como pode-se observar na Tabela 14 e na Figura 46, estes cenários possuem um equilíbrio na Profundidade da Edificação – e conseqüentemente sua profundidade, como mencionado anteriormente – com todos os cenários com 30 m de profundidade, com altura na faixa superior dos valores estudados, entre 20 e 30 andares, e distanciamentos superiores aos mínimos, com quadras maiores que a projeção da edificação, entretanto não atingem os valores máximos, como todos os cenários com quadras de dimensões na faixa de 40 m a 60 m.

Adicionalmente, pode-se notar que estes cinco cenários possuem desempenho intermediários para superiores de Índice de Sombra Médio Ponderado (ISmp), entre 19° a 43°. Já para possuem desempenho inferior para LCF, todos na segunda centena. Por outro lado, desempenho do Volume Dominado pode ser considerado intermediário, na faixa de 40° a 80°.

Figura 46 – Representação morfológica dos três melhores cenários de *spatial Useful Daylight Illuminance* (sUDI) para a quadra com torre isolada

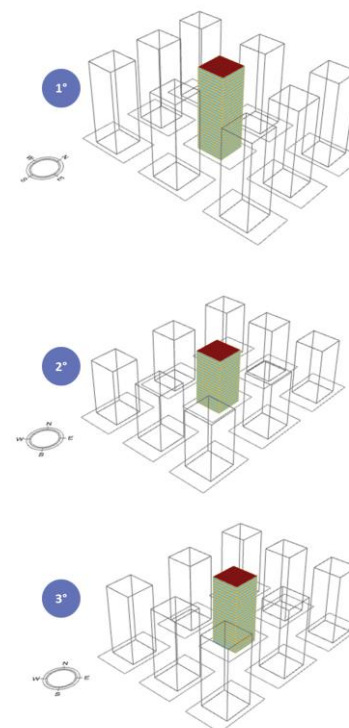


Tabela 14 - Características dos 5 melhores cenários para *spatial Useful Daylight Illuminance* (sUDI) da quadra com torre isolada

Iteração	Profundidade Edificação (m)	Dimensão da Quadra em x (m)	Dimensão da Quadra em y (m)	Número de Andares (#)	Azimute (graus)	ISmp (%)	Ranking ISmp	sUDI (%)	Ranking sUDI	LCF (%)	Ranking LCF	Volume Dominado (un³)	Ranking Volume Dominado
204	30	60	40	30	0	50,1	26	84,4	1	6,3	178	26.665,31	75
91	30	40	60	20	45	40,7	43	83,3	2	9,4	118	31.835,42	54
140	30	40	60	25	45	46,7	34	83,0	3	7,5	154	29.076,38	68
190	30	40	40	25	0	53,7	19	82,6	4	7,6	149	33.732,86	44
93	30	60	40	30	45	52,3	22	82,6	5	6,3	179	27.221,48	74

iii. **Load Cover Factor**

Os melhores resultados de *Load Cover Factor* (LCF) encontrados no processo de otimização obtiveram valores superiores a 32,8% de *Load Cover Factor* (LCF) (Tabela 15). Como pode-se observar na Tabela 15 e na Figura 47, estes cenários são principalmente caracterizados por edificações de baixo gabarito, todos com 5 andares – menor gabarito possível no estudo –, profundidade de edificação de 30 m a 40 m – maiores valores do estudo –, quadras pequenas e com azimute de 45°. Neste sentido, evidencia-se uma tendência por favorecer maior área de cobertura para geração de energia e redução da área construída e consequentemente, menor demanda energética – como pontuado anteriormente.

Os resultados destes cenários nos outros dois objetivos são intermediários para inferiores – na faixa de 82° a 120° para Índice de Sombra Médio Ponderado (ISmp) e 70° a 130° para *spatial Useful Daylight Illuminance* (sUDI). Por outro lado, para o Volume Dominado, a maior parte dos cenários têm resultados superiores, com 4 cenários entre os 20 mais bem ranqueados – inclusive o 2° mais bem ranqueado.

Figura 47 – Representação morfológica dos três melhores cenários de *Load Cover Factor* (LCF) para a quadra com torre isolada

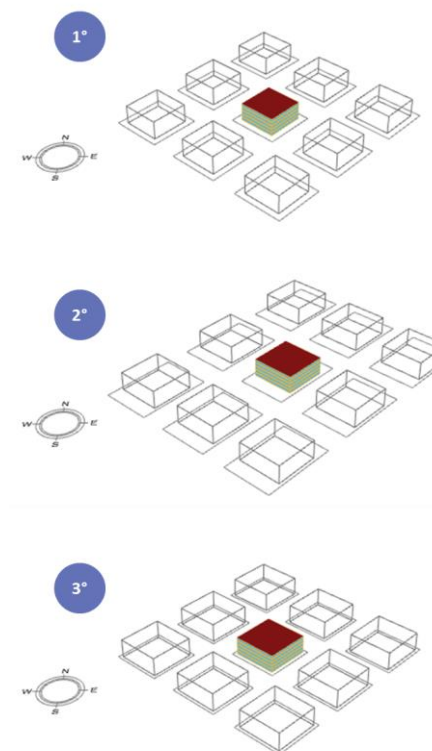


Tabela 15 - Características dos 5 melhores cenários para *Load Cover Factor* (LCF) da quadra com torre isolada

Iteração	Profundidade Edificação (m)	Dimensão da Quadra em x (m)	Dimensão da Quadra em y (m)	Número de Andares (#)	Azimute (graus)	ISmp (%)	Ranking ISmp	sUDI (%)	Ranking sUDI	LCF (%)	Ranking LCF	Volume Dominado (un³)	Ranking Volume Dominado
31	30	40	40	5	45	17,5	120	72,6	75	32,8	1	41.456,11	20
50	35	40	60	5	45	19,6	112	70,9	91	32,8	2	45.630,38	14
63	35	40	40	5	45	26,5	82	70,7	92	32,8	3	61.564,31	2
79	40	60	60	5	45	13,1	142	67,8	114	32,8	4	29.179,88	67
94	40	60	40	5	45	19,4	114	67,0	122	32,8	5	42.532,69	18

iv. Volume Dominado

O Volume Dominado representa o melhor equilíbrio – ou *trade-off* – entre o desempenho dos objetivos empregados no processo de otimização. Neste sentido, os desempenhos destes cenários para os três objetivos da otimização são considerados, em sua maioria, intermediários, com exceção os três cenários com desempenhos superiores para *Load Cover Factor* (LCF) (Tabela 16).

Como pode-se observar na Tabela 16 e na Figura 48, a morfologia dos melhores cenários de Volume Dominado possuem características que beneficiam de certa forma cada um dos três objetivos, com:

1. Edificações mais baixas – entre 5 e 10 andares -, o que auxilia a um melhor *Load Cover Factor* (LCF);
2. Profundidade da edificação intermediária para grande – próximo a 30 m, o que favorece o *spatial Useful Daylight Illuminance* (sUDI) e;
3. Quadras com dimensões pequenas, o que beneficia a proteção das áreas urbanas e assim favorece o Índice de Sombra Médio Ponderado (ISmp).

Figura 48 – Representação morfológica dos três melhores cenários de Volume Dominado para a quadra com torre isolada

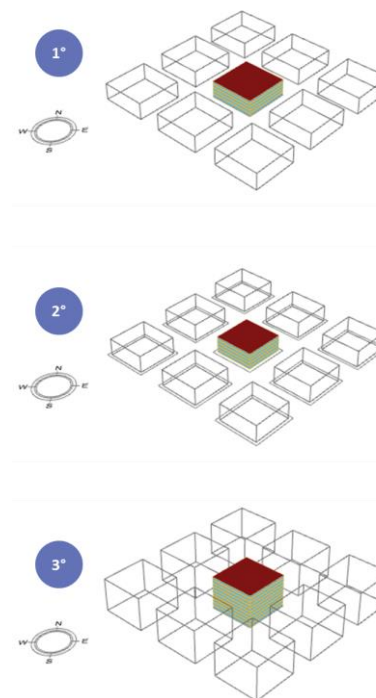


Tabela 16 - Características dos 5 melhores cenários para Volume Dominado da quadra com torre isolada

Iteração (#)	Profundidade Edificação (m)	Dimensão da Quadra em x (m)	Dimensão da Quadra em y (m)	Número de Andares (#)	Azimute (graus)	ISmp (%)	Ranking ISmp	sUDI (%)	Ranking sUDI	LCF (%)	Ranking LCF	Volume Dominado (un³)	Ranking Volume Dominado
14	40	40	40	5	45	30,1	73	64,1	131	32,8	7	63.180,61	1
63	35	40	40	5	45	26,5	82	70,7	92	32,8	3	61.564,31	2
59	40	40	40	10	45	50,7	24	64,6	130	18,8	42	61.526,19	3
54	35	40	40	10	45	43,2	38	73,7	64	18,7	44	59.542,17	4
15	40	40	40	5	0	27,4	80	66,0	126	32,6	22	58.924,64	5

4.1.6 Considerações finais – quadra com torre isolada

O estudo da tipologia de quadra com torre isolada indica para maior relevância de aspectos como altura e profundidade das edificações, assim como das dimensões da quadra nos indicadores de desempenho. Inclusive o efeito desses aspectos muitas vezes se caracteriza como antagônico, com tendências opostas, especialmente entre *Load Cover Factor* (LCF) e Índice de Sombra Médio Ponderado (ISmp), o que reforça a ideia de problema de projeto complexos.

O estudo aponta para correlações bastante altas em valores absolutos entre os objetivos da otimização e variáveis de projeto e covariáveis relativas à morfologia urbana. Contudo é possível identificar uma relação entre essas variáveis e covariáveis para cada objetivo de otimização. Para *Load Cover Factor* (LCF) aspectos relacionados à altura, como Número de Andares e Razão entre Área de Cobertura e Área de Fachada, possuem correlações altas, ampliação da geração energética que está diretamente atrelada a área de cobertura e a redução da demanda energética. Por outro lado, o Índice de Sombra Médio Ponderado (ISmp) está mais atrelado a beneficiar ambientes urbanos mais protegidos da insolação direta e assim indicadores que melhor expressam o câniões urbano como Fator H/W, Taxa de Ocupação (TO), Índice de Aproveitamento (IA) e Índice de Infraestrutura possuem maiores correlações. Por sua vez *spatial Useful Daylight Illuminance* (sUDI) apresenta correlações fortes com aspectos relacionados ao formato do ambiente interno, especialmente a profundidade da edificação, a Razão entre Perímetro e Área da planta e o Fator Forma.

Entretanto uma análise mais detalhada das variáveis de projeto aponta para padrões e tendências marcantes que podem contribuir com o

desenvolvimento de projeto. No caso de *spatial Useful Daylight Illuminance* (sUDI) nota-se a existência de um ponto ótimo, com profundidade de 30 m, em que há o melhor equilíbrio entre a faixa de iluminância excessiva, localizada próxima às janelas, e a área com iluminância insuficiente, no núcleo central mais profundo. A altura da edificação, medida pelo seu número de andares, é outra variável morfológica de projeto que chama atenção devido a efeitos opostos em *Load Cover Factor* (LCF) e em Índice de Sombra Médio Ponderado (ISmp). Enquanto *Load Cover Factor* (LCF) se beneficia com edificações mais baixas, com menor área construída em relação a área e cobertura disponível para instalação de módulos fotovoltaicos, o Índice de Sombra Médio Ponderado (ISmp) tem melhor desempenho com ambientes urbanos mais enclausurados, algo favorecido por edificações mais altas.

Já a análise dos *clusters* da Fronte de Pareto, que apresenta um agrupamento dos cenários com melhor equilíbrio entre os três objetivos de otimização, apresenta dois cluster com características mais semelhantes, mas que destoam consideravelmente do outro. Neste sentido, evidencia-se essa distinção entre cenários que mais favorecem o desempenho do Índice de Sombra Médio Ponderado (ISmp), com edifícios mais altos e quadras menores que propicia um espaço urbano mais protegido da insolação, e outros cenários com edificações mais baixas, que beneficia mais o *Load Cover Factor* (LCF).

Essas características morfologias são reforçadas pela análise dos melhores cinco resultados para cada objetivo de otimização. Entretanto, interessantemente, os melhores cenários para Volume Dominado conseguem contemplar todas as demandas dos três objetivos de otimização, **com edificações mais baixas** – que favorece *Load Cover Factor* (LCF) –, **Profundidade da edificação intermediária** –

que contribui com *spatial Useful Daylight Illuminance* (sUDI) – e **quadras com dimensões pequenas** – que beneficia o Índice de Sombra Médio Ponderado (ISmp). Neste sentido, verifica-se a pertinência e relevância do Volume Dominado como um indicador que concilia diferentes indicadores de desempenho e possibilita cenário mais equilibrados e factíveis.

4.2 QUADRA COM EDIFICAÇÕES EM FITA

Nesta seção apresentam-se os resultados para a tipologia de quadra com edificações em fita, organizados em cinco partes distintas:

- i. Variáveis de projeto e objetivos de otimização;
- ii. Análise das correlações significativas;
- iii. Análise das variáveis de projeto;
- iv. Clusterização da Fronte de Pareto;

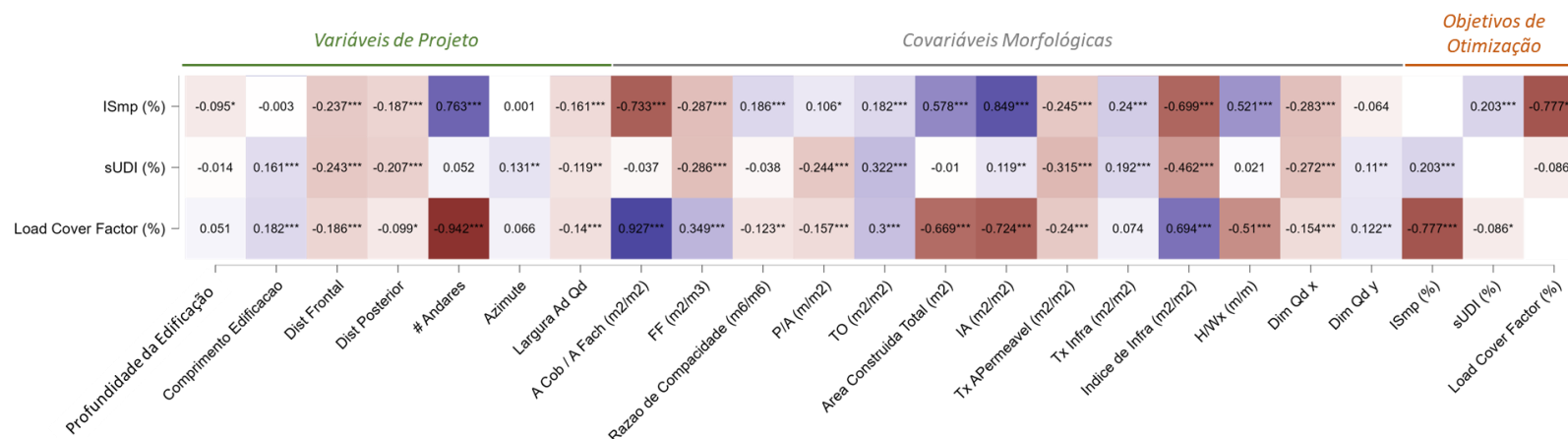
v. Melhores Resultados.

4.2.1 Variáveis de projeto e objetivos da otimização

Para analisar a relação entre variáveis de projeto e os objetivos da otimização, assim como indicadores de desempenho, realiza-se uma análise de correlação. Para melhor visualização dos dados emprega-se uma matriz de correlação com o mapa de calor em que tons de azul e vermelho para as correlações positivas e negativas, respectivamente. A intensidade da cor corresponde a intensidade de correlação.

O Gráfico 34 apresenta os resultados dessa correlação por meio de uma matriz de correlação com a mapa de calor. Opta-se por apresentar somente a correlação dos três objetivos da otimização com as variáveis de projeto e as covariáveis.

Gráfico 34 - Matriz de correlação entre os objetivos da otimização e as variáveis e covariáveis de projeto para quadra com edificações em fita



Fonte: Autor, desenvolvido em JASP v. 0.17.2 (2024).

Observa-se que o Índice de Sombra Médio Ponderado (ISmp) apresenta diversas correlações significativas, tanto com variáveis de projetos, com covariáveis e mesmo com outro objetivo da otimização. Dois desses indicadores possuem correlação positiva – Número de Andares (# Andares) e Índice de Aproveitamento (IA) –, enquanto os outros dois possuem relação inversamente proporcional, ou correlação negativa – Relação entre Área de Cobertura por Área de Fachada (Acob/Afach) e o *Load Cover Factor* (LCF).

O objetivo de otimização *spatial Useful Daylight Illuminance* (sUDI) não apresentou correlação significativa, acima ou igual de 0,7 absoluto. O indicador com correlação mais forte é o Índice de Infraestrutura (Índice de Infra) com valor de -0,462.

Por sua vez, o *Load Cover Factor* (LCF) apresenta diversas correlações significativas, tanto com variáveis de projetos, com covariáveis e mesmo com outro objetivo da otimização. Curiosamente, são os mesmos indicadores com correlações significativas observado em Índice de Sombra Médio Ponderado (ISmp). Entretanto as correlações possuem sentidos distintos. Enquanto o Número de Andares (# Andares) e o Índice de Aproveitamento (IA) possuem correlação positiva com Índice de Sombra Médio Ponderado (ISmp), esta relação é negativa para o *Load Cover Factor* (LCF). Já a Relação entre Área de Cobertura por Área de Fachada (Acob/Afach) possui correlação positiva para o *Load Cover Factor* (LCF) ao invés de negativa como ocorre para o Índice de Sombra Médio Ponderado (ISmp). também pode-se notar este fenômeno em outros indicadores com valores absolutos mais altos, mas inferiores a 0,7, como Índice de Infraestrutura (Índice de Infra) – com valor positivo para Índice de Sombra Médio Ponderado (ISmp) e negativo para *Load Cover Factor* (LCF) – e Área Construída Total – com valor

positivo para *Load Cover Factor* (LCF) e negativo para Índice de Sombra Médio Ponderado (ISmp).

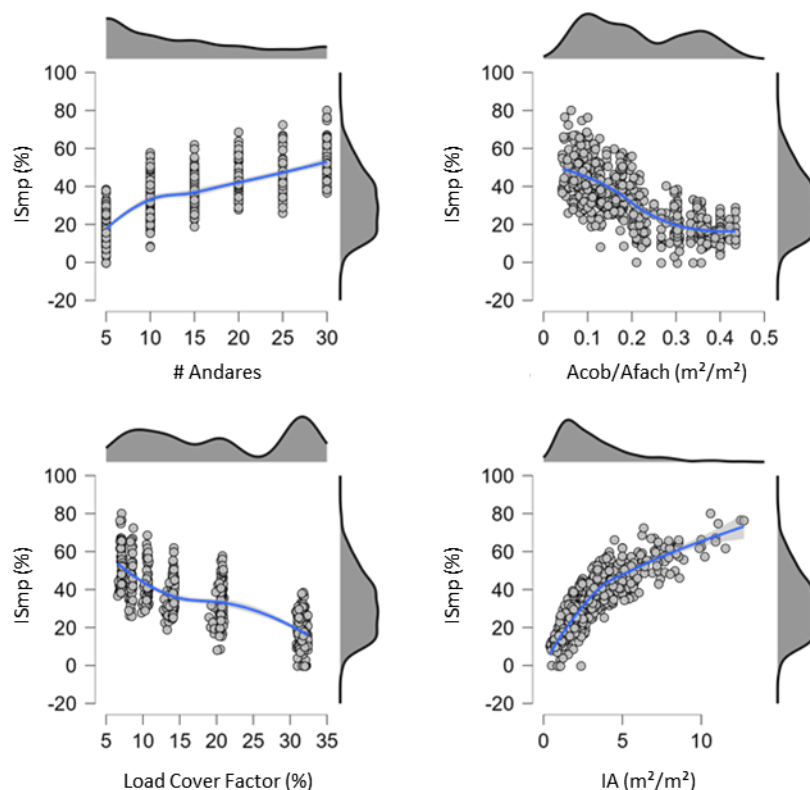
4.2.2 Análise das correlações significativas

Para melhor compreender os fenômenos existentes nos casos de correlações significativas apontadas no item anterior apresentam-se os gráficos de densidade e dispersão com uma linha de regressão suavizada. Os gráficos são agrupados por objetivo da otimização para facilitar a análise. Dos três objetivos analisados, tem-se quatro indicadores relevantes para Índice de Sombra Médio Ponderado (ISmp) e quatro indicadores relevantes para *Load Cover Factor* (LCF), enquanto nenhum indicador apresenta valor absoluto superior ou igual a 0,7 para *spatial Useful Daylight Illuminance* (sUDI).

i. Índice de Sombra Médio Ponderado

Como mencionado anteriormente, dos quatro indicadores, dois possuem relação diretamente proporcional com o Índice de Sombra Médio Ponderado (ISmp) e outros dois com relação inversamente proporcional. Apesar de todas as linhas de regressão serem curvas, no caso do Número de Andares (# Andares) e *Load Cover Factor* (LCF) estas curvas de regressão suavizadas se aproximam de retas, como nota-se no Gráfico 35. Contudo a dispersão dos valores nestes dois gráficos é bastante estratificada. Já os outros dois indicadores possuem curvas menos suaves. No caso específico do Índice de Aproveitamento (IA) os pontos se aglutinam bastante a curva de regressão devido à alta correlação, de -0,849, a mais alta dentre todos os indicadores para o Índice de Sombra Médio Ponderado (ISmp) na tipologia de quadra com edificações em fita.

Gráfico 35 - Gráficos de dispersão de Número de Andares, Relação de Área de Cobertura por Área de Fachada, Índice de Aproveitamento e *Load Cover Factor* (LCF)



Fonte: Autor, desenvolvido em JASP v. 0.17.2 (2024).

É interessante perceber que há uma concentração de resultados com valores mais baixos de Índice de Sombra Médio Ponderado (ISmp), como se pode observar pelos gráficos de densidade (Gráfico 35). Já Quanto à densidade dos valores dos outros indicadores, existe concentração de valores claros para Número de Andares (# Andares) e o Índice de Aproveitamento (IA), com maior

concentração em valores mais baixos. Por outro lado, para Relação Área de Cobertura por Área de Fachada (Acob/Afach) e *Load Cover Factor* (LCF) a distribuição é mais heterogênea com pelo menos dois intervalos em que há maior densidade de resultados.

Há clara estratificação dos valores do Número de Andares (# Andares) e do *Load Cover Factor* (LCF). O primeiro caso se deve ao fato de ser uma variável categórica, já o segundo, por também ser um objetivo da otimização, não se pode explicar pelo mesmo motivo. Contudo, é provável que se deva a influência da variável categoria em ambos os objetivos da otimização. Desta forma evidencia-se a influência do Número de Andares (# Andares) nos resultados, contudo de forma divergente entre objetivos da otimização, diretamente proporcional para Índice de Sombra Médio Ponderado (ISmp) e inversamente proporcional para *Load Cover Factor* (LCF).

Esta relação da verticalização e ambientes urbanos mais protegidos da insolação também em parte justifica os resultados do Índice de Aproveitamento (IA) e Relação Área de Cobertura por Área de Fachada (Acob/Afach). Em ambos os casos, o aumento do Número de Andares (# Andares), e conseqüentemente a melhoria do Índice de Sombra Médio Ponderado (ISmp), pode ser notada nas duas variáveis, porém com efeitos opostos, de forma diretamente proporcional para Índice de Aproveitamento (IA) e inversamente proporcional para Relação Área de Cobertura por Área de Fachada (Acob/Afach). Curiosamente, outra variável – ou covariável- relacionada à altura da edificação o Fator H/W não apresenta correlação significativa, como ocorre com a tipologia de quadra com torre, algo que sugere sua menor pertinência para a tipologia em quadra com edificações em fita.

No geral, pode-se entender que todos os quatro indicadores são capazes de descrever bem o Índice de Sombra Médio Ponderado (ISmp). Além disso, também é importante ressaltar que o processo de otimização obteve número significativo de cenários com valores de Índice de Sombra Médio Ponderado (ISmp) mais baixo. Isso pode ser um indicativo do funcionamento efetivo do processo de otimização, em que resultados superiores começaram a emergir somente após um determinado número significativo de iterações. Por outro lado, pode significar que os resultados da otimização convergem para resultados de IS intermediários, mas com maior Volume Dominado.

Em linhas gerais, pode-se notar que aspectos morfológicos têm grande impacto na disponibilidade de sombreamento da área urbana, especialmente aqueles relacionados à altura da edificação, como Número de Andares (# Andares), Índice de Aproveitamento (IA) e Relação Área de Cobertura por Área de Fachada (Acob/Afach). Adicionalmente, evidencia-se efeito oposto que estas características possuem em Índice de Sombra Médio Ponderado (ISmp) e em *Load Cover Factor* (LCF), o que demonstra a importância de conciliar estes diferentes resultados.

ii. ***Spatial Useful Daylight Illuminance***

O *spatial Useful Daylight Illuminance* (sUDI) não apresentou correlação significativa igual ou superior ao valor absoluto de 0,7 para a tipologia de quadra com edificações em fita. O indicador com maior valor é o Índice de Infraestrutura (Índice de Infra) com valor de -0,462. Por se tratar da relação entre Área de Caixa de Rua – pista de rodagem e calçadas – por Área Construída das Edificações, uma relação inversamente proporcional indica que uma redução da Área de Caixa de Rua e/ou incremento da Área Construída das Edificações melhora o desempenho de *spatial Useful Daylight Illuminance* (sUDI). Isso pode sugerir que ambientes

urbanos mais protegidos da insolação podem ser benéficos para iluminação natural. Dessa forma, o melhor desempenho de *spatial Useful Daylight Illuminance* (sUDI) neste tipo de tipologia pode estar mais atrelado à redução da faixa de iluminância excessiva próxima a janela do que a insuficiência de iluminância no núcleo da edificação. Algo que é coerente com a própria tipologia, visto que naturalmente é menos profunda. Desta forma, apesar de esperado, a profundidade não é um indicador que influencia o desempenho de *spatial Useful Daylight Illuminance* (sUDI), pelo menos não no intervalo analisado, como pode-se observar pela correlação quase nula, de -0,014.

iii. ***Load Cover Factor***

Para o *Load Cover Factor* (LCF), os quatro indicadores com maior correlação – Número de Andares (# Andares), Índice de Aproveitamento (IA), Relação Área de Cobertura por Área de Fachada (Acob/Afach) e Índice de Sombra Médio Ponderado (ISmp) – são mais bem descritos por curvas ao invés de retas. Curiosamente, são os mesmos indicadores com correlações significativas observado em Índice de Sombra Médio Ponderado (ISmp). Dentre todos os indicadores, o Número de Andares (# Andares) é a característica que mais influencia o *Load Cover Factor* (LCF).

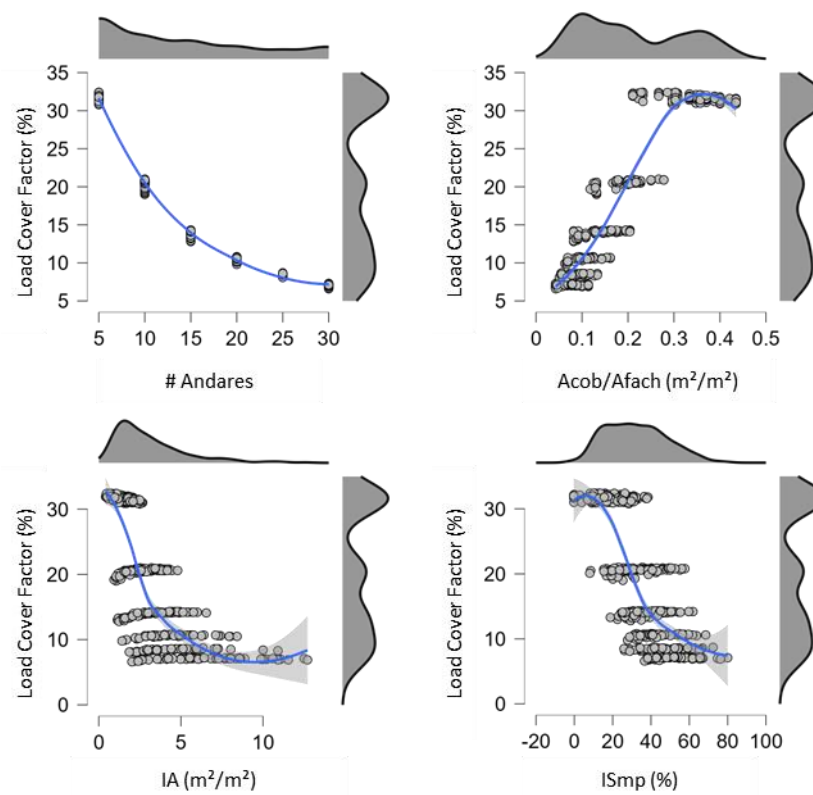
A densidade dos resultados de *Load Cover Factor* (LCF) é bastante heterogênea para a tipologia de quadra com edificações em fita, como mencionado anteriormente. Há uma maior concentração na faixa superior de resultados – entre 30% e 35% - o que pode sugerir que eventualmente os resultados convergem para resultados superiores, como se pode notar no Gráfico 36. Já quanto à densidade dos valores dos indicadores, há concentração em valores mais baixos para Número de Andares (# Andares) e Índice de Aproveitamento (IA),

intermediário para Índice de Sombra Médio Ponderado (ISmp) e perfil mais heterogêneo para Relação Área de Cobertura por Área de Fachada (Acob/Afach), com ao menos duas faixas de concentração de valores.

É interessante observar o efeito da variável categórica do indicador Número de Andares (# Andares) da Edificação. Para este gráfico, pode-se notar a relação quase que exponencial e inversamente proporcional da relação de Número de Andares (# Andares) da Edificação com *Load Cover Factor* (LCF). Nota-se que os dois níveis mais baixos – 5 e 10 andares – possuem resultados com desempenho evidentemente superior em *Load Cover Factor* (LCF), enquanto a diferença entre gabaritos mais altos possui variação menos perceptível. Dessa forma, até de forma esperada, há uma tendência a melhores resultados de *Load Cover Factor* (LCF) com a diminuição do gabarito da edificação.

Também se percebe este efeito do Número de Andares (# Andares) nos indicadores de Relação Área de Cobertura por Área de Fachada (Acob/Afach) e Índice de Aproveitamento (IA). Entretanto, nestes dois casos, possuem efeitos opostos, de forma diretamente proporcional para Relação Área de Cobertura por Área de Fachada (Acob/Afach) e inversamente proporcional para Índice de Aproveitamento (IA). É interessante notar inclusive a estratificação dos resultados, mas perpendicular ao eixo das ordenadas, da variável dependente, o que surge da relação com o Número de Andares (# Andares), uma variável categórica. Desta forma, evidencia-se a influência do Número de Andares (# Andares) nos resultados, contudo de forma divergente entre objetivos da otimização, inversamente proporcional para *Load Cover Factor* (LCF) e diretamente proporcional para Índice de Sombra Médio Ponderado (ISmp).

Gráfico 36 - Gráficos de Dispersão de Número de Andares, Relação de Área de Cobertura por Área de Fachada, Índice de Aproveitamento e Índice de Sombra Médio Ponderado (ISmp)



Fonte: Autor, desenvolvido em JASP v. 0.17.2 (2024).

Em linhas gerais, percebe-se a partir dos cenários explorados pelo processo de otimização que há uma tendência a valorizar cenários com menor Número de Andares e maior Relação Área de Cobertura por Área de Fachada. Algo coerente com a ampliação da geração energética que está diretamente atrelada a

área de cobertura e a redução da demanda energética, algo relacionado a redução do Número de Andares – e conseqüentemente da área construída.

4.2.3 *Análise das variáveis de projeto*

Para sistematizar melhor os resultados, também se propõe a analisar os resultados a partir das variáveis categóricas de projeto: Profundidade da Edificação, Comprimento da Edificação, Distância Frontal e Posterior entre Edificações, Azimute, Número de Andares e Largura Adicional da Quadra. Ao analisar cada uma das variáveis para os três objetivos de forma conjunta, a partir de gráficos de caixa – ou *boxplot* –, visa-se melhor compreender os efeitos de cada variável de forma geral, o que pode auxiliar a tomada de decisão de projeto.



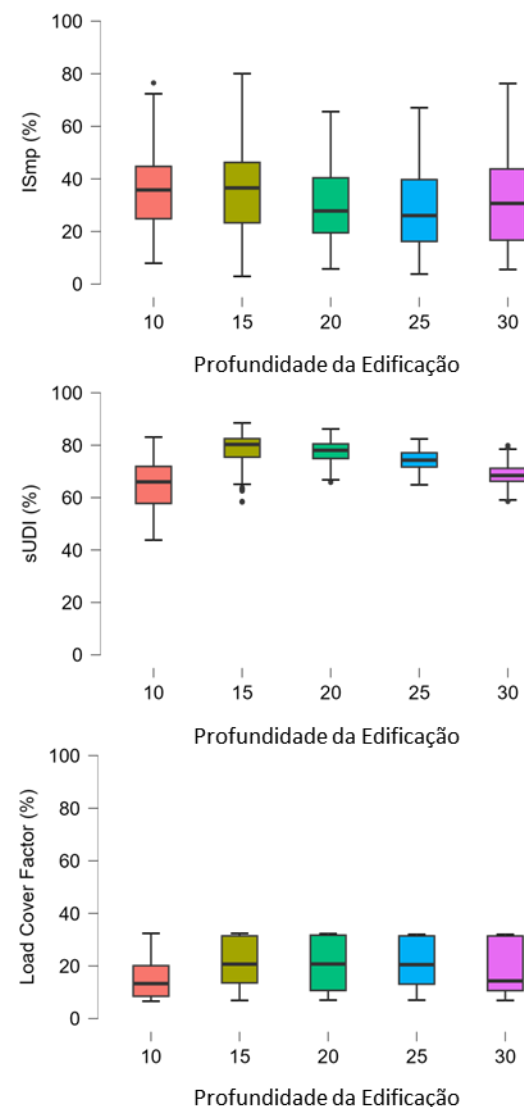
i. Profundidade da Edificação

A variação da Profundidade da Edificação acarreta comportamento distinto em cada um dos objetivos do processo de otimização – como pode ser observado no Gráfico 37.

Nos casos do *Load Cover Factor* (LCF) e do Índice de Sombra Médio Ponderado (ISmp), os diferentes grupos possuem resultados muito semelhantes entre si, com considerável sobreposição de intervalos de valores dos grupos. Isso indica uma baixa influência da Profundidade da Edificação nestes dois objetivos. No Índice de Sombra Médio Ponderado (ISmp) há sutil variação de máximos e medianas entre os grupos, porém ainda assim com grande sobreposição entre os grupos. Já para o *Load Cover Factor* (LCF), máximas e mínimas são idênticas e as variações de quartis e medianas podem ser decorrentes de variação amostral.

Por outro lado, apesar da sobreposição entre os grupos, *spatial Useful Daylight Illuminance* (sUDI) é o objetivo que possui padrão mais definido e capaz de oferecer indicações mais interessantes. Aparentemente há um ponto ótimo para *spatial Useful Daylight Illuminance* (sUDI) na Profundidade da Edificação com 15 m dentro do estudo realizado. Presume-se que com essa dimensão há o melhor equilíbrio entre a faixa de iluminância excessiva, localizada próxima às janelas, e a área com iluminância insuficiente, no núcleo central, mais profundo, fenômeno observado em outras tipologias de quadra. No presente caso, nota-se especialmente que o grupo com menor Profundidade da Edificação possui pior desempenho.

Gráfico 37 – Gráficos *boxplot* de *Load Cover Factor* (LCF), *spatial Useful Daylight Illuminance* (sUDI) e Índice de Sombra Médio Ponderado (ISmp) para Profundidade da Edificação



Fonte: Autor, desenvolvido em JASP v. 0.17.2 (2024).

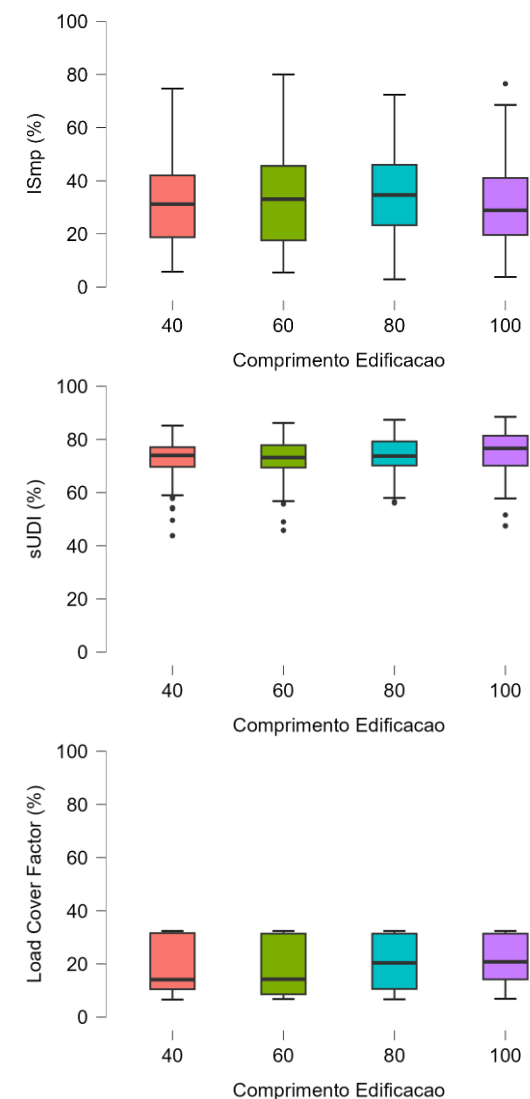
Dessa forma, ao observar resultados dos cenários investigados para todos os três objetivos, pode-se compreender que uma Profundidade da Edificação com 15 m seja preferível, pois contempla o ponto ótimo para *spatial Useful Daylight Illuminance* (sUDI), enquanto esta variável de projeto é indiferente para os outros dois objetivos – Índice de Sombra Médio Ponderado (ISmp) e *Load Cover Factor* (LCF).

ii. Comprimento da Edificação

A variação do Comprimento da Edificação apresenta comportamento semelhante em cada um dos objetivos do processo de otimização – como pode ser observado no Gráfico 23.

Observa-se que variação do Comprimento da Edificação não afeta de forma evidente os três objetivos da otimização, com grande sobreposição dos domínios dos grupos, especialmente entre máximos e mínimos, com pequenas variações que podem ser decorrentes de tamanho amostral ou inclusão ou exclusão de *outlier*. Neste sentido, pode-se concluir que os três objetivos da otimização são indiferentes a variação do Comprimento da Edificação.

Gráfico 38 – Gráficos *boxplot* de *Load Cover Factor* (LCF), *spatial Useful Daylight Illuminance* (sUDI) e Índice de Sombra Médio Ponderado (ISmp) para Comprimento da Edificação



Fonte: Autor, desenvolvido em JASP v. 0.17.2 (2024).

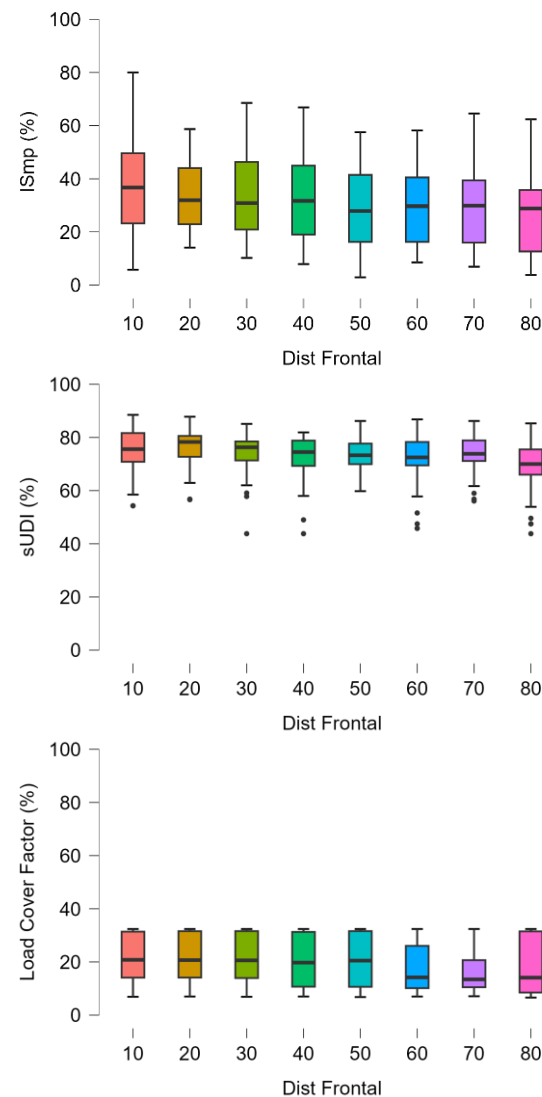
iii. Distância Frontal entre Edificações

A variação da Distância Frontal entre Edificações acarreta comportamento distinto em cada um dos objetivos do processo de otimização – como pode ser observado no Gráfico 39. Observa-se que variação do Comprimento da Edificação não afeta de forma evidente os três objetivos da otimização, com grande sobreposição dos domínios dos grupos, especialmente entre máximos e mínimos, com pequenas variações que podem ser decorrentes de tamanho amostral ou inclusão ou exclusão de *outlier*. Neste sentido, pode-se concluir que os três objetivos da otimização são indiferentes a variação da Distância Frontal entre Edificações.

iv. Distância Posterior entre Edificações

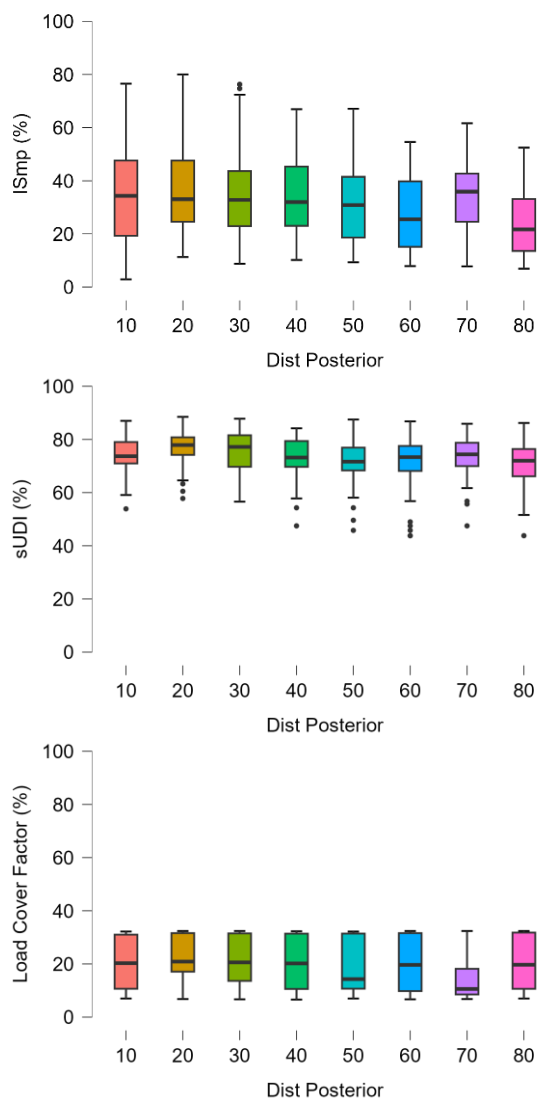
A variação da Distância Posterior entre Edificações acarreta comportamento distinto em cada um dos objetivos do processo de otimização – como pode ser observado no Gráfico 40, na página 149. Observa-se que variação do Comprimento da Edificação não afeta de forma evidente os três objetivos da otimização, com grande sobreposição dos domínios dos grupos, especialmente entre máximos e mínimos, com pequenas variações que podem ser decorrentes de tamanho amostral ou inclusão ou exclusão de *outlier*. Neste sentido, pode-se concluir que os três objetivos da otimização são indiferentes a variação da Distância Posterior entre Edificações.

Gráfico 39 – Gráficos *boxplot* de *Load Cover Factor* (LCF), *spatial Useful Daylight Illuminance* (sUDI) e Índice de Sombra Médio Ponderado (ISmp) para Distância Frontal entre Edificações



Fonte: Autor, desenvolvido em JASP v. 0.17.2 (2024).

Gráfico 40 – Gráficos *boxplot* de *Load Cover Factor* (LCF), *spatial Useful Daylight Illuminance* (sUDI) e Índice de Sombra Médio Ponderado (ISmp) para Distância Posterior entre Edificações



Fonte: Autor, desenvolvido em JASP v. 0.17.2 (2024).

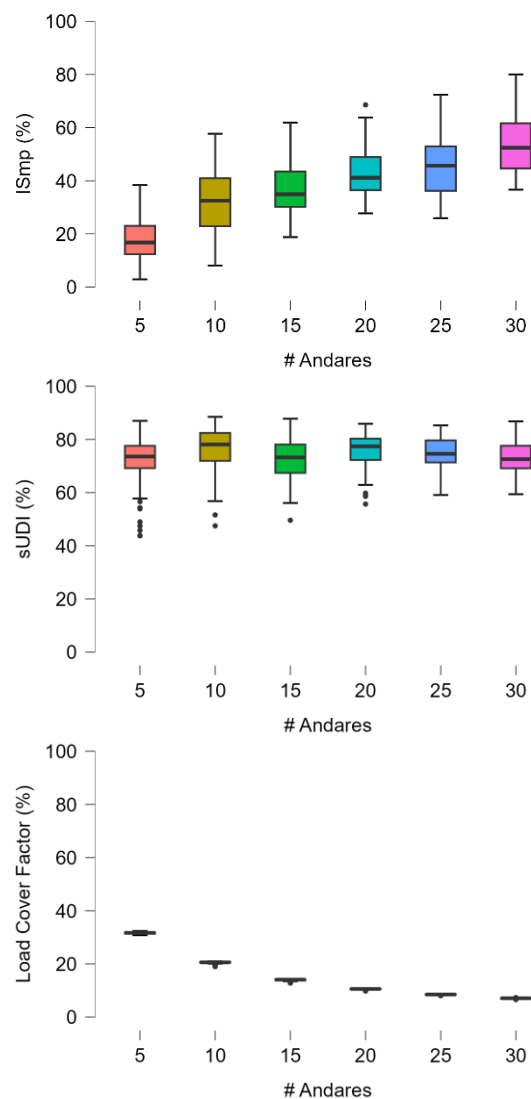
v. Número de Andares

A variação do Número de Andares da Edificação (# Andares) acarreta comportamento distinto em cada um dos objetivos do processo de otimização, inclusive com tendências opostas – como pode ser observado no Gráfico 41, na página 150

Nos casos do Índice de Sombra Médio Ponderado (ISmp), apesar da sobreposição entre os grupos, há uma evidente relação, no caso diretamente proporcional. A variação é gradual, porém grupos intermediários – de 10 a 25 andares – possuem maior sobreposição do domínio dos resultados, especialmente com medianas semelhantes. Desta forma, tanto o grupo de menor Número de Andares como o de maior Número de Andares se destacam dos demais, respectivamente grupos com 5 e 30 andares.

O *spatial Useful Daylight Illuminance* (sUDI) é o objetivo que apresenta efeito menos evidentes, em que os diferentes grupos possuem resultados muito semelhantes, com grande sobreposição de domínio dos resultados. Isso indica para uma baixa influência da Número de Andares da Edificação (# Andares) neste objetivo de otimização. Interessante notar que, ao considerar os *outliers*, que a amplitude dos resultados diminui com o aumento do Número de Andares, especialmente quanto aos valores mínimos dos grupos. Isso sugere que edificações mais baixas são mais suscetíveis a desempenho de *spatial Useful Daylight Illuminance* (sUDI) inferior, provavelmente em virtude do excesso de iluminância próxima às janelas.

Gráfico 41 – Gráficos *boxplot* de *Load Cover Factor* (LCF), *spatial Useful Daylight Illuminance* (sUDI) e Índice de Sombra Médio Ponderado (ISmp) para Número de Andares Edificações



Fonte: Autor, desenvolvido em JASP v. 0.17.2 (2024).

Por outro lado, o *Load Cover Factor* (LCF) é o objetivo que possui padrão mais definido e capaz de oferecer indicações mais interessantes. Os grupos são bastante coesos e sem alguma sobreposição dos domínios dos resultados. Adicionalmente, possuem uma variação marcante, com um perfil exponencial. Essas características evidenciam o efeito que o Número de Andares da Edificação (# Andares) possui em *Load Cover Factor* (LCF). Neste sentido, pode-se destacar os dois grupos com menores Número de Andares – 5 e 10 andares respectivamente –, com desempenho sensivelmente melhores. Dentre todas as relações observadas, é o caso de indicador e objetivo de otimização com tendência mais marcante e clara distinção entre grupos, semelhante a outras tipologias de quadra.

Dessa forma, ao observar resultados dos cenários investigados para todos os três objetivos, evidencia-se um conflito de efeitos especialmente entre *Load Cover Factor* (LCF) e Índice de Sombra Médio Ponderado (ISmp). Entretanto, por ser um efeito mais marcante e claro, seja mais vantajoso beneficiar o desempenho do *Load Cover Factor* (LCF) e assim preferir edificações com menor Número de Andares.

vi. Azimute

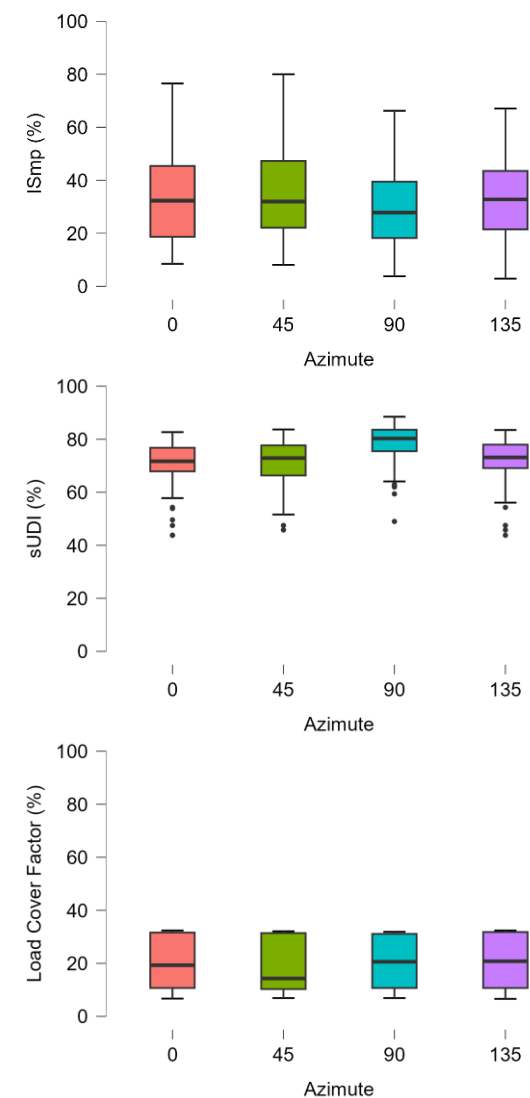
A variação do Azimute da fachada principal da edificação acarreta comportamento semelhante em cada um dos objetivos do processo de otimização – como pode ser observado no Gráfico 42, na página 151. Em linhas gerais, observa-se pouco efeito do Azimute nos três objetivos, com grande sobreposição dos domínios dos grupos, especialmente entre máximos e mínimos, com pequenas variações que podem ser decorrentes de tamanho amostral ou inclusão ou exclusão de *outlier*.

A única exceção é o grupo de 90° que apresenta resultados superiores para *spatial Useful Daylight Illuminance* (sUDI). Isso pode aparentar ser um resultado contraintuitivo, visto que nesta condição as principais fachadas da edificação em fita estão orientadas para Leste e Oeste. Contudo, este melhor desempenho é relativo somente a iluminação natural e não ao desempenho térmico – ou mesmo ao *Load Cover Factor* (LCF). Adicionalmente, é importante observar que as edificações do entorno propiciam sombreamento da insolação mais frontal, com altura solar mais baixa, o que deve contribuir para redução da iluminância excessiva próxima às janelas.

Por outro lado, não se observa um melhor desempenho térmico, expresso por meio do *Load Cover Factor* (LCF), com fachadas principais orientadas para o Norte e Sul – com edificação implantada no eixo Leste-Oeste -, algo inicialmente esperado. Entretanto, pode-se compreender este resultado em virtude do sombreamento do entorno, o que sugere a importância deste aspecto.

Dessa forma, ao observar os resultados dos cenários investigados para todos os três objetivos, pode-se compreender que o Azimute não apresenta efeito marcante. Contudo, as fachadas principais orientadas para o Norte e Sul – com edificação implantada no eixo Leste-Oeste – apresentam sutil melhora para *spatial Useful Daylight Illuminance* (sUDI) e assim podem ser preferíveis desde que devidamente sombreadas com elementos horizontais em frente as aberturas, como ocorre no caso de edificações semelhantes do entorno.

Gráfico 42 – Gráficos *boxplot* de *Load Cover Factor* (LCF), *spatial Useful Daylight Illuminance* (sUDI) e Índice de Sombra Médio Ponderado (ISmp) para Azimute

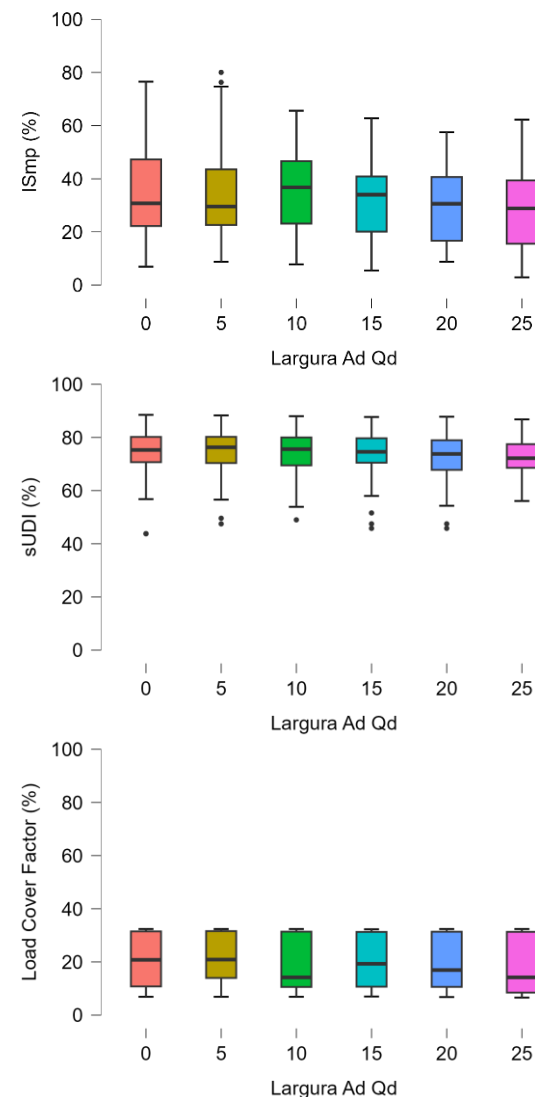


Fonte: Autor, desenvolvido em JASP v. 0.17.2 (2024).

vii. Largura Adicional da Quadra

A variação da Largura da Quadra no sentido longitudinal acarreta comportamento distinto em cada um dos objetivos do processo de otimização – como pode ser observado no Gráfico 43, na página 152. Observa-se que variação do Comprimento da Edificação não afeta de forma evidente os três objetivos da otimização, com grande sobreposição dos domínios dos grupos, especialmente entre máximos e mínimos, com pequenas variações que podem ser decorrentes de tamanho amostral ou inclusão ou exclusão de *outlier*. Neste sentido, pode-se concluir que os três objetivos da otimização são indiferentes a variação da Largura da Quadra no sentido longitudinal.

Gráfico 43 – Gráficos *boxplot* de *Load Cover Factor (LCF)*, *spatial Useful Daylight Illuminance (sUDI)* e Índice de Sombra Médio Ponderado (ISmp) para Largura Adicional da Quadra

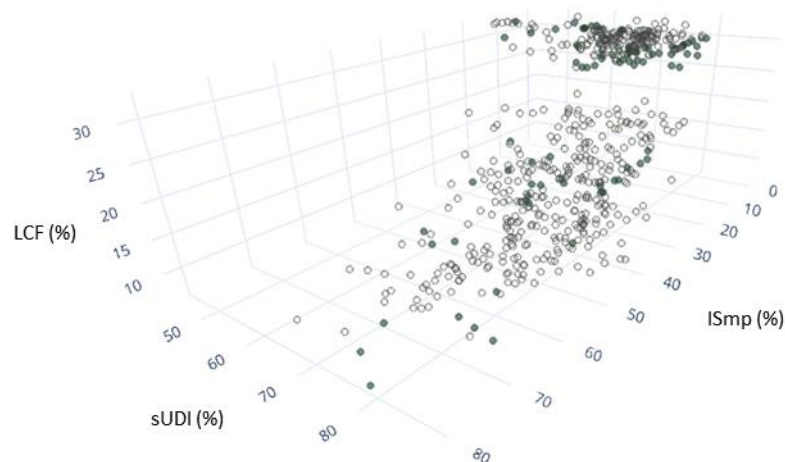


Fonte: Autor, desenvolvido em JASP v. 0.17.2 (2024).

4.2.4 Clusterização da Fronte de Pareto

A definição da Fronte de Pareto é etapa essencial para a avaliação do processo de otimização. Nesse processo define-se os resultados considerados ótimos, ou melhores resultados, pois não existe outro resultado que é superior simultaneamente em todos os objetivos avaliados. No caso da presente otimização com três objetivos, essa Fronte de Pareto se caracteriza como uma superfície não necessariamente plana, como pode ser visto na Gráfico 44, em que os pontos coloridos em verde pertencem à Fronte de Pareto.

Gráfico 44 – Gráfico de dispersão 3D pelos eixos LCF, sUDI e ISmp com indicação da Fronte de Pareto para quadra com edificação em fita



Fonte: Autor, produzido em Plotly Chart Studio (2023)

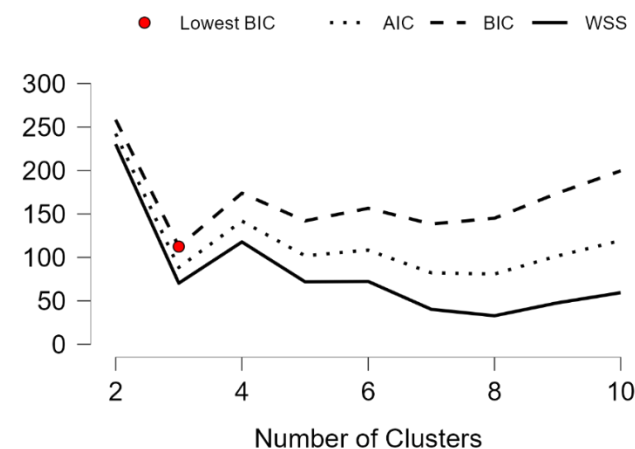
A partir da definição da Fronte de Pareto, realiza-se um processo de divisão em *clusters* destes cenários, definidos a partir da sua proximidade, por meio do processo de *Neighborhood-Based Clustering (C-means)*. No presente estudo, o algoritmo define três *clusters* como condição ideal, como se observa no ponto de inflexão do Gráfico 45 e na Tabela 17 que apresenta o resumo deste processo.

Tabela 17 – Tabela resumo de *C-Means Clustering* da quadra com edificação em fita

Clusters	N	R ²	AIC	BIC	Silhouette
3	107	0,561	157,080	181,130	0,460

Fonte: Autor, desenvolvido em JASP v. 0.17.2 (2024).

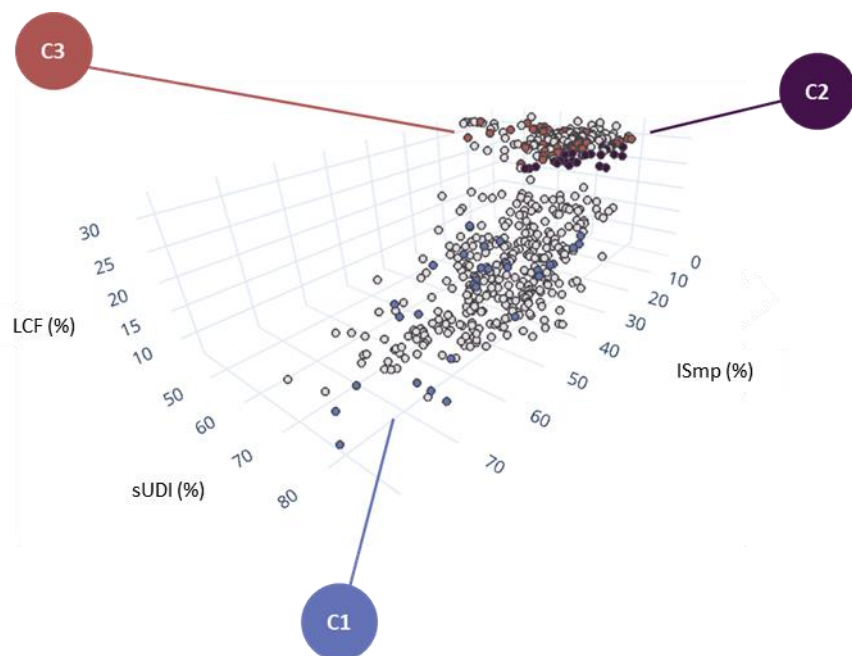
Gráfico 45 - Gráfico de *C-Means clustering* para definição da quantidade ideal de clusters da quadra com edificação em fita



Fonte: Autor, desenvolvido em JASP v. 0.17.2 (2024).

O Gráfico 46 apresenta os três *clusters* da Frente de Pareto com distinção por cores, enquanto os cenários que não se encontram na Frente de Pareto são apresentados por pontos brancos. Estes três *clusters* (C1, C2 e C3) possuem características próprias relativas aos três objetivos, assim como características morfológicas, relativas as variáveis de projeto. Assim, a seguir apresentam-se as caracterizações dos três *clusters* separadamente.

Gráfico 46 - Gráfico de dispersão 3D pelos eixos LCF, sUDI e ISmp com indicação de *clusters* no Frente de Pareto para quadra com edificação em fita

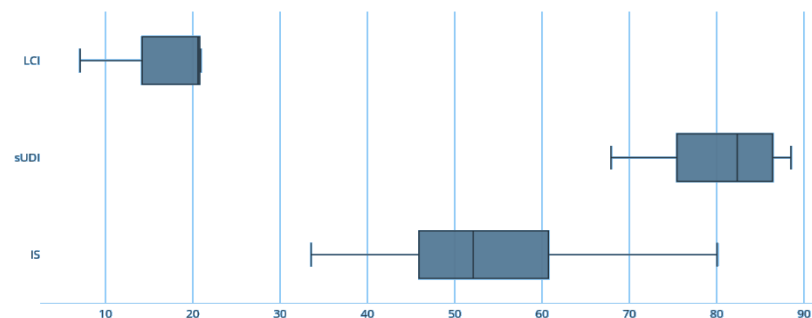


Fonte: Autor, produzido em *Plotly Chart Studio* (2023)

i. Cluster 1

Os resultados do *Cluster 1* (C1) – como se observa no Gráfico 47 – revelaram que as edificações apresentaram um *Load Cover Factor* (LCF) mais baixo, com valores máximos próximos a 20%. Além disso, no Índice de Sombra Médio Ponderado (ISmp), os resultados se encontram no intervalo entre 30% e 80%, o que sugere uma variação considerável na quantidade de sombra projetada no meio urbano, variação significativamente maior do que nos outros *clusters*. Em relação à *spatial Useful Daylight Illuminance* (sUDI), os valores estão na faixa de 60% e 90%, o que indica iluminância adequada em área significativa, algo semelhante nos três *clusters*.

Gráfico 47 – Gráfico descritivo dos objetivos da otimização do Cluster 1 da tipologia com edificações em fita

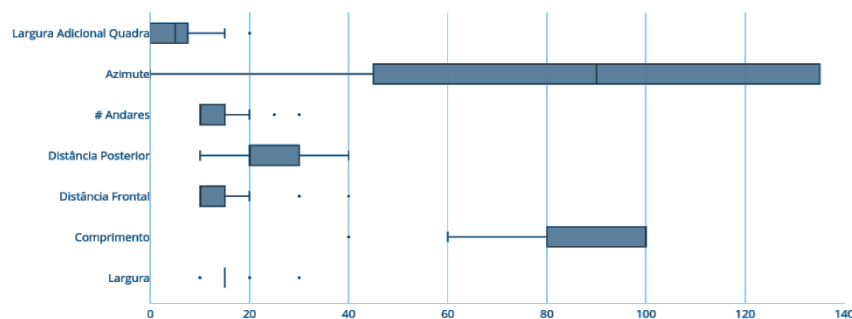


Fonte: Autor, produzido em *Plotly Chart Studio* (2023)

Quanto as características morfológicas – disponíveis no Gráfico 48 –, as edificações e quadra do *Cluster 1* apresentaram uma profundidade quase que

exclusiva de 15 metros, comprimento de 60 a 100 metros – com predomínio da faixa de 80 a 100 metros – e altura de 10 a 20 andares – com predomínio de 10 a 15 andares. A distância posterior entre edificações varia de 10 a 40 metros, com predomínio da faixa de 20 a 30 metros, enquanto a medida frontal possui intervalo de 10 a 20 metros. Quanto à largura adicional da quadra varia de 0 a 15 metros. Já o azimute pode assumir todos os valores estudados, de 0° a 135° - em incrementos de 45° -, mas tem predomínio de 45°, 90° e 135°.

Gráfico 48 – Gráfico descritivo das variáveis de projeto do *Cluster 1* da tipologia com edificações em fita



Fonte: Autor, produzido em *Plotly Chart Studio* (2023)

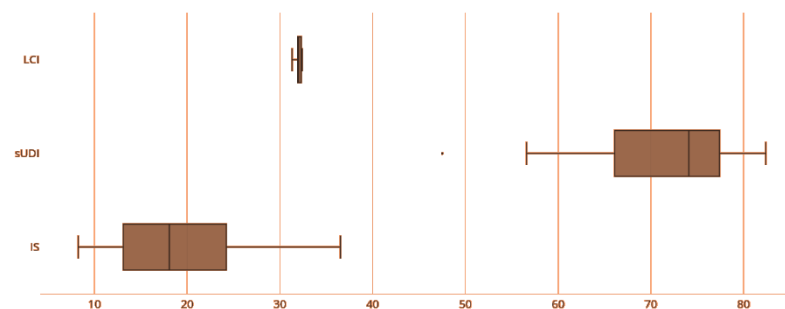
Dessa forma, este *cluster* pode ser caracterizado morfológicamente como edificações em fita com alturas baixas a médias, plantas pouco profundas e grande comprimento. Em virtude deste comprimento, possuem uma dimensão de quadra significativa – com recuo lateral pequeno –, mas por outro lado possuem a outra dimensão intermediária – relativa ao espaçamento entre edificações. Possuem

diversas orientações, mas com menor ocorrência de no eixo Leste-Oeste, com fachadas principais orientadas para Norte e Sul.

ii. *Cluster 2*

Os resultados do *Cluster 2* (C2) – como se observa no Gráfico 49 – apresentaram cenários com maiores valores de *Load Cover Factor* (LCF), em um intervalo estreito, logo acima do 30%, algo semelhante ao *Cluster 3*. Já o Índice de Sombra Médio Ponderado (ISmp) apresenta resultados mais baixos na faixa entre 5% e 40%, o que sugere ambientes urbano mais expostos à insolação, condição também semelhante ao *Cluster 3*. Em relação à *spatial Useful Daylight Illuminance* (sUDI), os valores estão na faixa de 55% e 85%, o que indica iluminância adequada em área significativa, algo semelhante nos três *clusters*.

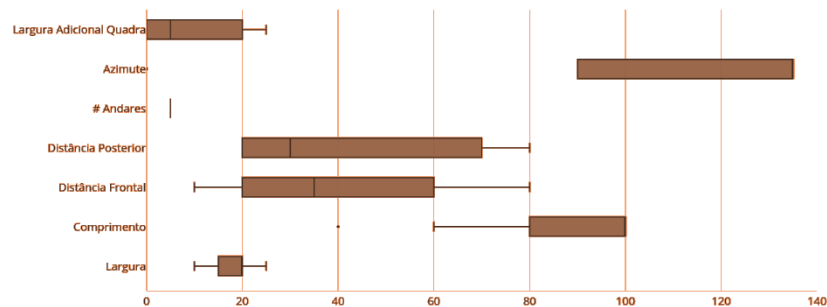
Gráfico 49 – Gráfico descritivo dos objetivos da otimização do *Cluster 2* da tipologia com edificações em fita



Fonte: Autor, produzido em *Plotly Chart Studio* (2023)

Quanto às características morfológicas – disponíveis no Gráfico 50 –, as edificações e quadra do *Cluster 2* apresentaram uma profundidade entre 10 e 25 metros, comprimento de 60 a 100 metros – com predomínio da faixa de 80 a 100 metros – e altura exclusiva de 5 andares. A distância entre edificações possui grande variação, entre 10 e 80 metros, tanto para a medida frontal, como para a medida posterior. Quanto à largura adicional da quadra varia de 0 a 25 metros. Já o azimute pode assumir somente 90° e 135°.

Gráfico 50 – Gráfico descritivo das variáveis de projeto do *Cluster 2* da tipologia com edificações em fita



Fonte: Autor, produzido em *Plotly Chart Studio* (2023)

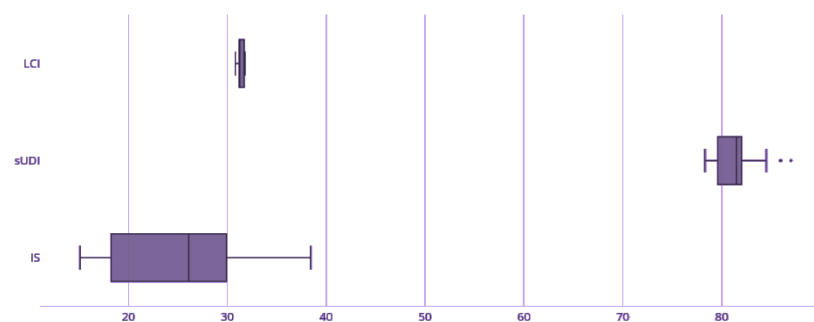
Dessa forma, este *cluster* pode ser caracterizado morfológicamente como edificações em fita com alturas baixas, plantas com profundidade intermediária e grande comprimento. Em virtude deste comprimento, recuo lateral intermediário e do generoso espaçamento entre edificações são quadras bastante grandes, com

baixa Taxa de Ocupação e Índice de Aproveitamento. Quanto à orientação, tem as fachadas principais orientadas para Leste e Oeste ou Noroeste e Sudeste.

iii. *Cluster 3*

Os resultados do *Cluster 3* (C3) – como se observa no Gráfico 51 – apresentaram cenários com maiores valores de *Load Cover Factor* (LCF), em um intervalo estreito, logo acima do 30%, algo semelhante ao *Cluster 2*. Já o Índice de Sombra Médio Ponderado (ISmp) apresenta resultados mais baixos na faixa entre 10% e 40%, o que sugere um ambiente urbano mais exposto, condição também semelhante ao *Cluster 2*. Em relação à *spatial Useful Daylight Illuminance* (sUDI), os valores estão acima de 75%, algo superior aos demais *clusters*.

Gráfico 51 – Gráfico descritivo dos objetivos da otimização do *Cluster 3* da tipologia com edificações em fita



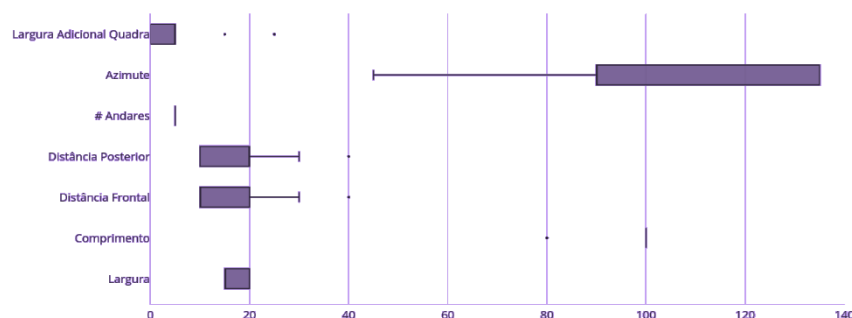
Fonte: Autor, produzido em *Plotly Chart Studio* (2023)

Quanto às características morfológicas – disponíveis no Gráfico 52 –, as edificações e quadra do *Cluster 3* apresentaram uma profundidade entre 15 e 20 metros, comprimento exclusivo de 100 metros e altura exclusiva de 5 andares. A distância entre edificações possui grande variação, entre 10 e 30 metros, tanto para a medida frontal, como para a medida posterior. Quanto a largura adicional da quadra varia de 0 a 5 metros. Já o azimute pode assumir somente 90° e 135°.

entre edificações -, assim são quadras longas e estreitas. Quanto à orientação, tem as fachadas principais orientadas para Nordeste e Sudoeste, Leste e Oeste ou Noroeste e Sudeste.



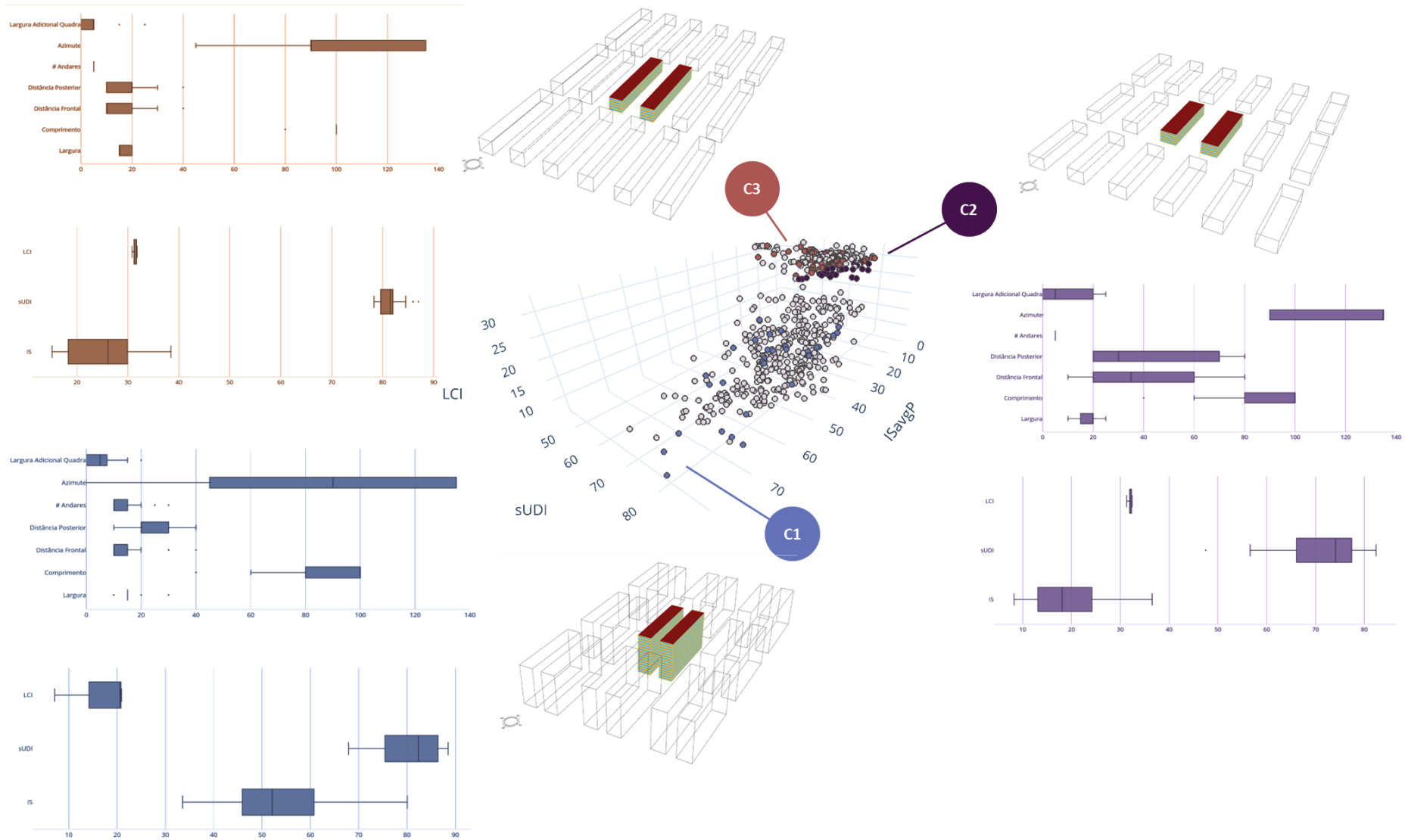
Gráfico 52 – Gráfico descritivo das variáveis de projeto do *Cluster 3* da tipologia com edificações em fita



Fonte: Autor, produzido em *Plotly Chart Studio* (2023)

Dessa forma, este *cluster* pode ser caracterizado morfológicamente como edificações em fita com alturas baixas, plantas com profundidade intermediária e grande comprimento. Em virtude deste comprimento, estes cenários possuem uma dimensão de quadra significativa – apesar do recuo lateral pequeno –, mas por outro lado possuem a outra dimensão reduzida – relativa ao espaçamento

Figura 49 – Diagrama geral dos resultados dos cenários pertencentes à Frente de Pareto da tipologia de quadra com edificação em fita



Fonte: Autor (2023)

4.2.5 Melhores resultados – quadra com edificações em fita

A seguir apresentam-se os cenários com melhor desempenho para cada um dos objetivos da otimização, assim como para o Volume Dominado.

i. Índice de Sombra Médio Ponderado

O ranqueamento dos melhores cinco resultados do Índice de Sombra Médio Ponderado (ISmp) no processo de otimização são apresentados na Tabela 18, enquanto a Figura 50 apresenta uma ilustração dos três cenários com melhores resultados. Estes dados evidenciam que o Índice de Sombra Médio Ponderado (ISmp) se beneficia de um contexto urbano mais protegido da insolação, com maiores Índices de Aproveitamento (IA), algo que também acarreta maiores gabaritos, como apontado anteriormente.

Adicionalmente, percebe-se que estes cenários não possuem desempenho elevados nos outros objetivos assim como para o Volume Dominado – praticamente todos ranqueados na metade inferior, abaixo de 300ª posição.

Figura 50 - Representação morfológica dos três melhores cenários de Índice de Sombra Médio Ponderado (ISmp) para a quadra com edificação em fita

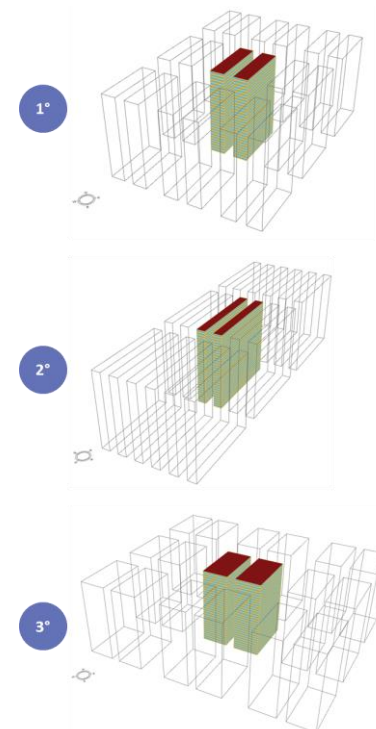


Tabela 18 – Características dos cinco cenários mais bem ranqueados para Índice de Sombra Médio Ponderado (ISmp) da quadra com edificação em fita

Iteração	Profundidade da Edificação (m)	Comprimento da Edificação (m)	Distância Frontal entre Edificações (m)	Distância Posterior entre Edificações (m)	Número de Andares (#)	Azimute (graus)	Largura Adicional da Quadra (m)	ISmp (%)	Rank ISmp	sUDI (%)	Rank sUDI	LCF (%)	Rank LCF	Volume Dominado (un³)	Rank Volume Dominado
387	15	60	10	20	30	45	5	80.0	1	79.2	150	7.1	529	45009.50	172
11	10	100	10	10	30	0	0	76.5	2	73.7	305	7.1	535	40034.13	220
456	30	60	10	30	30	45	5	76.3	3	61.8	528	6.9	566	32530.18	320
13	30	40	10	30	30	45	5	74.7	4	68.9	450	7.0	558	36030.83	263
376	10	80	10	30	25	45	5	72.4	5	73.4	315	8.7	467	46221.89	164

ii. **Spatial Useful Daylight Illuminance**

Os melhores resultados de *spatial Useful Daylight Illuminance* (sUDI) encontrados no processo de otimização obtiveram valores entre 87% e 88% de *spatial Useful Daylight Illuminance* (sUDI). Como pode-se observar na Tabela 19 e na Figura 51, todos os cenários são muito semelhantes, com Profundidade da edificação de 15 m – segunda menor medida do estudo – comprimento da edificação de 100 m, altura da edificação de 10 ou 15 andares – com predomínio de 10 m, segundo menor valor do estudo – e distâncias entre edificações de 10 m à 30 m. Interessante perceber novamente o impacto da iluminância excessiva em plantas menos profundas, com a preferência por Profundidade da edificação diferente do menor valor – no caso o segundo menor valor.

Adicionalmente, pode-se notar que estes cinco cenários possuem desempenho intermediários para superiores de Índice de Sombra Médio Ponderado (ISmp), praticamente todos no quartil superior. Já para *Load Cover Factor* (LCF), possuem desempenho intermediário, na faixa entre 250° e 350°. Por outro lado, desempenho do Volume Dominado pode ser considerado elevado, com quatro cenários entre os 21 melhores desempenho de Volume Dominado.

Figura 51 - Representação morfológica dos três melhores cenários de *spatial Useful Daylight Illuminance* (sUDI) para a quadra com edificação em fita

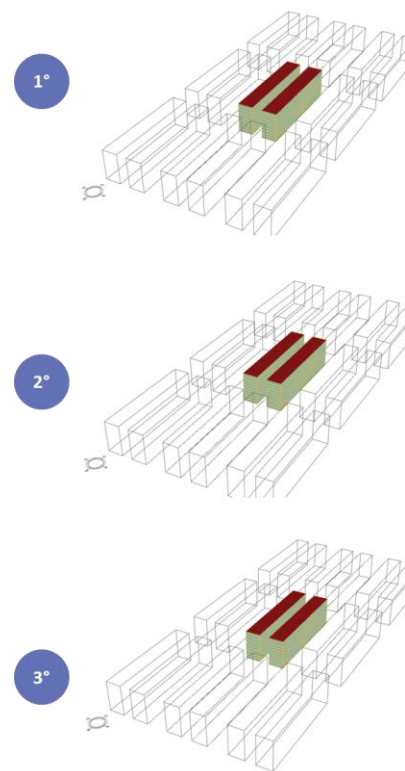


Tabela 19 – Características dos cinco cenários mais bem ranqueados para *spatial Useful Daylight Illuminance* (sUDI) da quadra com edificação em fita

Iteração	Profundidade da Edificação (m)	Comprimento da Edificação (m)	Distância Frontal entre Edificações (m)	Distância Posterior entre Edificações (m)	Número de Andares (#)	Azimute (graus)	Largura Adicional da Quadra (m)	ISmp (%)	Rank ISmp	sUDI (%)	Rank sUDI	LCF (%)	Rank LCF	Volume Dominado (un³)	Rank Volume Dominado
525	15	100	10	20	10	90	0	49.8	84	88.5	1	20.6	254	90856.37	9
465	15	100	10	20	10	90	5	49.9	83	88.3	2	20.6	255	90745.16	10
464	15	100	10	20	10	90	10	45.3	124	88.0	3	20.6	256	82066.41	21
334	15	100	20	30	15	90	20	42.0	157	87.8	4	14.1	354	52001.48	126
474	15	100	10	20	10	90	15	45.7	117	87.7	5	20.6	257	82588.23	20

iii. Load Cover Factor (LCF)

Os melhores resultados de *Load Cover Factor* (LCF) encontrados no processo de otimização obtiveram valores semelhantes a tipologia de quadra com torre isolada, todos com 32,4%. Como pode-se observar na Tabela 20 e na Figura 52, estes cenários são principalmente caracterizados por edificações de baixo gabarito, todos com 5 andares – menor gabarito possível no estudo –, estreitas, com profundidade de edificação de 15 m – segundo menor valor do estudo –, e pelo menos uma das distâncias entre edificações mais avantajada, de pelo menos 60 m. Neste sentido, evidencia-se novamente uma tendência por favorecer menor área construída, que regula a demanda energética, em relação com a área de cobertura, relacionada a geração de energia.

Os resultados destes cenários nos outros dois objetivos são inferiores, pertencentes ao último quartil, com praticamente todos abaixo da posição 500°. Quanto ao Volume Dominado, o desempenho é levemente superior, porém considerado igualmente baixo, pertencente ao último quartil de resultados, todos abaixo da posição 400°.

Figura 52 - Representação morfológica dos três melhores cenários de *Load Cover Factor* (LCF) para a quadra com edificação em fita

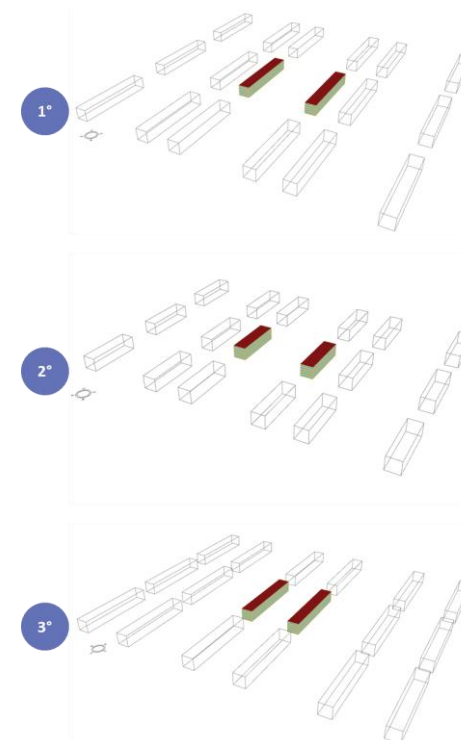


Tabela 20 – Características dos cinco cenários mais bem ranqueados para *Load Cover Factor* (LCF) da quadra com edificação em fita

Iteração	Profundidade da Edificação (m)	Comprimento da Edificação (m)	Distância Frontal entre Edificações (m)	Distância Posterior entre Edificações (m)	Número de Andares (#)	Azimute (graus)	Largura Adicional da Quadra (m)	ISmp (%)	Rank ISmp	sUDI (%)	Rank sUDI	LCF (%)	Rank LCF	Volume Dominado (un³)	Rank Volume Dominado
122	15	100	80	30	5	135	25	12.8	507	66.6	483	32.4	1	27688.97	420
556	15	60	70	30	5	135	20	10.2	540	63.9	514	32.4	2	21081.79	521
121	15	100	50	80	5	0	0	13.3	499	63.5	516	32.4	3	27451	430
511	15	100	40	80	5	0	25	13.6	496	63.3	519	32.4	4	27797.7	416
178	15	100	60	60	5	0	10	13.1	503	63.3	520	32.4	5	26875.03	439

iv. Volume Dominado

O Volume Dominado representa o melhor equilíbrio – ou *trade-off* – entre o desempenho dos objetivos empregados no processo de otimização. O desempenho destes cenários em *spatial Useful Daylight Illuminance* (sUDI) e Índice de Sombra Médio Ponderado (ISmp) são considerados altos, com vários cenários entre os 10% melhores, algo que não se observa em *Load Cover Factor* (LCF), que na sua maioria são intermediários, pertencentes ao segundo quartil.

Como pode-se observar na Tabela 21 e na Figura 53, a morfologia dos melhores cenários de Volume Dominado possuem características que beneficiam de certa forma cada um dos três objetivos, com:

1. Edificações mais baixas – de 10 andares -, o que auxilia a um melhor *Load Cover Factor* (LCF);
2. Profundidade da edificação baixa, mas acima do menor valor – de 15 m, o que favorece o *spatial Useful Daylight Illuminance* (sUDI);
3. E distância entre edificações com valores mais comedidos, o que beneficia a proteção das áreas urbanas e assim favorece o Índice de Sombra Médio Ponderado (ISmp).

Figura 53 - Representação morfológica dos três melhores cenários de Volume Dominado (VD) para a quadra com edificação em fita

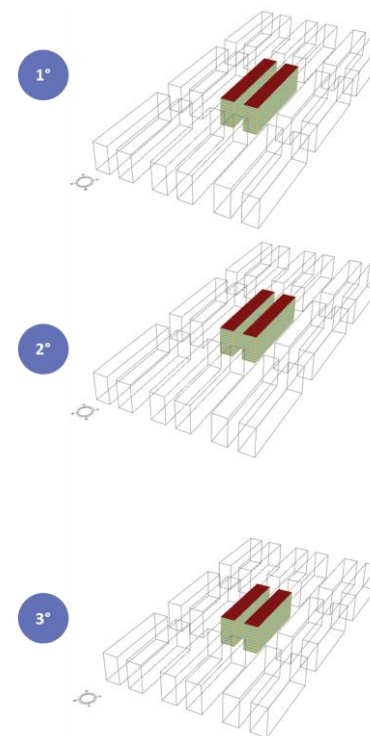


Tabela 21 – Características dos cinco cenários mais bem ranqueados para Volume Dominado (VD) da quadra com edificação em fita

Iteração	Profundidade da Edificação (m)	Comprimento da Edificação (m)	Distância Frontal entre Edificações (m)	Distância Posterior entre Edificações (m)	Número de Andares (#)	Azimute (graus)	Largura Adicional da Quadra (m)	ISmp (%)	Rank ISmp	sUDI (%)	Rank sUDI	LCF (%)	Rank LCF	Volume Dominado (un³)	Rank Volume Dominado
494	15	100	10	20	10	135	0	57.7	36	83.5	40	20.8	227	100170.6	1
433	15	100	10	20	10	135	5	57.3	40	82.8	47	20.8	228	98650.38	2
495	15	80	10	20	10	45	5	56.0	46	82.2	54	20.8	231	95717.69	3
444	15	100	10	20	5	135	5	38.4	199	78.3	173	31.8	76	95673.75	4
405	15	80	10	20	5	45	0	37.4	215	78.4	171	31.6	113	92660.69	5

4.2.6 Considerações finais – quadra com edificações em fita

O estudo da tipologia de quadra com edificação em fita indica para maior relevância de aspectos relacionados à altura das edificações para *Load Cover Factor* (LCF) e Índice de Sombra Médio Ponderado (ISmp), mas com efeito antagônico, com tendências opostas.

O estudo aponta para correlações bastante altas em valores absolutos entre os objetivos da otimização e variáveis de projeto e covariáveis relativas à morfologia urbana, especialmente à aspectos relativos à altura das edificações, como Número de Andares, Índice de Aproveitamento (IA) e Relação entre Área de Cobertura por Área de Fachada (Acob/Afach). As mesmas variáveis e covariáveis de morfologia urbana possuem altos valores absolutos de correlação para *Load Cover Factor* (LCF) e Índice de Sombra Médio Ponderado (ISmp), porém com efeito inverso. Inclusive, observa-se alta correlação entre os dois objetivos de otimização, o que reforça a natureza antagônica desses dois objetivos de otimização. Por sua vez, *spatial Useful Daylight Illuminance* (sUDI) curiosamente não apresenta nenhuma correlação significativa.

Contudo, a ausência de correlação significativa para *spatial Useful Daylight Illuminance* (sUDI) não significa que as variáveis de projeto não têm influência em seu desempenho. A Profundidade da Edificação apresenta padrão bem definido, que inclui novamente valor ótimo, em 15 m, um dos valores mais baixos dentre as dimensões estudadas, o que demonstra a importância de plantas menos profundas, porém também aponta para o cuidado com plantas muito estreitas. Neste sentido, entende-se que esta Profundidade da Edificação de 15 m possui melhor equilíbrio entre área com excesso de iluminância próxima às janelas e área com iluminância insuficiente, no interior da edificação.

Além disso, a altura da edificação, medida pelo seu número de andares, é outra variável morfológica de projeto que chama atenção devido a efeitos opostos em *Load Cover Factor* (LCF) e em Índice de Sombra Médio Ponderado (ISmp). Enquanto *Load Cover Factor* (LCF) se beneficia com edificações mais baixas, com menor área construída em relação a área e cobertura disponível para instalação de módulos fotovoltaicos, o Índice de Sombra Médio Ponderado (ISmp) tem melhor desempenho com ambientes urbanos mais enclausurados, algo favorecido por edificações mais altas.

Já a análise dos *clusters* da Frente de Pareto, que apresenta um agrupamento dos cenários com melhor equilíbrio entre os três objetivos de otimização, apresenta dois cluster com características mais semelhantes, mas que destoam consideravelmente do outro. Neste sentido, evidencia-se essa distinção entre cenários que mais favorecem o desempenho do Índice de Sombra Médio Ponderado (ISmp), com edifícios mais altos e quadras menores que propicia um espaço urbano mais protegido da insolação, e outros cenários com edificações mais baixas, que beneficia mais o *Load Cover Factor* (LCF).

Essas características morfologias são reforçadas pela análise dos melhores 5 resultados para cada objetivo de otimização. Entretanto, interessante, os melhores cenários para Volume Dominado conseguem contemplar todas as demandas dos três objetivos de otimização, **com edificações mais baixas** –que favorece *Load Cover Factor* (LCF) –, **edificação mais estreitas, porém não as mais estreitas** – que contribui com *spatial Useful Daylight Illuminance* (sUDI) – **e distância entre edificações com valores comedidos** – que beneficia o Índice de Sombra Médio Ponderado (ISmp). Neste sentido, verifica-se a pertinência e

relevância do Volume Dominado como um indicador que concilia diferentes indicadores de desempenho e possibilita cenários mais equilibrados e factíveis.

4.3 QUADRA COM PÁTIO INTERNO

Nesta seção apresentam-se os resultados para a tipologia de quadra com pátio interno, organizados em cinco partes distintas:

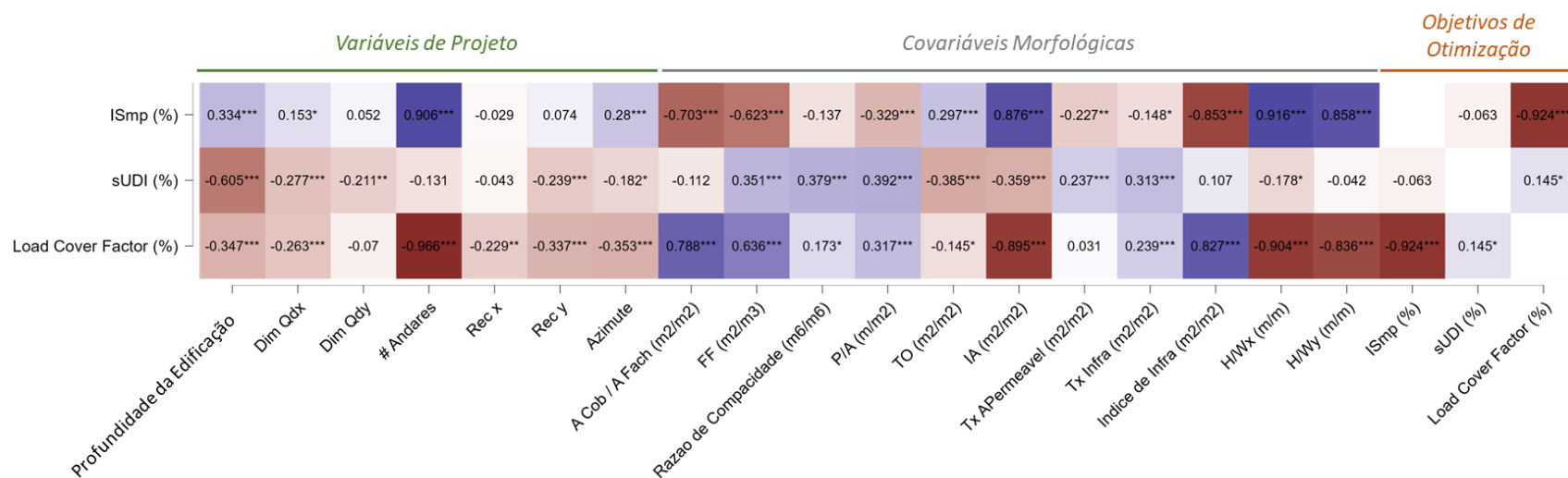
- i. Variáveis de projeto e objetivos de otimização;
- ii. Análise das correlações significativas;
- iii. Análise das variáveis de projeto;
- iv. Clusterização da Frente de Pareto;
- v. Melhores Resultados.

4.3.1 Variáveis de projeto e objetivos da otimização

Para analisar a relação entre variáveis de projeto e os objetivos da otimização, assim como indicadores de desempenho, realiza-se uma análise de correlação. Para melhor visualização dos dados emprega-se uma matriz de correlação com o mapa de calor em que tons de azul e vermelho para correlações positivas e negativas respectivamente. A intensidade da cor corresponde a intensidade de correlação.

O Gráfico 53 a seguir apresenta os resultados dessa correlação por meio de uma matriz de correlação com a mapa de calor. Opta-se por apresentar somente a correlação dos três objetivos da otimização com as variáveis de projeto e as covariáveis

Gráfico 53 - Matriz de correlação entre os objetivos da otimização e as variáveis e covariáveis de projeto para quadra com pátio interno



Fonte: Autor, desenvolvido em JASP v. 0.17.2 (2024).

Observa-se que o Índice de Sombra Médio Ponderado (ISmp) apresenta diversas correlações significativas, tanto com variáveis de projetos, com covariáveis e mesmo com outro objetivo da otimização. Dois desses indicadores possuem correlação positiva – Número de Andares (# Andares) e Índice de Aproveitamento (IA) e Fatores H/W em ambas as direções –, enquanto os outros quatro possuem relação inversamente proporcional, ou correlação negativa – Relação entre Área de Cobertura por Área de Fachada (Acob/Afach), Índice de Infraestrutura e o *Load Cover Factor* (LCF).

O objetivo de otimização *spatial Useful Daylight Illuminance* (sUDI) não apresentou correlação significativa, acima ou igual de 0,7 absoluto. O indicador Profundidade da Edificação apresenta maior valor absoluto para este objetivo de otimização, com correlação de -0,605.

Por sua vez, o *Load Cover Factor* (LCF) apresenta diversas correlações significativas, tanto com variáveis de projetos, com covariáveis e mesmo com outro objetivo da otimização. Curiosamente, são os mesmos indicadores com correlações significativas observado em Índice de Sombra Médio Ponderado (ISmp). Entretanto as correlações possuem sentidos distintos, fato também encontrado na tipologia de quadra com edificação em fita. Enquanto Número de Andares (# Andares), Índice de Aproveitamento (IA) e ambos os Fatores H/W possuem correlação positiva com Índice de Sombra Médio Ponderado (ISmp), esta relação é negativa para *Load Cover Factor* (LCF). Já a Relação entre Área de Cobertura por Área de Fachada (Acob/Afach) e o Índice de Infraestrutura possuem correlação positiva para o *Load Cover Factor* (LCF), ao invés de negativa como ocorre para o Índice de Sombra Médio Ponderado (ISmp).

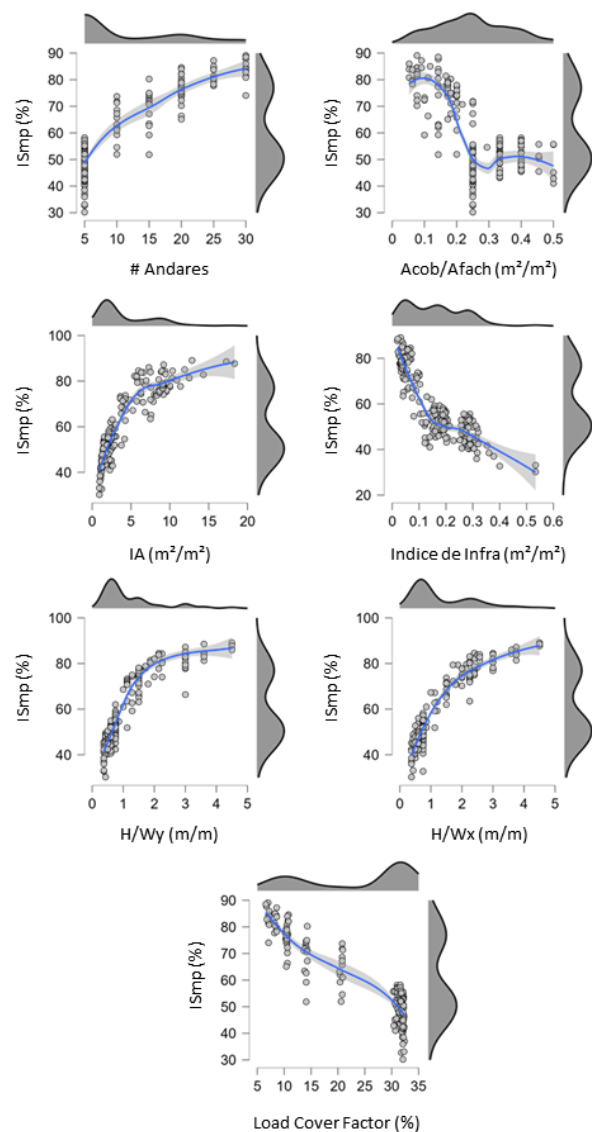
4.3.2 Análise das correlações significativas

Para melhor compreender os fenômenos existentes nos casos de correlações significativas apontadas no item anterior apresentam-se os gráficos de densidade e dispersão com uma linha de regressão suavizada desses casos. Os gráficos são agrupados por objetivo da otimização para facilitar a análise. Dos três objetivos analisados, tem-se seis indicadores relevantes para Índice de Sombra Médio Ponderado (ISmp) e 6 indicadores relevantes para *Load Cover Factor* (LCF). Adicionalmente, os próprios objetivos – Índice de Sombra Médio Ponderado (ISmp) e *Load Cover Factor* (LCF) – apresentam alta correlação entre si. E novamente, nenhum indicador apresenta valor absoluto superior ou igual a 0,7 para *spatial Useful Daylight Illuminance* (sUDI).

i. Índice de Sombra Médio Ponderado

Como mencionado anteriormente, dos sete indicadores, quatro possuem relação diretamente proporcional com o Índice de Sombra Médio Ponderado (ISmp) e outros três com relação inversamente proporcional. Apesar de todas as linhas de regressão serem curvas, a relação com Número de Andares (# Andares) e *Load Cover Factor* (LCF) se aproximam de uma reta, como nota-se no Gráfico 54. Já os casos do Índice de Aproveitamento (IA), Índice de Infraestrutura e ambos os Fatores H/W possuem curvas simples definidas. Com exceção de Relação entre Área de Cobertura por Área de Fachada (Acob/Afach), que possui correlação de -0,788, os demais têm valores absolutos bastante elevados – acima de 0,83 – o que se evidencia pela proximidade dos pontos dos gráficos de dispersão com as curvas de regressão.

Gráfico 54 – Gráficos de dispersão de Número de Andares, Relação de Área de Cobertura por Área de Fachada, Índice de Aproveitamento, Índice de Infraestrutura, Fatores H/W e Load Cover Factor (LCF)



Fonte: Autor, desenvolvido em JASP v. 0.17.2 (2024).

É interessante perceber que existem dois intervalos com concentrações de resultados de Índice de Sombra Médio Ponderado (ISmp), um entre 40% e 60% e outro em torno de 80%, como se pode observar pelos gráficos de densidade (Gráfico 54). Suspeita-se que isto esteja relacionado a dificuldade do processo de otimização de atingir melhorias do desempenho do objetivo.

Já Quanto à densidade dos valores dos outros indicadores, a maioria possui concentração de resultados com valores mais baixos, com exceção da Relação Área de Cobertura por Área de Fachada (Acob/Afach) que tem maior concentração de resultados numa faixa intermediária. A maior densidade de resultados sugere que o processo de otimização se beneficie desses valores. Já o *Load Cover Factor* (LCF), curiosamente, possui dois intervalos distintos com concentrações algo semelhante a distribuição do Índice de Sombra Médio Ponderado (ISmp) e da mesma forma, suspeita-se que isto esteja relacionado a dificuldade do processo de otimização de atingir melhorias do desempenho do objetivo

Há clara estratificação dos valores do Número de Andares (# Andares) e do *Load Cover Factor* (LCF). O primeiro caso se deve ao fato de ser uma variável categórica, já o segundo, por também ser um objetivo da otimização, não se pode explicar pelo mesmo motivo. Contudo, é provável que se deva a influência da variável categoria em ambos os objetivos da otimização. Desta forma evidencia-se a influência do Número de Andares (# Andares) nos resultados, contudo de forma divergente entre objetivos da otimização, diretamente proporcional para Índice de Sombra Médio Ponderado (ISmp) e inversamente proporcional para *Load Cover Factor* (LCF).

Esta relação da verticalização e ambientes urbanos mais protegidos da insolação também em parte justifica os resultados do Índice de Aproveitamento (IA), da Relação Área de Cobertura por Área de Fachada (Acob/Afach) e dos Fatores H/W. Nesses casos, o aumento do Número de Andares (# Andares), e consequentemente a melhoria do Índice de Sombra Médio Ponderado (ISmp), pode ser notada nas duas variáveis, porém com efeitos opostos, de forma diretamente proporcional para Índice de Aproveitamento (IA) e inversamente proporcional para Relação Área de Cobertura por Área de Fachada (Acob/Afach).

No geral, pode-se entender que todos os 4 indicadores são capazes de descrever bem o Índice de Sombra Médio Ponderado (ISmp). Além disso, também é importante ressaltar que o processo de otimização obteve número significativo de cenários com valores de Índice de Sombra Médio Ponderado (ISmp) mais baixo. Isso pode ser um indicativo do funcionamento efetivo do processo de otimização, em que resultados superiores começaram a emergir somente após um determinado número significativo de iterações. Por outro lado, pode significar que os resultados da otimização convergem para resultados de IS intermediários, mas com maior Volume Dominado.

Em linhas gerais, pode-se notar que aspectos morfológicos têm grande impacto na disponibilidade de sombreamento da área urbana, especialmente aqueles relacionados à altura da edificação, como Número de Andares (# Andares), Índice de Aproveitamento (IA) e Relação Área de Cobertura por Área de Fachada (Acob/Afach). Adicionalmente, evidencia-se efeito oposto que estas características possuem em Índice de Sombra Médio Ponderado (ISmp) e em *Load Cover Factor* (LCF), o que demonstra a importância de conciliar estes diferentes resultados.

ii. ***Spatial Useful Daylight Illuminance***

O *spatial Useful Daylight Illuminance* (sUDI) não apresentou correlação significativa igual ou superior ao valor absoluto de 0,7 para a tipologia de quadra com edificações em fita. O indicador com maior valor é a Profundidade da Edificação, com correlação de -0,605. Isso sugere que edificações menos profundas possuem melhor desempenho de *spatial Useful Daylight Illuminance* (sUDI).

iii. ***Load Cover Factor***

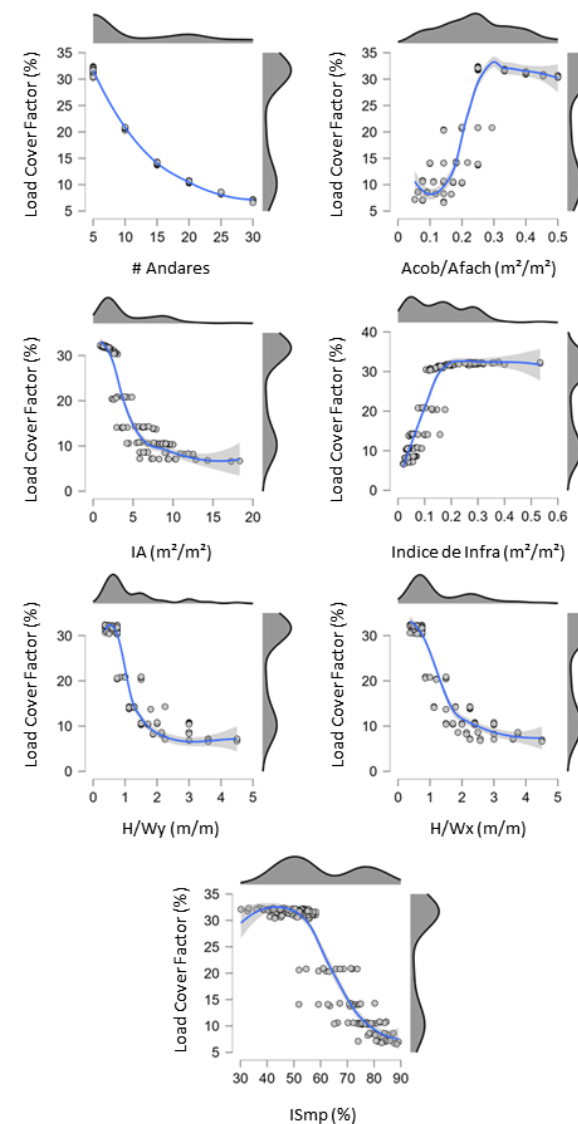
Para o *Load Cover Factor* (LCF), os quatro indicadores com maior correlação – Número de Andares (# Andares), Índice de Aproveitamento (IA), Relação Área de Cobertura por Área de Fachada (Acob/Afach) e Relação Área de Cobertura por Área de Fachada (Acob/Afach) – são mais bem descritos por curvas ao invés de retas. Curiosamente, são os mesmos indicadores com correlações significativas observado em Índice de Sombra Médio Ponderado (ISmp). Dentre todos os indicadores, o Número de Andares (# Andares) é a característica que mais influencia o *Load Cover Factor* (LCF).

A densidade dos resultados de *Load Cover Factor* (LCF) é bastante heterogênea para a tipologia de quadra com edificações em fita, como mencionado anteriormente. Há uma maior concentração na faixa superior de resultados – entre 30% e 35% - o que pode sugerir que eventualmente os resultados convergem para resultados superiores, como se pode notar no Gráfico 55. Já quanto à densidade dos valores dos indicadores, há concentração em valores mais baixos para Número de Andares (# Andares) e Índice de Aproveitamento (IA), intermediário para Índice de Sombra Médio Ponderado (ISmp) e perfil mais heterogêneo para Relação Área de Cobertura por Área de Fachada (Acob/Afach), com ao menos duas faixas de concentração de valores.

É interessante observar o efeito da variável categórica do indicador Número de Andares (# Andares) da Edificação. Para este gráfico, pode-se notar a relação quase que exponencial e inversamente proporcional da relação de Número de Andares (# Andares) da Edificação com *Load Cover Factor* (LCF). Nota-se que os dois níveis mais baixos – 5 e 10 andares – possuem resultados com desempenho evidentemente superior em *Load Cover Factor* (LCF), enquanto a diferença entre gabaritos mais altos possui variação menos perceptível. Dessa forma, até de forma esperada, há uma tendência a melhores resultados de *Load Cover Factor* (LCF) com a diminuição do gabarito da edificação.

Também se percebe o efeito do Número de Andares (# Andares) nos indicadores de Relação Área de Cobertura por Área de Fachada (Acob/Afach), Índice de Aproveitamento (IA) e Índice de Infraestrutura (Índice de Infra). Para o Índice de Aproveitamento (IA), essa relação é diretamente proporcional, enquanto para a Relação Área de Cobertura por Área de Fachada (Acob/Afach) e o Índice de Infraestrutura (Índice de Infra), ela é inversamente proporcional. É interessante notar inclusive a estratificação dos resultados, mas perpendicular ao eixo das ordenadas, da variável dependente, o que surge da relação com o Número de Andares (# Andares), uma variável categórica. Desta forma, evidencia-se a influência do Número de Andares (# Andares) nos resultados, contudo de forma divergente entre objetivos da otimização, inversamente proporcional para *Load Cover Factor* (LCF) e diretamente proporcional para Índice de Sombra Médio Ponderado (ISmp).

Gráfico 55 – Gráficos de Dispersão de Número de Andares, Relação de Área de Cobertura por Área de Fachada, Índice de Aproveitamento, Índice de Infraestrutura, Fatores H/W e Índice de Sombra Médio Ponderado (ISmp)



Fonte: Autor, desenvolvido em JASP v. 0.17.2 (2024).

Em linhas gerais, percebe-se a partir dos cenários explorados pelo processo de otimização que há uma tendência a valorizar cenários com menor Número de Andares e maior Relação Área de Cobertura por Área de Fachada. Algo coerente com a ampliação da geração energética que está diretamente atrelada a área de cobertura e a redução da demanda energética, algo relacionado a redução do Número de Andares – e conseqüentemente da área construída.

4.3.3 Análise das variáveis de projeto

Para sistematizar melhor os resultados, também se propõe a analisar os resultados a partir das variáveis categóricas de projeto: Profundidade da Edificação, Dimensão da Quadra no eixo x, Dimensão da Quadra no eixo y, Número de Andares, Recuo da Edificação no eixo x, Recuo da Edificação no eixo y e Azimute. Ao analisar cada uma das variáveis para os três objetivos de forma conjunta, a partir de gráficos de caixa – ou *boxplot* -, visa-se melhor compreender os efeitos de cada variável de forma geral, o que pode auxiliar a tomada de decisão de projeto.



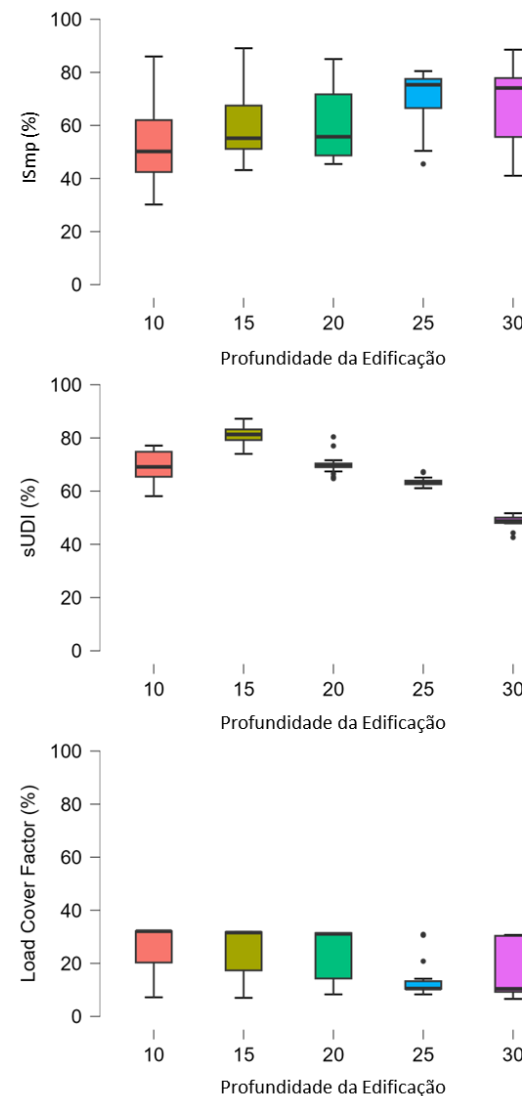
i. Profundidade da Edificação

A variação da Profundidade da Edificação acarreta comportamento distinto em cada um dos objetivos do processo de otimização – como pode ser observado no Gráfico 56.

Nos casos do *Load Cover Factor* (LCF) e do Índice de Sombra Médio Ponderado (ISmp), os diferentes grupos possuem resultados muito semelhantes, com grande sobreposição de domínio dos resultados. Algumas exceções – como por exemplo o grupo de 25 metros de Profundidade da Edificação para o *Load Cover Factor* (LCF) – podem ser explicadas pela não inclusão de *outliers* ou em decorrentes de variação amostral. No mais, somente o grupo de 10 metros de Profundidade da Edificação na análise do Índice de Sombra Médio Ponderado (ISmp) possui resultados inferiores diferenciados, com pior desempenho.

Por outro lado, *spatial Useful Daylight Illuminance* (sUDI) é o objetivo que possui padrão mais definido e capaz de oferecer indicações mais interessantes. Aparentemente há um ponto ótimo para *spatial Useful Daylight Illuminance* (sUDI) na Profundidade da Edificação com 15 m dentro do estudo realizado. Presume-se que com essa dimensão há o melhor equilíbrio entre a faixa de iluminância excessiva, localizada próxima às janelas, e a área com iluminância insuficiente, no núcleo central, mais profundo, fenômeno também observado em outras tipologias de quadra.

Gráfico 56 – Gráficos *boxplot* de *Load Cover Factor* (LCF), *spatial Useful Daylight Illuminance* (sUDI) e Índice de Sombra Médio Ponderado (ISmp) para Profundidade da Edificação



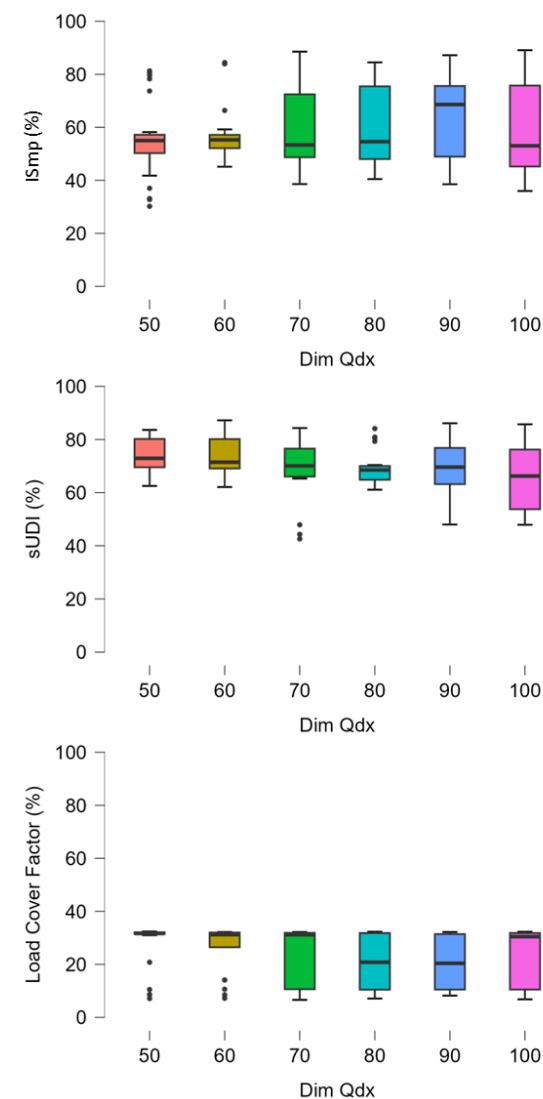
Fonte: Autor, desenvolvido em JASP v. 0.17.2 (2024).

Dessa forma, ao observar resultados dos cenários investigados para todos os três objetivos, pode-se compreender que uma Profundidade da Edificação com 15 m seja preferível, pois contempla o ponto ótimo para *spatial Useful Daylight Illuminance* (sUDI), enquanto o Índice de Sombra Médio Ponderado (ISmp) e o *Load Cover Factor* (LCF) são indiferentes ou pouco influenciados pela Profundidade da Edificação.

ii. Dimensão da Quadra em x

A variação da Dimensão da Quadra no eixo x apresenta comportamento semelhante em cada um dos objetivos do processo de otimização – como pode ser observado no Gráfico 57. Observa-se que variação da Dimensão da Quadra no eixo x não afeta de forma evidente nenhum dos três objetivos da otimização. Percebe-se grande sobreposição dos domínios dos grupos, especialmente entre quartis. Pequenas variações com a diminuição da semelhança com os demais grupos, como nos grupos de 50 e 60 metros em *Load Cover Factor* (LCF) e Índice de Sombra Médio Ponderado (ISmp), podem decorrer do tamanho amostral ou inclusão ou exclusão de *outlier*. Neste sentido, pode-se concluir que os três objetivos da otimização são indiferentes a variação do Dimensão da Quadra no eixo x.

Gráfico 57 – Gráficos *boxplot* de *Load Cover Factor* (LCF), *spatial Useful Daylight Illuminance* (sUDI) e Índice de Sombra Médio Ponderado (ISmp) para Dimensão da Quadra em x



Fonte: Autor, desenvolvido em JASP v. 0.17.2 (2024).

iii. Dimensão da Quadra em y

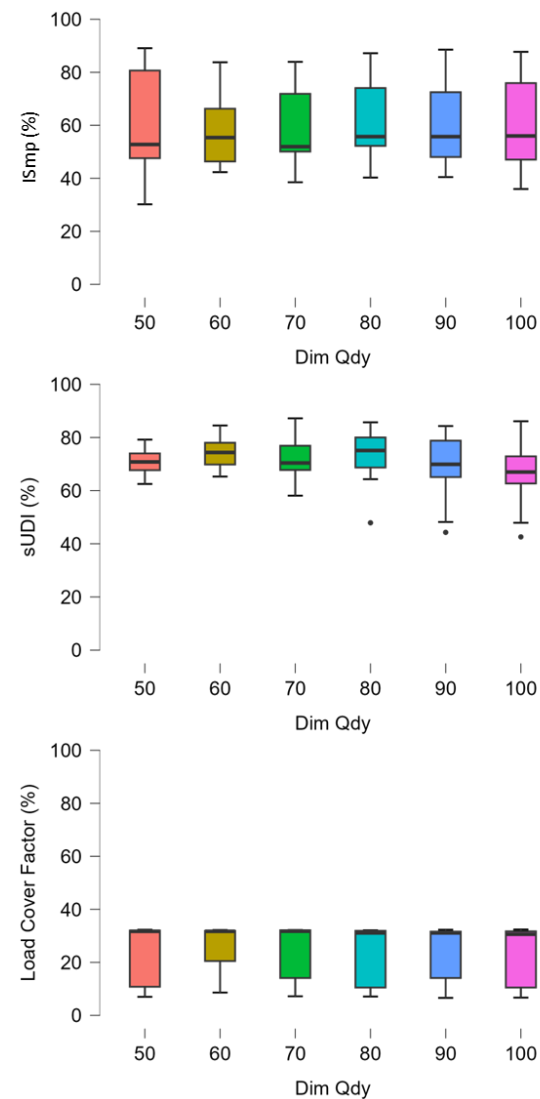
A variação da Dimensão da Quadra no eixo y apresenta comportamento semelhante em cada um dos objetivos do processo de otimização – como pode ser observado no Gráfico 57. Observa-se que variação da Dimensão da Quadra no eixo y não afeta de forma evidente nenhum dos três objetivos da otimização. Percebe-se grande sobreposição dos domínios dos grupos, especialmente entre quartis, resultado muito semelhante à Dimensão da Quadra no eixo x. Pequenas variações com a diminuição da semelhança com os demais grupos, provavelmente decorrentes do tamanho amostral ou inclusão ou exclusão de *outlier* não ocorrem como em Dimensão da Quadra no eixo x, algo que reforça a suspeita desses serem os motivos das diferenças entre grupos na análise anterior. Neste sentido, pode-se concluir que os três objetivos da otimização são indiferentes a variação do Dimensão da Quadra no eixo y.

iv. Número de Andares

A variação do Número de Andares da Edificação (# Andares) acarreta comportamento distinto em cada um dos objetivos do processo de otimização, inclusive com tendências opostas, comportamento também observado nas outras duas tipologias de quadras anteriores – como pode ser observado no Gráfico 59, na página 173.

O *spatial Useful Daylight Illuminance* (sUDI) é o objetivo que apresenta efeito menos evidentes, em que os diferentes grupos possuem resultados muito semelhantes, com grande sobreposição de domínio dos resultados. Isso indica para uma baixa influência do Número de Andares da Edificação (# Andares) neste objetivo de otimização.

Gráfico 58 – Gráficos *boxplot* de *Load Cover Factor* (LCF), *spatial Useful Daylight Illuminance* (sUDI) e Índice de Sombra Médio Ponderado (ISmp) para Dimensão da Quadra em y



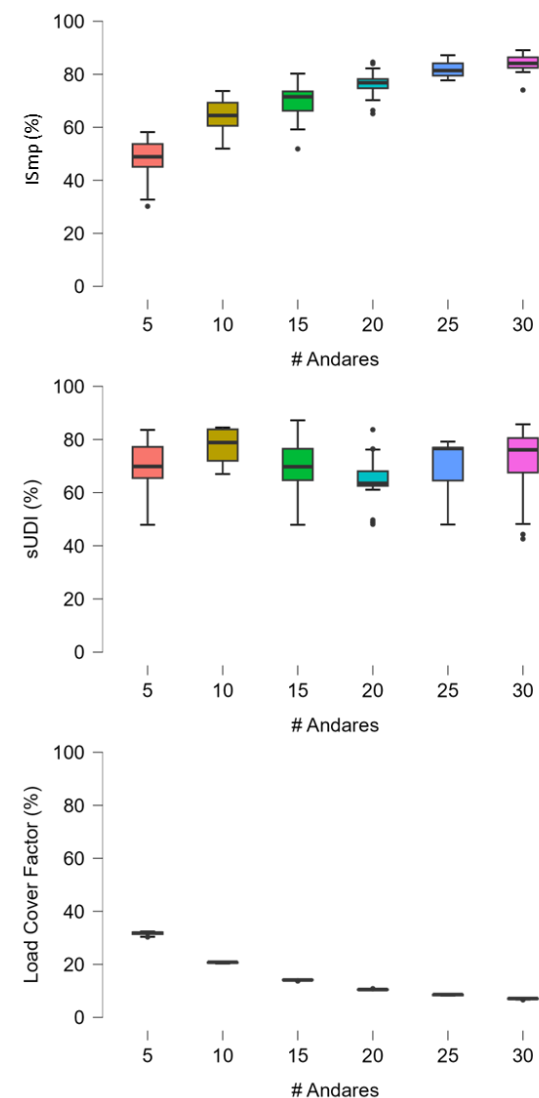
Fonte: Autor, desenvolvido em JASP v. 0.17.2 (2024).

Nos casos do Índice de Sombra Médio Ponderado (ISmp), apesar de alguma sobreposição entre os grupos, há uma tendência clara diretamente proporcional. A variação é gradual, porém mais acentuada entre os grupos mais baixos, especialmente de 5 a 20 andares. Após essa faixa a variação se torna mais sutil. Adicionalmente, a amplitude de variação interna aos grupos é menor nos grupos com Número de Andares da Edificação (# Andares) mais elevados.

Por outro lado, o *Load Cover Factor* (LCF) é o objetivo que possui padrão ainda mais definido do que o Índice de Sombra Médio Ponderado (ISmp). No *Load Cover Factor* (LCF), os grupos são bastante coesos e sem alguma sobreposição dos domínios dos resultados entre grupos. Adicionalmente, possuem uma variação marcante, com um perfil exponencial. Essas características evidenciam o efeito que o Número de Andares da Edificação (# Andares) possui em *Load Cover Factor* (LCF). Desta forma, pode-se destacar os dois grupos com menores Número de Andares – 5 e 10 andares respectivamente –, com desempenho sensivelmente melhores. Dentre todas as relações observadas, é o caso de indicador e objetivo de otimização com tendência mais marcante e clara distinção entre grupos, fenômeno também observado nas outras tipologias de quadra.

Dessa forma, ao observar resultados dos cenários investigados para todos os três objetivos, evidencia-se um conflito de efeitos especialmente entre *Load Cover Factor* (LCF) e Índice de Sombra Médio Ponderado (ISmp). A variação mais acentuada do *Load Cover Factor* (LCF) pode indicar maiores benefícios em se atender esse objeto. Entretanto, tanto para o *Load Cover Factor* (LCF), como para o Índice de Sombra Médio Ponderado (ISmp) a maior variação entre grupos ocorre entre 10 e 15 andares, o que sugere um ponto de equilíbrio, ou *trade-off*, entre os objetivos próximo a este intervalo.

Gráfico 59 – Gráficos *boxplot* de *Load Cover Factor* (LCF), *spatial Useful Daylight Illuminance* (sUDI) e Índice de Sombra Médio Ponderado (ISmp) para Número de Andares



Fonte: Autor, desenvolvido em JASP v. 0.17.2 (2024).

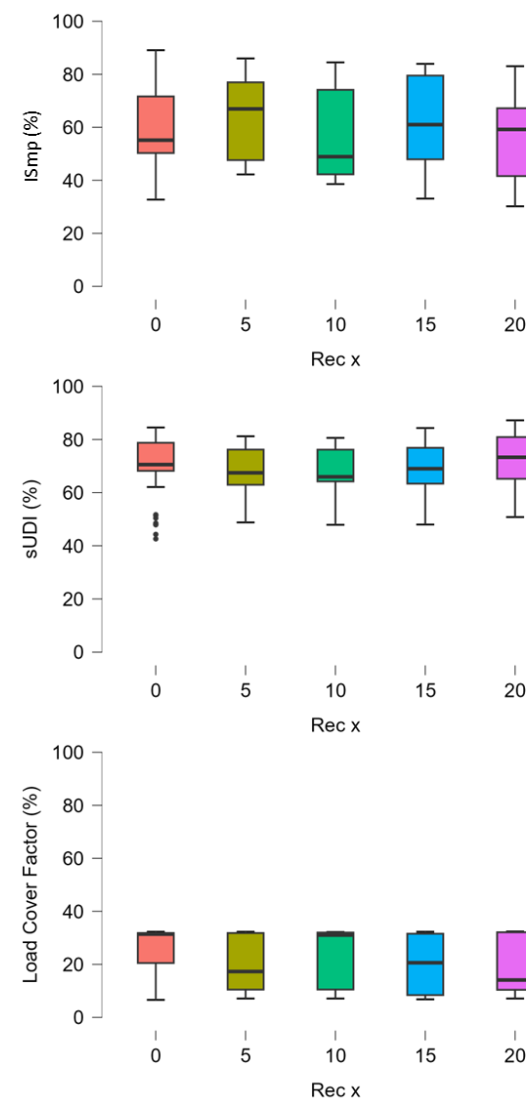
v. Recuo da Edificação em x

A variação do Recuo da Edificação no eixo x apresenta comportamento semelhante em cada um dos objetivos do processo de otimização – como se pode notar no Gráfico 60. Observa-se que variação do Recuo da Edificação no eixo x não afeta de forma evidente nenhum dos três objetivos da otimização. Percebe-se grande sobreposição dos domínios dos grupos, especialmente entre quartis, na análise dos três objetivos de otimização. Pequenas variações com a diminuição da semelhança com os demais grupos, como no grupo sem recuo – ou 0 metros –, podem decorrer do tamanho amostral ou inclusão ou exclusão de *outlier*. Neste sentido, pode-se concluir que os três objetivos da otimização são indiferentes a variação do Recuo da Edificação no eixo x.

vi. Recuo da Edificação em y

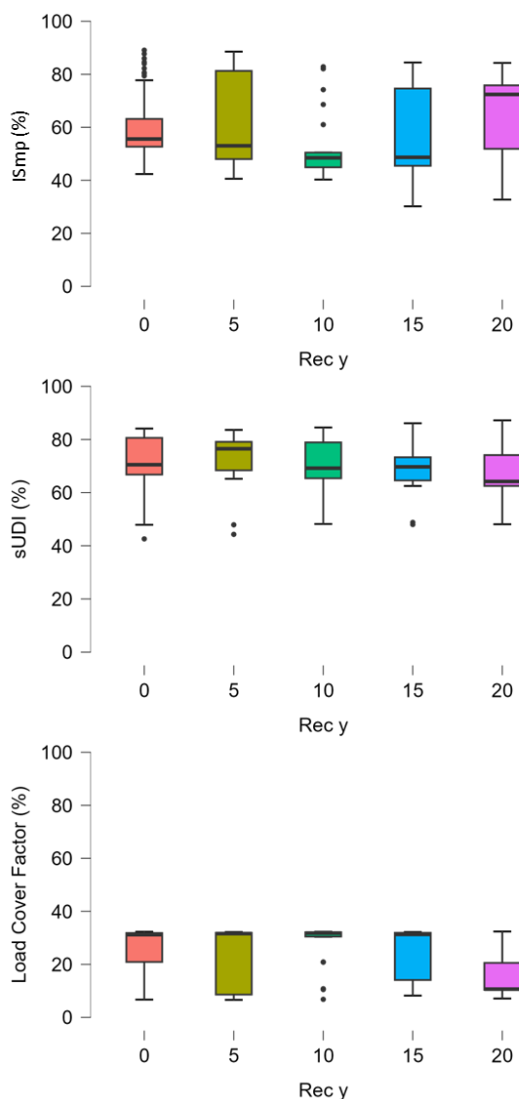
A variação do Recuo da Edificação no eixo y apresenta comportamento semelhante em cada um dos objetivos do processo de otimização – como se pode notar no Gráfico 61. Observa-se que variação do Recuo da Edificação no eixo y não afeta de forma evidente nenhum dos três objetivos da otimização, de forma quase idêntica ao item anterior, Recuo da Edificação no eixo y. Percebe-se grande sobreposição dos domínios dos grupos, especialmente entre quartis, na análise dos três objetivos de otimização. Pequenas variações com a diminuição da semelhança com os demais grupos, como no grupo sem recuo – ou 0 metros –, podem decorrer do tamanho amostral ou inclusão ou exclusão de *outlier*. Neste sentido, pode-se concluir que os três objetivos da otimização são indiferentes a variação do Recuo da Edificação no eixo y.

Gráfico 60 – Gráficos *boxplot* de *Load Cover Factor (LCF)*, *spatial Useful Daylight Illuminance (sUDI)* e Índice de Sombra Médio Ponderado (ISmp) para Recuo da Edificação em x



Fonte: Autor, desenvolvido em JASP v. 0.17.2 (2024).

Gráfico 61 – Gráficos *boxplot* de *Load Cover Factor* (LCF), *spatial Useful Daylight Illuminance* (sUDI) e Índice de Sombra Médio Ponderado (ISmp) para Recuo da Edificação em y



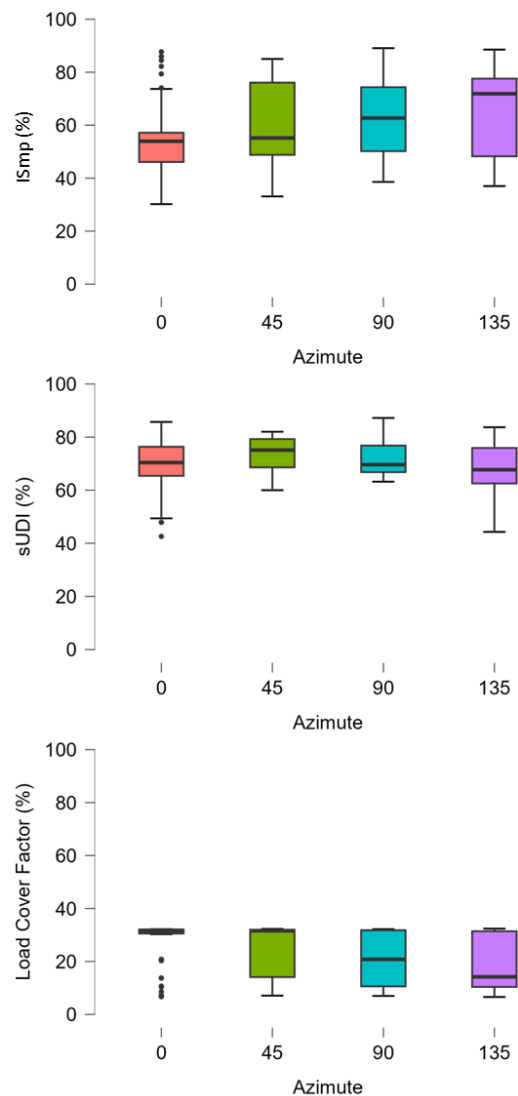
Fonte: Autor, desenvolvido em JASP v. 0.17.2 (2024).

vii. Azimute

A variação do Azimute da fachada principal da edificação acarreta comportamento semelhante em cada um dos objetivos do processo de otimização – como pode ser observado no Gráfico 62, na página 176. Em linhas gerais, observa-se pouco efeito do Azimute nos três objetivos, com grande sobreposição dos domínios dos grupos, especialmente entre máximos, mínimos e quartis. Pequenas variações com a diminuição da semelhança com os demais grupos, como no grupo com Azimute 0°, podem decorrer do tamanho amostral ou inclusão ou exclusão de *outlier*. Isso a parte, os grupos de 45° e 90° possuem mínimos superiores aos demais grupos para *spatial Useful Daylight Illuminance* (sUDI). Desta forma, pode-se entender que o Azimute possui pouca influência no desempenho dos três objetivos, fenômeno que se observa em outras tipologias e que pode ser decorrente ao sombreamento do entorno.



Gráfico 62 – Gráficos *boxplot* de Load Cover Factor (LCF), *spatial Useful Daylight Illuminance* (sUDI) e Índice de Sombra Médio Ponderado (ISmp) para Azimute

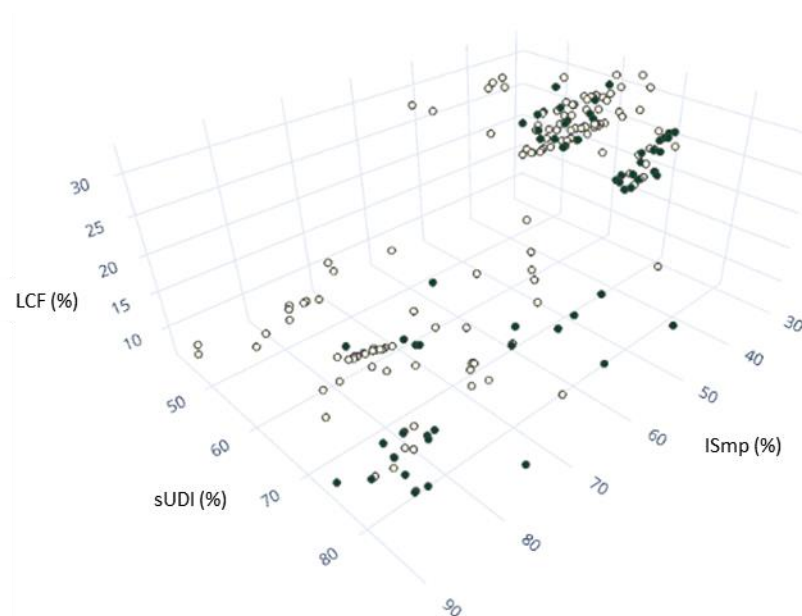


Fonte: Autor, desenvolvido em JASP v. 0.17.2 (2024).

4.3.4 Clusterização da Frente de Pareto

A definição da Frente de Pareto é etapa essencial para a avaliação do processo de otimização. Nesse processo, define-se os resultados considerados ótimos, ou melhores resultados, pois não existe outro resultado que é superior simultaneamente em todos os objetivos avaliados. No caso da presente otimização com três objetivos, esse Frente de Pareto se caracteriza como uma superfície não necessariamente plana, como pode ser visto na Gráfico 63, em que os pontos coloridos em verde pertencem à Frente de Pareto.

Gráfico 63 - Gráfico de dispersão 3D pelos eixos LCF, sUDI e ISmp com indicação da Frente de Pareto para quadra com pátio interno



Fonte: Autor, produzido em Plotly Chart Studio (2023)

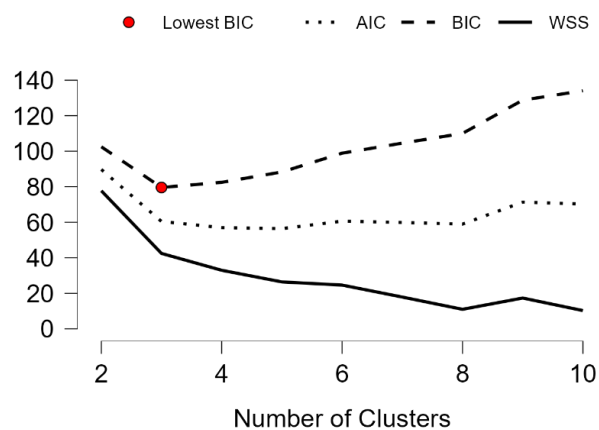
A partir da definição da Frente de Pareto, realiza-se um processo de divisão em *clusters* destes cenários, definidos a partir da sua proximidade, por meio do processo de *Neighborhood-Based Clustering (C-means)*. No presente estudo, o algoritmo define três *clusters* como condição ideal, como se observa no ponto de inflexão do Gráfico 64 e na Tabela 22 que apresenta o resumo deste processo.

Tabela 22 - C-Means Clustering da quadra com pátio interno

Clusters	N	R ²	AIC	BIC	Silhouette
3	62	0,783	59,150	78,290	0,550

Fonte: Autor, desenvolvido em JASP v. 0.17.2 (2024).

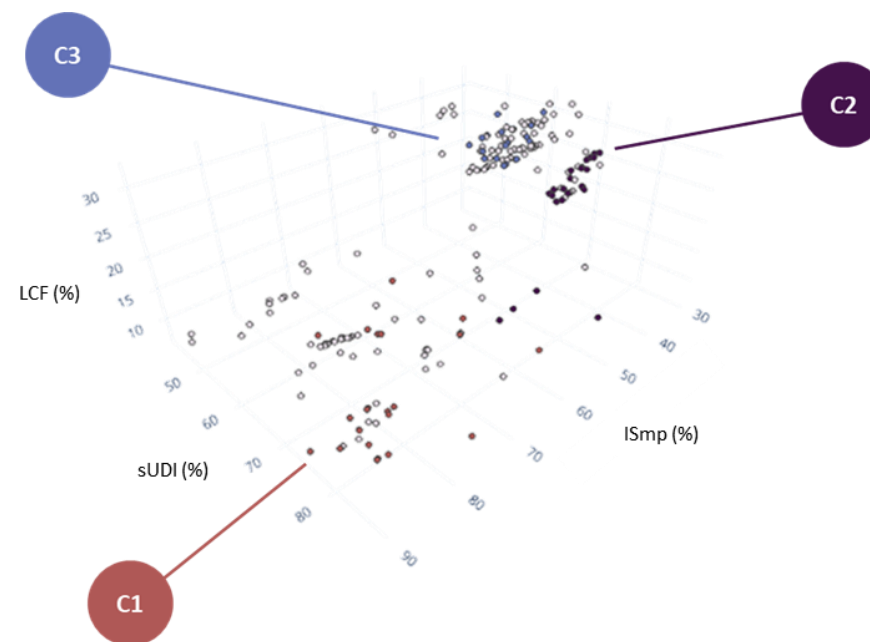
Gráfico 64 - Gráfico de C-Means Clustering para definição da quantidade ideal de clusters da quadra com pátio interno



Fonte: Autor, desenvolvido em JASP v. 0.17.2 (2024).

O Gráfico 65 apresenta os três *clusters* da Frente de Pareto com distinção por cores, enquanto os cenários que não se encontram na Frente de Pareto são apresentados por pontos brancos. Estes três *clusters* (C1, C2 e C3) possuem características próprias relativas aos três objetivos, assim como características morfológicas, relativas às variáveis de projeto. Assim, a seguir apresentam-se as caracterizações dos três *clusters* separadamente.

Gráfico 65 - Gráfico de dispersão 3D pelos eixos LCF, sUDI e ISmp com indicação de clusters no Frente de Pareto para quadra com pátio interno

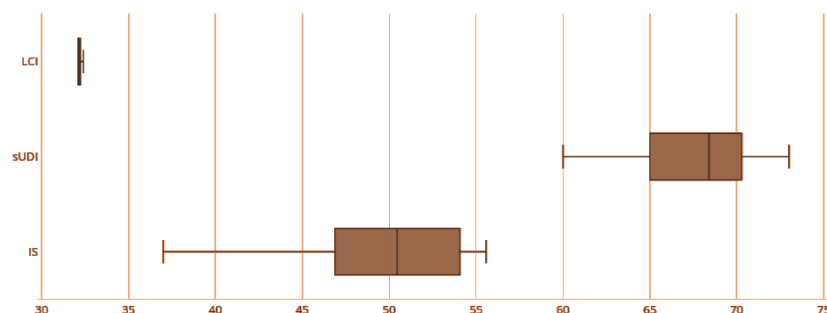


Fonte: Autor, produzido em Plotly Chart Studio (2023)

i. Cluster 1

Os resultados do *Cluster 1* (C1) – como se observa no Gráfico 66 – apresentaram cenários com maiores valores de *Load Cover Factor* (LCF), em um intervalo estreito, logo acima do 30%, algo semelhante ao *Cluster 2*. Já o Índice de Sombra Médio Ponderado (ISmp) apresenta resultados mais baixos na faixa entre 35% e 60%, o que sugere ambientes urbano mais expostos à insolação, pior condição entre os *clusters* de quadras com pátio interno. Em relação à *spatial Useful Daylight Illuminance* (sUDI), os valores entre 60% e 75%, que apesar de ser uma situação favorável a respeito da disponibilidade de iluminância, também é inferior aos demais *clusters*.

Gráfico 66 – Gráfico descritivo dos objetivos da otimização do *Cluster 1* da tipologia com pátio interno

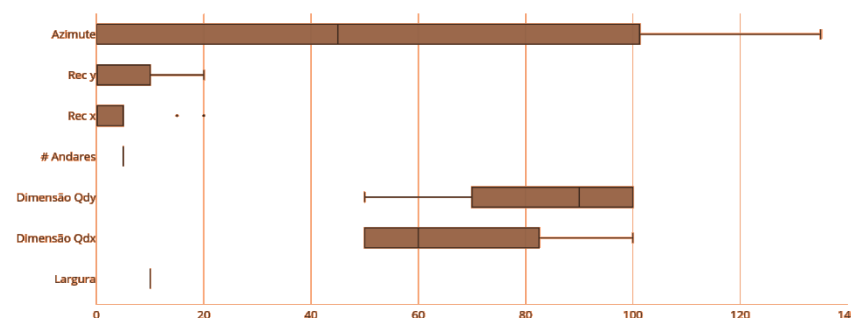


Fonte: Autor, produzido em *Plotly Chart Studio* (2023)

Quanto às características morfológicas – disponíveis no Gráfico 67 –, as edificações e quadra do *Cluster 1* apresentaram uma profundidade exclusiva de 10

metros e altura exclusiva de 5 andares. São quadras médias a grandes, com as dimensões na faixa de 50 a 100 metros em ambas as dimensões. Já os recuos são em sua grande maioria pequenos, entre 0 e 5 metros em uma dimensão (eixo x) e de 0 a 20 metros – mas com predomínio até 10 metros – na outra dimensão (eixo y). Já o azimute pode assumir todas as orientações estudadas, mas com predomínio da faixa de 0° a 90°.

Gráfico 67 – Gráfico descritivo das variáveis de projeto do *Cluster 1* da tipologia com pátio interno



Fonte: Autor, produzido em *Plotly Chart Studio* (2023)

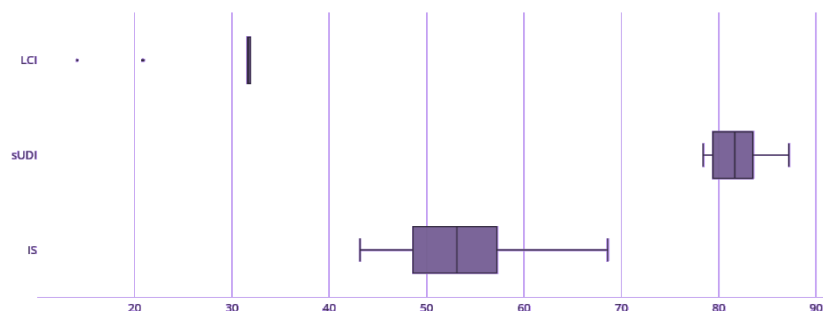
Dessa forma, este *cluster* pode ser caracterizado morfológicamente como edificações em fita com alturas baixas, plantas com profundidade intermediária e grande comprimento. Em virtude deste comprimento, estes cenários possuem uma dimensão de quadra significativa – apesar do recuo lateral pequeno –, mas por outro lado possuem a outra dimensão reduzida – relativa ao espaçamento entre edificações –, assim são quadras longas e estreitas. Quanto à orientação, tem

as fachadas principais orientadas para Nordeste e Sudoeste, Leste e Oeste ou Noroeste e Sudeste.

ii. Cluster 2

Os resultados do Cluster 2 (C2) – como se observa no Gráfico 68 – apresentaram cenários com maiores valores de *Load Cover Factor* (LCF), em um intervalo estreito, logo acima do 30% - apesar de alguns *outliers* inferiores –, algo semelhante ao Cluster 1. Já o Índice de Sombra Médio Ponderado (ISmp) apresenta resultados mais baixos na faixa entre 40% e 70%, levemente superior ao Cluster 1, entretanto, mesmo assim, sugere ambientes urbano mais expostos à insolação. Em relação à *spatial Useful Daylight Illuminance* (sUDI), os valores estão acima de 85%, algo superior aos demais clusters da tipologia de quadra com pátio interno, mas também dos clusters das demais tipologias.

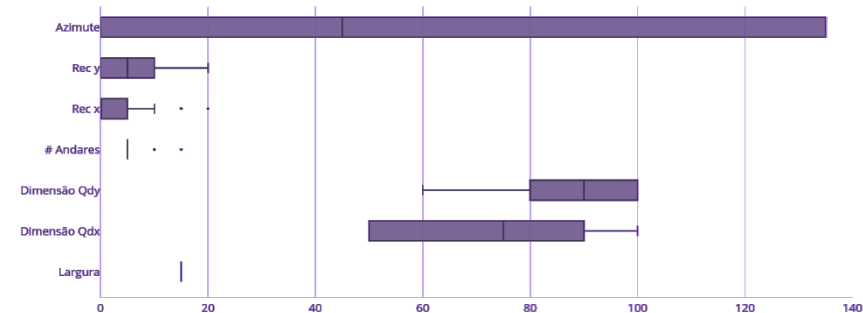
Gráfico 68 – Gráfico descritivo dos objetivos da otimização do Cluster 2 da tipologia com pátio interno



Fonte: Autor, produzido em *Plotly Chart Studio* (2023)

Quanto às características morfológicas – disponíveis no Gráfico 69 –, as edificações e quadra do Cluster 2 apresentaram uma profundidade exclusiva de 15 metros e altura exclusiva de 5 andares. São quadras médias a grandes, com as dimensões na faixa de 50 a 100 metros em uma das dimensões e de 60 a 100 na outra dimensão. Já os recuos são em sua grande maioria pequenos, entre 0 e 10 metros – com predomínio de 0 a 5 metros – em uma dimensão (eixo x) e de 0 a 20 metros – mas com predomínio até 10 metros – na outra dimensão (eixo y). Já o azimute pode assumir todas as orientações estudadas, entre 0° a 135° em incrementos de 45°.

Gráfico 69 – Gráfico descritivo das variáveis de projeto do Cluster 2 da tipologia com pátio interno



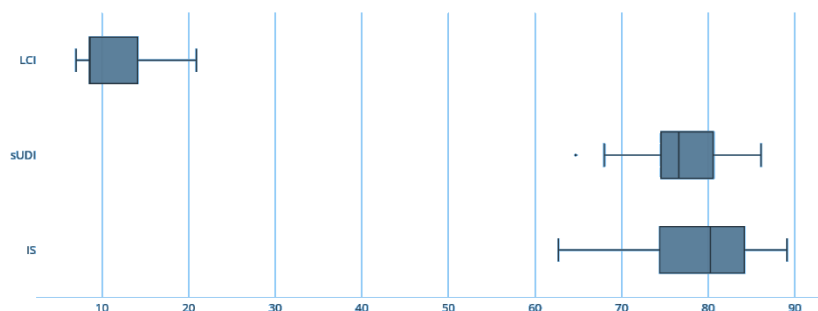
Fonte: Autor, produzido em *Plotly Chart Studio* (2023)

Dessa forma, este *cluster* pode ser caracterizado morfologicamente como quadras com pátio interno com baixas alturas e plantas com pequena profundidade – porém não a menor de todas. Possuem dimensões de quadra significativas, contudo, apresentam recuos pequenos.

iii. Cluster 3

Os resultados do *Cluster 3* (C3) – como se observa no Gráfico 70 – apresentaram cenários com menores valores de *Load Cover Factor* (LCF), não superior a 25%, mas em sua maioria próximos a 10%. Já o Índice de Sombra Médio Ponderado (ISmp) apresenta os melhores resultados para tipologia de quadras com pátio interno, na faixa entre 65% e 85%, o que sugere um ambiente urbano mais protegidos da insolação. Em relação à *spatial Useful Daylight Illuminance* (sUDI), os valores estão entre 60% e 90%.

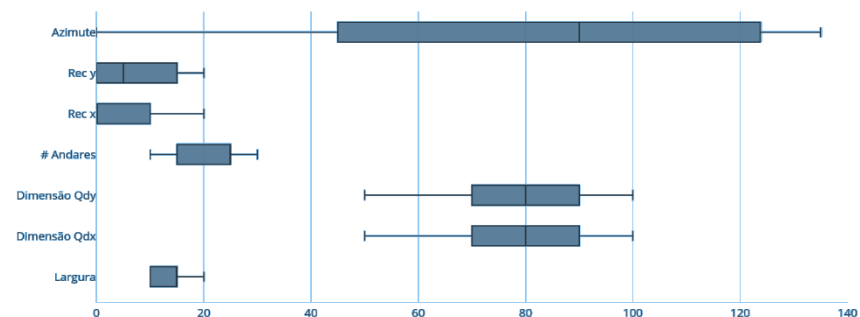
Gráfico 70 – Gráfico descritivo dos objetivos da otimização do *Cluster 3* da tipologia com pátio interno



Fonte: Autor, produzido em *Plotly Chart Studio* (2023)

Quanto as características morfológicas – disponíveis no Gráfico 71 –, as edificações e quadra do *Cluster 3* apresentaram uma Profundidade da Edificação entre 10 e 20 metros e altura na faixa de 10 a 30 andares. São quadras médias a grandes, com as dimensões na faixa de 50 a 100 metros – com predomínio entre 70 e 90 metros – em ambas as dimensões. Já os recuos são variados, entre 0 e 20 metros em ambas as dimensões. Já o azimute pode assumir todas as orientações estudadas, mas com predomínio de 45° a 90°.

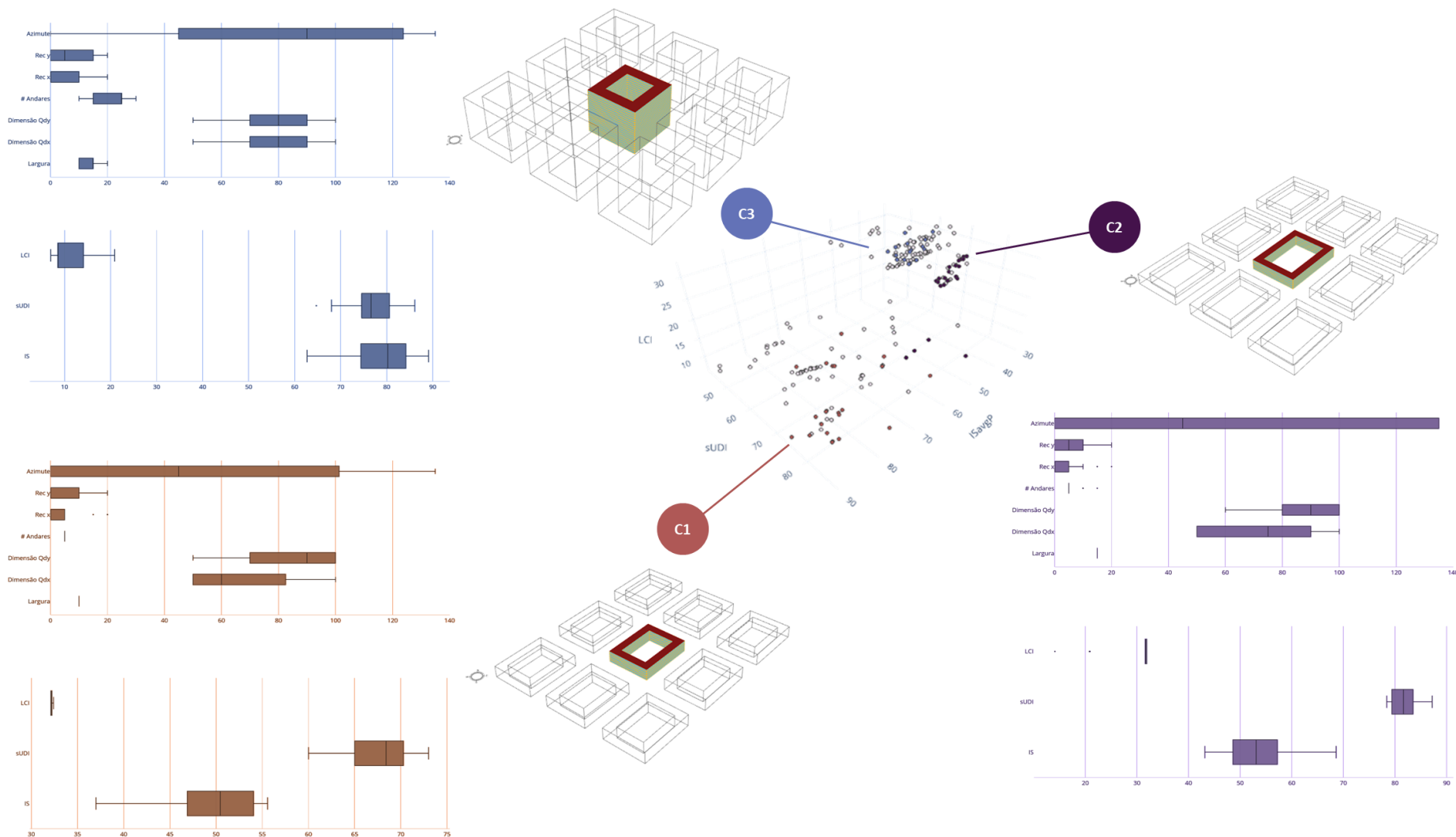
Gráfico 71 – Gráfico descritivo das variáveis de projeto do *Cluster 3* da tipologia com pátio interno



Fonte: Autor, produzido em *Plotly Chart Studio* (2023)

Dessa forma, este *cluster* pode ser caracterizado morfologicamente como quadras com pátio interno com baixas alturas e plantas com profundidade intermediária. Possuem dimensões de quadra significativas, aliados a recuos generoso.

Figura 54 – Diagrama geral dos resultados dos cenários pertencentes à Frente de Pareto da tipologia de quadra com pátio interno



Fonte: Autor (2023)

4.3.5 Melhores resultados – quadra com pátio interno

A seguir apresentam-se os cenários com melhor desempenho para cada um dos objetivos da otimização, assim como para o Volume Dominado.

i. Índice de Sombra Médio Ponderado

O ranqueamento dos melhores cinco resultados do Índice de Sombra Médio Ponderado (ISmp) no processo de otimização são apresentados na Tabela 23 enquanto a Figura 55 apresenta uma ilustração dos três cenários com melhores resultados. Estes dados evidenciam que o Índice de Sombra Médio Ponderado (ISmp) se beneficia de um contexto urbano mais protegido da insolação, com maiores Fatores H/W e Índices de Aproveitamento (IA), algo que também acarreta maiores gabaritos, como apontado anteriormente nesta tipologia de quadra, assim como nas anteriores.

Adicionalmente, percebe-se que estes cenários possuem desempenho baixo para os outros indicadores, predominantemente entre os 15% piores. Exceção a três cenários que tem desempenho intermediário em *spatial Useful Daylight Illuminance* (sUDI), no segundo quartil.

Figura 55 - Representação Morfológica dos três melhores cenários de Índice de Sombra Médio Ponderado (ISmp) para a Quadra com Pátio Interno

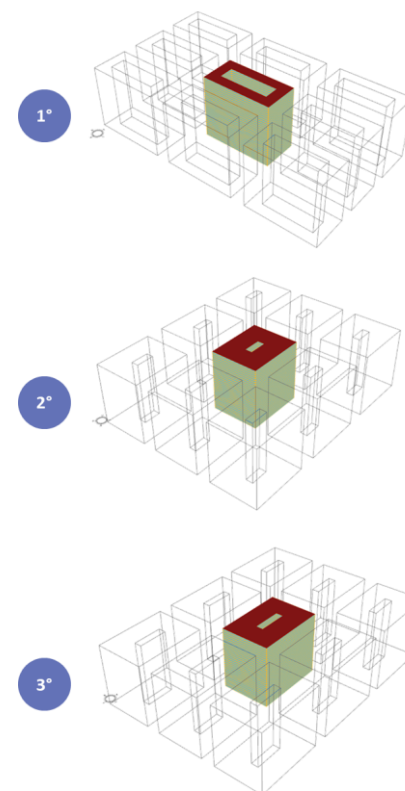


Tabela 23 – Características dos cinco cenários mais bem ranqueados para Índice de Sombra Médio Ponderado (ISmp) da quadra com pátio interno

Iteração	Profundidade Edificação (m)	Dimensão da Quadra em x (m)	Dimensão da Quadra em y (m)	Número de Andares (#)	Recuo em x (m)	Recuo em y (m)	Azimuth (graus)	ISmp (%)	Rank ISmp	sUDI (%)	Rank sUDI	LCF (%)	Rank LCF	Volume Dominado (un³)	Rank Volume Dominado
21	15	100	50	30	0	0	90	89.1	1	74	67	7	191	46147.99	178
179	30	70	90	30	0	5	135	88.5	2	44.3	193	6.6	194	25883.33	193
32	30	70	100	30	0	0	0	87.7	3	42.6	194	6.7	193	25033.83	194
82	15	90	80	25	0	5	135	87.2	4	77.4	43	8.6	172	58031.88	144
116	10	100	100	30	5	0	0	86.0	5	76.2	58	7.2	184	47163.54	174

ii. *Spatial Useful Daylight Illuminance*

Os melhores resultados de *spatial Useful Daylight Illuminance* (sUDI) encontrados no processo de otimização obtiveram valores superiores a 80% de *spatial Useful Daylight Illuminance* (sUDI). Como pode-se observar na Tabela 24 e na Figura 56, estes cenários possuem segunda menor profundidade do edifício – semelhante à quadra com edificações em fita – altura da edificação intermediária, de 10 a 30 andares. As dimensões das quadras são habitualmente generosas, com pelo menos uma dimensão superior a 70 m. Os recuos também são amplos, normalmente com pelo menos um dos valores com 20 m, maior valor para essas variáveis.

Adicionalmente, pode-se notar que estes cinco cenários possuem desempenho intermediários para os outros três indicadores, predominantemente no início da segunda centena. Exceções para três cenários que estão no segundo quartil para Índice de Sombra Médio Ponderado (ISmp) e um destes cenários que está no primeiro quartil para Volume Dominado, na 40° posição.

Figura 56 - Representação morfológica dos três melhores cenários de *spatial Useful Daylight Illuminance* (sUDI) para a quadra com pátio interno

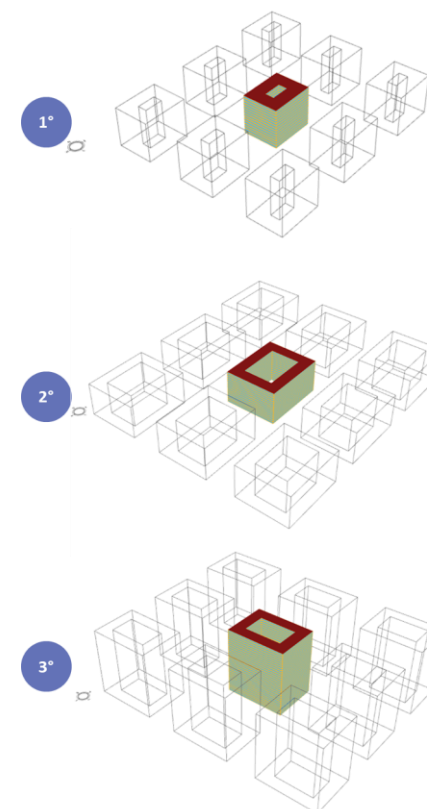


Tabela 24 – Características dos cinco cenários mais bem ranqueados para *spatial Useful Daylight Illuminance* (sUDI) da quadra com pátio interno

Iteração	Profundidade Edificação (m)	Dimensão da Quadra em x (m)	Dimensão da Quadra em y (m)	Número de Andares (#)	Recuo em x (m)	Recuo em y (m)	Azimute (graus)	ISmp (%)	Rank ISmp	sUDI (%)	Rank sUDI	LCF (%)	Rank LCF	Volume Dominado (un³)	Rank Volume Dominado
159	15	60	70	15	20	20	90	51.8	124	87.2	1	14.1	130	63747.20	138
141	15	90	100	15	20	15	90	62.7	75	86.1	2	14.1	131	76109.13	118
31	15	100	80	30	20	20	0	74.0	53	85.7	3	7.1	186	45056.93	180
148	15	90	60	10	0	10	90	68.6	67	84.5	4	20.8	115	120556.82	40
168	15	70	90	10	15	20	90	52.0	123	84.3	5	20.6	121	90219.94	100

iii. Load Cover Factor (LCF)

Os melhores resultados de *Load Cover Factor* (LCF) encontrados no processo de otimização obtiveram valores de 32,4%. Como pode-se observar na Tabela 25 e na Figura 57, estes cenários são principalmente caracterizados por edificações de baixo gabarito, todos com 5 andares – menor gabarito possível no estudo –, profundidade de edificação pequena, de 10 m – menor valor possível no estudo. Contudo as quadras variam bastante, desde as menores possíveis, de 50 m por 50 m, até as maiores possíveis, de 100 m por 100 m. Entretanto, há uma maior tendência a pelo menos uma das dimensões no maior valor, de 100 m. Os recuos também variam bastante, mas igualmente há uma tendência a pelo menos um valor máximo, de 20 m.

Os resultados destes cenários são intermediários ou inferiores nos outros indicadores, com destaque negativo para Índice de Sombra Médio Ponderado (ISmp), com praticamente todos nos 10% piores. Quanto ao *spatial Useful Daylight Illuminance* (sUDI), estes cenários pertencem ao terceiro e quarto quartil. Já para o Volume Dominado, estes cenários têm um desenho levemente superior e se encontram no segundo e terceiro quartil.

Figura 57 - Representação morfológica dos três melhores cenários de *Load Cover Factor* (LCF) para a quadra com pátio interno

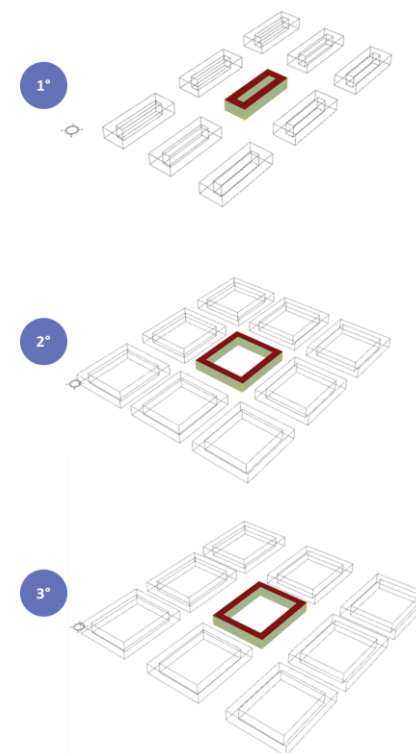


Tabela 25 – Características dos cinco cenários mais bem ranqueados para *Load Cover Factor* (LCF) da quadra com pátio interno

Iteração	Profundidade Edificação (m)	Dimensão da Quadra em x (m)	Dimensão da Quadra em y (m)	Número de Andares (#)	Recuo em x (m)	Recuo em y (m)	Azimute (graus)	ISmp (%)	Rank ISmp	sUDI (%)	Rank sUDI	LCF (%)	Rank LCF	Volume Dominado (un³)	Rank Volume Dominado
25	10	50	100	5	20	20	135	37.0	190	64.4	153	32.4	1	77189.91	117
18	10	80	100	5	0	10	135	46.3	156	69	111	32.3	2	103241.68	80
76	10	100	100	5	20	0	135	42.4	177	66.5	131	32.3	3	91007.18	99
181	10	50	50	5	15	20	45	33.1	192	62.5	171	32.3	4	66834.09	134
177	10	100	90	5	5	20	45	42.2	179	60	174	32.3	5	81810.79	111

iv. Volume Dominado

O desempenho dos melhores cenários de Volume Dominado nos três objetivos da otimização pode ser considerado, em sua maioria, intermediários, porém com desempenho considerado superior em *spatial Useful Daylight Illuminance* (sUDI), com resultados entre os 10% melhores.

Como pode-se observar na Tabela 26 e na Figura 58, a morfologia dos melhores cenários de Volume Dominado possuem características que beneficiam de certa forma cada um dos três objetivos, com:

1. Edificações mais baixas, de 5 andares, o que auxilia a um melhor *Load Cover Factor* (LCF);
2. Profundidade da edificação pequena, porém não a menor, o que favorece *spatial Useful Daylight Illuminance* (sUDI);
3. E espaços urbanos bem protegidos da insolação decorrentes dos recuos mínimos, o que beneficia Índice de Sombra Médio Ponderado (ISmp).

Figura 58 - Representação morfológica dos três melhores cenários de Volume Dominado (VD) para a quadra com pátio interno

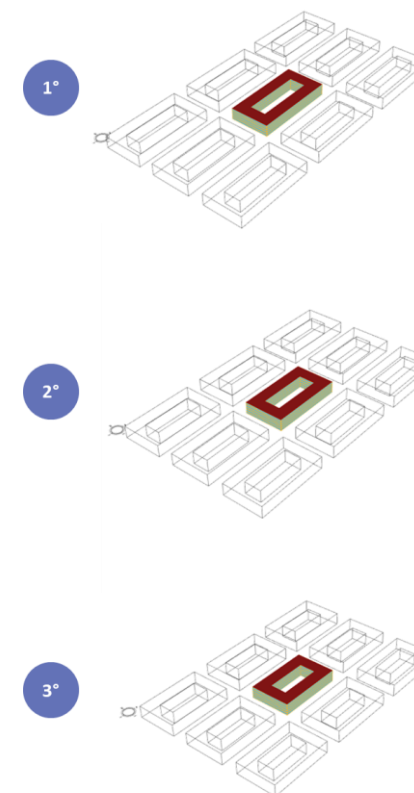


Tabela 26 – Características dos cinco cenários mais bem ranqueados para Volume Dominado (VD) da quadra com pátio interno

Iteração	Profundidade Edificação (m)	Dimensão da Quadra em x (m)	Dimensão da Quadra em y (m)	Número de Andares (#)	Recuo em x (m)	Recuo em y (m)	Azimute (graus)	ISmp (%)	Rank ISmp	sUDI (%)	Rank sUDI	LCF (%)	Rank LCF	Volume Dominado (un³)	Rank Volume Dominado
110	15	50	100	5	0	0	0	58.2	80	83.3	11	31.6	68	153185.65	1
80	15	50	90	5	0	0	0	57.4	82	83.5	10	31.6	67	151483.05	2
41	15	50	80	5	0	0	0	56.5	88	83.2	13	31.5	78	148057.10	3
124	15	50	100	5	0	0	45	57.2	84	81.9	20	31.6	72	148048.99	4
118	15	50	90	5	0	0	45	57.1	86	81.4	22	31.6	73	146799.19	5

4.3.6 Considerações finais – quadra com pátio interno

O estudo da tipologia de quadra com edificação em fita indica para maior relevância de aspectos relacionados à altura das edificações para *Load Cover Factor* (LCF) e Índice de Sombra Médio Ponderado (ISmp), mas com efeito antagônico, com tendências opostas.

O estudo aponta para correlações bastante altas em valores absolutos entre os objetivos da otimização e variáveis de projeto e covariáveis relativas à morfologia urbana, especialmente à aspectos relativos à altura das edificações, como Número de Andares, Índice de Aproveitamento (IA), Relação entre Área de Cobertura por Área de Fachada (Acob/Afach), Índice de Infraestrutura e ambos os Fatores H/W. As mesmas variáveis e covariáveis de morfologia urbana possuem altos valores absolutos de correlação para *Load Cover Factor* (LCF) e Índice de Sombra Médio Ponderado (ISmp), porém com efeito inverso. Inclusive, observa-se alta correlação entre os dois objetivos de otimização, o que reforça a natureza antagônica desses dois objetivos. Por sua vez, *spatial Useful Daylight Illuminance* (sUDI) curiosamente não apresenta nenhuma correlação significativa.

Contudo, está ausência de correlação significativa para *spatial Useful Daylight Illuminance* (sUDI) não significa que as variáveis de projeto não têm influência em seu desempenho. A Profundidade da Edificação apresenta padrão bem definido, que inclui novamente valor ótimo, em 15 m, um dos valores mais baixos dentre as dimensões estudadas, o que demonstra a importância de plantas menos profundas, porém também aponta para o cuidado com plantas muito estreitas. Neste sentido, entende-se que esta Profundidade da Edificação de 15 m possui melhor equilíbrio entre área com excesso de iluminância próxima às janelas e área com iluminância insuficiente, no interior da edificação.

Além disso, a altura da edificação, medida pelo seu número de andares, é outra variável morfológica de projeto que chama atenção devido a efeitos opostos em *Load Cover Factor* (LCF) e em Índice de Sombra Médio Ponderado (ISmp). Enquanto *Load Cover Factor* (LCF) se beneficia com edificações mais baixas, com menor área construída em relação a área e cobertura disponível para instalação de módulos fotovoltaicos, o Índice de Sombra Médio Ponderado (ISmp) tem melhor desempenho com ambientes urbanos mais enclausurados, algo favorecido por edificações mais altas.

Já a análise dos *clusters* da Fronte de Pareto, que apresenta um agrupamento dos cenários com melhor equilíbrio entre os três objetivos de otimização, apresenta dois cluster com características mais semelhantes, mas que destoam consideravelmente do outro. Neste sentido, evidencia-se essa distinção entre cenários que mais favorecem o desempenho do Índice de Sombra Médio Ponderado (ISmp), com edifícios mais altos e quadras menores que propicia um espaço urbano mais protegido, e outros cenários com edificações mais baixas, que beneficia mais o *Load Cover Factor* (LCF).

Essas características morfologias são reforçadas pela análise dos melhores 5 resultados para cada objetivo de otimização. Entretanto, interessantemente, os melhores cenários para Volume Dominado conseguem contemplar todas as demandas dos três objetivos de otimização, **com edificações mais baixas** – que favorece *Load Cover Factor* (LCF) –, **Profundidade da edificação pequena, porém não a menor** – que contribui com *spatial Useful Daylight Illuminance* (sUDI) – e **sem recuos da edificação em relação ao limite da quadra** – que beneficia o Índice de Sombra Médio Ponderado (ISmp). Neste sentido, verifica-se a pertinência e

relevância do Volume Dominado como um indicador que concilia diferentes indicadores de desempenho e possibilita cenário mais equilibrados e factíveis.

4.4 COMPARAÇÃO TIPOLÓGICAS

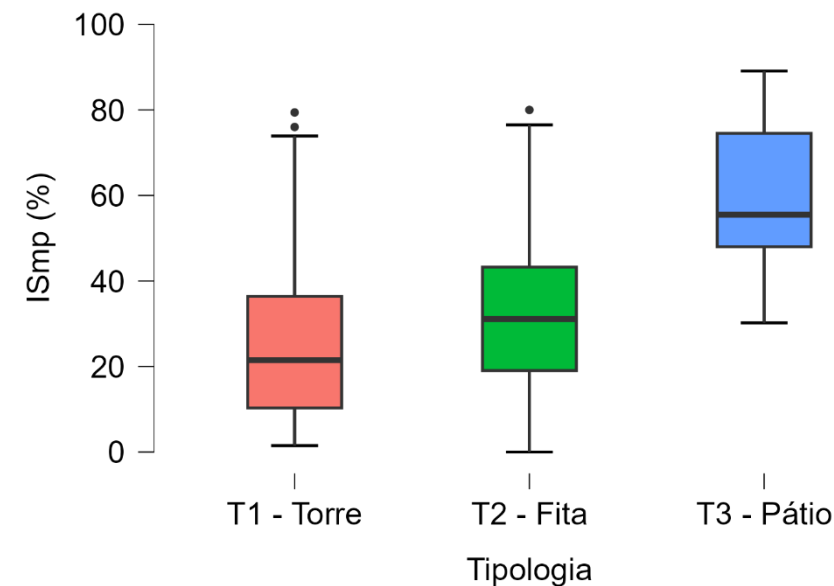
A presente seção apresenta uma análise comparativa dos indicadores de desempenho – o Volume Dominado e os três objetivos de otimização, Índice de Sombra Médio Ponderado (ISmp), *spatial Useful Daylight Illuminance* (sUDI) e *Load Cover Factor* (LCF) – entre as três tipologias, Quadra com Torre Isolada, Quadra com Edificação em Fita e Quadra com Pátio Interno. Para simplificar e expressão destas tipologias nos gráficos, elas estão denominadas de forma sucinta, T1 – Torre, T2 Fita e T3 – Pátio.

4.4.1 Comparação global entre tipologias

i. Índice de Sombra Médio Ponderado (ISmp)

A amostra de tipologia de quadra com pátio interno se destaca no desempenho Índice de Sombra Médio Ponderado (ISmp). A média é quase que o dobro da quadra com edificação em fita - 59,8% contra 32,2%, como se pode observar no Gráfico 72 e na Tabela 27. Os máximos das três tipologias é a característica descritiva da amostra com menor diferença, com 9,7% e 9,1% acima da quadra com torre isolada (T1) e quadra com edificação em fita (T2), respectivamente. Contudo a diferença é mais gritante para os valores mínimos, em que as outras duas tipologias, quadra com torre isolada (T1) e quadra com edificação em fita (T2), se aproximam a zero, enquanto a quadra com pátio interno (T3) tem um mínimo de 30,2%, valor acima da média de quadra com torre isolada (T1) e levemente inferior da quadra com edificação em fita (T2).

Gráfico 72 – Gráfico *boxplot* do Índice de Sombra Médio Ponderado (ISmp) para as tipologias de quadra



Fonte: Autor, desenvolvido em JASP v. 0.17.2 (2024).

Tabela 27 – Tabela descritiva do Índice de Sombra Médio Ponderado (ISmp) para as tipologias de quadra

	ISmp (%)		
	T1 - Torre	T2 - Fita	T3 - Pátio
Amostra	205	571	194
Média	25,565	32,185	59,853
Desvio Padrão	18,260	15,844	14,850
Mínimo	1,500	0,400	30,200
Máximo	79,400	80,000	89,100

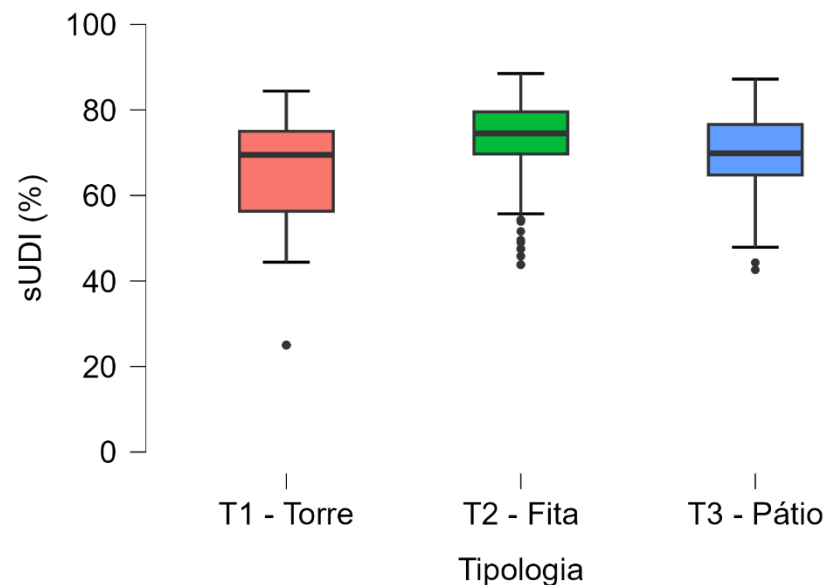
Fonte: Autor, desenvolvido em JASP v. 0.17.2 (2024).

Em linhas gerais, pode-se notar que o conjunto de dados das tipologias de quadra com torre isolada (T1) e quadra com edificação em fita (T2) possuem desempenho semelhantes para Índice de Sombra Médio Ponderado (ISmp). Observa-se ligeira vantagem para quadra com edificação em fita (T2), com valores extremos com diferença inferior a 1%, contudo, na média, há uma diferença maior, de 6,7%. Neste sentido, pode-se compreender que a quadra com edificação em fita (T2) possui desempenho superior a quadra com torre isolada (T1), especialmente nas medidas de tendência central.

ii. *Spatial Useful Daylight Illuminance (sUDI)*

Para o *spatial Useful Daylight Illuminance (sUDI)* a diferença entre os dados das amostras das tipologias de quadras é mais sutil, como se observa no Gráfico 73 e na Tabela 28. Entretanto a quadra com torre isolada (T1) possui pior desempenho nas três medidas básicas de tendência central e dispersão. Essa diferença é maior para o mínimo, de 18,3% e 17,6% para quadra com edificação em fita (T2) e quadra com pátio interno (T3), respectivamente. Isso em parte se deve a inclusão de *outlier*. Inclusive, essa diferença é substancialmente reduzida para a média, de 10,8% e 6,9% para quadra com edificação em fita (T2) e quadra com pátio interno (T3), respectivamente e ainda mais para o máximo, de somente 4,1% e 2,8%. De certa forma, isto é reflexo ao desvio-padrão mais alto de quadra com torre isolada (T1).

Gráfico 73 – Gráfico *boxplot spatial Useful Daylight Illuminance (sUDI)* para as tipologias de quadra



Fonte: Autor, desenvolvido em JASP v. 0.17.2 (2024).

As tipologias de quadra com edificação em fita (T2) e quadra com pátio interno (T3) possuem amostra mais semelhantes, mais coesa e desvio padrão menor que quadra com torre isolada (T1). Contudo em todas as medidas de tendência central e dispersão a quadra com edificação em fita (T2) possui desempenho superior a quadra com pátio interno (T3). Essa diferença é menor nos extremos de 1,2% e para o mínimo e 1,3% para o máximo, enquanto para a média esta diferença é de 3,9%.

Tabela 28 – Tabela descritiva do *spatial Useful Daylight Illuminance* (sUDI) para as tipologias de quadra

	sUDI (%)		
	T1 - Torre	T2 - Fita	T3 - Pátio
Amostra	205	571	194
Média	62.874	73.700	69.785
Desvio Padrão	17.604	7.873	9.567
Mínimo	25.000	43.800	42.600
Máximo	84.400	88.500	87.200

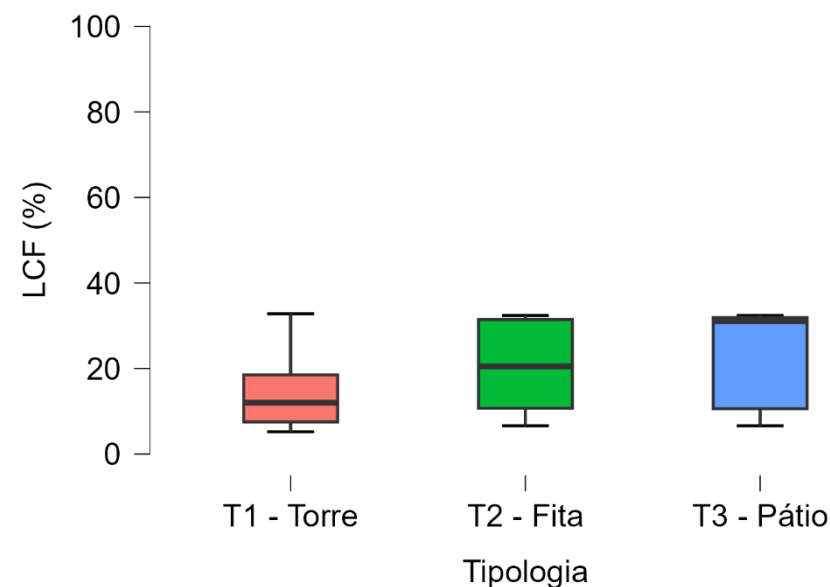
Fonte: Autor, desenvolvido em JASP v. 0.17.2 (2024).

Neste sentido, pode-se argumentar que quadra com edificação em fita (T2) possui melhor desempenho para *spatial Useful Daylight Illuminance* (sUDI). Essa diferença é mais marcante para a mediada de tendência central, enquanto para os cenários com melhores desempenhos de cada tipologia essa diferença é sutil.

iii. **Load Cover Factor (LCF)**

O *Load Cover Factor* (LCF) é o indicador com variação menos perceptível entre as tipologias de quadra, especialmente em seus extremos, em que a diferença entre o pior e melhor desempenho é de 0,4% e 1,4%, para o máximo e mínimo, respectivamente., como se observa na Tabela 29 e no Gráfico 74. A quadra com torre isolada (T1) possui maior máximo, entretanto possui desempenho da média sensivelmente inferior as outras duas tipologias, com uma diferença de 5,1% e 8,2% para quadra com edificação em fita (T2) e quadra com pátio interno (T3), respectivamente.

Gráfico 74 – Gráfico *boxplot* do *Load Cover Factor* (LCF) para as tipologias de quadra



Fonte: Autor, desenvolvido em JASP v. 0.17.2 (2024).

Tabela 29 – Tabela descritiva do *Load Cover Factor* (LCF) para as tipologias de quadra

	LCF (%)		
	T1 - Torre	T2 - Fita	T3 - Pátio
Amostra	205	571	194
Média	15.134	20.215	23.322
Desvio Padrão	9.388	9.681	10.184
Mínimo	5.200	6.600	6.600
Máximo	32.800	32.400	32.400

Fonte: Autor, desenvolvido em JASP v. 0.17.2 (2024).

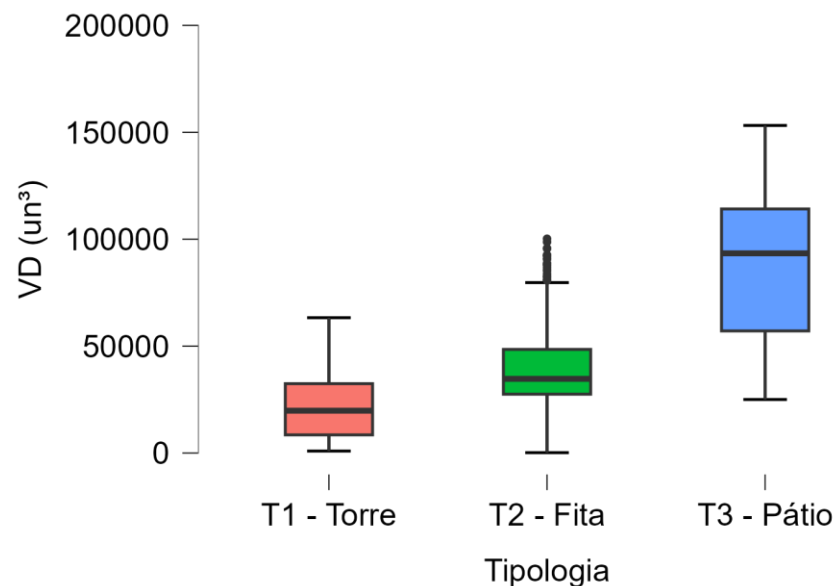
As quadras com edificação em fita (T2) e quadras com pátio interno (T3) possuem intervalos entre os quartis parecidos em uma análise visual do gráfico, com valores muito próximos, contudo, não só a média de quadra com pátio interno (T3) é superior, mas especialmente a mediana, que é próxima ao valor máximo de desempenho de *Load Cover Factor* (LCF)⁵² da quadra com edificação em fita (T2). Neste sentido, apesar de semelhanças entre o intervalo do desempenho das tipologias e do maior máximo ser da tipologia quadra com torre isolada (T1), pode-se compreender que a quadra com pátio interno (T3) possui um desempenho melhor com tipologia no seu conjunto amostral para *Load Cover Factor* (LCF).

iv. Volume Dominado

Quanto ao Volume Dominado, indicador que equaciona os três objetivos de otimização em um único indicador e assim é capaz de melhor representar uma grandeza mais equilibrada dos objetivos do problema de otimização, nota-se que quadra com pátio interno (T3) possui desempenho sensivelmente superior. Isso reflete no melhor desempenho de todas as medidas descritivas. Para ponto de referência, o mínimo de quadra com pátio interno (T3) é superior à média de quadra com torre isolada (T1). Também se observa que a mediana de quadra com pátio interno (T3) é superior ao valor do início do primeiro quartil⁵³ de quadra com edificação em fita (T2).

⁵² A razão desse teto de *Load Cover Factor* (LCF), que provavelmente está subestimado, é ponderada na seção de discussão do capítulo de Resultados e Discussões.

Gráfico 75 – Gráfico *boxplot* do Volume Dominado para as tipologias de quadra



Fonte: Autor, desenvolvido em JASP v. 0.17.2 (2024).

Tabela 30 – Tabela descritiva do Volume dominado (VD) para as tipologias de quadra

	sUDI (%)		
	T1 - Torre	T2 - Fita	T3 - Pátio
Amostra	205	571	194
Média	21.385,726	39.700,905	88.620,064
Desvio Padrão	15.248,970	18.285,250	32.480,251
Mínimo	924,000	173,558	25.031,334
Máximo	63.284,648	100.213,360	153198,696

Fonte: Autor, desenvolvido em JASP v. 0.17.2 (2024).

⁵³ Valor máximo sem os outliers.

A diferença entre T2 e T1 também é sensível, apesar de menos marcante, com melhor desempenho de T2 para VD. Apesar de possuir mínimo inferior a T1, T2 se sobressai em todas as outras medidas de tendência central e dispersão. Desta forma, pode-se compreender que a quadra com edificação em fita (T2) possui um desempenho melhor que quadra com torre isolada (T1) no seu conjunto amostral para Volume Dominado (VD).

4.5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Esta última seção do presente capítulo trata da discussão dos resultados apresentados nas quatro seções anteriores. Neste sentido, busca-se compreender os resultados obtidos à luz da literatura, ponderar sobre a pertinência desses resultados, além de prospectar possíveis razões para determinados fenômenos e padrões observados. Adicionalmente apresenta-se uma reflexão mais qualitativa e argumentativa para responder às questões de pesquisa de cunho mais metodológico e de caráter mais prático, voltado às políticas de projeto urbano, aspectos nos quais este trabalho está inserido.

4.5.1 Quadra Zero

A análise inicial dos resultados revela uma compensação máxima de apenas 34%. É importante ressaltar que, devido à alta resolução temporal do indicador *Load Cover Factor* (LCF), alcançar uma compensação total da energia consumida pela energia gerada – um *Load Cover Factor* (LCF) de 100% - demonstra-se inviável, uma vez que não há geração de energia fotovoltaica durante o período noturno.

Estudos semelhantes relatam valores de *Load Cover Factor* (LCF) na faixa entre 30% e 60% (Lim *et al.*, 2021; Natanian; De Luca; Naboni, 2022), valores mais próximos aos obtidos na presente pesquisa. Porém, é possível que os valores de geração de energia fotovoltaica estejam subestimados nos resultados desta tese devido às limitações do programa PVWatt e a questões de modelagem da geometria, que inclui eventual alta fragmentação do *mesh*. Além disso, é importante destacar que apenas na tipologia de quadra com torre isolada há geração de energia na fachada, o que também compromete o potencial de geração energética. Adicionalmente, os padrões construtivos adotados seguem as normas vigentes e melhorias desses sistemas podem resultar em um melhor desempenho termoenergético. De forma semelhante, o emprego de outras estratégias bioclimáticas, como o uso de sombreamento e o emprego de modo misto de condicionamento – *mixed-mode ventilation* ou *hybrid ventilation* –, podem acarretar redução da demanda energética das edificações da quadra.

Mesmo com a subestimação do *Load Cover Factor* (LCF), o enfoque principal da abordagem metodológica é identificar tendências e padrões que possam facilitar o desenvolvimento de um desenho urbano mais eficiente e com maior qualidade ambiental. Nesse sentido, os diversos resultados e padrões observados no estudo do impacto dos aspectos morfológicos das tipologias de quadras urbanas nos indicadores de desempenho contribuem significativamente para a compreensão desses aspectos no desenvolvimento de projetos e desenhos urbanos, e assim promover maior eficiência energética e qualidade ambiental.

Um dos aspectos mais marcantes que a pesquisa evidencia é a relevância da altura da edificação para obtenção de balanço energético nulo. Pode-se afirmar especificamente que edifícios com menores gabaritos possuem maior potencial de

serem ZEB, pois possuem maior área de cobertura – principal local para instalação de módulos fotovoltaicos – em relação à área construída – que está diretamente atrelada ao consumo energético. Este impacto de variáveis de geometria relacionadas à altura da edificação no potencial de obtenção de ZEB já é vastamente discutido na literatura científica do campo de pesquisa (Costa; Amorim; Silva, 2020; Haase; Amato, 2006; Petrichenko, 2010).

Sobre o conforto do ambiente urbano, esta pesquisa indica a preferência de ambientes mais protegidos da insolação, algo compreensível até pela definição do indicador que correlaciona sombreamento com conforto em climas com predomínio de desconforto por calor, como os climas tropicais. Este fenômeno de ambientes mais protegidos da insolação propiciarem maior conforto térmico em espaços urbanos é verificado na literatura, como já apontado no Capítulo de Materiais e Métodos (Mackey *et al.*, 2015; Natanian; Auer, 2020; Natanian; De Luca; Naboni, 2022).

Especificamente acerca do Fator H/W, discute-se que este apresenta alta correlação com o Índice de Sombra Médio Ponderado (ISmp)– indicador de conforto térmico em ambientes urbanos – em pelo menos duas das tipologias estudadas nesta pesquisa. Entretanto, mesmo a quadra com edificação em fita, que não apresenta correlação superior ou igual ao valor absoluto de 0,7, possui valor considerável, acima de 0,6, o que demonstra a importância do Fator H/W, algo que se observa nas pesquisas da área (Emmanuel; Rosenlund; Johansson, 2007; Nasrollahi *et al.*, 2017; Yahia; Johansson; Thorsson, 2018). De certa forma, esta característica de ambientes mais protegidos da insolação, inclusive no exemplo de cidades árabes tradicionais, já é apontada por autores seminais no campo do bioclimatismo, como Romero (Romero, 2013) e Olgyay (Olgyay, 1963).

Já a relação entre profundidade das edificações e a qualidade da iluminação natural também merece destaque. É consolidado o entendimento que edificações menos profundas são preferíveis devido a sua autonomia de luz natural, pois reduz áreas centrais muito distantes das janelas, inclusive existem *rules of thumb* ou regras práticas que mencionam uma relação de 1,5 entre profundidade do ambiente com autonomia de iluminação e altura da janela (O'Connor, 1997, *apud* Lechner, 2015). Entretanto, nesses casos, não se considera os impactos do excesso de iluminância que ocorrem próximos as janelas. Neste sentido, a presente pesquisa corrobora com o conhecimento da área de pesquisa, pois nas tipologias de quadra em fita e quadra com pátio edificações menos profundas, mais estreitas possuem melhor desempenho.

Pondera-se que os melhores resultados não são encontrados nas soluções mais estreitas de 10 m, mas nas soluções imediatamente maiores, com 15 m de Profundidade da Edificação, que diluem ou minimizam, o impacto da área de iluminância excessiva próxima às janelas. No caso da planta quadrada da tipologia de quadra com torre isolada, o valor ótimo de 30 m para a Profundidade da Edificação se distancia consideravelmente da premissa de que plantas menos profundas seriam mais adequadas para uma melhor iluminação. Neste sentido, reforça-se necessidade de cuidados e a dificuldade de trabalhar com esta tipologia, pois inclusive é a tipologia com pior desempenho na análise da iluminação natural.

Por fim, é crucial abordar a influência da orientação ou do azimute no desempenho dos indicadores de desempenho. Inicialmente, a variável azimute não apresenta correlação significativa com os indicadores de conforto térmico urbano, iluminação natural e eficiência energética, algo que é contrário ao entendimento consagrado na área do conforto ambiental. Contudo, é importante

observar que algumas variáveis de projeto, especialmente mediadas de dimensões de quadra e recuos das edificações, são configuradas em relação aos eixos de coordenadas do programa, em eixos x e y. Desta forma, é possível ter um mesmo cenário com diferentes azimutes, com a inversão dos valores dos eixos x e y. Assim, estas variáveis configuradas deste modo influenciam negativamente o efeito do azimute no desempenho térmico das edificações, e conseqüentemente na eficiência energética e *Load Cover Factor* (LCF). Além disso, ao se analisar os dados dos melhores cenários, percebe-se uma maior presença de cenários com orientação equatorial – no caso Norte – e ainda outros cenários com fachadas principais orientadas a Leste e Oeste, contudo, não se pode negligenciar a influência do sombreamento do entorno, especialmente das alturas solares mais baixas. De toda forma, a questão da orientação se mostra mais complexa do que por vezes apresentada, especialmente ao se incorporar aspectos adicionais, como *layout* interno da edificação, algo já é apontado por Olgyay (Olgyay, 1963) para edificações com unidades em fachadas opostas.

i. Outras questões urbanas

Além das questões energética e de conforto ambiental, as características morfológicas do contexto urbano estão associadas a diversas outras pautas da qualidade das cidades. Isso inclui desde temas relacionados a sustentabilidade, até aspectos mais socioculturais.

Autores influentes, como Jane Jacobs (Jacobs, 1961), Jan Gehl (Gehl, 2010) e Carlos Moreno (Moreno, 2024) advogam por cidades mais compactas, porém de gabarito menos alto. Apesar dos textos de Jacobs precederem o conceito de sustentabilidade mais contemporâneo que se consolida no final do século XX, a ideia dos “olhos da rua” (Jacobs, 1961) se alinha com as perspectivas de “cidades

para pessoas” de Gehl (Gehl, 2010) e da “cidade de 15 minutos” de Moreno (Moreno, 2024), que ressaltam a importância de espaços urbanos propícios para a interação humana e a mobilidade pedestre, resultando em ambientes urbanos mais humanizados. Em todos estes casos há em comum a concepção de cidades mais compactas e gabarito moderado, algo que possui ressonância com os resultados da presente pesquisa, especialmente para o indicador de desempenho de Volume Dominado, que contempla edificações mais baixas e espaços urbanos mais protegidos da insolação – o que de certa forma favorece maior densidade. Isso demonstra a pertinência dos resultados observados à luz dessas teorias urbanas e alinhado com os marcos referenciais das cidades sustentáveis.

Diversos destes aspectos da qualidade urbana podem ser de alguma forma medidos ou analisados com uso de indicadores que realizam alguma aproximação a esses aspectos do desenho urbano. Na presente pesquisa, alguns indicadores são empregados com esse intuito, como Índice de Aproveitamento (IA), que serve de aproximação para a densidade populacional, Taxa de Infraestrutura (TxInfra), que funciona como um indicador de custos de urbanização, e Taxa de Área Permeável (TxAP), que indica a quantidade de solo natural, aspecto relacionado a drenagem natural, algo atrelado ao desenvolvimento de um urbanismo e paisagismo sustentável.

Apesar de medir esses indicadores, esta tese apenas investiga a correlação deles com os indicadores de desempenho considerados objetivos da otimização. A integração de indicadores desta natureza à *workflows* computacionais de análise e tomada de decisão, como é o caso dos processos de otimização, podem auxiliar a oferecer cenários ainda mais coerentes as demandas de projeto urbanos. Contudo, a extensão e complexidade do problema de

otimização, tanto do universo de soluções possíveis, como da quantidade e natureza dos dados dos objetivos de otimização e das variáveis de projeto, necessitam de equilíbrio para não se tornarem problemas impraticáveis. Neste sentido, o emprego de indicadores simplificados, que funcionam como *proxy*, auxilia na redução dos custos computacionais. Adicionalmente, a redução do número de objetivos também contribui para a simplificação dos problemas de otimização, perspectiva defendidas por Wortmann e Nannicini (Wortmann; Nannicini, 2017).

Os resultados da pesquisa também possuem alinhamento com os questionamentos ao urbanismo modernistas realizado por Jencks (Jencks, 1973) e Arantes (Arantes, 2015), que criticam a baixa articulação com o contexto urbano das edificações em tipologias de quadras tipicamente modernistas. De forma geral, as tipologias de quadra com edificações em fita e com torre isolada – tipologias com menor articulação com o contexto urbano – possuem resultados inferiores em praticamente todos os indicadores de desempenho – objetivos de otimização e Volume Dominado – em comparação com a quadra com pátio interno, que delimita o espaço da rua com a própria edificação e, assim, possui maior articulação com o contexto urbano.

Neste sentido, compreende-se que há grande campo para análise e experimentação de soluções formais, de morfologias diversas. Inicialmente, a tese contemplava estudos de outras tipologias de quadras, inclusive com a tentativa de uma solução formal que se aproximava da quadra pós-moderna contextualista, com múltiplos pátios e subtrações da geometria. Contudo, definições paramétricas com alto grau de flexibilidade também podem resultar em cenários com geometrias mais complexas e fragmentadas, o que representa um grande desafio

para realização de simulações em programas como *Radiance*, *EnergyPlus* e *PVWatt*. Isso evidencia a relevância do emprego de indicadores simplificados, ao menos nesta etapa inicial de exploração do universo de soluções projetuais, pois não dependem de programas mais robustos – ou pelo menos das técnicas mais robustas desses programas – que possuem requisitos geométricos bastante específicos. Por outro lado, este desafio também indica a relevância do emprego de soluções de modelagem paramétrica mais contidas, com menor flexibilidade, mas que possuam maior consistência na geração de cenários viáveis e que possuam universo de soluções projetuais possíveis mais modesto e, por isso, mais compreensível. Assim, há grande potencial de investigação de formas escalonadas ou com emprego de técnicas de envelope solar.

Por fim, a prática do desenvolvimento de contextos urbanos com múltiplos usos é um dos princípios centrais de várias abordagens de urbanismo sustentáveis, contudo a presente pesquisa tem caráter monofuncional, exclusivamente residencial. A incorporação do uso comercial traz benefícios sob a perspectiva energética, pois a combinação de usos residenciais e comerciais é bastante pertinente, já que atenua os picos de demanda dos respectivos usos. Além disso, melhora-se a compatibilização de demanda e geração de energia – o *load match* –, pois o uso comercial possui maior pico no período diurno, justamente no período de maior geração de energia fotovoltaica, diferentemente do uso residencial, que possui grande parcela da demanda no período noturno.

4.5.2 *Desenho urbano baseado em desempenho*

A abordagem tradicional de zoneamento urbano, embora historicamente estabelecida, frequentemente resulta em cidades fragmentadas e carentes de diversidade funcional. A ênfase excessiva na separação de zonas residenciais,

comerciais e industriais limita a vitalidade das comunidades urbanas, aumenta a dependência de veículos motorizados e contribui para a exclusão social. Além disso, a segregação espacial perpetua desigualdades socioeconômicas e étnicas. Desta forma, este modelo enfrenta críticas crescentes de urbanistas contemporâneos, como Jencks (Jencks, 1973) e Arantes (Arantes, 2015), que questionam este modelo de urbanização marcado por traços modernistas – o que inclui a crítica específica as tipologias de quadras com falta e integração com o contexto urbano. Diante dessas limitações, há uma necessidade urgente de repensar os paradigmas tradicionais de instrumentos urbanísticos.

Pensar o processo de concepção dos ambientes urbanos implica necessariamente em considerar a complexa interação entre a forma urbana e seus múltiplos impactos sobre as relações sociais, ambientais e energéticas. A configuração física do desenho urbano, expressa através de seu *layout*, densidade, uso do solo e padrões de mobilidade, exerce influência direta sobre a qualidade ambiental e a eficiência energética do ambiente construído. Portanto, é crucial adotar abordagens baseadas em métodos quantitativos e qualitativos, que de alguma forma possam mensurar aspectos da qualidade ambiental e eficiência energética e assim auxiliar os tomadores de decisão, arquitetos urbanistas e demais agentes envolvidos no processo de projeto urbanístico.

Nesse sentido, a utilização de instrumentos pautados em desempenho emerge como o objetivo a ser perseguido. Essa mudança de paradigma de abordagem de desempenho já é enfatizada por Castells há pelo menos 15 anos (Burkhalter; Castells, 2009). De fato, no Brasil, alguns instrumentos relacionados à normatização das edificações estão seguindo essa tendência, como a NBR 15.575 (ABNT, 2024) e o processo de etiquetagem (INMETRO, 2013), que apesar de

possuírem instrumentos prescritivos, já contemplam, ou de alguma forma privilegiam, instrumentos de avaliação de performance. Algo semelhante vale para os Estudos de Impacto de Vizinhança (EIV), que demandam análises de parâmetros de desempenho ambiental para aprovação de projeto.

Essa visão de instrumentos legais balizados por indicadores de performance de fato ainda é limitada, com maior consolidação em algumas áreas específicas mundo a fora, como em prevenção de incêndio e rotas de fuga (Hadjisophocleous; Benichou; Tamim, 1998; Hurley; Rosenbaum, 2015). Entretanto, não se pode negar o crescimento desta perspectiva mesmo no campos dos projetos e instrumentos urbanísticos e do desenho urbano (Du; Azari, 2022).

Por outro lado, isso não implica na ausência de obstáculos a implementação desta prática baseada em performance. O principal desafios reside em onerar os projetistas com a realização dessas diversas análises ambientais, que exige mais recursos adicionais de tempo e expertise para realizar as avaliações necessárias. Neste sentido, uma abordagem intermediária entre instrumentos prescritivos e de desempenho é incorporar de forma mais holística esses estudos de desempenho ambiental e eficiência energética no desenvolvimento dos instrumentos urbanísticos, proposta já defendida por Tsuda (Tsuda, 2019) para cidade de São Paulo, mas que de alguma forma também encontram ressonância com outros trabalhos com Birck e Amorim (Birck; Amorim, 2020) para Brasília e Martins e coautores (Martins; Adolphe; Bastos, 2014) para Maceió. Para esse fim, não é possível planejar a partir de instrumentos generalistas, como zoneamento, é fundamental conceber a forma urbana e delimitar os atributos do desenho urbano que possa propiciar maiores benefícios de desempenho ambiental e eficiência energética, assim como outros parâmetros de qualidade urbana. Neste

sentido, é interessante observar como esta abordagem de incorporar indicadores de desempenho à concepção do desenho urbano dialoga com a tendência emergente do desenho urbano baseado em forma – *form-based design* – e assim tem muito a contribuir com esta abordagem de desenho urbano.

As análises presentes nesta pesquisa de tese visam contribuir exatamente com esta problemática e auxiliem o desenvolvimento de instrumentos urbanísticos que contemplem morfologia e desenho urbanos de melhor desempenho ambiental e eficiência energética. Apesar de empregar soluções genéricas, ao invés de contextos urbanos reais, os estudos indicam maiores relacionados ao emprego de determinada tipologia de quadra, mas acima de tudo com parâmetros que servem de balizadores para concepção de um desenho e forma urbanos com melhores benefícios ambientais. Desta forma, é possível projetar a forma urbana de forma prescritiva, porém pautada por diretrizes de desempenho ambiental.

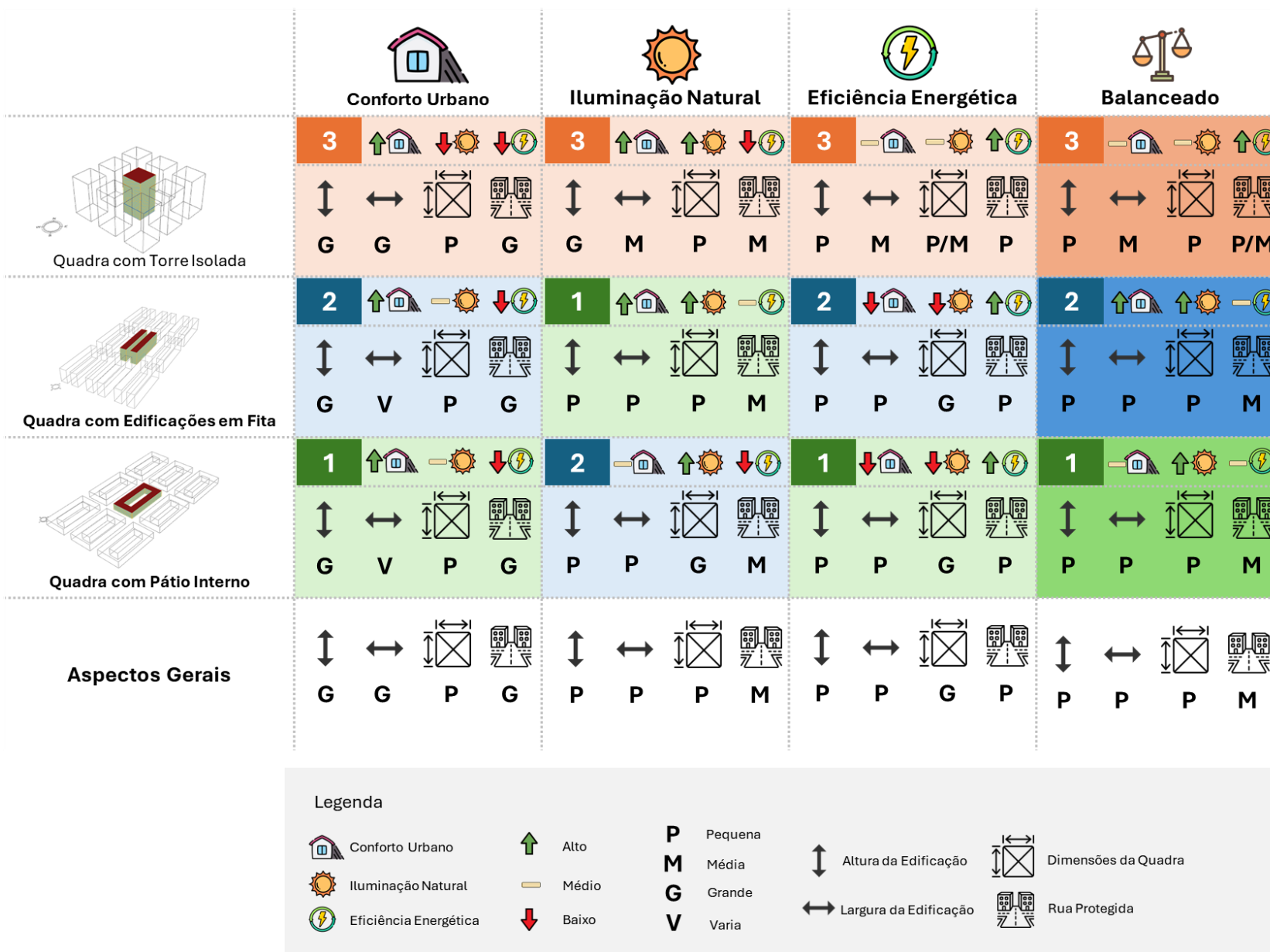
No intuito de estabelecer uma comunicação eficaz com os diversos agentes envolvidos nas decisões de projetos urbanos, torna-se imprescindível engajar não apenas os projetistas diretamente envolvidos no processo de planejamento urbano, mas também os gestores, cujo papel diretivo é crucial. No entanto, é comum que esses gestores careçam de um repertório técnico adequado para compreender plenamente as nuances e complexidades dos projetos urbanos. Essa abordagem é especialmente relevante no contexto dos planos futuros de urbanização do Distrito Federal, que devem estar alinhados com os objetivos estabelecidos na Agenda 2030. Nesse sentido, é fundamental promover uma interação colaborativa entre os diferentes atores envolvidos, com intuito de alcançar soluções urbanas sustentáveis e socialmente inclusivas que atendam às

necessidades da população e promovam o desenvolvimento equitativo e resiliente da região.

A fim de simplificar e apresentar de forma acessível as diretrizes de projeto para as diferentes tipologias de quadra, bem como para cada objetivo de otimização e para o Volume Dominado, a Figura 59 oferece uma visão geral, com o emprego de linguagem mais acessível e menos jargões técnicos. Para cada critério é indicada a tipologia com melhor desempenho em verde, a segunda melhor em azul e a pior em vermelho. É importante ressaltar o cenário mais equilibrado, referente ao Volume Dominado, além de destacar as diretrizes gerais mais comuns para cada critério. Essa representação simplificada permite uma compreensão mais direta das estratégias de projeto recomendadas para alcançar os melhores resultados em termos de desempenho ambiental e eficiência energética nas tipologias de quadra analisadas.



Figura 59 – Diagrama de diretrizes projetuais simplificadas



i. Ferramentas digitais

As ferramentas digitais são componentes centrais para o desenvolvimento de desenho urbano baseado em desempenho. Para este fim, as ferramentas de simulação de desempenho representam um grande avanço, pois possibilitam o teste de várias alternativas de projeto com rápida iteração antes mesmo da construção das edificações. Contudo, de forma mais abrangente, a adoção de técnicas de design computacional implica em uma mudança de paradigma na abordagem e concepção do projeto, onde os recursos digitais assumem o papel de assistentes de projeto, conforme destacado por Stasiuk (Stasiuk, 2018). Nesse contexto, como observado por Kolarevic (Kolarevic, 2003), avança-se de um processo de *form-making* e *form-finding*. Essa abordagem possibilita explorar o universo de soluções projetuais com o auxílio de análises computacionais avançadas, resultando em projetos mais inovadores, eficientes e adaptáveis às demandas contemporâneas.

Os resultados desta pesquisa evidenciam a relevância do processo de otimização como uma técnica de *design* computacional que permite a exploração de diversas soluções projetuais por meio de ferramentas digitais. O método utilizado revela a interação entre o usuário e a tecnologia, especialmente na formulação de problemas analíticos e na interpretação dos resultados. Não se trata, portanto, de uma única definição do melhor resultado ou cenário, mas sim da identificação de padrões e tendências. Dessa maneira, a análise realizada por meio das ferramentas digitais oferece uma orientação para embasar a tomada de decisão fundamentada em dados ou informações. Essa abordagem está alinhada à

concepção do processo de projeto como algo investigativo e iterativo, originado de problemas complexos ou perversos, como discutido ao longo desta tese.

De fato, a análise dos dados para interpretação dos resultados e apoio à tomada de decisões de projeto emerge como um dos principais desafios enfrentados. No entanto, o processo exploratório dos dados empregado nesta tese revela-se adequado, ao identificar tendências e padrões essenciais para orientar o desenvolvimento do projeto. Esse processo de análise de dados integra-se de forma harmoniosa ao processo de investigação inerente ao desenvolvimento de um projeto, também caracterizado como um processo iterativo de investigação.

Em um contexto de avanços significativos no campo computacional, notadamente com os recentes progressos na área da Inteligência Artificial, surge a preocupação crescente com a possível substituição do trabalho humano por máquinas. Entretanto, como evidenciado pelas atividades desenvolvidas nesta pesquisa, o que se observa é uma relação de parceria entre humanos e tecnologia, em que a tomada de decisão é fruto de processo maturado e complexo. E conforme ressalta a clássica frase da apresentação da IBM, " (...) um computador nunca pode ser responsabilizado, portanto, nunca deve tomar uma decisão de gestão" (IBM, 1979, p. [s.d.], tradução livre)⁵⁴, há uma necessidade premente de incorporar a percepção e a responsabilização humanas nesse processo de colaboração.

- a. Técnicas computacionais na concepção de formas urbanas

A presente pesquisa discute técnicas de parametrização simples, baseada nas tipologias de quadra mais habituais. Contudo, conforme já mencionado, outras

⁵⁴ Da frase em inglês, "(...) a computer can never be held accountable, therefore a computer must never make a management decision".

técnicas com maior natureza generativa fizeram parte do escopo inicial da pesquisa e estão contempladas como aspectos de investigações futuras.

O desenvolvimento de formas urbanas por meio de técnicas subtrativas da morfologia representa as técnicas mais próximas de acordo com o seu grau de complexidade. Estratégias como escalonamento da forma ou mesmo envelope solar demandam recursos computacionais acessíveis e podem apresentar ajustes formais com desdobramentos evidentes no desempenho ambiental, visto que interferem de forma consistente na exposição solar. Além disso, representam soluções formais mais próximas das tradicionalmente empregadas nos contextos urbanos.

O emprego de atratores conciliados a volumes a serem subtraídos também é uma abordagem bastante acessível, e pode representar uma forma de concepção formal de quadras abertas ou contextualistas. Contudo cuidados com o nível de flexibilidade do modelo paramétrico, e conseqüentemente o nível de fragmentação da geometria, são pontos importantes para garantir a realização das simulações de desempenho além do funcionamento adequado do processo de otimização. De fato, o emprego de atratores é uma técnica simples, mas que possui grande potencial em processos de otimização, pois pode estruturar a variação de múltiplos parâmetros, o que restringe o número de soluções possíveis e orienta o desenvolvimento de cenários mais factíveis. Um exemplo simples desta condição é um conjunto de edificações, cada uma com altura distintas. Neste caso, o emprego de atratores pode organizar a variação das alturas de acordo com um gradiente, o que estrutura e limita as soluções possíveis.

Já no campo de técnicas agregativas para geração de formas urbanas, há um grande potencial no emprego de gramática da forma. Contudo, técnicas

procedurais específicas que empregam recursos probabilísticos possuem limitações para o emprego de técnicas de otimização, pois adicionam incertezas e não reprodutibilidade ao processo de busca do algoritmo de otimização. De fato, a natureza probabilística de diversas técnicas é um desafio nos casos de indicadores de desempenho com uso de caixas pretas – como é o caso dos algoritmos de busca dos processos de otimização.

Técnicas procedurais desempenham um papel crucial na definição de espaços de forma potencialmente complexos. Especialmente notáveis são aquelas que lidam com arranjos simplificados e lógicas acessíveis, facilitando a compreensão e manipulação dos modelos gerados. Um exemplo emblemático dessas técnicas são os modelos celulares ou baseados em *voxel spaces*, que podem ser facilmente integrados com uma variedade de abordagens – tanto agregativas quanto subtrativas. Além disso, soluções relacionais, que incorporam vínculos topológicos, emergem como alternativas intrigantes nesse contexto, permitindo não apenas resolver questões de orientação mencionadas anteriormente, mas também oferecendo uma base sólida para a exploração criativa de formas complexas.

As alternativas mencionadas possibilitam o desenvolvimento de soluções formais altamente inovadoras, abrindo caminho para quebrar o paradigma de padronização e repetição e permitindo vislumbrar uma produção mais diversificada. Essa mudança de paradigma, de padronização em massa para a customização em massa, como proferido por Mario Carpo (Carpo, 2017), reflete a transição entre a modernidade ao período pós-moderno, entre universalismo para diversidade, entre homogeneidade para heterogeneidade. Esse movimento implica uma mudança de homogeneidade para heterogeneidade, o que reconhece

que soluções mais diversas são consideradas mais adaptadas em diversos campos. Assim, essa mudança para soluções mais múltiplas e diversificadas pode até mesmo resultar em melhorias no desempenho ambiental, como já sugerem alguns trabalhos (Natanian; De Luca; Naboni, 2022).

Inclusive, observa-se esta natureza do maior benefício da heterogeneidade espacial no desempenho ambiental em trabalho de conclusão de curso de especialização desenvolvido sob a orientação do autor desta tese, “Algoritmo adicionado ao planejamento urbano e ambiental: otimização multiobjetivo do trecho da ViaTransbrásilia” (Maron; Góes, 2023). Os resultados apresentados neste artigo sugerem que a diversidade morfológica não apenas promove desempenho ambiental superior, mas também contribui para soluções mais equilibradas entre diferentes indicadores de desempenho. Assim, essas técnicas computacionais representam o surgimento de um novo paradigma de criação colaborativa, baseado em evidências e dados, entre seres humanos e máquinas cibernéticas.

4.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Os presentes resultados desta tese indicam impacto relevantes das variáveis morfológicas de projeto nos indicadores de desempenho empregados como objetivos da otimização para todas as tipologias de quadra estudadas. Além disso, observa-se correlação significativas entre diversos aspectos morfológicos – variáveis e covariáveis – com os indicadores de desempenho. Contudo, mais importante, tendências morfológicas emergem como elementos orientadores do processo de desenvolvimento de um desenho urbano ambiental no contexto

climático estudado, de Brasília: contexto urbano mais protegido da insolação, edificações relativamente baixas e profundidade de planta moderada.

O estudo tipológico revela uma distinção notável no desempenho entre as três tipologias de quadras analisadas. A tipologia de quadra com pátio interno destaca-se pelo seu desempenho superior de Índice de Sombra Médio Ponderado (ISmp) e *Load Cover Factor* (LCF), enquanto registra o segundo melhor desempenho no *spatial Useful Daylight Illuminance* (sUDI). No entanto, essa superioridade é mais evidente ao se considerar o desempenho do Volume Dominado, indicador de equilíbrio entre os três objetivos de otimização. Por outro lado, a tipologia de quadra com torre isolada demonstra medidas de tendência central e dispersão significativamente inferiores em relação às outras tipologias para todos os indicadores de desempenho.

Um aspecto crucial para a compreensão dos resultados e para auxiliar as decisões de projeto e planejamento é a análise detalhada dos melhores cenários, realizada através do estudo dos clusters da Frente de Pareto, bem como dos próprios cenários que apresentam o melhor desempenho para cada um dos três objetivos de otimização, incluindo o Volume Dominado. Os melhores cenários para cada objetivo de otimização destacam claramente as características mencionadas anteriormente, embora muitas vezes de forma exagerada, resultando em impactos negativos nos outros indicadores de desempenho, o que os torna menos viáveis. Por outro lado, o Volume Dominado consegue apresentar cenários mais equilibrados, que de alguma forma contemplam as demandas dos três objetivos de otimização. Em suma, esses cenários equilibrados com melhores volumes dominados geralmente se traduzem em edificações mais baixas, favorecendo o *Load Cover Factor* (LCF), com uma profundidade de edificação moderada, que

contribui para o spatial Useful Daylight Illuminance (sUDI), e quadras de tamanho reduzido ou sem recuos da edificação em relação ao limite da quadra, beneficiando o Índice de Sombra Médio Ponderado (ISmp). Isso reforça a importância do Volume Dominado e, conseqüentemente, do processo de otimização.

Diversos aspectos influenciam significativamente os indicadores de desempenho empregados nos objetivos de otimização. O Índice de Sombra Médio Ponderado (ISmp), embora simplificado, é crucial para compreender o conforto térmico urbano, especialmente em áreas com desconforto térmico devido ao calor. Variáveis morfológicas como o Número de Andares, Fator H/W e Índice de Aproveitamento mostram forte correlação positiva com o Índice de Sombra Médio Ponderado (ISmp), o que indica benefício em cenários mais protegidos da insolação direta. Por outro lado, os resultados do *Load Cover Factor* (LCF) revelam a importância da altura da edificação para o balanço energético, com maiores benefícios de edificações mais baixas, que assim possuem maior relação de área e cobertura – disponível para instalação de módulos fotovoltaicos – e área interna condicionada – relacionada com a demanda energética. Já o *spatial Useful Daylight Illuminance* (sUDI) está intimamente ligado à Profundidade da Edificação, algo especialmente evidente em quadras com edificações em fita e pátios internos. Contudo, os resultados indicam para profundidades de planta moderadas, porém não as menores, para que haja um equilíbrio entre a faixa com excesso de iluminância próxima às janelas e o núcleo com iluminância insuficiente.



V CONCLUSÃO

Os desafios colocados para a humanidade na atual conjuntura de mudanças climáticas demandam atitudes enfáticas para mitigação e adaptação com viés propositivo. A busca do balanço energético nulo das edificações e a consequente melhoria da eficiência energética são elementos centrais nesta mudança de paradigma. Contudo, para que essa mudança ocorra na escala e no prazo adequados, torna-se crucial adotar abordagens mais incisivas, que orientem as práticas edilícias desde sua concepção, ou até mesmo antes, por meio de regulamentos urbanísticos. E isso não pode estar restrito a eficiência energética, ao consumo e geração de energia, mas necessita contemplar a qualidade ambiental de forma mais abrangente.

O desenvolvimento de estudos de ZEB na escala urbana ou no parque construído contribuem significativamente para equacionar essa questão. E apesar de não ser um campo novo, ainda está em plena formação, como esta pesquisa demonstra por meio de sua pesquisa bibliográfica e análise bibliométrica. Aspectos metodológicos e de terminologia ainda se encontram em consolidação e amadurecimento, como atesta a produção fragmentada, com grande quantidade de artigos que não compartilham uma referência sequer, e pulverizada, com aproximadamente 90% dos autores com somente uma publicação no tema. Contudo, é evidente o aumento de relevância do tema nos últimos anos, especialmente a partir de 2015, com o crescimento de publicações, além de uma crescente ênfase aspectos urbanísticos e de questões que demandam maior integração interdisciplinar, áreas mais alinhadas ao *métier* da arquitetura e urbanismo.

Em termos propositivos da pesquisa aplicada em si, os resultados do presente estudo evidenciam os impactos significativos dos aspectos morfológicos das tipologias de quadra urbanas no desempenho de critérios holísticos de avaliação ambiental no contexto climático de Brasília. Observa-se melhorias significativas dos três indicadores de desempenho utilizados com objetivos de otimização – Índice de Sombra Médio Ponderado (ISmp), *spatial Useful Daylight Illuminance* (sUDI) e *Load Cover Factor* (LCF).

O estudo tipológico se mostra bastante pertinente e consegue apresentar claramente uma diferença significativa de desempenho entre as três tipologias. **A tipologia de quadra com pátio interno se apresenta com desempenho superior** dos valores de tendência central para Índice de Sombra Médio Ponderado (ISmp) e *Load Cover Factor* (LCF), enquanto tem o segundo melhor desempenho para

spatial Useful Daylight Illuminance (sUDI). Contudo, esta superioridade da quadra com pátio interno é mais evidente no desempenho do Volume Dominado, que equaciona os três objetivos de otimização em um único indicador e representa soluções mais equilibradas. Por outro lado, a **tipologia de quadra com torre isolada possui praticamente todas as medidas de tendência central e dispersão inferiores às mesmas medidas das outras tipologias**. Nesse contexto, em termos de desempenho dos indicadores de desempenho ambiental nas amostras globais de tipologias, conclui-se que a quadra com pátio interno demonstra o melhor desempenho, seguida pela quadra com edificações em fita, e por fim, a quadra com torre isolada é identificada com o pior desempenho.

Já a análise interna das tipologias possibilita observar a relevância das variáveis morfológicas de projeto, empregadas com *inputs* no processo de otimização, assim como outros indicadores da morfologia urbana – ou covariáveis. Algumas dessas características morfológicas se destacam, com maior correlação com os indicadores de desempenho, especialmente as variáveis de projeto Profundidade da Edificação e Número de Andares, assim como as covariáveis Fator H/W e Índice de Aproveitamento.

O Índice de Sombra Médio Ponderado (ISmp), apesar de ser um indicador simplificado do fenômeno de conforto térmico de contextos urbanos, captura uma das variáveis mais impactantes, especialmente em contextos climáticos dominados pelo desconforto por calor. De forma lógica e até esperada, o Índice de Sombra Médio Ponderado (ISmp) beneficiou cenários mais protegidos da insolação direta. Variáveis e covariáveis morfológicas com Número de Andares, Fator H/W e Índice de Aproveitamento apresentam alta correlação positiva com o Índice de Sombra Médio Ponderado (ISmp) para todas as tipologias, algo que encontra

suporte na literatura, e que atesta a pertinência dessas características da morfologia como indicadores de qualidade de conforto térmico de ambientes urbanos.

Por outro lado, o *spatial Useful Daylight Illuminance* (sUDI) demonstra estreita relação com a profundidade da edificação, algo também corroborado pela literatura específica. Contudo, este padrão é mais perceptível, com correlações mais significativas nas tipologias de quadra com edificações em fita e quadras com pátio interno. De toda forma, em todas as tipologias nota-se uma dimensão ótima para a profundidade, em que há melhor equilíbrio entre o excesso de iluminância na faixa perimetral próximo às janelas e área de iluminância insuficiente no núcleo da edificação. Estes valores ótimos não são a menor possibilidade de Profundidade da Edificação, mas nos casos das tipologias de quadra com edificações em fita e quadras com pátio interno, são a segunda menor, de 15 m. Isto evidencia a importância do emprego de um indicador de iluminância que contemple tanto a insuficiência quanto o excesso de iluminância, como é o caso desta variação do *Useful Daylight Illuminance* (UDI).

Já os resultados de *Load Cover Factor* (LCF) evidenciam a significativa conexão entre altura da edificação e o balanço energético, que está estritamente relacionada com a relação entre área de cobertura disponível para instalação dos módulos fotovoltaicos e área interna condicionada. Neste sentido, a variável Número de Andares, e as covariáveis relação Área de Cobertura pela Área de Fachada e Índice de Aproveitamento (IA) apresentam correlações marcantes. Especificamente, o Número de Andares apresenta relação mais clara e marcante dentre todas as variáveis investigadas, com padrão claro de melhoria do

desempenho do *Load Cover Factor* (LCF) com a redução do gabarito, relação também documentada na literatura científica.

Contudo, a análise do **Load Cover Factor (LCF)** demonstra um desempenho significativamente inferior ao do balanço energético nulo, um dos pontos centrais da pesquisa, com uma compensação do consumo pela geração verificada na presente pesquisa **de no máximo 34%**. Entretanto, este estudo se restringe a variáveis morfológicas e não contempla aspectos relacionados às características termofísicas e óticas da envoltória, elementos de proteção solar, percentual de abertura em fachadas, ou mesmo a eficiência dos sistemas ativos que podem contribuir para a obtenção do padrão ZEB. Contudo, valores de geração de energia fotovoltaica subestimados pela modelagem com o programa PVWatt podem ser um dos principais motivos de valores considerados abaixo do esperado. De qualquer forma, este fato não descredibiliza os resultados da pesquisa que estão mais voltados a identificação de padrões do que soluções ideias e prontas.

Um dos padrões mais significativos observado se refere a tendência de **desempenho concorrente, opostas ou contraditórias do Índice de Sombra Médio Ponderado (ISmp) e do Load Cover Factor (LCF) em relação ao Número de Andares, fenômeno observado nas três tipologias**. Neste sentido, a melhoria de um indicador de desempenho implica em prejuízos no outro. Isto evidencia a questão do problema perverso que é o desenvolvimento de projeto, com demandas concorrentes ou contraditórias, características bastante adequadas a problemas de otimização, o que atesta para pertinência do método empregado.

Outro aspecto significativo para compreensão dos resultados capaz de auxiliar as decisões projetuais e de planejamento é a análise específica dos melhores cenários, por meio do estudo dos clusters da Frente de Pareto, além dos

próprios cenários com melhor desempenho para cada um dos três objetivos de otimização e do Volume Dominado. Os melhores cenários para cada um dos objetivos de otimização expressam claramente as características mencionadas anteriormente, contudo muitas vezes de forma exagerada e com impactos negativos nos outros indicadores de performance, o que os torna pouco viáveis. Por outro lado, **o Volume Dominado consegue apresentar cenários mais equilibrados, e que de alguma forma contemplam as demandas dos três objetivos de otimização**. Em linhas gerais, estes cenários mais equilibrados com melhores volumes dominados podem ser resumidos em edificações mais baixas – que favorece *Load Cover Factor* (LCF) –, com Profundidade da Edificação pequena, porém não a menor – que contribui com *spatial Useful Daylight Illuminance* (sUDI) – e quadras pequenas ou sem recuos da edificação em relação ao limite da quadra – que beneficia o Índice de Sombra Médio Ponderado (ISmp). Isso corrobora com a pertinência do Volume Dominado e, conseqüentemente, do processo de otimização.

Por sinal, este aspecto da definição metodológica baseada em *design* computacional e análise exploratória de dados se mostra bastante adequada para possibilitar a compreensão dos padrões de comportamento dos indicadores de desempenho. Adicionalmente, após esta visão panorâmica dos resultados é possível inspecionar em mais detalhes os cenários já simulados. Neste sentido, compreende-se que esta abordagem computacional fundamentada no tripé design paramétrico, simulação de desempenho e otimização auxiliada por análise exploratória de dados possui grande potencial para exploração do universo de soluções projetuais e auxiliar o processo de decisão projetual e de planejamento.

Todos estes aspectos, mais do que indicarem uma resposta única e definitiva servem de suporte orientativo nas atividades de projeto e planejamento. Estas contribuições, especialmente metodológicas, podem auxiliar códigos urbanísticos a incorporarem indicadores de desempenho em suas elaborações, planejamento baseado em desempenho. Este processo pode possuir muitas nuances, como discute-se nesta pesquisa. Ao invés de se optar por projetos em que o desempenho seja verificada na etapa de projeto, pode-se conceber códigos urbanísticos que sejam elaborados a partir dessas análises, algo alinhado com a tendência pela incorporação de instrumento urbanísticos como planejamento baseado em forma.

5.1 LIMITAÇÕES DE PESQUISA

A pesquisa apresenta limitação que estão relacionadas ao desenho da pesquisa, além de aspectos relacionados aos desafios enfrentados no processo de desenvolvimento da pesquisa. Neste sentido, o primeiro tipo de limitações relaciona-se com decisões ou escolhas metodológicas, enquanto o segundo trata mais de dificuldades não esperadas inicialmente. Muitas dessas questões podem também ser compreendidas como oportunidades de pesquisas futuras.

O desenho da pesquisa, especialmente aos cenários e variáveis de projeto, covariáveis morfológicas e indicadores de desempenho define o escopo da investigação. Dessa forma, a definição das variáveis morfológicas de projeto é limitada, assim como os intervalos e níveis que estas variáveis possuem. Outras tipologias de quadras menos usuais – como tipologias em cruz ou edificações escalonadas – ou soluções diferentes da multifamiliar - especificamente edificações unifamiliares –, também não fazem parte do escopo da pesquisa.

Adicionalmente, tipologias de uso misto também não fazem parte do escopo. Por fim, o trabalho contempla exclusivamente questões morfológicas e, desta forma, aspectos relativos aos sistemas construtivos e materiais, sistemas ativos e mesmo geometria de aberturas e elementos de proteção solar, estão fora da finalidade da pesquisa.

Sobre as variáveis morfológicas uma questão importante a ser salientada é da relação entre dimensões configuradas a partir dos eixos x e y e o azimute. Como mencionado anteriormente, esta influência entre essas variáveis de projeto gera ruído significativo na leitura dos resultados por orientação, visto que é possível obter cenários idênticos com orientações com diferença de 90°, mas com valores invertidos entre os eixos x e y. Uma possível alternativa para equacionar essa situação é considerar o azimute como covariável, uma resultante do cenário, e que seja calculada pela normal da maior face da edificação.

O emprego de indicador de desempenho simplificado para expressar fenômenos complexos, como é o caso do Índice de Sombra Médio Ponderado (ISmp) com o conforto térmico de ambientes urbanos, também pode ser considerado uma limitação. Contudo, como mencionado anteriormente – tanto no método, quanto na discussão – há uma busca de equilíbrio entre custo computacional e precisão de dados. Contudo, entende-se que o emprego de indicadores com menor custo computacional em fases iniciais, com caráter exploratório, sejam benéficas. Especialmente se aplicadas com técnicas mais robustas que possibilitem maior acurácia em etapas posteriores.

No mais, a provável subestimação da geração fotovoltaica com o uso do PVWatt acarreta prejuízos à pesquisa. Contudo, como o maior enfoque é na compreensão de tendências e padrões, este prejuízo não inviabiliza a análise.

Durante o desenvolvimento da pesquisa houve interesse no uso de *plug-ins* específicos para estimar o potencial de geração fotovoltaica de forma preliminar e de forma abrangente, como é o caso do Vitaly. Contudo, o recurso de computação paralela, a solução computacional que possibilita maior agilidade no processo de exploração do universo de soluções projetuais, demanda placa de vídeo dedicada com processadores CUDA. Uma limitação de materiais de pesquisa, relativa ao *hardware*.

5.2 OPORTUNIDADES DE PESQUISAS FUTURAS

A presente pesquisa também se apresenta como um ponto de partida para novas investigações, que não se restringe ao autor da tese, mas serve para demais pesquisadores da área. Estes desdobramentos podem estar relacionados ao objeto de pesquisa, à metodologia e ferramentas computacionais, à análise adicional dos dados já coletados, a diferentes técnicas para contornar limitações encontradas, e aos encaminhamentos práticos dos resultados da presente pesquisa.

- i. Para uma consolidação do método de análise, recomenda-se contemplar ciclos adicionais de otimização ou de exploração do universo de soluções projetuais que visem equacionar outras variáveis, mais voltadas aos sistemas construtivos, aberturas e sistemas ativos;
- ii. Com a consolidação do método e técnicas empregadas, uma frente de pesquisa possível é a aplicação desta abordagem em outros contextos climáticos brasileiros;

- iii. Adicionalmente, recomenda-se o emprego de arquivos climáticos futuros para uma comparação com as condicionantes atuais;
- iv. O emprego de indicadores simplificados se mostra como importante ferramenta na exploração do universo de soluções projetuais, especialmente nas fases iniciais de projeto. Para consolidar estes indicadores, são necessários estudos de correlação com indicadores mais consolidados, provenientes de técnicas de simulação mais robustas ou de dados de medições *in loco*;
- v. A respeito das questões morfológicas em si, aponta-se a análise de outras tipologias de quadras menos convencionais ou mesmo de tipologias unifamiliar, podem contribuir para o entendimento da relação entre desempenho ambiental e morfologia urbana;
- vi. No contexto de outras composições morfológicas, há grande possibilidade de experimentação, com técnicas computacionais, desde simples escalonamento das edificações, envelope solar, até técnicas generativas como modelos agregativos ou abordagens topológicas de *voxelização*;
- vii. Também há grande campo na tradução desses estados mais técnicos para legislação urbanística, como para Planos Diretores, com grande aderência a temas como projeto baseado em forma (*form-based design*) e projeto baseado em desempenho (*performance-based design*);

- viii. Especificamente na intersecção dos campos de pesquisa de desempenho ambiental e *design* computacional, técnicas generativa que consigam contemplar a variável de orientação como *input* equaciona uma demanda latente;
- ix. Além da variação morfológica, mais próximos de proposições urbanísticas contemporâneas, com o emprego de uso misto, demonstram grande potencial, com especial atenção ao *Load Match*, ou correspondência de demanda energética, mais bem distribuído e com menos picos.

5.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O ambiente urbano é um dos objetos mais significativos produzidos pela humanidade, pois, como coloca Lewis Mumford (Mumford, 1961, p. 571), "(...) a principal função da cidade é converter poder em forma, energia em cultura, matéria morta em símbolos vivos da arte, reprodução biológica em criatividade social". Além de ser um fim em si mesmo, as cidades servem como meio para a produção e, portanto, é crucial que elas desempenhem adequadamente suas funções. Num contexto de mudanças climáticas cada vez mais acentuadas, o desempenho urbano deve abordar tanto medidas de mitigação quanto de adaptação climática. Nesse sentido, a busca pela eficiência energética do ambiente construído, combinada de forma holística com outros aspectos da qualidade ambiental, torna-se imperativa.

Neste contexto, a busca por ZEBs demanda uma abordagem analítica abrangente, que incorpore um conjunto de indicadores holísticos de qualidade ambiental, que inclusive avalie o ambiente urbano como um todo. As técnicas de

design computacional, como *design* paramétrico, simulação de desempenho e algoritmos de busca, como demonstrados nesta tese, desempenham um papel fundamental na tomada de decisões do projeto urbano. Mais do que fornecer uma solução única, este processo de exploração do universo de solução projetual, caracterizado pela colaboração entre ser humano e máquina, identifica tendências e padrões que informam a tomada de decisões. Assim, essa abordagem se alinha perfeitamente ao processo iterativo e investigativo do projeto.

Essa abordagem não só impulsiona a busca por soluções de eficiência energética, mas também pode ser um catalisador essencial para o desenvolvimento de projetos urbanísticos mais resilientes e de maior qualidade ambiental, tão necessários em tempos de desafios climáticos crescentes. Ao integrar técnicas avançadas de *design* computacional, pode-se não apenas criar ambientes urbanos energeticamente eficientes, mas também promover espaços urbanos mais habitáveis, sustentáveis e adaptáveis. Portanto, essa abordagem representa uma oportunidade para enfrentar os desafios contemporâneos do urbanismo ao oferecer soluções adequadas e sustentáveis para o presente e o futuro das cidades.

REFERÊNCIAS

- ABALOS, Inaki; SNETKIEWICZ, Renata; ORTEGA, Lluís. **Essays on Thermodynamics: Architecture and Beauty**. First edited. [S. l.]: Actar, 2015.
- ABNT. **NBR/CIE 8995: Iluminância de interiores**. [S. l.]: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2013.
- ABNT. **NBR 15.575: Edificações Habitacionais - Desempenho**. [S. l.]: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2021.
- ABNT. **NBR 15220-2:Desempenho térmico de edificações – Parte 2: Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações**. [S. l.]: (ABNT) Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2005.
- ABNT. **NBR 15575-1 Edificações habitacionais — Desempenho Parte 1: Requisitos gerais**. [S. l.]: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2024.
- ACRE, F *et al.* Cost-benefit analysis of net zero energy campus residence. **Renewable Energy**, Department of Mechanical and Aerospace Engineering, University of Dayton, Dayton, OH, United States, v. 1, n. 3, p. 567–575, 2020. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85067744302&partnerID=40&md5=acf35a79ae6e072d95436f1af0fdb8c0>.
- AGKATHIDIS, Asterios. Generative Design Methods - Implementing Computational Techniques in Undergraduate Architectural Education. **33rd eCAADe Conference - Volume 2**, [s. l.], v. 2, p. 47–55, 2015.
- AIA, (American Institute of Architects). **The AIA 2030 Commitment**. [S. l.], 2006. Disponível em: <https://www.aia.org/pages/6464938-the-aia-2030-commitment>.
- AJAEI, F B *et al.* Hybrid AC/DC microgrid configurations for a net-zero energy community. *In:* , 2019, Western University, London, ON N6A 5B9, Canada. **55th IEEE/IAS Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference, I and CPS 2019**. Western University, London, ON N6A 5B9, Canada: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2019. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85067889839&doi=10.1109%2FICPS.2019.8733323&partnerID=40&md5=22e44efd167b463f0466047b9182187d>.
- AL-SAEED, Yahya Wisam; AHMED, Abdullahi. Evaluating design strategies for nearly zero energy buildings in the middle east and North Africa regions. **Designs**, [s. l.], v. 2, n. 4, p. 1–12, 2018.
- ALANNE, Kari; CAO, Sunliang. Zero-energy hydrogen economy (ZEH2E) for buildings and communities including personal mobility. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Dept. of Energy Technology, Aalto University, P.O. Box 14400, Aalto, 00076, Finland, v. 71, p. 697–711, 2017. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85009459037&doi=10.1016%2Fj.rser.2016.12.098&partnerID=40&md5=b916b614226c1524ebd72256a163848b>. Acesso em: 23 jun. 2020.
- ALAWODE, Adisa; RAJAGOPALAN, Priyadarsini. Feasibility of net zero energy high rise apartment buildings in Australia. **Solar Energy**, [s. l.], v. 231, n. November 2021, p. 158–174, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.11.030>.

AMARAL, A R *et al.* Review on performance aspects of nearly zero-energy districts. **Sustainable Cities and Society**, ADAI, LAETA, Department of Mechanical Engineering, University of Coimbra Rua Luís Reis Santos, Pólo II, Coimbra, 3030-788, Portugal, v. 43, p. 406–420, 2018. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85053562211&doi=10.1016%2Fj.scs.2018.08.039&partnerID=40&md5=261d6d8de57ecd803b70c8448b30287b>.

ANDIA, Alfredo; SPIEGELHALTER, Thomas. **POST-PARAMETRIC AUTOMATION IN DESIGN AND CONSTRUCTION**. [S. l.]: Artech House, 2015.

ANG, Yu Qian *et al.* UBEM.io: A web-based framework to rapidly generate urban building energy models for carbon reduction technology pathways. **Sustainable Cities and Society**, [s. l.], v. 77, n. August 2021, 2022.

ARANTES, Otilia. **O Lugar da Arquitetura Depois dos Modernos**. 3ªed. [S. l.]: EdUSP, 2015.

ARIA, Massimo; CUCCURULLO, Corrado. bibliometrix: An R-tool for comprehensive science mapping analysis. **Journal of Informetrics**, [s. l.], v. 11, n. 4, p. 959–975, 2017.

ARUMI, F. N.; DODGE, R. L. The formal implication of solar rights. **Energy and Buildings**, [s. l.], v. 1, n. 2, p. 183–191, 1977.

ASANOWICZ, Aleksander. Parametric design Tool, medium or new paradigm?. **Parametric and generative design - eCAADe proceedings**, [s. l.], v. 2, n. Lee, p. 379–386, 2017. Disponível em: http://papers.cumincad.org/data/works/att/ecaade2017_038.pdf.

ASHRAE. **ASHRAE Standard 90.1-2019. Energy standard for buildings except low-rise residential buildings. SI edition**. Atlanta, Estados Unidos: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2019.

ASTE, N *et al.* A renewable energy scenario for a new low carbon settlement in northern Italy: Biomass district heating coupled with heat pump and solar photovoltaic system. **Energy**, Department of Architecture, Built Environment and Construction Engineering, Politecnico di Milano, Milan, Italy, v. 206, 2020. Disponível em: [https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-](https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85086578009&doi=10.1016%2Fj.energy.2020.118091&partnerID=40&md5=475e0bff8b3ed2140fa60d90475d215a)

[85086578009&doi=10.1016%2Fj.energy.2020.118091&partnerID=40&md5=475e0bff8b3ed2140fa60d90475d215a](https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85086578009&doi=10.1016%2Fj.energy.2020.118091&partnerID=40&md5=475e0bff8b3ed2140fa60d90475d215a).

ATHIENITIS, Andreas; BRIEN, William O. **Optimization of Net-Zero Energy Buildings Related Titles Solar and Heat Pump Systems for Residential Buildings Performance Based Building Design 2 Solution Sets for Net Zero Energy Buildings Performance Based**. [S. l.: s. n.], 2015.

ATHIENITIS, Andreas; O'BRIEN, William. **Modeling, Design, and Optimization of Net-Zero Energy Buildings**. Federal Republic of Germany: Ernst & Sohn, 2015.

ATTIA, Shady *et al.* Simulation-based decision support tool for early stages of zero-energy building design. **Energy and Buildings**, [s. l.], v. 49, p. 2–15, 2012. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84861799500&doi=10.1016%2Fj.enbuild.2012.01.028&partnerID=40&md5=3ef99fce373d4553ddc57b423d491a0e>. Acesso em: 20 fev. 2018.

AUGENBROE, GODFRIED. The role of simulation in performance based building. *In*: HENSEN, Jan L.M.; LAMBERTS, Roberto (org.). **Building Performance Simulation for Design and Operation**. Oxon: Spon Press, Taylor and Francis, 2011.

AUSTIN, M. C.; CHUNG-CAMARGO, K.; MORA, D. Review of Zero Energy Building Concept-Definition and.pdf. [s. l.], 2021.

BAKER, Nick; STEEMERS, Koen. **Energy and Environment in Architecture: A Technical Design Guide - Nick Baker, Koen Steemers - Google Books**. [S. l.: s. n.], 2016. Disponível em: https://books.google.ru/books?hl=en&lr=&id=FJp5AgAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=Energy+and+Environment+in+Architecture&ots=6jwErDsU6Q&sig=9Tu1QFVKfOPLYtp3VTjbfCoDKOE&redir_esc=y#v=onepage&q=Energy and Environment in Architecture&f=false.

BAKHTAVAR, E *et al.* Assessment of renewable energy-based strategies for net-zero energy communities: A planning model using multi-objective goal programming. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 272, 2020. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85087902952&doi=10.1016%2Fj.jclepro.2020.122886&partnerID=40&md5=372d8ceb6bfae04b47030add54f38383>.

- BAKSHI, N; VALE, P R; VALE, P B. A low energy community? A comparative study of Eco-Villages around the world. *In:* , 2014, Victoria University of Wellington, New Zealand. (Rawal R., Manu S., & Khadpekar N., Org.) **Anais [...]**. Victoria University of Wellington, New Zealand: CEPT University Press, 2014. p. 34–41. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85053009613&partnerID=40&md5=9e5b50c95abcea736a405d81d0643e34>.
- BANHAM, Reyner. **Architecture of the Well-Tempered Environment**. 1st. ed. Chicago: University of Chicago Press, 1969.
- BANKS, J. *et al.* **Discrete-Event System Simulation**. [S. l.]: Prentice Hall, 2001.
- BANO, Farheen; SEHGAL, Vandana; TAHSEEN, Mohammad. Early-Stage Design Guidelines for Net-Zero-Energy Office Buildings in Tropical Climate. **2020 International Conference on Contemporary Computing and Applications, IC3A 2020**, [s. l.], p. 143–149, 2020.
- BARBER, Daniel A. **A House in the Sun: Modern Architecture and Solar Energy in the Cold War**. 1st editioed. [S. l.]: Oxford University Press, 2016.
- BARRIOS, Carlos. Transformations on Parametric Design Models. **Computer Aided Architectural Design Futures 2005**, [s. l.], p. 393–400, 2005.
- BELLINGER, G. **Simulation Is Not The Answer**. [S. l.: s. n.], 2004. Disponível em: <http://www.systems-thinking.org/simulation/simnotta.htm>.
- BIRCK, Márcia Bocacio; AMORIM, Claudia Naves David. Condicionantes solares como princípio orientador da forma urbana: estudo de caso contextualizado no Distrito Federal. **Ambiente Construído**, [s. l.], v. 20, n. 3, p. 591–609, 2020.
- BOAKE, Terri Meyer. HOT CLIMATE DOUBLE FAÇADES : Avoiding Solar Gain. **Facade Tectonics**, [s. l.], v. 14, p. 2–25, 2014.
- BOAKE, Terri Meyer *et al.* Understanding the General Principles of the Double Skin Façade System. [s. l.], n. November, p. 1–18, 2003.
- BOHNACKER, Hartmut *et al.* **Generative Design: Visualize, Program, and Create with Processing**. Princeton: Princeton Architectural Press, 2012.
- BOX, G. E. P. Robustness in the strategy of scientific model building. *In:* LAUNER, Robert L.; WILKINSON, Graham N. (org.). **Robustness in Statistics**. [S. l.]: Academic Press, 1979.
- BRAND, M *et al.* A direct Heat Exchanger Unit used for domestic hot water supply in a single-family house supplied by Low Energy District Heating. *In:* , 2010, Technical University of Denmark, Denmark. **Anais [...]**. Technical University of Denmark, Denmark: [s. n.], 2010. p. 60–68. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-79952687732&partnerID=40&md5=26092b2f8f1125c3ae772eacf764927f>.
- BRIBIESCA, E. Measure of compactness for 3D shapes. **Computers and Mathematics with Applications**, [s. l.], v. 40, n. 10, p. 1275–1284, 2000.
- BROWN, Martin; NABONI, Emanuele; HAVINGA, Lisanne. DEFINING REGENERATIVE DESIGN. *In:* NABONI, Emanuele; HAVINGA, Lisanne (org.). **Regenerative Design in Digital Practice: A Handbook for the Built Environment**. Bolzano, IT: [s. n.], 2019a.
- BROWN, Martin; NABONI, Emanuele; HAVINGA, Lisanne. DEFINING REGENERATIVE DESIGN. *In:* NABONI, E & HAVINGA, L. C. (org.). **REGENERATIVE DESIGN IN DIGITAL PRACTICE: A Handbook for the Built Environment**. Bolzano, IT: Eurac, 2019b.
- BUCKING, S; COTTON, J S. Methodology for energy and economic modeling of net zero energy communities. *In:* , 2015, Department of Mechanical Engineering, McMaster University, Hamilton, ON, Canada. **2015 ASHRAE Winter Conference**. Department of Mechanical Engineering, McMaster University, Hamilton, ON, Canada: [s. n.], 2015. p. 462–470. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84938875580&partnerID=40&md5=c7fb96c32c18efa0c437ab94fdd29ff5>.
- BURKHALTER, Laura; CASTELLS, Manuel. BEYOND THE CRISIS: TOWARDS A NEW URBAN PARADIGM. *In:* , 2009, Amsterdam/Delft. **The 4th International Conference of the International Forum on Urbanism (IFoU) - The New Urban Question – Urbanism beyond Neo-Liberalism**. Amsterdam/Delft: [s. n.], 2009. p. 21–44.
- BYRNE, John *et al.* A review of the solar city concept and methods to assess rooftop

solar electric potential, with an illustrative application to the city of Seoul. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s. l.], v. 41, p. 830–844, 2015.

BYRNE, John *et al.* A solar city strategy applied to six municipalities: integrating market, finance, and policy factors for infrastructure-scale photovoltaic development in Amsterdam, London, Munich, New York, Seoul, and Tokyo. **Wiley Interdisciplinary Reviews: Energy and Environment**, [s. l.], v. 5, n. 1, p. 68–88, 2016. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/wene.182>. Acesso em: 6 out. 2022.

BYRNE, John *et al.* Multivariate analysis of solar city economics: impact of energy prices, policy, finance, and cost on urban photovoltaic power plant implementation. **Wiley Interdisciplinary Reviews: Energy and Environment**, [s. l.], v. 6, n. 4, p. e241, 2017. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/wene.241>. Acesso em: 6 out. 2022.

CACHE, BERNARD. After Parametrics?. **GAM ARCHITECTURE MAGAZINE 06 - Nonstandard Structures**, [s. l.], p. 120, 2009.

CANTRELL, Bradley; MEKIES, Adam. **Codify: Parametric and computational design in landscape architecture**. [S. l.: s. n.], 2018.

CAPELUTO, I.G. *et al.* Solar rights in the design of urban spaces. *In:* , 2006. **PLEA 2006 - 23rd International Conference on Passive and Low Energy Architecture, Conference Proceedings**. [S. l.: s. n.], 2006.

CARLISLE, Nancy; GEET, Otto Van; PLESS, Shanti. Definition of a " Zero Net Energy " Community. **National Renewable Energy Laboratory**, [s. l.], n. November, p. 1–14, 2009. Disponível em: <http://www.nrel.gov/docs/fy10osti/46065.pdf>.

CARPO, Mario. **The Second Digital Turn: Design Beyond Intelligence**. 1st edition. [S. l.]: The MIT Press, 2017.

CASE, M *et al.* A computational framework for low-energy community analysis and optimization. *In:* , 2014, U.S. Army Engineer Research and Development Center, Champaign, IL, United States. **ASHRAE Transactions**. U.S. Army Engineer Research and Development Center, Champaign, IL, United States: Amer. Soc. Heating, Ref. Air-Conditioning Eng. Inc., 2014. p. 130–144. Disponível em:

<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84904333185&partnerID=40&md5=578fdf6a2cb0fcbfd3c0a0e325c38d1e>.

CASTAGNA, M *et al.* CasaNova, a low energy quarter. *In:* , 2008, EURAC Research, Drususallee 1, 39100 Bozen, Italy. **Anais [...]**. EURAC Research, Drususallee 1, 39100 Bozen, Italy: University College Dublin, 2008. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85067705200&partnerID=40&md5=2d9ed387379012c7ab5bc50456ba0017>.

CASTALDO, V L *et al.* How outdoor microclimate mitigation affects building thermal-energy performance: A new design-stage method for energy saving in residential near-zero energy settlements in Italy. **Renewable Energy**, [s. l.], v. 127, p. 920–935, 2018. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85048159496&doi=10.1016%2Fj.renene.2018.04.090&partnerID=40&md5=d03e7ccc81d5e8c04a77018970b0e920>.

CATALINA, Tiberiu; VIRGONE, Joseph; IORDACHE, Vlad. STUDY ON THE IMPACT OF THE BUILDING FORM ON THE ENERGY CONSUMPTION. *In:* , 2011, Sydney. **Proceedings of Building Simulation 2011: 12th Conference of International Building Performance Simulation Association**. Sydney: [s. n.], 2011. p. 1726–1729.

CELANI, Maria Gabriela; VAZ, Carlos Eduardo. Scripts em CAD e ambientes de programação visual para modelagem paramétrica: uma comparação do ponto de vista pedagógico. *In:* , 2011, Salvador, Bahia, Brasil, 4 e 5 de agosto de 2011. **V Encontro de Tecnologia de Informação e Comunicação na Construção**. Salvador, Bahia, Brasil, 4 e 5 de agosto de 2011: [s. n.], 2011. p. 177–194.

CEREZO DAVILA, Carlos; REINHART, Christoph F.; BEMIS, Jamie L. Modeling Boston: A workflow for the efficient generation and maintenance of urban building energy models from existing geospatial datasets. **Energy**, [s. l.], v. 117, p. 237–250, 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2016.10.057>.

CHARAN, Tanushree *et al.* Integration of Open-Source URBANopt and Dragonfly Energy Modeling Capabilities into Practitioner Workflows for District-Scale Planning and Design. **Energies**, [s. l.], v. 14, n. 18, p. 1–28, 2021. Disponível em: <https://www.nrel.gov/docs/fy21osti/76781.pdf>.

COFFEY, Brian *et al.* Towards a very low-energy building stock: Modelling the US

commercial building sector to support policy and innovation planning. **Building Research and Information**, Lawrence Berkeley National Laboratory, MS 90R3111, 1 Cyclotron Road, Berkeley, CA 94720, United States, v. 37, n. 5–6, p. 610–624, 2009. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-70349635044&doi=10.1080%2F09613210903189467&partnerID=40&md5=5e724e0b618c38e25c900ddd89abda3a>.

COMMISSION, European. **Towards a “ Post-Carbon Society ”**. [S. l.: s. n.], 2008.

COSTA, Joao Francisco Walter; AMORIM, Claudia Naves David; SILVA, Joara Cronemberger Ribeiro. Retrofit guidelines towards the achievement of net zero energy buildings for office buildings in Brasilia. **Journal of Building Engineering**, [s. l.], v. 32, n. June, p. 101680, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.job.2020.101680>.

CRAWLEY, Drury B. *et al.* EnergyPlus: Creating a new-generation building energy simulation program. **Energy and Buildings**, [s. l.], v. 33, n. 4, p. 319–331, 2001.

CRESPO, Ana Maria Leon. **History of the Double Skin Facade**. Cambridge, MA: Harvard University, 1999.

DALLA ROSA, A; CHRISTENSEN, J E. Low-energy district heating in energy-efficient building areas. **Energy**, Technical University of Denmark, Department of Civil Engineering, Section of Building Physics and Services, Brovej, Building 118, DK-2800, Kgs. Lyngby, Denmark, v. 36, n. 12, p. 6890–6899, 2011. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-82955247889&doi=10.1016%2Fj.energy.2011.10.001&partnerID=40&md5=eff1a770bd4cd88b07b218994e7c54eb>.

DALLA ROSA, A; LI, H; SVENDSEN, S. Method for optimal design of pipes for low-energy district heating, with focus on heat losses. **Energy**, Department of Civil Engineering, Technical University of Denmark, Brovej, Building 118, 2800 Kgs. Lyngby, Denmark, v. 36, n. 5, p. 2407–2418, 2011.

DALY, Herman. **Economics for a Full World**. [S. l.]: Great Transition Initiative, 2015. Disponível em: <https://greattransition.org/publication/economics-for-a-full-world>.

DAVIS, Daniel. **Modelled on Software Engineering: Flexible Parametric Models in**

the Practice of Architecture. 2013. 234 f. - RMIT University, [s. l.], 2013.

DE LUCA, Francesco; DOGAN, Timur; SEPÚLVEDA, Abel. Reverse solar envelope method. A new building form-finding method that can take regulatory frameworks into account. **Automation in Construction**, [s. l.], v. 123, n. December 2020, p. 103518, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103518>.

DEKAY, R M. Climatic urban design: configuring the urban fabric to support daylighting, passive cooling, and solar heating. **Transactions on Ecology and The Environment**, [s. l.], v. 155, p. 1743–3541, 2012.

DEZFOULI, M. M.S. *et al.* Solar Desiccant Cooling System as an Alternative Solution for Net-Zero Energy Buildings (NZEBS) in the Tropical Regions. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, [s. l.], v. 1008, n. 1, 2022.

DOUBLEDAY, K *et al.* Toward a subhourly net zero energy district design through integrated building and distribution system modeling. **Journal of Renewable and Sustainable Energy**, Power Systems Engineering Center, National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO, United States, v. 11, n. 3, 2019. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85067227691&doi=10.1063%2F1.5093917&partnerID=40&md5=2a43cb1e77d9bbf67ec47760081cad4a>.

DU, Peng; AZARI, Rahman. **Performance-Based Urban Design: Integrated Urban Analytics, Simulation and Climate-Responsive Design**. [S. l.]: Buildings - MDPI, 2022.

DU PISANI, Jacobus A. Sustainable development – historical roots of the concept. **Environmental Sciences**, [s. l.], v. 3(2), p. 83 – 96, 2006.

DU PLESSIS, Chrisna. Towards a regenerative paradigm for the built environment. **Building Research and Information**, [s. l.], v. 40, n. 1, p. 7–22, 2012.

ECK, Nees Jan van; WALTMAN, Ludo. VOS: A New Method for Visualizing Similarities Between Objects. In: DECKER R., Lenz H.J. (org.). **Advances in Data Analysis. Studies in Classification, Data Analysis, and Knowledge Organization**. Berlin, Heidelberg: Springer, 2007.

EICKER, U *et al.* Energy performance assessment in urban planning competitions.

Applied Energy, Research Centre Sustainable Energy Technologies zafh.net, University of Applied Sciences Stuttgart, Schellingstr. 24, Stuttgart, 70174, Germany, v. 155, p. 323–333, 2015. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84935021784&doi=10.1016%2Fj.apenergy.2015.05.094&partnerID=40&md5=a37f097b1008596481f4e3b7be10073c>.

EICKER, U *et al.* Low energy city quarters with high renewable fractions: Monitoring results and potential for replication. **International Journal of Sustainable Building Technology and Urban Development**, University of Applied Sciences, Stuttgart, Germany, v. 2, n. 1, p. 69–79, 2011. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85007816876&doi=10.5390%2FSUSB.2011.2.1.069&partnerID=40&md5=eb8d98657669d6726767159d951ee0b6>.

ELETRORBRAS. Edital de Chamada Pública - 01/2018 - NZEB Brasil - Procel Edifica. [s. l.], p. 45, 2019. Disponível em: <https://eletrobras.com/pt/Paginas/Chamada-Publica-Procel-Edifica2019.aspx>.

EMMANUEL, Walter; JÉRÔME, Kämpf. A verification of CitySim results using the BESTEST and monitored consumption values. **Building Simulation Applications**, [s. l.], v. 2015-Febru, p. 215–222, 2015.

EMMANUEL, R.; ROSENLUND, H.; JOHANSSON, E. Urban shading—a design option for the tropics? A study in Colombo, Sri Lanka. **International Journal of Climatology**, [s. l.], 2007.

ESBENSEN, TorbenV; KORSGAARD, Vagn. Performance of the Zero Energy House in Denmark. *In: , 1977. 1st German Solar Energy Forum*. [S. l.: s. n.], 1977. p. 1–14.

EU, (European Union). **Energy Performance of Buildings Directive**. [S. l.: s. n.], 2002.

FATHY, Hassan. **Architecture for the Poor: An Experiment in Rural Egypt**. 21st. ed. Cairo: University in Cairo Press, 1969.

FELA, Randy Frans *et al.* The effects of orientation, window size, and lighting control to climate-based daylight performance and lighting energy demand on buildings in tropical area. **Building Simulation Conference Proceedings**, [s. l.], v. 2,

n. September, p. 1075–1082, 2019.

FERNÁNDEZ-GALIANO, Fire and Memory On Architecture and Energy Luis. **Fire and Memory On Architecture and Energy**. Cambridge, Massachusetts London, England: MIT Press, 2000.

FERNÁNDEZ, María Eugenia; GENTILI, Jorge Osvaldo; CAMPO, Alicia María. Solar access: Review of the effective legal framework for an average argentine city. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s. l.], v. 156, 2022.

FERRARI, Simone *et al.* A gis-based procedure for estimating the energy demand profiles of buildings towards urban energy policies. **Energies**, [s. l.], v. 14, n. 17, 2021.

FIGUEROA, Mário. **Habitação coletiva e a evolução da quadra (1)**. [S. l.], 2006. Disponível em: <https://vitruvius.com.br/revistas/read/arquitextos/06.069/385>. Acesso em: 14 mar. 2024.

FREITAS, Jader de Sousa *et al.* Modeling and assessing BIPV envelopes using parametric Rhinoceros plugins Grasshopper and Ladybug. **Renewable Energy**, [s. l.], v. 160, p. 1468–1479, 2020.

GAISER, K; STROEVE, P. The impact of scheduling appliances and rate structure on bill savings for net-zero energy communities: Application to West Village. **Applied Energy**, University of California Davis, Department of Chemical Engineering, One Shields Avenue, Davis, CA 95616, United States, v. 113, p. 1586–1595, 2014.

GARCÍA-FUENTES, M Á; DE TORRE, C. Towards smarter and more sustainable cities: The remourban model. **Entrepreneurship and Sustainability Issues**, Fundación CARTIF, Parque Tecnológico de Boecillo 205, Valladolid, Spain, v. 4, n. 3, p. 328–338, 2017. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85016114058&doi=10.9770%2Fjesi.2017.4.3S%288%29&partnerID=40&md5=fb82c6feb0fa1d2dbc1ab3a1bef764a>.

GARDE, F. *et al.* Enerpos: A french research program for developing new methods for the design of zero energy buildings in hot climates. *In: , 2007. CESB 2007 PRAGUE International Conference - Central Europe Towards Sustainable Building*. [S. l.: s. n.], 2007.

- GARDE, F. *et al.* Towards net zero energy buildings in hot climates: Part 1, new tools and methods. *In:* , 2011. **ASHRAE Transactions**. [S. l.: s. n.], 2011. p. 450–457.
- GARDE, F.; OTTENWELTER, E.; BORNAREL, A. Integrated building design in tropical climates: Lessons learned from the ENERPOS net zero energy building. *In:* , 2012. **ASHRAE Transactions**. [S. l.: s. n.], 2012. p. 81–89.
- GEHL, Jan. **Cities for People**. [S. l.]: Island Press, 2010.
- GEORGESCU-ROEGEN, Nicholas. **The Entropy Law and the Economic Process**. Cambridge, MA: Harvard University Press, 1971.
- GEORGESCU ROEGEN-, Nicholas. La décroissance Entropie-Écologie-Économie. [s. l.], n. 1979, p. 213, 1994.
- GOH, Tian; ANG, B. W. Four reasons why there is so much confusion about energy efficiency. **Energy Policy**, [s. l.], v. 146, n. April, p. 111832, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2020.111832>.
- GONZALEZ, R M *et al.* Distributed energy resources for a zero-energy neighborhood. *In:* , 2012, Department of Electrical Energy Systems, Faculty of Electrical Engineering, Eindhoven University of Technology, 5600MB Eindhoven, Netherlands. **2012 3rd IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe, ISGT Europe 2012**. Department of Electrical Energy Systems, Faculty of Electrical Engineering, Eindhoven University of Technology, 5600MB Eindhoven, Netherlands: [s. n.], 2012. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84874689922&doi=10.1109%2FISGTEurope.2012.6465820&partnerID=40&md5=2c932a403d197930cb5f47db5f2bc1fd>.
- GOUGH, DAVID; OLIVER, SANDY; THOMAS, JAMES. **Systematic Reviews**. London: SAGE Publications Ltd, 2012-. ISSN 07424671.
- GROAT, Linda; WANG, David. **Architectural Research Methods**. 2nd edition. [S. l.]: Wiley, 2013.
- GROUT, D.S. Access to sunlight: New Mexico's Solar Rights Act. **Natural Resources Journal**, [s. l.], v. 19, n. 4, p. 957–968, 1979.
- GÜNEL, G. Ergos: A new energy currency . **Anthropological Quarterly**, Columbia University, United States, v. 87, n. 2, p. 359–379, 2014. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84901422567&doi=10.1353%2FAnq.2014.0026&partnerID=40&md5=62cd637e0118e118e24389578f75c18e>.
- GUYOT, D *et al.* Detailed monitoring as an essential tool for achieving energy performance targets in operation conditions: The HIKARI case study . *In:* , 2020. (Kalamees T Kurnitski J., Org.) **Anais [...]**. [S. l.]: EDP Sciences , 2020. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85088446784&doi=10.1051%2Ffe3sconf%2F202017222006&partnerID=40&md5=82ace81f182e64f5dc9c9b6114839e0c>.
- HAASE, Matthias; AMATO, Alex. Sustainable façade design for zero energy buildings in the tropics. **PLEA 2006 - 23rd International Conference on Passive and Low Energy Architecture, Conference Proceedings**, [s. l.], n. September, p. 6–8, 2006.
- HADJISOPHOCLEOUS, George V.; BENICHOU, Nouredine; TAMIM, Amal S. Literature Review of Performance-Based Fire Codes and Design Environment. **Journal of Fire Protection Engineering**, [s. l.], v. 9, n. 1, 1998.
- HAMILTON, D. Kirk; WATKINS, David H. **Evidence-Based Design for Multiple Building Types**. [S. l.]: Wiley, 2008.
- HANEEF, F *et al.* A citysim urban energy simulation for the development of retrofit scenarios for a neighborhood in bolzano, Italy . *In:* , 2020. (G Pernigotto et al., Org.) **Anais [...]**. [S. l.]: Free University of Bozen Bolzano , 2020. p. 59–66. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85090837332&partnerID=40&md5=158a9298b55be7bdabc2589eb1a32d86>.
- HARTRANFT, T *et al.* Energy systems analyses for ultra low energy communities. *In:* , 2009, U.S. Army Engineer Research and Development Center, Champaign, IL, United States. **Anais [...]**. U.S. Army Engineer Research and Development Center, Champaign, IL, United States: [s. n.], 2009. p. 365–376.
- HAWKES, D. Towards the sustainable city. **Renewable Energy**, Department of Architecture, University of Cambridge, Cambridge, CB2 1PX, United Kingdom, v. 6, n. 3, p. 345–352, 1995. Disponível em:

<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-0029416670&doi=10.1016%2F0960-1481%2895%2900011-8&partnerID=40&md5=a19ec45504164867736dfe0a0125cafc>.

HECKEROTH, S; HECKEROTH, C. Beyond zero energy homes. *In: , 2005, Ovonic Solar, P.O. Box 151, Albion, CA 95410, United States. **Solar World Congress 2005: Bringing Water to the World, Including 34th ASES Annual Conference and 30th National Passive Solar Conference.** Ovonic Solar, P.O. Box 151, Albion, CA 95410, United States: [s. n.], 2005. p. 665–669. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84870505499&partnerID=40&md5=6ac45b7d2c11149338327fbceb03dfe7>.*

HEENDENIYA, C B; SUMPER, A; EICKER, U. The multi-energy system co-planning of nearly zero-energy districts – Status-quo and future research potential. **Applied Energy**, Institute for Applied Research (IAF), University of Applied Sciences - Stuttgart, Schellingstr. 24, Stuttgart, 70174, Germany, v. 267, 2020.

HENSEN, Jan L.M.; LAMBERTS, Roberto. Building Performance Simulation for Design and Operation. **Building Performance Simulation for Design and Operation**, [s. l.], p. 1–6, 8–12, 16–23, 37–42, 44, 45, 49–52, 56–60, 2011.

HENSEN, Jan L.M.; LAMBERTS, Roberto. **Building Performance Simulation for Design and Operation**. [S. l.]: Routledge, 2011.

HOPFE, Christina J.; AUGENBROE, Godfried L.M.; HENSEN, Jan L.M. Multi-criteria decision making under uncertainty in building performance assessment. **Building and Environment**, [s. l.], v. 69, p. 81–90, 2013. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.07.019>.

HURLEY, Morgan J.; ROSENBAUM, Eric R. **Performance-based fire safety design**. [S. l.: s. n.], 2015.

IBRAHIM, Yasser *et al.* On the optimisation of urban form design, energy consumption and outdoor thermal comfort using a parametric workflow in a hot arid zone. **Energies**, [s. l.], v. 14, n. 13, 2021.

IEA. **The Future of Cooling: Opportunities for energy-efficient air conditioning Together Secure Sustainable**. [S. l.: s. n.], 2018.

INMETRO. Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas (RTQ-C). [s. l.], p. 96, 2013.

IONESCU, Constantin *et al.* The historical evolution of the energy efficient buildings. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s. l.], v. 49, p. 243–253, 2015.

IRP. **Building Resilient Societies after the COVID-19 Pandemic: Key messages from the International Resource Panel**. [S. l.: s. n.], 2020. Disponível em: <https://www.resourcepanel.org/reports/building-resilient-societies-after-covid-19-pandemic>.

JABI, Wassim. **Parametric Design for Architecture**. London: Laurence King Publishing Ltd, 2013.

JACOBS, Jane. **The Death and Life of Great American Cities**. [S. l.]: Vintage, 1961.

JENCKS, Charles. **Modern Movements in Architecture**. First Edited. [S. l.]: Anchor Press, 1973.

JEVONS, WS. **The Coal Question: an inquiry concerning the progress of the nation, and the probable exhaustion of our coal-mines**. Second reved. London: Macmillan, 1866.

JOHN, Vanderley Moacyr. **Reciclagem de resíduos na construção civil: contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento**. 2000. - Universidade de São Paulo, [s. l.], 2000.

KARUNATHILAKE, H *et al.* Renewable energy selection for net-zero energy communities: Life cycle based decision making under uncertainty. **Renewable Energy**, School of Engineering, University of British Columbia (Okanagan Campus), 1137 Alumni Avenue, Kelowna, BC V1V 1V7, Canada, v. 130, p. 558–573, 2019. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85049890492&doi=10.1016%2Fj.renene.2018.06.086&partnerID=40&md5=ffd6ab755486457869573dfaf78bd4dd>.

KASSIM, P S J; LATIP, N S A; FAUZI, M.K.B.M. K B M. Coupling thermal mass and water systems as urban passive design in hot climates. **ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences**, Kulliyyah of Architecture and Environmental

Design, International Islamic University Malaysia, Kuala Lumpur, Malaysia, v. 12, n. 16, p. 4786–4790, 2017. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85028468093&partnerID=40&md5=a5a5ea093015ec3789a7c5d195fce897>.

KELLER, Marian;; BURKE, Bill. **Fundamentos de projetos de edificações sustentáveis**. 1 eded. Porto Alegre: Bookman, 2010.

KERR, R; BACCEI, B; HAMMON, R. Premier Gardens & Cresleigh Rosewood: A Zero Energy community case study. *In:* , 2007, Building Industry Research Alliance, 7407 Tam O'Shanter Drive, Stockton, CA 95210, United States. **Solar 2007: Sustainable Energy Puts America to Work, Including 36th ASES Annual Conference, 32nd National Passive Solar Conference and 2nd Renewable Energy Policy and Marketing Conference**. Building Industry Research Alliance, 7407 Tam O'Shanter Drive, Stockton, CA 95210, United States: [s. n.], 2007. p. 562–569. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84867861005&partnerID=40&md5=7764cbba806a398e8660d43d3cc962a5>.

KETTLES, Colleen Mccann. **Review of Solar Access Law in the United States Colleen McCann Kettles Solar America Board for Codes and Standards**. [s. l.]: Solar America Board for Codes and Standards, 2008.

KIBERT, C.J. **Sustainable Construction: Green Building Design and Delivery**. 3rd. ed. Hoboken, NJ: Wiley, 2012.

KIM, B *et al.* Ultra-low energy Army installations. *In:* , 2011, Rochester Institute of Technology, 111 Lomb Memorial Drive, Rochester, NY 14623, United States. **Anais [...]**. Rochester Institute of Technology, 111 Lomb Memorial Drive, Rochester, NY 14623, United States: [s. n.], 2011. p. 729–736. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84859541078&partnerID=40&md5=707950dad67332f5a85990ef21e1f1e>.

KNECHT, Katja; STEFANESCU, Dimitrie A.; KOENIG, Reinhard. Citizen Engagement through Design Space Exploration Integrating citizen knowledge and expert design in computational urban planning. [s. l.], n. September, p. 785–794, 2020.

KNOWLES, Ralph L. **Sun Rhythm Form**. Cambridge, MA: MIT Press Classic, 1981.

KOLAREVIC, Branko. INTRODUCTION. *In:* KOLAREVIC, Branko (org.). **Architecture in**

the Digital Age. London: Taylor & Francis, 2003.

KOLBERT, Elizabeth. **The Sixth Extinction: An Unnatural History**. [s. l.]: Henry Holt & Company, 2014.

KONTAR, Rawad El *et al.* URBANopt: An Open-source Software Development Kit for Community and Urban District Energy Modeling. **2020 Building Performance Analysis Conference and SimBuild**, [s. l.], n. October, p. 293–301, 2020. Disponível em: <https://www.nrel.gov/docs/fy21osti/76781.pdf>.

KOUTRA, S *et al.* Towards a net-zero energy district transformation in a mono-criterion scenario analysis the case of Bo01, malmö district. *In:* , 2017, Department of Architecture and Urban Planning, University of Mons, Rue de l'Épargne, 56, Mons, Belgium. (Klein C., Helfert M., & Donnellan B., Org.) **6th International Conference on Smart Cities and Green ICT Systems, SMARTGREENS 2017**. Department of Architecture and Urban Planning, University of Mons, Rue de l'Épargne, 56, Mons, Belgium: SciTePress, 2017. p. 180–187. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85025433331&partnerID=40&md5=6abf037856f520c5386ec185176bd5eb>.

KOUTRA, S *et al.* Towards the development of a net-zero energy district evaluation approach: A review of sustainable approaches and assessment tools. **Sustainable Cities and Society**, [s. l.], v. 39, p. 784–800, 2018. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85046705054&doi=10.1016%2Fj.scs.2018.03.011&partnerID=40&md5=160d971e265dc34419a0e7475de9160e>.

KOUTRA, S; BECUE, V; IOAKIMIDIS, C S. **A Simplified methodological approach towards the net zero energy district**. Net-Zero Energy Efficiency Unit on City Districts, Research Institute for Energy, University of Mons, Mons, Belgium: Springer Verlag, 2017. Disponível em: https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85028419523&doi=10.1007%2F978-3-319-63712-9_12&partnerID=40&md5=3860806dfc0837ea72117fb4e5c9b7c0.

KWAG, Byung Chang; ADAMU, Babayo Mohammed; KRARTI, Moncef. Analysis of high-energy performance residences in Nigeria. **Energy Efficiency**, [s. l.], v. 12, n. 3, p. 681–695, 2019.

LAMBERTS, Roberto; DUTRA, Luciano; PEREIRA, Fernando O. R. **Eficiência Energética na Arquitetura**. 3ª Ediçãoed. [S. l.]: ELETROBRAS/PROCEL, 2014.

LAN, Lan; WOOD, Kristin L.; YUEN, Chau. A holistic design approach for residential net-zero energy buildings: A case study in Singapore. **Sustainable Cities and Society**, [s. l.], v. 50, n. February, p. 101672, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101672>.

LAWSON, Brian. **How designers think**. 4. ed. Oxford: Architectural Press, 1980-. ISSN 0142694X. Disponível em: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0142694X81900338>.

LECHNER, Norbert. **HEATING, COOLING, LIGHTING: Sustainable Design Methods for Architects**. Fourth Edied. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2015.

LEED. **LEED v4 for Building Design and Construction**. [S. l.]: Leadership in Energy and Environmental Design, 2019.

LENOIR, A.; THELLIER, F.; GARDE, F. Towards net zero energy buildings in hot climate, part 2: Experimental feedback. *In: , 2011. ASHRAE Transactions*. [S. l.: s. n.], 2011. p. 458–465.

LI, Y; FU, L; JIE, C. Case study for integrated regional energy planning in SINO-Singapore Tianjin Eco-City. *In: , 2009, San Francisco, California, USA. Proceedings of the ASME 2009 3rd International Conference of Energy Sustainability*. San Francisco, California, USA: [s. n.], 2009. p. 43–48. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-77953803445&doi=10.1115%2FES2009-90177&partnerID=40&md5=6248df1b8230c47c85ec9fee871138be>.

LI, D. H. W.; YANG, L.; LAM, J. C. Zero energy buildings and sustainable development implications - A review. **Energy**, [s. l.], v. 54, p. 1–10, 2013. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2013.01.070>.

LIANG, J; SHIRSAT, A; TANG, W. Sustainable community based PV-storage planning using the Nash bargaining solution. **International Journal of Electrical Power and Energy Systems**, North Carolina State University, Raleigh, NC 27695, United States, v. 118, 2020. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0->

[85077309277&doi=10.1016%2Fj.ijepes.2019.105759&partnerID=40&md5=c496f417294ce59463c9028669757e93](https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85077309277&doi=10.1016%2Fj.ijepes.2019.105759&partnerID=40&md5=c496f417294ce59463c9028669757e93).

LIESEN, R *et al.* Energy master planning toward net zero energy installation - Portsmouth Naval Shipyard. *In: , 2015, Energy Branch, U.S. Army Corps of Engineers Engineer Research and Development Center-Construction Engineering Research Laboratory (ERDC/CERL), Champaign, IL, United States. ASHRAE Transactions*. Energy Branch, U.S. Army Corps of Engineers Engineer Research and Development Center-Construction Engineering Research Laboratory (ERDC/CERL), Champaign, IL, United States: [s. n.], 2015. p. 160–175. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84938824732&partnerID=40&md5=cb0678997c87ac766e69dc2d216c2f05>.

LIM, Hee Won *et al.* Case study of load matching and energy cost for net-zero energy houses in Korea. **Energies**, [s. l.], v. 14, n. 19, p. 1–11, 2021.

LITARDO, Jaqueline *et al.* Energy saving strategies and on-site power generation in a university building from a tropical climate. **Applied Sciences (Switzerland)**, [s. l.], v. 11, n. 2, p. 1–21, 2021.

LITTLEFAIR, P J *et al.* Environmental site layout planning: solar access, microclimate and passive cooling in urban areas. **Building Research Establishment Ltd**, [s. l.], v. 380, p. 151, 2000.

LORENÇO, João; PESSOA, Novaes; LAMBERTS, Roberto. Estado da arte em eficiência energética : iluminação e envoltória. [s. l.], 2013.

LU, Y *et al.* Economic Performance of Net-Zero Energy Community under Reward-Penalty Mechanism Considering PV System Reliability. **Environmental and Climate Technologies**, Department of Civil Engineering and Architecture, Anhui University of Technology, Ma'anshan, 243002, China, v. 23, n. 3, p. 26–42, 2019. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85078038289&doi=10.2478%2Fruet-2019-0077&partnerID=40&md5=eb3ab5dff14613ee2303318deb21142e>.

MACHLINE, E; PEARLMUTTER, D; SCHWARTZ, M. Parisian eco-districts: low energy and affordable housing?. **Building Research and Information**, Ben Gurion University of the Negev, Blaustein Institutes for Desert Research, Beer-Sheva, Israel, v. 46, n. 6, p. 636–652, 2018. Disponível em:

<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85004125639&doi=10.1080%2F09613218.2016.1258852&partnerID=40&md5=8c1804f18d51a6c7b5a6a0c9e2995418>.

MACKEY, Christopher *et al.* Wind , Sun , Surface Temperature , and Heat Island : Critical Variables for High-Resolution Outdoor Thermal Comfort Payette Architects , United States of America Massachusetts Institute of Technology , United States of America University of Pennsylvania ,. [s. l.], p. 985–993, 2015.

MACKEY, Chris; SADEGHIPOUR ROUDSARI, Mostapha. The Tool(s) Versus The Toolkit. *In:* , 2017, Paris, France. **Proceedings of the Design Modeling Symposium**. Paris, France: [s. n.], 2017. p. 93–101.

MARCO, C; DANIELE, A; ROBERTO, L. Monitoring of CasaNova Low Energy District: Result and Discussion. *In:* , 2016, Eurac Research Institute for Renewable Energy, Via G. Di Vittorio 16, Bolzano, I-39100, Italy. (Kurnitskin J., Org.)**Anais [...]**. Eurac Research Institute for Renewable Energy, Via G. Di Vittorio 16, Bolzano, I-39100, Italy: Elsevier Ltd, 2016. p. 895–906. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85006375436&doi=10.1016%2Fj.egypro.2016.09.162&partnerID=40&md5=60c836feff4ccfdd7383107aef767c6>.

MARDALJEVIC, John *et al.* DAYLIGHTING METRICS: IS THERE A RELATION BETWEEN USEFUL DAYLIGHT ILLUMINANCE AND DAYLIGHT GLARE PROBABILITY?. *In:* , 2012, Loughborough, UK. **First Building Simulation and Optimization Conference**. Loughborough, UK: IBPSA - England, 2012.

MARIQUE, A.-F.; REITER, S. A simplified framework to assess the feasibility of zero-energy at the neighbourhood/community scale. **Energy and Buildings**, University of Liege, LEMA (Local Environment: Management and Analysis), Chemin des Chevreuils, 1 B52/3, 4000 Liege, Belgium, v. 82, p. 114–122, 2014a. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84905405284&doi=10.1016%2Fj.enbuild.2014.07.006&partnerID=40&md5=9cbdcedef596c4fbf2ab93e52b6a7175>.

MARIQUE, A.-F.; REITER, S. A simplified framework to assess the feasibility of zero-energy at the neighbourhood/community scale. **Energy and Buildings**, [s. l.], v. 82, p. 114–122, 2014b. Disponível em: [https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-](https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84905405284&doi=10.1016%2Fj.enbuild.2014.07.006&partnerID=40&md5=9cbdcedef596c4fbf2ab93e52b6a7175)

[84905405284&doi=10.1016%2Fj.enbuild.2014.07.006&partnerID=40&md5=9cbdcedef596c4fbf2ab93e52b6a7175](https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84905405284&doi=10.1016%2Fj.enbuild.2014.07.006&partnerID=40&md5=9cbdcedef596c4fbf2ab93e52b6a7175).

MARON, Marco Aurélio; GÓES, Thiago. Algoritmo adicionado ao planejamento urbano e ambiental. **Paranoá**, [s. l.], n. 36, p. 1–25, 2023.

MARSZAL, A. J. *et al.* Zero Energy Building - A review of definitions and calculation methodologies. **Energy and Buildings**, [s. l.], v. 43, n. 4, p. 971–979, 2011. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.12.022>.

MARTINS, Tathiane *et al.* Building Energy Demand Based on Urban Morphology Analysis : Case Study in Maceió , Brazil. [s. l.], 2019.

MARTINS, Tathiane Agra de Lemos *et al.* Sensitivity analysis of urban morphology factors regarding solar energy potential of buildings in a Brazilian tropical context. **Solar Energy**, [s. l.], v. 137, p. 11–24, 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2016.07.053>.

MARTINS, Tathiane A.I.; ADOLPHE, Luc; BASTOS, Leopoldo E.g. From solar constraints to urban design opportunities: Optimization of built form typologies in a Brazilian tropical city. **Energy and Buildings**, [s. l.], v. 76, p. 43–56, 2014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.02.056>.

MARTINS, Tathiane Agra de Lemos; BITTENCOURT, Leonardo Salazar; KRAUSE, Cláudia Mariz de Lyra Barroso. Contribuição ao zoneamento bioclimático brasileiro: reflexões sobre o semiárido nordestino TT - Contribution to the Brazilian bioclimatic zoning: considerations about the tropical semi-arid climate. **Ambiente Construído**, [s. l.], v. 12, n. 2, p. 59–75, 2012. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1678-86212012000200005&lang=pt.

MARTINS, Tathiane Agra de Lemos; BONHOMME, Marion; ADOLPHE, Luc. Análise do impacto da morfologia urbana na demanda estimada de energia das edificações: um estudo de caso na cidade de Maceió, AL TT - Evaluation of the impact of urban morphology on the estimated energy demand of buildings: a case study in Maceió, Brazi. **Ambiente Construído**, [s. l.], v. 13, n. 4, p. 213–233, 2013. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1678-86212013000400015&lang=pt.

MAZRIA, Edward. **The Passive Solar Energy Book: A Complete Guide to Passive Solar Home, Greenhouse and Building Design**. First Edited. [S. l.]: Rodale Pr, 1979.

MCGREGOR, Gloria Shepard. ENERGY CONSERVATION IN URBAN AND REGIONAL PLANNING: THE DAVIS EXPERIENCE. **AIAA Monographs**, [s. l.], v. 25, p. 125–136, 1979.

MERTZ, G A *et al.* Conceptual design of net zero energy campus residence. *In:* , 2005, Orlando, Florida, USA. **Proceedings of ISEC2005 Proceedings of 2005 International Solar Energy Conference**. Orlando, Florida, USA: [s. n.], 2005. p. 123–131. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-33748240646&doi=10.1115%2FISEC2005-76199&partnerID=40&md5=a950cc9d76fff3232ecb3440e0f50ac2>.

MITCHELL, W J. The theoretical foundation of computer-aided architectural design. **Environment and Planning B: Planning and Design**, [s. l.], v. 2, n. 2, p. 127–150, 1975.

MOHAMMADI, Firoozeh; MOFIDI, Majid; TAHBAZ, Mansoureh. Evaluation and Analysis of the Efficiency of Dynamic Metrics Evaluating Daylight Performance (Daylight Autonomy and Useful Daylight Illuminance) through Sensitivity Analysis ; Case Study : Elementary Classroom in Tehran *. [s. l.], p. 135–144, 2020.

MOHURD, (MINISTRY OF HOUSING AND URBAN-RURAL DEVELOPMENT, China). **Design standard for energy efficiency of public buildings (GB 50189-2005)**. Pequim: China Architecture and Building Press, 2005.

MORENO, Carolos. **The 15-Minute City: A Solution to Saving Our Time and Our Planet**. 1ª edição. [S. l.]: Wiley, 2024.

MUMFORD, Lewis. **The City in History: Its origins, its transformations and its prospects**. New York: HARCOURT BRACE JOVANOVIĆ, INC., 1961.

NABIL, Azza; MARDALJEVIC, John. Useful daylight illuminances: A replacement for daylight factors. **Energy and Buildings**, [s. l.], v. 38, n. 7, p. 905–913, 2006.

NABONI, Emanuele *et al.* A digital workflow to quantify regenerative urban design in the context of a changing climate. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s. l.], v. 113, n. July, p. 109255, 2019. Disponível em:

<https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109255>.

NABONI, Emanuele *et al.* Defining The Energy Saving Potential of Architectural Design. **Energy Procedia**, [s. l.], v. 83, n. 1991, p. 140–146, 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2015.12.204>.

NABONI, Emanuele; HAVINGA, Lisanne. Introduction. *In:* NABONI, Emanuele; HAVINGA, Lisanne (org.). **Regenerative Design in Digital Practice: A Handbook for the Built Environment**. Bolzano, IT: Eurac, 2019.

NABONI, Emanuele; LUCA, Francesco De. Digital Tools to Support District Regenerative Design and Scale Jumping. *In:* REITH, Andrés; BRAJKOVIĆ, Jelena (org.). **Scale Jumping: Regenerative Systems Thinking within the Built Environment. A guidebook for regenerative implementation: Interactions, tools, platforms, metrics, practice**. (Bolzano, IT: COST Action CA16114 RESTORE, Working Group Five: Scale Jumping, printed by Eurac Research, 2021.

NASROLLAHI, Nazanin *et al.* Numerical evaluation of thermal comfort in traditional courtyards to develop new microclimate design in a hot and dry climate. **Sustainable Cities and Society**, [s. l.], v. 35, n. June, p. 449–467, 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scs.2017.08.017>.

NATANIAN, J; ALEKSANDROWICZ, O; AUER, T. A parametric approach to optimizing urban form, energy balance and environmental quality: The case of Mediterranean districts. **Applied Energy**, Chair of Building Technology and Climate Responsive Design, Dept. of Architecture, Technical University of Munich, Arcisstraße 21, Munich, 80333, Germany, v. 254, 2019. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85070573828&doi=10.1016%2Fj.apenergy.2019.113637&partnerID=40&md5=943de7a0776b881bc63c6682211895>.

NATANIAN, Jonathan; ALEKSANDROWICZ, Or; AUER, Thomas. A parametric approach to optimizing urban form, energy balance and environmental quality: The case of Mediterranean districts. **Applied Energy**, Chair of Building Technology and Climate Responsive Design, Dept. of Architecture, Technical University of Munich, Arcisstraße 21, Munich, 80333, Germany, v. 254, 2019. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85070573828&doi=10.1016%2Fj.apenergy.2019.113637&partnerID=40&md5=943de7a0776b881bc63c6682211895>.

- NATANIAN, J; AUER, T. Beyond nearly zero energy urban design: A holistic microclimatic energy and environmental quality evaluation workflow. **Sustainable Cities and Society**, Chair of Building Technology and Climate Responsive Design, Department of Architecture, Technical University of Munich, Arcisstraße 21, Munich, 80333, Germany, v. 56, 2020. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85079527492&doi=10.1016%2Fj.scs.2020.102094&partnerID=40&md5=84ec0004108f463ec971741be815e2bf>.
- NATANIAN, Jonathan; DE LUCA, Francesco; NABONI, Emanuele. From repetition to diversity: A workflow for energy-driven optimization of heterogeneous urban blocks in hot climates. **Will Cities Survive? Proceedings of 36th International Conference Passive and Low Energy Architecture - PLEA**, [s. l.], n. November, p. 1–6, 2022.
- NEGENDAHL, Kristoffer; NIELSEN, Toke Rammer. Building energy optimization in the early design stages: A simplified method. **Energy and Buildings**, [s. l.], v. 105, p. 88–99, 2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com.ez54.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S0378778815300888#fig0030>. Acesso em: 18 mar. 2018.
- NG, Provides *et al.* AI In+form: Intelligence and Aggregation for Solar Designs in the Built Environment. [s. l.], p. 203–216, 2022.
- NGUYEN, Anh-Tuan; REITER, Sigrid; RIGO, Philippe. A review on simulation-based optimization methods applied to building performance analysis. **Applied Energy**, [s. l.], v. 113, p. 1043–1058, 2014. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com.ez54.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S0306261913007058>. Acesso em: 20 fev. 2018.
- NIEMASZ, Jeffrey; SARGENT, Jon; REINHART, Christoph F. Solar zoning and energy in detached dwellings. **Environment and Planning B: Planning and Design**, [s. l.], v. 40, n. 5, p. 801–813, 2013.
- O’CONNOR, Jennifer. **Tips for Daylighting**. [S. l.]: Regents of the University of California, 1997.
- O’RIAIN, Marc. **The world’s first ‘zero energy’ house**. [S. l.], 2021. Disponível em: <https://passivehouseplus.co.uk/blogs/the-world-s-first-zero-energy-house>.
- ODUM, Howard T. **Ecological and General Systems: An Introduction to Systems Ecology**. [S. l.]: University Press of Colorado, 1994.
- OHENE, Eric; HSU, Shu Chien; CHAN, Albert P.C. Feasibility and retrofit guidelines towards net-zero energy buildings in tropical climates: A case of Ghana. **Energy and Buildings**, [s. l.], v. 269, p. 112252, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112252>.
- OLGYAY, V. **Design with climate: Bioclimatic approach to architectural regionalism: New and expanded edition**. PRINCETON; OXFORD: Princeton University Press, 1963.
- ORR, Harold. **Saskatchewan Conservation House**. [S. l.], 2014. Disponível em: https://passipedia.org/basics/the_passive_house_-_historical_review/pioneer_award/saskatchewan_conservation_house. Acesso em: 4 out. 2022.
- OSTERGARD, Torben *et al.* Building simulations supporting decision making in early design - A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, THE BOULEVARD, LANGFORD LANE, KIDLINGTON, OXFORD OX5 1GB, ENGLAND, v. 61, p. 187–201, 2016. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84962861426&doi=10.1016%2Fj.rser.2016.03.045&partnerID=40&md5=995ca518a0da2ee1cb9deca18051649f>. Acesso em: 20 fev. 2018.
- OXMAN, Rivka; OXMAN, Robert. **Theories of the Digital in Architecture**. [S. l.]: Routledge, 2013.
- PERLIN, John. **Let It Shine: The 6,000-year Story of Solar Energy**. Novato, California: New World Library, 2013.
- PERONATO, Giuseppe *et al.* A parametric design-based methodology to visualize building performance at the neighborhood scale. **Building Simulation Applications BSA 2015 2nd IBPSA-Italy conference Bozen-Bolzano, 4th – 6th February 2015**, [s. l.], n. April, p. 351–358, 2015.
- PETRICHENKO, Ksenia. **Net-zero energy buildings GLOBAL AND REGIONAL PERSPECTIVES**. 2010. - Central European University, [s. l.], 2010.
- PORTZAMPARC, Christian. A terceira era da cidade. **Revista Óculum**, [s. l.], n. 9,

- 1992.
- RAFIQUE, M M; REHMAN, S. **Solar Electrification and Zero Energy Rural Communities**. King Fahd University of Petroleum and Minerals, Dhahran, 31261, Saudi Arabia: Springer, 2020. Disponível em: https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85079417577&doi=10.1007%2F978-3-030-37794-6_16&partnerID=40&md5=a13884a2b03c2d1bd77a12c60c8e3133.
- RAFIQUE, M M; REHMAN, S; ALHEMS, L M. Developing zero energy and sustainable villages – A case study for communities of the future. **Renewable Energy**, Faculty of Mechanical Engineering, Technische Universität Bergakademie, Freiberg, 09599, Germany, v. 127, p. 565–574, 2018. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85052131694&doi=10.1016%2Fj.renene.2018.04.087&partnerID=40&md5=747af82e6abe58e3a063c661f7cb25e8>.
- RATTI, Carlo; BAKER, Nick; STEEMERS, Koen. Energy consumption and urban texture. **Energy and Buildings**, [s. l.], v. 37, n. 7, p. 762–776, 2005.
- RATTI, Carlo; RAYDAN, Dana; STEEMERS, Koen. Building form and environmental performance: Archetypes, analysis and an arid climate. **Energy and Buildings**, [s. l.], v. 35, n. 1, p. 49–59, 2003.
- REICHARDT, Alexander *et al.* Sustainable Building Certification and the Rent Premium : A Panel Data Approach. **Journal of Real Estate Research**, [s. l.], v. Vol. 34, n. No. 1, p. 99–126, 2012.
- REINHART, Christoph F.; CEREZO DAVILA, Carlos. Urban building energy modeling - A review of a nascent field. **Building and Environment**, [s. l.], v. 97, p. 196–202, 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132315003248>. Acesso em: 20 fev. 2018.
- REITER, S; MARIQUE, A F. Toward a sustainable energy transition in the built environment. *In*: ENERGY CONSUMPTION: IMPACTS OF HUMAN ACTIVITY, CURRENT AND FUTURE CHALLENGES, ENVIRONMENTAL AND SOCIO-ECONOMIC EFFECTS. University of Liege, Architecture and Urban Planning, LEMA, Belgium: Nova Science Publishers, Inc., 2014. p. 35–52. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84958624084&partnerID=40&md5=bb25555742c722ca907dc6e4452ef728>.
- ROBERTO, J; CHÁVEZ, G. Sustainable ecological habitat: Towards zero energy building. *In*: , 2008, Universidad Autónoma Metropolitana, Mexico. **Anais [...]**. Universidad Autónoma Metropolitana, Mexico: University College Dublin, 2008. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85067744302&partnerID=40&md5=acf35a79ae6e072d95436f1af0fdb8c0>.
- ROBICHAUD, R. Hybrid renewable power for the Solar Decathlon’s zero energy village. *In*: , 2006, National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO 80401, United States. **Anais [...]**. National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO 80401, United States: [s. n.], 2006. p. 385–400. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-33845811574&partnerID=40&md5=fe0fc5cd02d995c853a6925be24ebe71>.
- ROBINSON, John; COLE, Raymond J. Theoretical underpinnings of regenerative sustainability. **Building Research and Information**, [s. l.], v. 43, n. 2, p. 133–143, 2015.
- ROMERO, Marta Adriana Bustos. **Princípios Bioclimáticos Para o Desenho Urbano**. 1. ed. Brasília: Editora UnB, 2013.
- ROUDSARI, Mostapha Sadeghipour; PAK, Michelle. Ladybug: A parametric environmental plugin for grasshopper to help designers create an environmentally-conscious design. *In*: , 2013. **Proceedings of BS 2013: 13th Conference of the International Building Performance Simulation Association**. [S. l.: s. n.], 2013. p. 3128–3135.
- RUUSKA, Antti; HÄKKINEN, Tarja. Material efficiency of building construction. **Buildings**, [s. l.], v. 4, n. 3, p. 266–294, 2014.
- SALOM, Jaume E. *et al.* Interaction Indicators of Net Zero Energy Buildings with High-Resolution Data. [s. l.], n. March, p. 103, 2014.
- SANTAMOURIS, M. Cooling the cities - A review of reflective and green roof mitigation technologies to fight heat island and improve comfort in urban environments. **Solar Energy**, [s. l.], v. 103, p. 682–703, 2014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2012.07.003>.

SANTANA, Laila Oliveira *et al.* Impacto da geometria de edificações sobre o desempenho térmico de acordo com o método prescritivo do RTQ-R | Impact of the building shape on the thermal performance according to the brazilian labelling program. **Oculum Ensaios**, [s. l.], v. 16, n. 1, p. 139, 2019.

SAVVIDES, Andreas; VASSILIADES, Constantinos. Designing urban building blocks around solar planning principles. **WIT Transactions on Ecology and the Environment**, [s. l.], v. 226, n. 1, p. 679–690, 2017.

SCHUMACHER, Patrik. Parametricism: A new global style for architecture and urban design. **Architectural Design**, [s. l.], v. 79, n. 4, p. 14–23, 2009.

SCOGNAMIGLIO, A; GARDE, F. Photovoltaics' architectural and landscape design options for Net Zero Energy Buildings, towards Net Zero Energy Communities: Spatial features and outdoor thermal comfort related considerations. **Progress in Photovoltaics: Research and Applications**, ENEA, UTTP-FOTO, Largo Enrico Fermi 1, Portici, NA, 80055, Italy, v. 24, n. 4, p. 477–495, 2016. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84959882944&doi=10.1002%2Fpip.2563&partnerID=40&md5=8413cb7d66b9777e7ef65501687301dc>.

SHAREEFDEEN, Z *et al.* Design and analysis of a biogas digester for a net-zero energy community in southwestern Ontario. *In:* , 2015, Department of Chemical Engineering, American University of Sharjah, Sharjah, United Arab Emirates. **5th International Conference on Industrial Engineering and Operations Management, IEOM 2015**. Department of Chemical Engineering, American University of Sharjah, Sharjah, United Arab Emirates: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2015. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84931098894&doi=10.1109%2FIEOM.2015.7093887&partnerID=40&md5=7391fa5efadebb5639e87b3475295490>.

SHI, Zhongming; FONSECA, Jimeno A; SCHLUETER, Arno. A review of simulation-based urban form generation and optimization for energy-driven urban design. [s. l.], 2017.

SILVA, Caio Frederico E. **O Conforto Térmico de cavidades urbanas: contexto climático do Distrito Federal**. 2013. - Universidade de Brasília, [s. l.], 2013.

SIRY, Joseph M. **Air-Conditioning in Modern American Architecture, 1890–1970**. University Park, PA: The Pennsylvania State University Press, 2021.

SKRIVER, C. Project with new technologies: Coming soon: Low energy district heating. **Euroheat and Power (English Edition)**, Kamstrup A/S, Skanderborg, Denmark, v. 9, n. 1, p. 38–42, 2012. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84859543825&partnerID=40&md5=61b992b7fdd9e8af364130e4c7eb0335>.

SMIL, Vaclav. Energy Transitions - History, Requirements, Prospects (2010) by Vaclav Smil. **Praeger**, [s. l.], 2010.

SMITH, A; GILL, G; FOREST, R. Global environmental contextualism. *In:* , 2008, Adrian Smith + Gordon Gill Architecture, 111 W Monroe, Chicago, IL 60603, United States. **8th World Congress on Tall and Green: Typology for a Sustainable Urban Future, CTBUH 2008**. Adrian Smith + Gordon Gill Architecture, 111 W Monroe, Chicago, IL 60603, United States: Council on Tall Buildings and Urban Habitat, 2008. p. 203–210. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84900853457&partnerID=40&md5=c410d0d5cbdd3401658f8b836a4ca527>.

SODDU, Celestino. The design of morphogenesis. An experimental research about the logical procedures in design processes. **Demetra Magazine**, [s. l.], p. 1–5, 1994.

SØRNES, K *et al.* Analysis of the impact resolution has on load matching in the Norwegian context. *In:* , 2017, SINTEF Byggforsk, P.O.Box 124 Blindern, Oslo, NO-0314, Norway. (Geving S. & Time B., Org.) **11th Nordic Symposium on Building Physics, NSB 2017**. SINTEF Byggforsk, P.O.Box 124 Blindern, Oslo, NO-0314, Norway: Elsevier Ltd, 2017. p. 610–615. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85033373345&doi=10.1016%2Fj.egypro.2017.09.683&partnerID=40&md5=1f33e7166aed6f6346534e257cc68598>.

STASIUK, David. **Design Modeling Terminology**. [S. l.]: Prouving Ground, 2018. Disponível em: <https://provingground.io/2018/06/13/design-modeling-terminology/>.

STERNFELD, S.M. The Anti-Solar House. *In:* , 1953, London. **Conference on Tropical Architecture: A Report on the Proceedings Held at University College**. London: Allen and Unwin, 1953. p. 122–125.

TARBATT, Jonathan; TARBATT, Chloe Street. **The Urban Block**. London,: RIBA Publisher, 2020.

TEDESCHI, Arturo. **Algorithms Aided Design**. Brienza (Potenza) - ITALY: LE PENSEUR PUBLISHER, 2014.

TODOROVIĆ, M S. BPS, energy efficiency and renewable energy sources for buildings greening and zero energy cities planning: Harmony and ethics of sustainability. **Energy and Buildings**, University of Belgrade, Serbia and Southeast University, Nanjing, China, v. 48, p. 180–189, 2012. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84858069852&doi=10.1016%2Fj.enbuild.2012.01.027&partnerID=40&md5=545f603ca1a73470821685993e079dff>.

TOL, H I; DINCER, I; SVENDSEN, S. Regional energy planning tool for renewable integrated low-energy district heating systems: Environmental assessment. *In*: CAUSES, IMPACTS AND SOLUTIONS TO GLOBAL WARMING. Department of Civil Engineering, Technical University of Denmark, rovej, Building 118, Kongens Lyngby, 2800, Denmark: Springer New York, 2013. p. 859–878. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84919809314&doi=10.4324%2F9781841505442&partnerID=40&md5=3755edf50a43b77c3cb1807511f8067f>.

TOL, H I; SVENDSEN, S. Improving the dimensioning of piping networks and network layouts in low-energy district heating systems connected to low-energy buildings: A case study in Roskilde, Denmark. **Energy**, Technical University of Denmark, Department of Civil Engineering, Section of Building Physics and Services, Building 118, DK-2800 Brovej, Kgs. Lyngby, Denmark, v. 38, n. 1, p. 276–290, 2012.

TORCELLINI, P. *et al.* Zero Energy Buildings: A Critical Look at the Definition. **ACEEE Summer Study Pacific Grove**, [s. l.], n. August, p. 15, 2006. Disponível em: <http://www.nrel.gov/docs/fy06osti/39833.pdf>.

TORCELLINI, P.; CRAWLEY, D. Understanding Zero-Energy Buildings. **ASHRAE Journal**, [s. l.], n. September 2006, p. 62–69, 2006.

TORCELLINI, P; PLESS, S; DERU, M. Zero Energy Buildings : A Critical Look at the Definition Preprint. *In*: , 2006. **ACEEE Summer Study**. [S. l.: s. n.], 2006.

TREGENZA, P. R. Subdivision of the sky hemisphere for luminance measurements. **Lighting Research & Technology**, [s. l.], v. 19, n. 1, p. 13–14, 1987.

TSUDA, Fernanda Panontin. **Conforto, adequação climática e o papel dos códigos de edificações: Os desafios de São Paulo frente ao estado da arte no Brasil e no mundo**. 2019. 171 f. - Universidade de São Paulo, [s. l.], 2019.

UN. **TRANSFORMING OUR WORLD: The 2030 Agenda for sustainable development**. [S. l.: s. n.], 2016.

UN HABITAT. **NOVA AGENDA URBANA**. [S. l.: s. n.], 2016.

UNDP. **The Next Frontier: Human Development and the Anthropocene Human Development Report 2020**. [S. l.: s. n.], 2020. Disponível em: <http://hdr.undp.org/en/2020-report>.

UNEP. **BUILDINGS AND CLIMATE CHANGE: Status, Challenges and Opportunities**. Paris: [s. n.], 2007.

ÜRGE-VORSATZ, D *et al.* Buildings. *In*: Mitigation. Working Group III contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel of Climate Change. [s. l.], p. 671–738, 2014.

VASILEIADOU, S.; KALLIGEROPOULOS, D.; KARCANIAS, N. Systems, modelling and control in ancient Greece - Part 1: Mythical automata. **Measurement and Control**, [s. l.], v. 36, n. 3, p. 76–80, 2003.

VERBRUGGEN, S *et al.* The Use of Solar Shading in a Nearly Zero-Energy Neighbourhood . *In*: , 2020. (Kalamees T Kurnitski J., Org.) **Anais [...]**. [S. l.]: EDP Sciences , 2020. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85088460413&doi=10.1051%2Ffe3sconf%2F202017219003&partnerID=40&md5=30e10481b45b09d1bfbf768262139b23>.

WARD, Greg. **RFLUXMTX**. [S. l.]: Lawrence Berkeley National Laboratory, [s. d.]. Disponível em: https://floyd.lbl.gov/radiance/man_html/rfluxmtx.1.html.

WARD, Gregory J. The RADIANCE lighting simulation and rendering system. **Proceedings of the 21st Annual Conference on Computer Graphics and**

Interactive Techniques, SIGGRAPH 1994, [s. l.], p. 459–472, 1994.

WATANABE, MAKOTO SEI. **The City of the Sun God**. [s. l.], 1995. Disponível em: https://www.ntticc.or.jp/pub/ic_mag/ic012/watanabe/taiyou_e.html. Acesso em: 4 mar. 2023.

WEBER, Fernando da Silva *et al.* Desenvolvimento de um modelo equivalente de avaliação de propriedades térmicas para a elaboração de uma biblioteca de componentes construtivos brasileiros para o uso no programa EnergyPlus. **Journal of Chemical Information and Modeling**, [s. l.], v. 53, n. 9, p. 1689–1699, 2017.

WETTER, Michael *et al.* Prototyping the Next Generation EnergyPlus Simulation Engine. **Proceedings of Building Simulation 2015: 14th Conference of IBPSA**, [s. l.], v. 14, n. April 2016, 2015.

WICKHAM, Hadley; STRYJEWSKI, Lisa. 40 Years of Boxplots. **Had.Co.Nz**, [s. l.], p. 1–17, 2011. Disponível em: <http://had.co.nz/stat645/project-03/boxplots.pdf>.

WOODBURY, ROBERT. **ELEMENTS OF PARAMETRIC DESIGN**. New York: Routledge, 2010.

WORTMANN, Thomas. Opossum. **CAADRIA 2017 - 22nd International Conference on Computer-Aided Architectural Design Research in Asia: Protocols, Flows and Glitches**, [s. l.], p. 283–292, 2017.

WORTMANN, Thomas; NANNICINI, Giacomo. Introduction to Architectural Design Optimization. *In*: KARAKITSIOU, Athanasia; MIGDALAS, Athanasios; PARDALOS, Panos M. (org.). **City Networks: Collaboration and Planning for Health and Sustainability**. Cham, Switzerland: Springer International Publishing, 2017. p. 259–278. Disponível em: <http://www.springer.com/series/7393%0Ahttp://widgets.ebscohost.com/prod/customerspecific/ns198523/vpn.php?url=https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=nlebk&AN=1651582&site=eds-live>.

YAHIA, M.W.; JOHANSSON, E.; THORSSON, S. Effect of urban design on microclimate and thermal comfort outdoors in warm-humid Dar es Salaam, Tanzania. **Int J Biometeorol**, [s. l.], n. 62, p. 373–385, 2018.

YANG, X *et al.* Energy and environment in Chinese rural housing: Current status

and future perspective. **Frontiers of Energy and Power Engineering in China**, Department of Building Science, School of Architecture, Tsinghua University, Beijing 100084, China, v. 4, n. 1, p. 35–46, 2010. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-77249149285&doi=10.1007%2Fs11708-010-0001-5&partnerID=40&md5=355df63291cbcabf35d3d20f2e30c6ff>.

YU, D *et al.* The Impact of Charging Battery Electric Vehicles on the Load Profile in the Presence of Renewable Energy. *In*: , 2019, Departmentt of Electrical and Computer Enginnering, Ryerson University, Toronto, ON, Canada. **2019 IEEE Canadian Conference of Electrical and Computer Engineering, CCECE 2019**. Departmentt of Electrical and Computer Enginnering, Ryerson University, Toronto, ON, Canada: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2019. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85074079853&doi=10.1109%2FCCECE.2019.8861730&partnerID=40&md5=ceb2acd992be31dad43a4ac1d7c496ca>.

ZANDAVALI, Bárbara Andrade. **Cellular Automata: A Bridge Between Building Variability and Urban Form Control**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), 2019. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/202241/001107523.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.

ZHANG, K M *et al.* An integrated design approach for sustainable community development. *In*: , 2009, Cornell University, Ithaca, NY 14853, United States. **42nd Annual Hawaii International Conference on System Sciences, HICSS**. Cornell University, Ithaca, NY 14853, United States: [s. n.], 2009. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-63349104578&doi=10.1109%2FHICSS.2009.67&partnerID=40&md5=a0e46aeae2ae0fa83f9a8d0593ef9de5>.

ZHIVOV, A M *et al.* Energy master planning towards net-zero energy communities/campuses. *In*: , 2014, Energy Branch of the U.S. Army, Engineer Research and Development Center, Construction Engineering Research Laboratory, Champaign, IL, United States. **2014 ASHRAE Winter Conference**. Energy Branch of the U.S. Army, Engineer Research and Development Center, Construction Engineering Research Laboratory, Champaign, IL, United States: Amer. Soc. Heating, Ref. Air-Conditing Eng. Inc., 2014. p. 114–129. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0->

84904298010&partnerID=40&md5=8af7ad280e2618783496619bd80d3b49.

ZHIVOV, A *et al.* Energy performance optimization for Army installations. **Building Services Engineering Research and Technology**, US Army Engineer Research and Development Center, Champaign, IL 61824, United States, v. 34, n. 1, p. 87–101, 2013. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84873023178&doi=10.1177%2F0143624412462907&partnerID=40&md5=130bc688934ec3670cae9fadaa3ae866>.

ZHIVOV, A M; CASE, M P. Toward net zero energy military installations. *In*: NATO SCIENCE FOR PEACE AND SECURITY SERIES C: ENVIRONMENTAL SECURITY. Construction Engineering Research Laboratory, U.S. Army Engineer Research and Development Center, Vicksburg, MS, United States: Springer Verlag, 2017. p. 15–23. Disponível em: https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85017540244&doi=10.1007%2F978-94-017-7600-4_3&partnerID=40&md5=2b674c2c2f79674fdf50157a9dabb7f5.

Algoritmo adicionado ao planejamento urbano e ambiental:

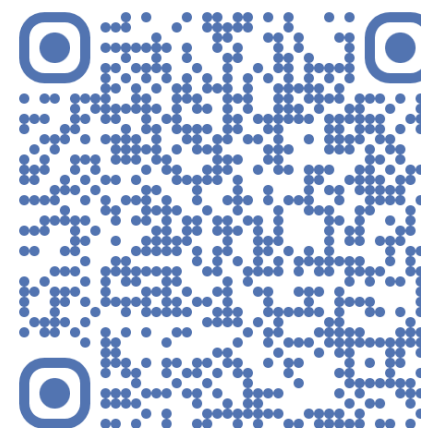
Otimização multiobjetivo do trecho da ViaTransbrásília

Autores: Marco Aurélio Maron & Thiago Montenegro Góes

Cadernos de Arquitetura e Urbanismo | Paranoá - vol. 36 - 2023

DOI: <http://doi.org/10.18830/issn.1679-0944.n36.2023.07>

O trabalho encontra-se disponível no sítio eletrônico:
<https://periodicos.unb.br/index.php/paranoa/article/view/47193> ou no QR Code
abaixo:



APÊNDICE A: PRINCIPAIS PUBLICAÇÕES

Artigo Publicado em Cadernos de Arquitetura e Urbanismo | Paranoá

A seguir é apresentado o artigo publicado revista Cadernos de Arquitetura e Urbanismo | Paranoá 36 em 2023. Este produto da pesquisa desenvolvida nesta tese é um desdobramento da parceria com Marco Aurélio Maron, e investigação realizada em seu Trabalho de Conclusão de Curso na especialização em Reabilitação Ambiental Sustentável Arquitetônica e Urbanística sob orientação do autor da presente tese.

Outas publicações e informações

Para outras publicações do autor, acessar perfil no *ReaserchGate*: <https://www.researchgate.net/profile/Thiago-Goes-3> ou no *QR Code* ao lado.



Outras informações sobre o autor estão disponíveis no Currículo *Lattes*: <http://lattes.cnpq.br/0942863208310732> ou no *QR Code* ao lado.



