CAROLINA GIROTTI

**Modelagem dos parâmetros da forma urbana para a maximização de
geração de energia solar fotovoltaica no ambiente urbano em adensamento
e verticalização: estudo de caso do Belenzinho, em São Paulo**

São Paulo

(2019)

CAROLINA GIROTTI

**Modelagem dos parâmetros da forma urbana para a maximização de
geração de energia solar fotovoltaica no ambiente urbano em adensamento
e verticalização: estudo de caso do Belenzinho, em São Paulo**

Dissertação de Mestrado apresentada à
Escola Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção do título de Mestre em
Ciências

Área de Concentração:
Engenharia de Construção Civil e Urbana

Orientadora:
Profa. Dra. Karin Regina de Castro Marins

São Paulo
(2019)

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

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

São Paulo, _____ de _____ de _____

Assinatura do autor: _____

Assinatura do orientador: _____

Catálogo-na-publicação

Girotti, Carolina

Modelagem dos parâmetros da forma urbana para a maximização de geração de energia solar fotovoltaica no ambiente urbano em adensamento e verticalização: estudo de caso do Belenzinho, em São Paulo / C. Girotti -- versão corr. -- São Paulo, 2019.

118 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil.

1.Sistemas Fotovoltaicos 2.Geração Distribuída (GD) 3.Morfologia Urbana 4.Urbanismo Paramétrico 5.Parâmetros Urbanísticos I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Construção Civil II.t.

Dedico a presente pesquisa às montanhas,
aquelas que inspiram meus estudos por
espaços urbanos sustentáveis e saudáveis.

AGRADECIMENTOS

Em especial à orientadora Karin, pela confiança depositada desde o início, pela orientação impecável nessa jornada e pelo desafio que essa pesquisa engloba.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) – pelo apoio ao fornecer a bolsa de estudos – Código de Financiamento 001.

Aos meus pais, Isabel e Clóvis, pelo amor fornecido durante a etapa de dedicação exclusiva ao mestrado.

À minha segunda família Camila Ohl, Theo Jun, Lia Sati e Takashi Shimabucuro, pela paciência e alegria nessa etapa tão importante.

Ao professor Ronaldo Mathias, por me apresentar o mundo acadêmico e pela confiança depositada durante todos esses anos.

À Escola Politécnica da USP e a todos os seus funcionários, em especial à Wandréa Dantas.

Ao professor Arthur Lara e ao Fernando, da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da USP, pela paciência, pelo humor e pela ajuda com a programação do *Grasshopper*®.

Aos amigos Laura Oliva, João Pavanelli, Renato Dallora, Dionísio Carvalho, Gabriela Vescovi, Mônica Bergamo, Matthew Kligerman e Luciano Shinkawa – cada um teve sua colaboração em alguma etapa importante da dissertação, ao longo dos últimos três anos.

RESUMO

O objetivo desta pesquisa é avaliar os parâmetros urbanísticos que influenciam a forma urbana e, consequentemente, maximizam a geração de energia fotovoltaica, no município de São Paulo, tomando por estudo de caso o bairro Belenzinho, em processo de adensamento e verticalização. A avaliação dos parâmetros urbanísticos foi realizada por meio do *software* de modelagem tridimensional *Rhinoceros*[®], utilizando dois vértices: inicialmente, foi modelada a variação isolada dos parâmetros urbanísticos, utilizando *Rhinoceros*[®] associado aos *plug-ins* *Grasshopper*[®] e *Diva*[®], com a finalidade de identificar os valores dos parâmetros urbanísticos que maximizam as respostas da forma urbana em relação à incidência de radiação solar na cobertura das edificações; em seguida, adicionou-se o algoritmo genético *Galapagos*, identificando-se a melhor combinação dos valores dos parâmetros urbanísticos quanto à maximização da incidência de radiação solar na cobertura das edificações. As análises mostraram que no cenário morfológico atual, 86% da cobertura das edificações existentes recebem entre 1840 e 1879 kWh/m².ano de incidência de radiação solar, porém, algumas edificações são prejudicadas com sombreamento causada pelas edificações vizinhas. Quando se objetiva otimizar a geração de energia solar fotovoltaica na cobertura de empreendimentos distribuídos no tecido urbano, valores de coeficiente de aproveitamento 3, quando o máximo permitido é 4, ou valores de coeficiente de aproveitamento 2, quando o máximo permitido é 2, associados a taxas de ocupação de 0,70, mostram-se apropriados. A aplicação do *Galapagos* indica que o ganho da radiação solar incidente por área total de cobertura, através da simulação da variação combinada dos parâmetros urbanísticos, é, em média, 60% maior quando comparado com o pior cenário da variação isolada dos parâmetros urbanísticos, no cenário com empreendimentos distribuídos. Porém, quando se objetiva otimizar a geração de energia solar fotovoltaica na cobertura de empreendimentos concentrados no tecido urbano, valores de coeficiente de aproveitamento 3 e 4, quando o máximo permitido é 4, associados a taxas de ocupação de 0,40, mostram-se apropriados. O uso do *Galapagos* indica que o ganho da radiação solar incidente por área total de cobertura, através da simulação da variação combinada dos parâmetros urbanísticos, é, em média, 40% maior quando comparado com o pior cenário da variação isolada dos parâmetros urbanísticos, no cenário com empreendimentos concentrados. Assim, a pesquisa indica que a definição de uma política energética municipal para aproveitamento fotovoltaico na cobertura de edificações passa pela análise da viabilidade de soluções de geração concentradas ou distribuídas no território urbano, o que impacta em diferentes formas de apropriação dessa variável na regulação da ocupação do solo, no que tange à definição de intervalos de valores dos parâmetros urbanísticos, gabarito de altura, assim como no uso do solo.

Palavras-chave: Sistemas Fotovoltaicos, Geração Distribuída (GD), Morfologia Urbana, Urbanismo Paramétrico, Parâmetros Urbanísticos.

ABSTRACT

The present study analyses the parameters of the urban form that conditions the PV power generation capacity in a neighbourhood in São Paulo: Belenzinho, which is in verticalization and densification processes. The urban analysis was modeled with Rhinoceros® 3D software, with two vertices. Initially, the case-study area was modeled based on the isolated variation of the urban parameters, with Rhinoceros® software associated with Grasshopper® and Diva® plug-ins, in order to identify the best and worse urban parameter values, considering the solar radiation incidence on the rooftops of isolated buildings. Then, Galapagos genetic algorithm was applied for the purpose of combining the urban parameters, and identified the most suitable values for better exploitation of solar radiation. The analysis showed that in the current morphological scenario, 86% of the existing buildings rooftops have values of solar radiation between 1840 and 1879 kWh/m².year, withal, some buildings are affected by shading caused by neighboring buildings. When optimizing the generation of photovoltaic solar energy in the rooftops of buildings distributed in area of this case study, values 3 for floor area ratio, when the maximum allowed is 4, or values 2 for floor area ratio, when the maximum allowed is 2, associated to values 0.70 of building coverage ratio to be appropriate. The study indicates that the gain of incident solar radiation by total coverage area through the simulation of the Galapagos genetic algorithm, represents on average 60% more when compared to the worst scenario of the isolated variation of the urban parameters, in isolated buildings. However, when the objective is to optimize the generation of photovoltaic solar energy in the rooftops of concentrated buildings in area of case study, values 3 and 4 for floor area ratio, when the maximum allowed is 4, associated to values 0.40 of building coverage ratio to be appropriate. The study indicates that the gain of incident solar radiation by total coverage area through the simulation of the Galapagos genetic algorithm, represents on average 40% more when compared to the worst scenario of the isolated variation of the urban parameters, in concentrated buildings. Thus, the definition of a municipal energy policy for photovoltaic application on the top of buildings involves the analysis of the feasibility of more concentrated or distributed generation solutions in the urban territory, and its appropriation of this variable in the land use regulation, in relation to the definition of ranges of values of urban planning parameters, building's height and land use.

Keywords: Photovoltaic Systems, Distributed Generation (DG), Urban Morphology, Urban Parameters, Urban regulation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Esquema do processo metodológico dividido em três etapas.....	19
Figura 2: Participação percentual por fonte de energia na geração de eletricidade em 2015.....	21
Figura 3: Mapa do sistema de transmissão de energia elétrica em 2017, que compõe o Sistema Interligado Nacional (SIN).....	22
Figura 4: Oferta interna de energia elétrica no Brasil, por fonte, ano base 2016	23
Figura 5: Número de conexões por fonte na geração distribuída de energia elétrica no Brasil, em 2016.....	25
Figura 6: Mapa da média anual da irradiação solar, no Brasil	26
Figura 7: Sistema de tarifação <i>net metering</i> , utilizado no BRASIL para SFCR	27
Figura 8: Sistema de tarifação <i>feed in</i> , utilizado na Europa para SFCR	28
Figura 9: Número de conexões GD acumulado entre 2012 e 2016.....	31
Figura 10: GD por classe de consumo de energia elétrica, em 2016.....	32
Figura 11: Curvas de carga: máxima demanda mensal global para clientes da AES Eletropaulo da Região Metropolitana de São Paulo.....	33
Figura 12: Polos Urbanos 1990, 2014, 2030.....	36
Figura 13: Diferentes tipos de forma urbana para mesma densidade construída	38
Figura 14: Variação de valores de taxa de ocupação do solo	39
Figura 15: Estudo de índices urbanos para o município de São Paulo com C.A. 4 e T.O. 0,70	40
Figura 16: Exemplo de malha urbana hipotética com C.A. 10 e T.O. 0,30.....	42
Figura 17: Estudo realizado por NG em uma malha de 5x5m, com alturas variadas de blocos (esquerda) e alturas semelhantes de blocos (direita)	47
Figura 18: Visão detalhada do algoritmo proposto “Sol Diva”	50
Figura 19: Visão detalhada do algoritmo proposto “mapa solar Diva”	51
Figura 20: Visão detalhada do algoritmo proposto “Projeção edificação”	52
Figura 21: Visão detalhada do algoritmo proposto “Gabarito edificação”	52
Figura 22: Visão detalhada do algoritmo proposto “Localização edificação no terreno”	52
Figura 23: Visão detalhada do algoritmo proposto “Novo empreendimento”	53
Figura 24: Visão detalhada do algoritmo “filtro recuo” e ângulo da edificação em relação ao lote.....	53
Figura 25: Visão detalhada do otimizador algoritmo genético <i>Galapagos</i>	54
Figura 26: Visão geral do algoritmo proposto e seus blocos algorítmicos, desenvolvidos no programa <i>Grasshopper</i> ®	55
Figura 27: Levantamento do percentual disponível de cobertura em empreendimentos comerciais em quarteirão da Vila Olímpia – São Paulo	57
Figura 28: Bairro Belenzinho situado na cidade de São Paulo.....	59
Figura 29: Levantamento tridimensional com a morfologia urbana atual da área de estudo	60
Figura 30: Parcelamento, uso e ocupação do solo no perímetro de estudo	61
Figura 31: Ruas e avenidas que configuram o perímetro de estudo	63
Figura 32: Uso e ocupação do solo da área de estudo.....	64
Figura 33: Lotes selecionados para o cenário 2 com potencial de transformação do uso e ocupação do solo em curto prazo	65
Figura 34: Lotes selecionados para o cenário 3 com potencial de transformação do uso e ocupação do solo em médio prazo	66
Figura 35: Levantamento tridimensional com a morfologia urbana atual da área de estudo do cenário 3	66
Figura 36: Mapa ilustrativo da simulação da incidência da radiação solar no topo das edificações da área de estudo, com a morfologia urbana atual	70

Figura 37: Cenário 2 – Lotes com intervenção – área de estudo bairro Belenzinho.....	71
Figura 38: Cenário 2 – Figura comparativa da incidência de radiação solar no lote 1 e na vizinhança imediata: morfologia urbana atual e intervenção morfológica simuladas pelo <i>Galapagos</i>	76
Figura 39: Cenário 2 – Figura comparativa da incidência de radiação solar nos lotes 2, 3 e na vizinhança imediata: morfologia urbana atual e intervenção morfológica simuladas pelo <i>Galapagos</i>	76
Figura 40: Cenário 2 – Figura comparativa da incidência de radiação solar nos lotes 4, 5 e na vizinhança imediata: morfologia urbana atual e intervenção morfológica simuladas pelo <i>Galapagos</i>	77
Figura 41: Cenário 2 – Figura comparativa da incidência de radiação solar nos lotes 6, 7 e na vizinhança imediata: morfologia urbana atual e intervenção morfológica simuladas pelo <i>Galapagos</i>	77
Figura 42: Cenário 2 – Figura comparativa da incidência de radiação solar nos lotes 8, 9, 10 e na vizinhança imediata: morfologia urbana atual e intervenção morfológica simuladas pelo <i>Galapagos</i>	78
Figura 43: Cenário 2 – Figura comparativa da incidência de radiação solar no lote 11 e na vizinhança imediata: morfologia urbana atual e intervenção morfológica simuladas pelo <i>Galapagos</i>	78
Figura 44: Cenário 2 – Figura comparativa da incidência de radiação solar no lote 12 e na vizinhança imediata: morfologia urbana atual e intervenção morfológica simuladas pelo <i>Galapagos</i>	79
Figura 45: Cenário 2 – Figura comparativa da incidência de radiação solar no lote 13 e na vizinhança imediata: morfologia urbana atual e intervenção morfológica simuladas pelo <i>Galapagos</i>	79
Figura 46: Cenário 2 – Figura comparativa da incidência de radiação solar no lote 14 e na vizinhança imediata: morfologia urbana atual e intervenção morfológica simuladas pelo <i>Galapagos</i>	80
Figura 47: Cenário 2 – Comparativo entre radiação solar no lote 15 e na vizinhança imediata: morfologia urbana atual e intervenção morfológica <i>Galapagos</i>	80
Figura 48: Cenário 2 – Comparativo de radiação solar entre lotes 16, 17, 18 e vizinhança imediata: morfologia urbana atual e intervenção morfológica <i>Galapagos</i>	81
Figura 49: Cenário 2 – Gráfico comparativo de incremento das melhores respostas dos ganhos de radiação solar incidente por m ² e por radiação solar incidente total, nos dezoito lotes analisados através das simulações da variação isolada dos parâmetros urbanísticos	86
Figura 50: Cenário 2 – Gráfico comparativo de incremento das melhores respostas dos ganhos de radiação solar incidente por radiação solar incidente total, nos dezoito lotes analisados, por meio das simulações simultânea com o <i>Galapagos</i>	87
Figura 51: Cenário 2 – Comparativo entre diferentes tipos de forma urbana e suas respectivas relações com a maximização energética fotovoltaica na cobertura das edificações, considerando um recorte da área de estudo	88
Figura 52: Cenário 2 – Comparativo tridimensional entre morfologia urbana atual frente ao cenário evolutivo <i>Galapagos</i>	89
Figura 53: Lotes analisados no cenário 3 – área de estudo: bairro Belenzinho.....	91
Figura 54: Cenário 3 – Figura comparativa da incidência de radiação solar nos lotes 1 a 11: morfologia urbana atual e intervenção morfológica simulada pelo <i>Galapagos</i>	95
Figura 55: Cenário 3 – Gráfico comparativo de incremento das melhores respostas dos ganhos de radiação solar incidente por m ² e por radiação solar incidente total, nos onze lotes analisados das simulações da variação isolada dos parâmetros urbanísticos	99

Figura 56: Cenário 3 – Gráfico comparativo entre simulações <i>Galapagos</i> para C.A e T.O., nos onze lotes analisados	99
Figura 57: Cenário 3 – Comparativo entre diferentes tipos de forma urbana e suas respectivas relações com a maximização energética fotovoltaica na cobertura das edificações	100
Figura 58: Cenário 3 – Comparativo tridimensional entre morfologia urbana atual frente ao cenário evolutivo <i>Galapagos</i>	101
Figura 59: Apresentação sugestões trabalhos futuros	107

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Composição Setorial do Consumo de Eletricidade no Brasil, em tep (toneladas equivalentes de petróleo), ano base 2016	24
Tabela 2: Tabela comparativa RN nº 482 e nº 687	30
Tabela 3: Relação entre possíveis ferramentas à serem utilizadas na pesquisa	48
Tabela 4: Descrição das zonas urbanas no perímetro de estudo	62
Tabela 5: Cenário 2 – Tabela indicativa com valores de incidência do nível de radiação solar por m ² , cálculo da radiação solar incidente total e cálculo do número de unidades habitacionais (lotes 1 a 6)	72
Tabela 6: Cenário 2 – Tabela indicativa com valores de incidência do nível de radiação solar por m ² , cálculo da radiação solar incidente total e cálculo do número de unidades habitacionais (lotes 7 a 12)	73
Tabela 7: Cenário 2 – Tabela indicativa com valores de incidência do nível de radiação solar por m ² , cálculo da radiação solar incidente total e cálculo do número de unidades habitacionais (lotes 13 a 18)	74
Tabela 8: Cenário 2 – Tabela indicativa com cálculo de demanda de eletricidade (lotes 1 a 6)	82
Tabela 9: Cenário 2 –Tabela indicativa com cálculo de demanda de eletricidade (lotes 7 a 12)	83
Tabela 10: Cenário 2 –Tabela indicativa com cálculo de demanda de eletricidade (lotes 13 a 18)	84
Tabela 11: Cenário 2 – Resumo da análise dos resultados obtidos	90
Tabela 12: Cenário 3 – Tabela indicativa com valores de incidência do nível de radiação solar por m ² , cálculo da radiação solar incidente total e cálculo do número de unidades habitacionais (lotes 1 a 6)	92
Tabela 13: Cenário 3 – Tabela indicativa com valores de incidência do nível de radiação solar por m ² , cálculo da radiação solar incidente total e cálculo do número de unidades habitacionais (lotes 7 a 11)	93
Tabela 14: Cenário 3 – Tabela indicativa com cálculo de demanda de eletricidade (lotes 1 a 6)	96
Tabela 15: Cenário 3 –Tabela indicativa com cálculo de demanda de eletricidade (lotes 7 a 11)	97
Tabela 16: Cenário 3 – Resumo da análise dos resultados obtidos	102
Tabela 17: Resumo dos resultados obtidos nos cenários 1, 2 e 3	104

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1: Coeficiente de aproveitamento	39
Equação 2: Taxa de ocupação	39
Equação 3: Radiação solar incidente total por ano	56

Equação 4: Geração energia fotovoltaica (por painel)	57
Equação 5: Número mínimo de unidades habitacionais	58
Equação 6: Área máxima das unidades habitacionais.....	58

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BEN	Balanco Energético Nacional
C.A.	Coeficiente de aproveitamento
CFD	Dinâmica dos fluidos computacional
EETU	Eixos de Estruturação da Transformação Urbana
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
GIS	Sistema de Informações Geográficas
GW	Gigawatts
ha	Hectare
kV	quilovolt
kWh	Quilowatt-hora
MW	Megawatt
RN	Resolução normativa
SFCR	Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica
T.O.	Taxa de ocupação do solo
top	Toneladas equivalentes de petróleo
TWh	Terawatt-hora
ZC-ZEIS	Zona Central-Zona Especial de Interesse Social
ZEIS	Zonas especiais de interesse social
ZEU	Zona Eixo de Estruturação Urbana
ZEUP	Zona Eixo de Estruturação Urbana Prevista

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	14
<i>Problemática</i>	16
OBJETIVOS	17
METODOLOGIA DE PESQUISA	18
CAPÍTULO 1: SISTEMAS DE GERAÇÃO DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA E GERAÇÃO DISTRIBUÍDA DE ENERGIA	20
1.1. COMPOSIÇÃO DA MATRIZ ELÉTRICA MUNDIAL	20
1.2. COMPOSIÇÃO DA MATRIZ ELÉTRICA BRASILEIRA	21
1.3. ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA	24
1.4. GERAÇÃO DISTRIBUÍDA DE ENERGIA	27
CAPÍTULO 2: MORFOLOGIA URBANA	35
2.1. DENSIDADE URBANA	37
2.2. USO MISTO	44
2.3. DENSIDADE URBANA E A DISPONIBILIDADE DE RADIAÇÃO SOLAR	45
CAPÍTULO 3: MODELAGEM DA FORMA URBANA COM RELAÇÃO À INCIDÊNCIA DA RADIAÇÃO SOLAR, NA MICROESCALA URBANA	46
3.1. ANÁLISE E SELEÇÃO DE FERRAMENTAS	47
CAPÍTULO 4: FORMA URBANA PARA A MAXIMIZAÇÃO DE GERAÇÃO DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA: PROCEDIMENTOS PARA MODELAGEM DOS PARÂMETROS UTILIZANDO AS FERRAMENTAS SELECIONADAS E REALIZAÇÃO DOS CÁLCULOS	50
4.1. PRIMEIRA ETAPA: Aplicação do plug-in Diva	50
4.2. SEGUNDA ETAPA: Simulação dos níveis de radiação solar na cobertura das edificações da área de estudo, na configuração urbana atual	50
4.3. TERCEIRA ETAPA: Simulação da variação isolada do coeficiente de aproveitamento e da taxa de ocupação do solo	51
4.4. QUARTA ETAPA: Aplicação do algoritmo genético Galapagos e visão geral do algoritmo grasshopper®	53
4.5. APRESENTAÇÃO DOS CÁLCULOS DA PESQUISA	55
CAPÍTULO 5: ESTUDO DE CASO: O BAIRRO BELENZINHO, EM SÃO PAULO	59
CAPÍTULO 6: AVALIAÇÃO INTEGRADA DE CENÁRIOS MORFOLÓGICOS URBANOS E ACESSO AO SOL, NA ÁREA DE ESTUDO DO BAIRRO BELENZINHO	67
6.1 PREMISSAS GERAIS ADOTADAS	67
6.2 CONFIGURAÇÃO E ANÁLISE DO CENÁRIO 1: ESTRUTURA MORFOLÓGICA ATUAL	69
6.3 CONFIGURAÇÃO E ANÁLISE DO CENÁRIO 2: Evolução morfológica urbana conforme limites impostos pela legislação urbanística vigente e ocupação de grandes lotes vazios ou subutilizados	71

6.3.1. Cenário 2: Análise dos resultados	85
6.4 CONFIGURAÇÃO E ANÁLISE DO CENÁRIO 3: <i>Evolução morfológica urbana conforme limites impostos pela legislação urbanística vigente, com adensamento e verticalização de tecido urbano baixo selecionado</i>	90
6.4.1. Cenário 3: Análise dos resultados	98
CONCLUSÕES DA PESQUISA	103
SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	106
REFERÊNCIAS	108
GLOSSÁRIO	114
APÊNDICE A – CÁLCULOS	118

INTRODUÇÃO

O sistema elétrico brasileiro conta, predominantemente, com grandes unidades centralizadas de geração de energia elétrica, cuja base é hidrotérmica. Nos últimos anos, a construção de novas usinas hidroelétricas tem sido dificultada, por diversos motivos, a exemplo da distância entre as unidades de geração de energia e os centros de consumo e seus impactos socioambientais (ABBUD; TANCREDI, 2010; FEARNSSIDE, 2006; 1999). Por tais razões, a geração de energia descentralizada¹ – ou seja, nos próprios centros urbanos, próxima aos consumidores – torna-se atraente, de forma a crescer mundialmente como tópico de pesquisa (SARRALDE *et al.*, 2015).

Em 2012, o ambiente formal institucional brasileiro permitiu a instalação e a operação de sistemas de geração distribuída, via resolução normativa (RN) da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), a qual permite que os centros urbanos, grandes núcleos consumidores de energia elétrica, tornem-se geradores dessa energia, principalmente através de Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica (SFCR), formando, assim, sistemas descentralizados de geração de energia elétrica (BRASIL, 2015; 2012).

Entretanto, os centros urbanos brasileiros não foram planejados para gerarem energia solar fotovoltaica, o que prescinde da avaliação e da adequação de parâmetros que orientem a definição, sobretudo, da morfologia urbana², ou o estudo da forma urbana, uma combinação de diversos elementos que formam o reparcelamento do solo, o traçado viário, as áreas ocupadas, as áreas livres, as áreas com vegetação ou as áreas com pavimentação (FUTCHER; MILLS, 2013; MARINS; ROMÉRO, 2013; MARTINS *et al.*, 2016; MARTINS; ADOLPE; BASTOS, 2014). A morfologia urbana está presente nas principais políticas urbanas, principalmente na lei de parcelamento, uso e ocupação do solo (PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO, 2016).

A morfologia urbana – para maximizar os níveis de radiação solar, os quais influenciam nas condições de insolação – depende, em grande parte, da densidade urbana³ (SCALCO; PEREIRA; RIGATTI, 2010). Esta, por sua vez, estabelece uma relação entre o número de pessoas por superfície ocupada e detém uma relação com a densidade construída⁴, que se refere à área total construída, em relação à área de solo considerada (HARGREAVES *et al.*,

¹ Ver Glossário.

² Ver Glossário.

³ Ver Glossário.

⁴ Ver Glossário.

2017; HUI, 2001; NG *et al.*, 2011). Na presente pesquisa, a densidade construída é analisada pelo coeficiente de aproveitamento⁵ (C.A.) e pela taxa de ocupação do solo⁶ (T.O.). O coeficiente de aproveitamento define a área construída total, pois é um multiplicador que, aplicado à área do lote e dividido pela área do pavimento-tipo (área computável), resulta na quantidade de pavimentos da edificação. Já a taxa de ocupação do solo é a divisão da área de projeção da edificação e a área do lote (MUNIZ-GÄAL *et al.*, 2018). As regulações urbanísticas definem, em geral, taxa de ocupação máxima e coeficientes de aproveitamento mínimos e máximos para cada lote, em função da zona urbana.

Desse modo, a densidade construída condiciona o acesso e a intensidade da radiação solar no ambiente urbano, devido ao sombreamento causado pelas edificações vizinhas. A compreensão do acesso da radiação solar ao meio urbano e das condições morfológicas que proporcionam esse acesso, facilita futuros planejamentos, de forma que a disponibilidade de radiação solar se altera entre os locais de estudo (CHATZIPOULKA; COMPAGNON; NIKOLOPOULOU, 2016). Portanto, a forma urbana possui papel crucial nos estudos de geração de energia solar fotovoltaica em centros urbanos.

Para a presente pesquisa foi concebida uma programação paramétrica envolvendo a representação dinâmica da morfologia urbana e da simulação de radiação solar no estudo de caso, o bairro Belenzinho, localizado no município de São Paulo. As ferramentas de modelagem selecionadas para apoiar a análise dos aspectos morfológicos urbanos condicionantes da geração de energia solar fotovoltaica foram o programa de desenho tridimensional *Rhinoceros*[®] (ROBERT MCNEEL & ASSOCIATES, 2012a), associado aos *plug-ins* *Grasshopper*[®] (ROBERT MCNEEL & ASSOCIATES, 2012b) e *Diva*[®] (SOLEMMA, 2016) e ao *plug-in* algoritmo genético *Galapagos*.

As ferramentas foram selecionadas com base nas seguintes justificativas:

- O *Rhinoceros*[®] possui uma capacidade de interoperabilidade⁷ ampliada através de *plug-ins*, o que o torna flexível com diversos tipos de projetos e problemas (ANTON; TĂNASE, 2016; GAVIRIA; PEREIRA; MIZGIER, 2013; SANTOS; AUER; SOUZA, 2017);

⁵ Ver Glossário.

⁶ Ver Glossário.

⁷ Ver Glossário.

- O *Grasshopper*[®] é um editor algorítmico visual que viabiliza a programação com a representação dinâmica dos elementos urbanos (ANTON; TĂNASE, 2016; GAVIRIA; PEREIRA; MIZGIER, 2013; SANTOS; AUER; SOUZA, 2017);
- O *Diva*[®] é um simulador energético que permite que a análise energética seja incorporada à construção do projeto paramétrico, sendo assim, a análise energética contribui ativamente com o processo de análise morfológica (ANTON; TĂNASE, 2016; GAVIRIA; PEREIRA; MIZGIER, 2013);
- O *Galapagos* é um algoritmo genético⁸ que busca soluções que resolvam simultanea e satisfatoriamente os diferentes objetivos de um problema, por meio de uma combinação de algoritmos (MARTINO; CELANI, 2014).

O estudo de caso abrange o bairro Belenzinho, situado na zona leste da capital paulista: Belenzinho foi escolhido por compor área de influência da Estação Belém do Metrô, que integra os “Eixos de Estruturação da Transformação Urbana” (EETU), zona de incentivo ao adensamento e à verticalização, segundo o Plano Diretor de São Paulo. A escala de trabalho é a de unidade de vizinhança⁹, pois possibilita realizar um estudo de mudanças na forma urbana e avaliar as condições de aproveitamento do potencial fotovoltaico. Foram considerados três cenários evolutivos urbanos, conforme detalhado no estudo de caso.

Problemática

O presente estudo considera o seguinte pressuposto: a morfologia urbana, em escala de vizinhança, condiciona o potencial de geração de energia solar fotovoltaica em um ambiente urbano.

Estudos mostram que a morfologia urbana, principalmente no que diz respeito à densidade construída, condiciona a radiação solar na cobertura das edificações e, consequentemente, pode maximizar ou minimizar o potencial de geração de energia solar fotovoltaica em um ambiente urbano. Não há um padrão morfológico que possa garantir o acesso a um determinado nível de radiação solar e consequentemente a otimização da geração de energia solar fotovoltaica em assentamento urbano; tal otimização depende de um estudo morfológico detalhado caso a caso, que considere o sombreamento do entorno da área estudada.

⁸ Ver Glossário.

⁹ Ver Glossário.

OBJETIVOS

O principal objetivo desta pesquisa é avaliar os parâmetros urbanísticos que influenciam a forma urbana e, conseqüentemente, maximizam a geração de energia fotovoltaica na cobertura das edificações, na escala de unidade de vizinhança, no município de São Paulo, tomando por estudo de caso o bairro Belenzinho, em processo de adensamento e verticalização. Entre os objetivos específicos, estão:

- Analisar o ambiente regulatório brasileiro para aplicações fotovoltaicas distribuídas (aquelas dedicadas à geração de energia elétrica com até 5 MW de potência instalada);
- Selecionar e aplicar ferramentas de modelagem urbana associadas a ferramentas de simulação de radiação solar no município de São Paulo, tomando por estudo de caso o bairro Belenzinho;
- Realizar a modelagem dos parâmetros urbanísticos, especificados pela lei de parcelamento, uso e ocupação do solo do município de São Paulo, de 2016, analisando o potencial de aproveitamento da energia solar fotovoltaica na cobertura das edificações, em sistemas com capacidade de até 5 MW de potência instalada, na escala de vizinhança, com base no caso de Belenzinho.

METODOLOGIA DE PESQUISA

A presente pesquisa utilizou a abordagem quantitativa de metodologia de pesquisa, associando-se revisão bibliográfica, estudo de caso e simulação gráfica.

Inicialmente, procedeu-se o estudo bibliográfico de conceitos aplicáveis à análise dos condicionantes morfológicos urbanos para melhor aproveitamento da energia solar fotovoltaica, na escala de vizinhança urbana. A análise bibliográfica foi dividida em duas etapas: a primeira engloba a análise dos sistemas de geração de energia solar fotovoltaica; a segunda etapa engloba a análise dos estudos da morfologia urbana. Tais análises correspondem, respectivamente, aos capítulos 1 e 2 deste trabalho.

Para a realização da simulação dos parâmetros da forma urbana e da maximização da radiação solar na área de estudo, foi feita revisão das ferramentas aplicáveis à modelagem e à análise dos condicionantes morfológicos urbanos para aproveitamento da energia solar fotovoltaica, detalhada nos capítulos 3 e 4. Depois, definiu-se a área de estudo de caso, a qual se encontra na escala de vizinhança, no bairro Belenzinho (em São Paulo), o qual passa por amplo processo de transformação urbana, com alterações do uso do solo mediante adensamento populacional construído e verticalização, conforme detalhado no capítulo 5.

Com a ferramenta de modelagem e a área de estudo definidos, foi realizada a simulação morfológica energética em três cenários morfológicos da área de estudo, detalhados no capítulo 6 (referente ao estudo de caso no bairro Belenzinho). O cenário 1 apresenta a morfologia urbana atual da área de estudo, o cenário 2 apresenta lotes dispersos com potencial de transformação em curto prazo e o cenário 3 apresenta lotes concentrados com potencial de transformação em curto prazo. O detalhamento dos cenários encontra-se no capítulo 5.

Assim, a metodologia adotada para desenvolvimento da pesquisa pode ser organizada em três etapas, sendo elas etapa preparatória, etapa de simulações e etapa conclusiva, conforme esquema do processo metodológico ilustrado na figura 1.

Figura 1: Esquema do processo metodológico dividido em três etapas

Fonte: Elaborado pela autora

CAPÍTULO 1: SISTEMAS DE GERAÇÃO DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA E GERAÇÃO DISTRIBUÍDA DE ENERGIA

Em 1807, Thomas Young (1773- 1829) definiu a energia como a capacidade de produzir trabalho, sendo que trabalho é o resultado da força sobre o deslocamento de um corpo. Enquanto isso, o trabalho, e consequentemente a energia, não podem ser armazenados (GOLDEMBERG; LUCON, 2008).

A energia pode ser dividida em sete formas: energia cinética é o trabalho resultante das ondas e do vento; energia gravitacional é o trabalho resultante das quedas d'água; energia elétrica é o trabalho resultante de turbinas e baterias; energia química é o trabalho resultante do processo de combustão; energia radiante é o trabalho resultante da luz solar; energia nuclear é o trabalho resultante da fissão de átomos de urânio ou fusão de núcleos de hidrogênio; e energia térmica é o trabalho resultante do calor que flui entre dois corpos devido à diferença de temperatura (GOLDEMBERG; LUCON, 2008).

De acordo com a primeira lei da termodinâmica, a energia é sempre conservada, de modo que não pode ser destruída nem criada; porém, as formas de energia podem ser transformadas de uma para outra (GOLDEMBERG, 2010). Por sua vez, com base na segunda lei da termodinâmica, ao transformar uma forma de energia em outra, sempre há perdas: não podemos utilizar todas as formas de energia com a mesma eficiência de conversão (GOLDEMBERG; LUCON, 2008).

A compreensão do trabalho e das leis da termodinâmica é essencial para entender que algumas fontes de energia são mais utilizadas que outras. Não é preciso utilizar energia constantemente: existem picos de demanda durante horários do dia e épocas do ano, de acordo com a necessidade humana. Sendo assim, fontes de energia armazenáveis, como as termoelétricas (movidas a combustíveis fósseis, biomassa ou fissão nuclear) e hidroelétricas (com reservatório) destacam-se por serem mais utilizadas do que fontes de energia não armazenáveis, como solar e eólica.

1.1. COMPOSIÇÃO DA MATRIZ ELÉTRICA MUNDIAL

As principais fontes de energia elétrica utilizadas no mundo, na década de 2010, eram provenientes de combustíveis fósseis, não renováveis, e foram utilizadas em usinas térmicas (SOLOMON; KRISHNA, 2011). A questão política contribui fortemente para o cenário

favorável aos combustíveis fósseis, considerando a existência de monopólios¹⁰ na extração de petróleo, poucos países controlam o valor do barril de acordo com o mercado e seus interesses (WEO, 2015). A figura 2 ilustra a participação percentual por fonte de energia na geração de energia elétrica consumida no mundo em 2015, em que 40,80% dos 23.816 TWh da geração mundial de energia elétrica são provenientes de carvão, seguidos por 21,60% de gás natural.

Figura 2: Participação percentual por fonte de energia na geração de eletricidade em 2015

Fonte: Elaborado pela autora com dados obtidos em *Key World Energy Statistics* (IEA - INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2016, 24p)

A análise da figura 2 indica que as principais fontes de geração de energia elétrica, em âmbito mundial, em 2015, eram fontes armazenáveis. Leva-se em consideração que há a necessidade do uso de baterias ou da utilização de sistemas de geração distribuída de energia quando a fonte não é armazenável, o que será detalhado no item 1.4.

1.2. COMPOSIÇÃO DA MATRIZ ELÉTRICA BRASILEIRA

O Brasil ocupou, em 2016, a oitava posição mundial em geração de energia elétrica, com um total produzido de 578,89 TWh (IEA - INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2016; MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2017).

O sistema elétrico brasileiro conta, predominantemente, com grandes usinas de geração centralizada e extensas redes de transmissão e distribuição de energia. Esse sistema, composto por mais de dois terços de grandes usinas hidroelétricas, é baseado em uma estrutura cuja

¹⁰ “Uma empresa detém um monopólio quando ela é a única comerciante de seu produto e esse produto não possui produtos competidores. A causa fundamental dos monopólios está nas barreiras de entrada, ou seja, um monopólio se mantém como único vendedor de seu mercado porque outras empresas não podem entrar no mercado para competir com a empresa monopolista. As barreiras de entrada possuem três origens principais: recursos, regulamentação do governo e processo de produção” (MANKIW; TAYLOR, 2012, 300p.).

expansão tem sido cada vez mais dificultada, por motivos como a distância entre as unidades geradoras e os centros de consumo, além de impactos socioambientais causados pelos grandes projetos das usinas hidroelétricas (FEARNSIDE, 2006; 1999).

No Brasil, a energia elétrica é gerada e transmitida através do Sistema Interligado Nacional (SIN), baseado em um sistema gerador hidrotérmico predominantemente formado por usinas hidroelétricas, com múltiplos operadores das regiões Sul, Sudeste, Centro-Oeste, Nordeste e parte da região Norte, conforme ilustra a figura 3 (ONS, 2017).

Figura 3: Mapa do sistema de transmissão de energia elétrica em 2017, que compõe o Sistema Interligado Nacional (SIN)

Fonte: (ONS, 2017)

Por conta da ampla base hidroelétrica, o sistema brasileiro de geração de energia elétrica tende a sofrer instabilidades. Até 2001, o sistema hidroelétrico era predominante no Brasil; mas, com a crise de fornecimento de energia elétrica daquele ano, decorrente da crise hídrica que causou instabilidades nos níveis da maioria das represas do país, concluiu-se que existia a necessidade de sistemas complementares. Nos anos seguintes, o governo criou medidas para implantação de usinas termoeletricas para complementar a fonte hidroelétrica, além de ampliar o sistema de transmissão de energia elétrica (ABBUD; TANCREDI, 2010).

A matriz elétrica brasileira mudou bastante em relação a 2001. Atualmente, existem algumas fontes complementares à hidroelétrica; porém, esta continua sendo a principal fonte de geração de energia elétrica brasileira, e a termoeletrica, seu principal complemento. A figura 4 apresenta a oferta interna de energia elétrica no Brasil, por fonte, referente ao ano 2016.

Figura 4: Oferta interna de energia elétrica no Brasil, por fonte, ano base 2016

Fonte: Elaborado pela autora com dados obtidos em Ministério de Minas e Energia (2017) 16p.

Em 2016, a potência instalada para geração eólica no país expandiu-se 54%, em relação à 2015 (3,5%) (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2017). O crescimento desta fonte de energia no Brasil, ano após ano, tem forte destaque. A fonte eólica se mostrou favorável quando usada de forma complementar à fonte hidroelétrica no país, sendo que, em épocas de escassez hídrica, ocorre intensificação dos ventos, o que favorece a geração de energia eólica (FALCETTA, 2015).

Quando analisado o consumo final de energia elétrica, destacam-se os setores industriais, residenciais e comerciais, conforme indica a tabela 1.

Tabela 1: Composição Setorial do Consumo de Eletricidade no Brasil, em tep (toneladas equivalentes de petróleo), ano base 2016

Composição Setorial do Consumo de Eletricidade em 2016	
Setores	%
Consumo Final (10 ³ tep)	44.705
Setor energético	5,7%
Residencial	25,6%
Comercial	17,2%
Público	8,3%
Agropecuário	5,3%
Transportes	0,4%
Industrial	37,6%
Total	100%

Fonte: Elaborado pela autora com dados obtidos em Ministério de Minas e Energia (2017) 34p.

1.3. ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

Quando a energia solar fotovoltaica começou a ser utilizada, era exclusivamente no modo *off grid*¹¹, ou seja, os seus sistemas de geração não eram conectados à rede elétrica, necessitando, assim, de baterias para seu funcionamento. Com o modelo *off grid*, a utilização de baterias encarece o sistema, o que fez com que países como Japão, Alemanha e Estados Unidos dominassem 85% do mercado de energia fotovoltaica até 2005, por conta de incentivos econômicos que davam ao uso desse tipo de energia (ZILLES *et al.*, 2012).

A partir do final da década de 1990, a energia solar fotovoltaica passou a ser utilizada também no sistema *on grid*¹², ou seja, em sistemas conectados à rede elétrica, dispensando o uso de baterias. Logo, a energia fotovoltaica tornou-se economicamente viável e está crescendo em diversos países, especialmente na China (ZILLES *et al.*, 2012).

Nesse contexto, os Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica (SFCR) passaram a ser cada vez mais expressivos em relação aos sistemas isolados, e, em 2006, mais de 90% dos sistemas fotovoltaicos mundiais já eram conectados com a rede elétrica (ZILLES *et al.*, 2012). A principal fonte da geração distribuída de energia elétrica é a energia solar fotovoltaica, conforme ilustra a figura 5. Portanto, os SFCR possuem cada vez mais importância quando o assunto é sistemas descentralizados de energia elétrica.

¹¹ Ver Glossário.

¹² Ver Glossário.

Figura 5: Número de conexões por fonte na geração distribuída de energia elétrica no Brasil, em 2016

Fonte: Elaborado pela autora com dados obtidos em ANEEL (2017)

A eficiência dos sistemas de geração solar depende dos índices de irradiação solar, os quais determinam quantos quilowatt por hora são possíveis de se obter com a incidência de luz solar em um metro quadrado durante um dia.

Os sistemas de geração de energia fotovoltaica configuraram, em 2013, 139 GW de potência instalada em escala global. O Brasil, embora possua tarifas competitivas e maiores índices de insolação, se comparado com países líderes do setor, detém ainda uma baixa capacidade instalada em sistemas fotovoltaicos (ZILLES *et al.*, 2012). A baixa capacidade instalada de SFCR no Brasil se dá pelo fato de o país possuir uma matriz energética cuja principal fonte é renovável e relativamente barata, a hidroelétrica – este não é o caso de outros países que investem em energia fotovoltaica. Apesar disso, a fonte hidroelétrica necessita de fontes complementares, conforme tratado no capítulo 1.2. O Brasil, por estar localizado na região tropical, apresenta um bom nível de radiação solar ao longo do ano inteiro. A radiação solar média anual (valores diários) sobre uma superfície horizontal é 5,5 kWh/m² no Norte, 5,7 kWh/m² no Nordeste, 5,6 kWh/m² no Centro-Oeste, 5,5 kWh/m² no Sudeste e 5,0 kWh/m² no Sul (NOGUEIRA; COSTA, 2012).). A figura 6 apresenta o mapa de irradiação diária no país, em média anual.

Figura 6: Mapa da média anual da irradiação solar, no Brasil

Fonte: Atlas Brasileiro de Energia Solar 2017 (PEREIRA *et al.*, 2017. p.36)

Os painéis fotovoltaicos possuem vida útil média de 25 anos e possuem manutenção mínima, que inclui basicamente sua limpeza (ZILLES *et al.*, 2012). Em termos econômicos, em 2015, o *payback* médio brasileiro dos SFCR era em torno de 11,3 anos e, no caso de São Paulo, em torno de 14 anos (NAKABAYASHI, 2015).

O mercado de fabricação de painéis fotovoltaicos é liderado pela China. A liderança chinesa do mercado de painéis é resultado de um movimento recente de empresas que iniciaram seus processos de produção pelas etapas finais da cadeia fotovoltaica, nas quais as escalas de produção são menores e o mercado é automatizado. A fase inicial desse movimento contou com a importação de células ou de silício purificado; hoje, a China já dispõe de fabricação própria desde o silício purificado até a fabricação de células e painéis fotovoltaicos (FUCHS, 2013).

A concentração de grande parte da produção dos painéis fotovoltaicos em um único país traz consequências econômicas no que tange ao uso de energia fotovoltaica mundial, já que um único país domina o mercado de painéis fotovoltaicos, criando-se assim um monopólio. Este, por sua vez, determina o preço do produto, de forma que não há competição no mercado. Assim, o mercado de geração de energia solar fotovoltaica pode ser afetado, principalmente por países que não podem pagar pelo preço do produto ofertado pelo monopólio (MANKIW,

2012). Além das consequências econômicas, a concentração da produção de painéis fotovoltaicos em um único país traz consequências ambientais, visto que a emissão de gases nocivos presentes na fabricação das células fotovoltaicas é concentrada em um único país – mesmo que tais componentes sejam utilizados na geração de energia por todo o planeta.

1.4. GERAÇÃO DISTRIBUÍDA DE ENERGIA

O ambiente institucional formal brasileiro permite que consumidores se tornem geradores por meio de um sistema de geração distribuída. Dessa forma, os centros urbanos se tornaram lugares atrativos também para a geração de energia, principalmente via SFCR. A Geração Distribuída (GD) de energia elétrica abrange sistemas de geração *on-site*, ou seja, que produzem e distribuem energia localmente, conectados à rede, da qual se poderá importar ou exportar energia elétrica (WOLFE, 2008).

O sistema utilizado para tarifação de SFCR no Brasil é o *net metering*. Por meio dele, o medidor eletrônico registra a energia que a edificação consome da rede pública e a energia que a edificação exporta para a rede pública. Assim, no final do mês, o consumidor paga a diferença entre o que consumiu e o que gerou (VILLALVA; GAZOLI, 2012). A figura 7 ilustra o sistema de tarifação *net metering*.

Figura 7: Sistema de tarifação *net metering*, utilizado no BRASIL para SFCR

Fonte: VILLALVA; GAZOLI, 2012 (157p.)

Existe outro sistema de tarifação de SFCR, denominado *feed in*, muito utilizado na Europa. Ele é semelhante ao sistema *net metering*, mas possui dois medidores: no *feed in*, o consumidor é premiado pela instalação de um sistema de energia fotovoltaica, recebendo o pagamento pela energia que seu sistema exporta. Portanto, não é vantajoso o consumidor

utilizar a energia gerada antes de exportar (VILLALVA; GAZOLI, 2012). A figura 8 ilustra o sistema de tarifação *feed in*.

Figura 8: Sistema de tarifação *feed in*, utilizado na Europa para SFCR

Fonte: VILLALVA; GAZOLI, 2012 (158p.)

Para que houvesse a possibilidade da GD ser uma opção para a geração de eletricidade no Brasil, incluindo mini e microgeração distribuída conectada à rede elétrica, uma série de regulamentações se fizeram necessárias. A ANEEL regulamentou, por meio da RN nº 482, de 17 de abril de 2012, condições para operação de mini e microgeração distribuída no Brasil. Em 2015, a ANEEL revisou a RN nº 482, de 2012, via RN nº 687, de 24 de novembro 2015.

A RN nº 482, de 2012, determinava que a capacidade instalada para microgeração distribuída deveria ser menor ou igual a 100 kW, utilizando-se as fontes hidroelétrica, solar, eólica, de biomassa ou de cogeração qualificada. Já a capacidade instalada para minigeração distribuída deveria ser maior que 100 kW e menor ou igual a 1 MW, e as fontes deveriam ser hidroelétrica, solar, eólica, de biomassa ou de cogeração qualificada¹³ (BRASIL, 2012). Já a RN nº 687, de 2015, determinou a capacidade instalada para microgeração distribuída menor ou igual a 75 kW e a fonte deve ser hidroelétrica, solar, eólica, de biomassa ou de cogeração qualificada. Já a capacidade instalada para minigeração distribuída deve ser maior que 75 kW e menor ou igual a 3 MW para hídrica ou 5 MW para demais fontes. A fonte deve ser hidroelétrica, solar, eólica, de biomassa ou de cogeração qualificada (BRASIL, 2015).

¹³ Cogeração Qualificada: Geradores de energia elétrica a gás natural que atendem os requisitos definidos em resolução normativa com aspectos de racionalidade energética.

Quanto ao sistema de compensação que trata os excedentes produzidos pelos micro e mini geradores, a RN nº 687 aumentou para sessenta meses o prazo de compensação dos excedentes por parte da distribuidora ao microgerador e ao minigerador, em comparação ao período de trinta e seis meses estabelecido pela RN nº 482. Também é explicitado na RN nº 687 o fato de serem gratuitos os empréstimos de energia, fato que garante que os excedentes cedidos à distribuidora por parte dos mini e micro produtores não possam gerar operações financeiras que subsidiem aplicações de juros a tal operação.

Quanto às regras desse sistema de compensação, a RN nº 482, assim como a RN nº 687, dispensa a assinatura de contratos, sendo suficiente um acordo operativo no caso de minigeradores e pelo relacionamento operacional para microgeradores. Também na RN nº 687 são definidos os conceitos de melhoria¹⁴ e reforço¹⁵. Houve a inclusão de algumas modalidades de geração na RN nº 687 em relação à RN nº 482, como os empreendimentos com múltiplas unidades consumidoras¹⁶, a geração compartilhada¹⁷ e o autoconsumo remoto¹⁸.

Quanto às obrigações, a RN nº 482 tratava de eventuais danos do sistema elétrico e responsabilizava tanto o micro como o minigerador pelos custos referentes aos sistemas de medição, onerava a distribuidora da manutenção e de eventuais adequações do sistema, tanto para mini como para microgeradores. Por sua vez, a RN nº 687 detalha as responsabilidades de maneira diferente entre mini e microgerador, cabendo agora ao segundo os custos de melhorias e eventuais adequações de seus sistemas, sendo a estes associados, também, os custos de medição de seus sistemas.

¹⁴ Melhoria: “Instalação, substituição ou reforma de equipamentos em instalações de distribuição existentes, ou a adequação destas instalações, visando manter a prestação de serviço adequado de energia elétrica” (BRASIL, 2015).

¹⁵ Reforço: “Instalação, substituição ou reforma de equipamentos em instalação de distribuição existentes, ou adequação destas instalações, para aumento de capacidade de distribuição, de vida útil ou para conexão de usuários” (BRASIL, 2015).

¹⁶ Empreendimento com múltiplas unidades consumidoras: “É caracterizado por um sistema de geração distribuída onde cada fração com seu uso individualizado constitua uma unidade de consumo distinta, de responsabilidade do empreendimento (ou condomínio). As unidades consumidoras devem estar dentro de uma mesma propriedade ou em propriedades contíguas. É proibido a utilização de vias públicas, passagens aéreas ou subterrâneas ou propriedades de terceiros que não componham o empreendimento de geração distribuída” (BRASIL, 2015).

¹⁷ Geração compartilhada: “É um consórcio ou uma cooperativa que possa gerar e distribuir energia elétrica, via geração distribuída e utilizar do sistema de compensação dentro de uma mesma área de concessão para um grupo de consumidores” (BRASIL, 2015).

¹⁸ Autoconsumo remoto: “É caracterizado por unidades consumidoras de um mesmo proprietário (pessoa física ou jurídica), incluindo matriz e filial, ou quando a unidade geradora está em local diferente da unidade consumidora, desde que em uma mesma área de concessão, toda a energia cedida poderá ser compensada” (BRASIL, 2015).

Também na RN nº 687 são atribuídos à distribuidora os custos de manutenção e adequação dos sistemas de minigeração e microgeração (com exceção de geração compartilhada), sendo ela a responsável técnica e financeira pelo sistema de medição de microgeração, e também pela coleta de dados das unidades consumidoras, tanto mini como microgeradores. A tabela 2 resume, de forma comparativa, os principais pontos que caracterizam a RN nº 687 e a RN nº 482.

Tabela 2: Tabela comparativa RN nº 482 e nº 687

	RN nº 482	RN nº 687
Microgeração distribuída	I. Quanto a fonte: Hidráulica, solar, eólica, biomassa e cogeração qualificada; II. Quanto a capacidade instalada: menor ou igual a 100 kW.	I. Quanto a fonte: Hidráulica, solar, eólica, biomassa e cogeração qualificada; II. Quanto a capacidade instalada: menor ou igual a 75 kW.
Minigeração distribuída	I. Quanto a fonte: Hidráulica, solar, eólica, biomassa e cogeração qualificada; II. Quanto a capacidade instalada: maior que 100 kW e menor ou igual a 1 MW.	I. Quanto a fonte: Hidráulica, solar, eólica, biomassa e cogeração qualificada; II. Quanto a capacidade instalada: maior que 75 kW e menor ou igual a 3 MW (para hídrica) ou 5 MW para demais fontes.
Sistema de Compensação	I. Sistema no qual a energia ativa gerada por unidade consumidora com micro ou mini geração distribuída compense o consumo de energia elétrica ativa.	I. Sistema no qual a energia ativa injetada por unidade consumidora com microgeração ou minigeração distribuída é cedida, por meio de empréstimo gratuito , à distribuidora local e posteriormente compensada com o consumo de energia elétrica ativa.
Regras	Podem aderir aos sistemas de compensação os consumidores responsáveis por unidade consumidora: I. Qualquer um pode aderir; II. Postos de horários no mesmo ciclo de faturamento; III. A energia pode ser distribuída para mais propriedades desde de que estejam no mesmo titular de geração; O prazo para compensação é de 36 meses. IV. O eventual saldo positivo de energia é dado em kWh por posto horário; V. Dispensa a assinatura de contratos para conexão da central geradora, tal contrato é substituído por acordo operativo no caso de minigeradores e pelo relacionamento operacional para microgeradores;	Podem aderir aos sistemas de compensação os consumidores responsáveis por unidade consumidora: I. Com microgeração ou minigeração distribuída; II. Integrante de empreendimento de múltiplas unidades consumidoras; III. Caracterizada como geração compartilhada; IV. Caracterizada como autoconsumo remoto. V. A energia injetada na rede cedida por empréstimo gratuito poderá ser compensado no prazo de 60 meses; VI. A adesão ao sistema de compensação não se aplica aos consumidores livres ou especiais; VII. Mantém dispensada a assinatura de contratos para conexão da central geradora com a rede elétrica, mantendo os padrões do código 3 do PRODIST; VIII. Fica vedada a cobrança de aluguel em cima de sistemas distribuídos;
Das obrigações do proprietário	I. Os custos referentes à adequação do sistema de medição; II. Dano ao sistema elétrico - Caso haja dano os créditos gerados de energia ativa no período não poderão ser utilizados no sistema de compensação;	I. Os custos para eventuais melhorias ou reforços dos sistemas de minigeração ; II. Adequações do sistema de medição.
Das obrigações da distribuidora	I. Operação e manutenção incluindo eventuais substituições e adequações; II. Todas as coletas de informações das unidades (micro e mini) geradoras; III. Adequação de seus sistemas para receber o acesso dos excedentes produzidos por micro e mini geração distribuída.	I. Os custos para eventuais melhorias ou reforços dos sistemas de microgeração - exceto em caso de geração compartilhada; II. Responsabilidade técnica e financeira pelo sistema de medição para microgeração; III. Coleta de dados das unidades consumidoras (mini e micro geração) para registro junto a ANEEL;

Fonte: Desenvolvido pela autora com dados obtidos em ANEEL, 2012 e ANEEL, 2015 (BRASIL, 2015; 2012).

A RN nº 482 progrediu com a sua revisão RN nº 687. A figura 9 mostra que as revisões feitas pela RN nº 687 foram bem aceitas pelo consumidor.

Figura 9: Número de conexões GD acumulado entre 2012 e 2016.

Fonte: Elaborado pela autora com dados obtidos em ANEEL (2017)

A figura 9 indica que a geração distribuída no Brasil cresceu mais de três vezes entre o período de revisão da RN nº 687 (final de 2015) e o final de 2016. Além disso, A Empresa de Pesquisa Energética (EPE) passou a inserir a geração distribuída em seus estudos anuais.

Nesse cenário, os setores residenciais e comerciais possuem papel fundamental na geração distribuída: representam em média 94% da energia que os centros urbanos brasileiros geraram em 2016, conforme a figura 10 apresenta.

Figura 10: GD por classe de consumo de energia elétrica, em 2016

* Grupo A¹⁹: Grupamento composto de unidades consumidoras com fornecimento em tensão igual ou superior a 2,3 kV, ou atendidas a partir de sistema subterrâneo de distribuição em tensão secundária.

Fonte: Elaborado pela autora com dados obtidos em ANEEL (2017)

Ao tratar de geração fotovoltaica distribuída, a maior externalidade²⁰ negativa enfrentada é a intermitência, ou seja, a possível interrupção temporária de energia. Esse problema pode limitar os avanços da geração fotovoltaica distribuída e também os custos com a intermitência podem sobrecarregar a distribuidora, o que não é bem equacionado na RN 487.

Ao inserir energia na rede elétrica, através da geração distribuída, a rede necessita de novas operações, as quais acarretam custos. Estes estão associados, principalmente, a comutações – ou seja, mudanças na direção do fluxo energético, feitas por transformadores. A rede foi concebida para operar unilateralmente, na ausência da geração distribuída, com energia proveniente de grandes usinas centralizadas. O mesmo problema ocorre com um equipamento denominado regulador de tensão, que necessita ser utilizado muito mais vezes ao dia na geração distribuída, de acordo com a intermitência na obtenção desta energia elétrica: isso encurta a vida útil de tal equipamento, elevando, assim, os custos operacionais (PAVANELLI, 2016).

Ao abordar intermitência na geração fotovoltaica distribuída, é importante investigar o pico de consumo de energia, o qual, na maioria das cidades brasileiras, ocorre no final da tarde

¹⁹ Ver glossário.

²⁰ Externalidade é um conceito econômico, sendo um efeito causado em um terceiro que não participa da ação, a externalidade pode ser positiva ou negativa (MANKIW; TAYLOR, 2012).

(ANEEL, 2019) – horário em que a população chega em suas residências depois do horário de trabalho, de modo que a demanda aumenta principalmente pelo uso do chuveiro elétrico. Tal pico não é positivo quando associado à geração de energia solar fotovoltaica, pois o momento de maior geração dessa fonte ocorre durante o dia – horário de sol a pino.

No caso das capitais brasileiras, como São Paulo, o horário de pico de consumo é representado pelo período das 15 horas, de acordo com a EPE - Empresa de Pesquisa Energética (2017) e a figura 11, por conta do ar condicionado utilizado por empreendimentos comerciais – isso é positivo quando associado à geração de energia solar fotovoltaica (JARDIM *et al.*, 2008). Portanto, do ponto de vista da distribuidora, é vantajoso que empreendimentos comerciais, cujo horário de pico de consumo energético é, majoritariamente, durante o dia, utilizem a geração distribuída fotovoltaica.

Figura 11: Curvas de carga: máxima demanda mensal global para clientes da AES Eletropaulo da Região Metropolitana de São Paulo

Fonte: Elaborado pela autora com dados obtidos em Vicentini (2015)

Para aliviar os picos de consumo de energia, a ANEEL anunciou uma nova medida tarifária para o grupo B²¹ (baixa tensão), em novembro de 2016, denominada Tarifa Branca. É uma nova opção que sinaliza aos consumidores a variação da tarifa da energia conforme o dia e o horário do consumo. Com a Tarifa Branca, o consumidor passa a ter possibilidade de pagar valores diferentes em função da hora e do dia da semana (ANEEL, 2016). Diante disso, se o consumidor adotar hábitos que priorizem o uso da energia fora do período de ponta,

²¹ Ver glossário.

diminuindo o consumo neste horário e no período intermediário, a opção pela Tarifa Branca oferece a oportunidade de reduzir o valor pago pela energia consumida.

O consumidor terá a opção de escolher a Tarifa Branca ou a convencional. Contudo, a Tarifa Branca não é recomendada se o consumo for maior nos períodos de ponta e intermediário e se não houver possibilidade de transferência do uso de tal energia elétrica para o período fora de ponta – esses casos podem resultar em uma conta de valor maior. As distribuidoras devem aderir ao sistema da Tarifa Branca até 2018 (ANEEL, 2016).

Assim, o uso do solo comercial ou misto associado à geração fotovoltaica distribuída, considerando a utilização da Tarifa Branca, é uma estratégia de planejamento energético urbano que pode amenizar o problema de intermitência de consumo de energia elétrica nas cidades. Considerando que o pico de consumo energético do uso comercial está combinado com a geração de energia pelos SFCR, e do ponto de vista da distribuidora, é vantajoso que empreendimentos comerciais, cujo horário de pico de consumo energético é, majoritariamente, durante o dia, utilizem a geração distribuída fotovoltaica, pois assim, não haverá sobrecarga da rede de distribuição e possíveis problemas com intermitência.

Outra estratégia é a implantação do sistema inteligente *Smart Grid* (ou rede inteligente, em tradução livre para o português), que pode mudar a forma como a sociedade produz, distribui e consome eletricidade. A rede inteligente conecta geradores e consumidores para garantir um fornecimento de eletricidade que seja economicamente eficiente, seguro e sustentável (JEGEN; PHILION, 2018). Desse modo, por conta da conexão entre consumidores e geradores, é possível amenizar o problema de intermitência.

O *Smart Grid* ²² necessita do crescimento de redes de geração renovável, através da geração distribuída, para evoluir, e o mesmo ocorre para a geração distribuída, que necessita da rede inteligente para evoluir (DANTAS *et al.*, 2018; JEGEN; PHILION, 2018).

Apesar dos desafios a serem enfrentados, a geração distribuída se configura um sistema complementar ao modelo centralizado, que possui altos valores econômicos e consideráveis impactos socioambientais. Além disso, cria-se, assim, infraestrutura e serviços de geração energética em âmbito urbano, o que passa a valorizar a questão da autonomia energética em nível municipal.

²² Ver glossário.

CAPÍTULO 2: MORFOLOGIA URBANA

Em 2016, 50% da população mundial vivia em assentamentos urbanos, e estima-se que, em 2030, essa porcentagem aumente para 60% da população. No Brasil, a situação é ainda mais acentuada: cerca de 85% de seus quase 202 milhões de habitantes vivem em áreas urbanas (UNITED NATIONS, 2016).

Com a grande quantidade de pessoas migrando das áreas rurais para áreas urbanas, nos últimos 30 anos, a ocupação desses centros urbanos foi aumentando de forma caótica e não planejada. A figura 12 ilustra a quantidade, no mundo, de polos urbanos, pequenas porções do território do planeta abrigando uma grande parcela da população mundial. Ao abrigarem grande parcela da população mundial, consequentemente, assentamentos urbanos consomem cerca de três quartos dos recursos globais, incluindo energia (UNITED NATIONS, 2016) – e a tendência é que esses polos permaneçam em crescimento.

Figura 12: Polos Urbanos 1990, 2014, 2030.

Fonte: (UNITED NATIONS, 2016) - Tradução realizada pela autora

Em cidades de países em desenvolvimento, como o Brasil, a urbanização²³ e a metropolização²⁴ cresceram de forma não planejada e desenfreada, principalmente nas últimas duas décadas. O planejamento e a gestão das redes de infraestrutura e serviços urbanos, como de água, energia e transportes, não acompanham a evolução da malha urbana, gerando assim

²³ Ver glossário.

²⁴ Ver glossário.

modelos urbanos com baixa qualidade ambiental e carência no atendimento das demandas sociais (MARTINS, 2014).

No Brasil, as consequências da intensificação urbana não planejada são: aumento do consumo de energia; maiores emissões de gases poluentes; falta de espaços verdes; falta de acesso ao sol; congestionamento viário; falta de infraestrutura adequada; periferização²⁵ e segregação urbana²⁶ e especulação imobiliária, que adensa as cidades sem estudos apropriados de tráfego (JABAREEN, 2006; MARTINS, 2014).

As consequências da intensificação urbana não planejada podem ser minimizadas mediante a aplicação de estratégias para promoção da sustentabilidade urbana, tais como diversidade, incentivo à áreas verde, densidade apropriada, transporte sustentável, uso misto do solo, cidade compacta e acesso ao sol (JABAREEN, 2006). Nesta pesquisa, será priorizado o conceito de densidade urbana, pois, como será visto, a densidade tem grande influência sobre a morfologia urbana e, conseqüentemente, influencia a maximização de geração de energia solar fotovoltaica em um assentamento urbano.

2.1. DENSIDADE URBANA

A densidade urbana estabelece uma relação entre um indicador estatístico, que pode ser de população, habitação, empregos e uma superfície (MERLIN; CHOAY, 1988). Diversos autores relacionam a densidade urbana com a eficiência energética das edificações e até mesmo com a maximização de geração de energia solar fotovoltaica em um ambiente urbano. Para Miana (2010), a densidade urbana possui consequência direta sobre a ocupação do solo, os transportes, a congestão urbana e o consumo energético.

A densidade urbana pode ser subdividida em: densidade construída; densidade regional; densidade residencial (ou densidade populacional); densidade de ocupação (ou taxa de ocupação do solo); densidade de empregos; densidade de pessoas de passagem; densidade de população flutuante; e até mesmo densidade percebida (MARINS; ROMÉRO, 2012; MARTINS, 2014; NG, 2010).

Para NG (2010), a densidade urbana construída é uma medida numérica, estando a concentração de estruturas físicas dentro de uma determinada área geográfica – é um objeto

²⁵ Ver glossário.

²⁶ Ver glossário.

indicador espacial quantitativo. No entanto, na prática, a densidade construída assume um significado quando estiver relacionado com uma escala de referência. Essa medida é um importante elemento a ser considerado nos estudos morfológicos urbanos. Por exemplo, combinações de diferentes malhas edificadas se manifestam em uma variedade de formas urbanas, mantendo a mesma densidade construída, conforme ilustrado nas figuras 13 (NG, 2010).

Figura 13: Diferentes tipos de forma urbana para mesma densidade construída

Fonte: (NG, 2010, p.10)

Na figura 13, é possível notar que edifícios altos não estão necessariamente associados com valores altos de densidade construída. Barcelona possui 32.022 pessoas por km², sendo uma das cidades mais compactas da Europa, e variam entre 4 e 6 os pavimentos de seus edifícios. Em contrapartida, Nova Iorque, com 33.666 pessoas por km², caberia em blocos de 7 pavimentos, se utilizasse o padrão de ocupação urbana de Barcelona; no entanto, é uma cidade mais vertical (NG, 2010).

Por sua vez, a densidade construída é condicionada por dois parâmetros urbanísticos básicos: o coeficiente de aproveitamento e a taxa de ocupação. O coeficiente de aproveitamento define a área construída total, pois é um multiplicador que, quando aplicado à área do lote e dividido pela área do pavimento-tipo (área computável), resulta na quantidade de pavimentos que terá o empreendimento, conforme indica a equação 1 (MUNIZ-GÄAL *et al.*, 2018; PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO, 2014):

$$\text{Multiplicador (C.A.)} \times \text{Área do lote} = \text{Área total do empreendimento} \quad (1)$$

Já a taxa de ocupação do solo é um índice urbanístico capaz de interferir nos valores de densidade urbana construída: ela estabelece uma relação entre o espaço construído e o espaço livre, conforme indicam a equação 2 e a figura 14. A taxa de ocupação pode ser calculada para um lote, se a escala for de uma edificação ou um espaço urbano, o que inclui suas vias e áreas verdes (PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO, 2014).

Figura 14: Variação de valores de taxa de ocupação do solo

Fonte: (NG, 2010, p.9)

$$\text{Multiplicador (T.O.)} \times \text{Área do lote} = \text{Área projetada do empreendimento} \quad (2)$$

É possível apresentar um valor de densidade através de cálculo de taxa de ocupação do solo e coeficiente de aproveitamento, porém a forma poderá ser diversificada (MARTINS, 2014).

O Plano Diretor Estratégico de um município, associado à Lei de Parcelamento, Uso e Ocupação do Solo e ao Código de Obras, visa, entre outros, orientar o desenvolvimento e a utilização de seus espaços públicos ou privados. Para estabelecer limites de adensamento e verticalidade, parâmetros urbanísticos como coeficiente de aproveitamento e taxa de ocupação do solo são fatores essenciais a serem definidos pelo Plano Diretor do Município.

O Plano Diretor Estratégico do Município de São Paulo de 2014 definiu maior potencial de adensamento em áreas de desenvolvimento urbano, denominadas “Eixos de Estruturação da Transformação Urbana” (EETU), com o intuito de otimizar o aproveitamento do solo nas áreas próximas à rede de transporte coletivo de média e alta capacidade – ou seja, em áreas próximas às estações de metrô e trem e aos corredores de ônibus (PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO, 2014). Parâmetros urbanísticos (C.A. e T.O.) foram criados para associar o adensamento habitacional e construtivo ao longo destes eixos de oferta de transporte público, além da qualificação e da ampliação dos espaços públicos e da oferta de comércio e serviços.

Ao tratar de densidade urbana, na maior parte do município de São Paulo, o coeficiente de aproveitamento básico é 1 – ou seja, pode-se construir apenas uma vez a área do lote – e o coeficiente de aproveitamento máximo é 2 – ou seja, pode-se construir duas vezes a área do lote, com exceção dos EETU e ZEIS (zonas especiais de interesse social), onde o coeficiente de aproveitamento máximo é 4 (PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO, 2014). O exemplo ilustrado pela figura 15 foi realizado com o coeficiente de aproveitamento 4 (C.A. máximo permitido em regiões estratégicas do município de São Paulo) e taxa de ocupação de 0,70. Em um suposto lote de 500m² (20x25m), neste estudo, o gabarito de altura das edificações não ultrapassa 15 metros, ou 5 pavimentos.

Figura 15: Estudo de índices urbanos para o município de São Paulo com C.A. 4 e T.O. 0,70

Fonte: Elaborado pela autora com o *Software Rhinoceros*[®] e *Plug-in Grasshopper*[®] (ROBERT MCNEEL & ASSOCIATES, 2012a, 2012b)

A densidade percebida, por sua vez, é a estimativa do número de pessoas presentes em uma área geográfica; ela pode variar de acordo com o espaço disponível e sua organização (RAPOPORT²⁷, 1975 *apud* NG, 2010). Características espaciais são importantes na verificação da densidade percebida, mas a interação entre o indivíduo e o ambiente como um todo são relevantes para essa interação, além de atributos cognitivos individuais e aspectos socioculturais, igualmente fundamentais (ALEXANDER²⁸, 1993 *apud* NG, 2010).

A densidade residencial, ou populacional, é uma medida numérica da concentração de estruturas populacionais dentro de uma determinada área geográfica. Essa densidade é motivada por ofertas de serviço, infraestrutura, culturas e aspectos topográficos (NG, 2010).

A densidade de empregos, finalmente, é um indicador das atividades econômicas urbanas. Cidades como Nova Iorque, Londres e Hong Kong são focadas em gestão do conhecimento e finanças, de modo que são favorecidas pela alta densidade e requerem mais espaços para

²⁷ RAPOPORT, A. Toward a Redefinition of Density. **Environment and Behavior**, v. 7, n. 2, p. 133–158, 1975.

²⁸ ALEXANDER, E. R. Density Measures: A Review and Analysis. **Journal of Architectural and Planning Research**, v. 10, n. 3, p. 181–203, 1993.

escritórios, os quais normalmente ficam concentrados em regiões centrais das cidades. Já centros urbanos com significativa base industrial têm padrões de distribuição de empregos dispersos nas regiões metropolitanas, como é possível observar em Bogotá e São Paulo (NG, 2010).

Para Martins (2014), a densidade construída atua diretamente sobre o consumo energético de uma edificação e de um assentamento urbano. Além disso, o bom aproveitamento solar para maximização da geração de energia fotovoltaica se relaciona com formas urbanas pouco densas e dispersas em clima tropical, uma vez que se reduz o sombreamento causado por obstruções. Por outro lado, segundo a autora, formas urbanas dispersas e pouco densas podem aumentar a temperatura nas fachadas e, conseqüentemente, seu consumo energético, por isso é necessário realizar uma ampla análise da área de estudo.

Para Marins e Roméro (2013) e Marins (2010), a densidade urbana e as condições de uso e ocupação do solo, em conjunto, condicionam o consumo energético de um centro urbano. Na escala de município, a densidade influencia diretamente nas redes de infraestrutura de transportes: a alta densidade diminui as distâncias e, conseqüentemente, reduz o uso de veículos individuais, além de facilitar a implantação de sistemas de transportes públicos e transportes alternativos, como por bicicletas e a pé. Ou seja, nessa escala, a alta densidade construída aliada ao uso misto tende a diminuir as distâncias e, por conseguinte, reduzir o uso do veículo individual, limitar extensões de redes de infraestruturas e gerar uma redução no consumo energético. Logo, a densidade se evidencia como um importante indicador da morfologia urbana ao se tratar de consumo energético em assentamentos urbanos.

Para NG (2010), a alta densidade leva a uma otimização dos sistemas de infraestrutura, incluindo os sistemas de transporte público, de forma a reduzir a demanda energética de uma cidade. Por outro lado, as cidades com valores de densidade construída maiores tendem a causar maiores efeitos de ilha de calor. O autor ressalta que em cidades com elevada densidade construída, o sombreamento causado pelas edificações pode prejudicar o potencial de geração de energia fotovoltaica, sendo que em uma habitação residencial típica, é necessário no mínimo 20m² de área desobstruída para que as placas fotovoltaicas atendam às demandas energéticas.

NG (2005) em seu estudo a respeito de densidade urbana e disponibilidade de luz natural, chegou a uma escala de trabalho aceitável em que edifícios mais altos possuem altura de 100 metros, edifícios mais baixos possuem altura de 50 metros e edifícios medianos possuem

altura de 75 metros. Entretanto, a escala de trabalho apresentada por NG para Hong Kong encontra-se distante da escala de trabalho comportada pelos instrumentos urbanísticos do município de São Paulo, onde o coeficiente de aproveitamento máximo é 4. A figura 16 ilustra uma simulação hipotética com a escala de trabalho de NG; foram modificados os parâmetros de densidade do *Grasshopper*® até se obter os números estudados pelo autor: 33 pavimentos, correspondente a um gabarito estimado de 99 metros. Os resultados obtidos na simulação foram coeficiente de aproveitamento de 10 e taxa de ocupação do solo de 0,30, sendo que o autor enfatiza, em seus estudos, que cidades densas necessitam de maiores distâncias entre as edificações.

Figura 16: Exemplo de malha urbana hipotética com C.A. 10 e T.O. 0,30

Fonte: Elaborado pela autora com o *Software Rhinoceros*® e *Plug-in Grasshopper*® (ROBERT MCNEEL & ASSOCIATES, 2012a, 2012b)

Hui (2001) explora efeitos positivos e negativos causados por valores altos de densidade construída. Entre os efeitos positivos desses valores, ele cita a tendência a promover o transporte público, já que a duração das viagens e a necessidade de uso dos automóveis individuais são reduzidas. Em contrapartida, o alto valor de densidade construída pode causar congestionamentos e, consequentemente, reduzir a eficiência dos automóveis, caso uma política de mobilidade urbana, apoiada em transporte a pé, por bicicleta e sistemas públicos eficientes, não seja simultaneamente implementada. Na infraestrutura, os aspectos positivos levantados pelo autor indicam a diminuição da quantidade de infraestrutura em cidades densas, a exemplo do sistema viário. Ademais, a implantação de sistemas, como de água e de energia, tende a ser facilitada em cidades densas. O aspecto negativo que o autor cita é que edifícios verticais geram, por exemplo, gastos energéticos com transportes verticais (elevadores).

Hui (2001) levanta também pontos positivos e negativos do sombreamento mútuo entre as edificações. Tal sombreamento pode amenizar a temperatura em cidades com clima quente, mas também limitar o potencial de geração de energia solar fotovoltaica. Dentre os aspectos negativos, cidades densas tendem a sofrer maiores efeitos de ilha de calor, além de terem a iluminação natural nas edificações prejudicada, o que pode aumentar o consumo de energia elétrica com iluminação artificial.

Para Martins (2014), do ponto de vista da maximização de geração de energia solar fotovoltaica no ambiente urbano, existem duas estratégias contraditórias com relação à densidade construída, em regiões de clima quente: aumentar a superfície de captação solar da edificação ou reduzir a exposição solar direta de fachadas, a fim de reduzir o consumo energético da edificação. A autora também ressalta que um edifício com baixa ou alta verticalização sempre terá a mesma área de superfície de captação de energia fotovoltaica em sua cobertura; porém, a partir de certo gabarito, a captação de energia não será mais suficiente para atender à demanda de eletricidade do edifício.

Então, pode-se concluir que os principais benefícios da alta densidade urbana estão, primeiramente, na eficiência nos serviços, visto que é mais viável econômica e tecnicamente oferecer serviços para uma área com densidade alta. Além disso, evidencia-se a vitalidade urbana, com maior número de pessoas circulando e vivendo a cidade, e também se incrementa a viabilização do transporte público, a pé e por bicicleta – afinal, uma cidade densa é sinônimo de uma cidade menos dispersa e com menores distâncias para percorrer. Com as distâncias menores, a viabilização dos transportes, sobretudo os modos ativos, é facilitada (HUI, 2001; NG, 2010; MARINS; ROMÉRO, 2012; MARTINS, 2014).

Dentre os pontos negativos estão a durabilidade construtiva, o congestionamento urbano, a falta de recursos e infraestrutura gerada por distâncias longas e pela desigualdade urbana, a saturação do espaço construído, a alteração do microclima urbano, a poluição sonora e atmosférica, o aumento do índice de ruído urbano, a perda de privacidade e a interferência no potencial de geração de energia através de painéis fotovoltaicos (HUI, 2001; NG, 2010; MARINS; ROMÉRO, 2012; MARTINS, 2014). Portanto, para estabelecer limites de adensamento e verticalização urbana visando diminuir seus impactos desfavoráveis, torna-se fundamental instrumentalizar o planejamento, o projeto e a gestão do espaço urbano, adequando-se políticas públicas, se necessário.

2.2. USO MISTO

O desenvolvimento urbano baseado no uso misto²⁹ apresenta como principal benefício a redução das necessidades de deslocamento na cidade, ao aproximar a oferta de bens e serviços da moradia, de modo que reduz o uso do transporte motorizado e isenta transportes alternativos, como o transporte público, associado a modos de transportes ativos, ou seja, a pé e de bicicleta (EWING; CERVERO, 2010; LAMOUR, 2018; LAMOUR; MARINS, 2016; WALTON *et al.*, 2007). Ademais, esse uso favorece a diversidade de usos e reforça a vitalidade urbana, aumentando a sensação de segurança de um bairro e oferecendo qualidade de vida para seus habitantes (LAMOUR, 2018; CERVERO, 2010; LAMOUR; MARINS, 2016; WALTON *et al.*, 2007).

Nesse contexto, o uso misto está atrelado ao modelo de cidade compacta, sendo que a compactidade é um eixo da sustentabilidade urbana que incide na forma física da cidade e na sua funcionalidade, minimizando redes de mobilidade e infraestrutura. O modelo compacto diminui os deslocamentos; em consequência disso, reduz o consumo de recursos naturais e o tempo destinado a essa função (MIANA, 2010; WALTON *et al.*, 2007).

Para Miana (2010), como estratégia de eficiência no desenvolvimento urbano, faz-se necessário a minimização do uso do solo; logo, o conceito de zonificação funcionalista não é justificado. Incentiva-se, assim, o uso misto, permitindo aumentar a complexidade e, ao mesmo tempo, liberar o espaço que gera o modelo de cidade difusa.

O plano diretor estratégico vigente no Município de São Paulo (PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO, 2014) estimula o uso misto, especialmente no térreo das edificações, através das fachadas ativas, as quais são consideradas não computáveis entre as áreas construídas no nível da rua, com acesso direto ao logradouro, com testada superior a 20m, até 50% da área do lote, destinadas ao comércio e serviços. O uso misto possui a finalidade de aproximar emprego de moradia, além de qualificar e dinamizar a vida urbana nos espaços públicos (LAMOUR; MARINS, 2016).

²⁹ Uso misto: “Exercício concomitante do uso residencial e não residencial” (MARTINS, 2014. p.383); “Desenvolvimento onde é necessária densidade habitacional mínima para sustentar usos não residenciais” (WALTON; *et. al.*, 2007. p. 46).

2.3. DENSIDADE URBANA E A DISPONIBILIDADE DE RADIAÇÃO SOLAR

A disponibilidade de radiação solar no ambiente urbano é determinada em grande parte pela morfologia urbana. Assim, o estudo da incidência da radiação solar no ambiente urbano poderia proporcionar uma melhor compreensão do desempenho da forma existente e facilitar futuros planejamentos, considerando que a disponibilidade de radiação solar muda de local para local (NG, 2010; MARTINS, 2014). A morfologia urbana tem influência direta no aspecto energético dos municípios em relação ao consumo de energia. Além do consumo, a forma urbana possui papel crucial quando se espera gerar energia através dos SFCR nos grandes centros, já que influencia diretamente a obstrução da radiação solar.

No contexto brasileiro, modelos estatísticos na escala de vizinhança foram analisados com o propósito de explorar as relações entre a forma urbana e o potencial de geração de energia fotovoltaica em centros urbanos. Martins *et al.* (2016) realizaram um estudo na cidade de Maceió, mostrando que maiores distâncias entre as edificações proporcionam menores obstruções causadas por sombreamentos, aumentando o albedo e, conseqüentemente, a disponibilidade de radiação solar, bem como a geração de energia solar fotovoltaica, em um assentamento urbano. Para os autores, a consequência negativa de diminuir as obstruções e, assim, o sombreamento em cidades de clima tropical, é o aumento da radiação térmica, que contribui para o efeito ilha de calor e pode trazer, dentre outros, desconforto térmico nos espaços externos.

O efeito ilha de calor causado pela diminuição de obstruções em um ambiente urbano é visível em estudo realizado pelos autores Pacifici, Rama e Marins (2019) no bairro Belenzinho, em São Paulo, Brasil. Para os autores Marins *et al.* (2018) é necessário encontrar um intervalo intermediário de verticalidade e adensamento construído para solucionar os conflitos existentes entre a maximização da radiação solar visando à geração de energia solar fotovoltaica, em climas tropicais, sem prejudicar o conforto térmico em ambientes abertos.

Martins, Adolpe e Bastos (2014), em um estudo realizado na cidade de Maceió, defendem que a distância entre as edificações é o parâmetro morfológico urbano que possui maior efeito na modificação do acesso da radiação solar. Destacam, ainda, a importância da área formada entre o gabarito de altura da edificação até o limite do lote e a própria verticalidade: quanto mais alta a edificação, maior será a radiação solar recebida. Os autores ressaltam também a importância da área de projeção da edificação, que influencia na área de cobertura e na disponibilidade de espaço destinado à aplicação de painel fotovoltaico.

CAPÍTULO 3: MODELAGEM DA FORMA URBANA COM RELAÇÃO À INCIDÊNCIA DA RADIAÇÃO SOLAR, NA MICROESCALA URBANA

Para Reinhart e Davila (2016), as ferramentas computacionais permitem detalhar o comportamento ambiental real e seus componentes, proporcionando a modelagem e a simulação de problemas e soluções atuais e futuros, simultaneamente. Dessa maneira, existe a possibilidade de avaliação do comportamento de um determinado cenário, de forma que a ferramenta computacional não é mais utilizada apenas como representação gráfica, mas também como componente de projeto baseado em desempenho (OXMAN, 2008).

As ferramentas computacionais viabilizam diversas aplicações através de simulações energéticas, em diversas escalas de trabalho. Na escala de edifício, Anton e Tănase (2016) utilizaram o programa *Rhinoceros*[®] com os *plug-ins* *Grasshopper*[®], *Diva*[®], *Ladybug*[®], *Kangaroo*[®] e *Galapagos* para analisar a abertura de uma edificação em relação à maximização da radiação solar em seu estudo de caso. O *Rhinoceros*[®] é um programa de modelagem tridimensional, o *Grasshopper*[®] é um *plug-in* que possibilita modelagem paramétrica, os *plug-ins* *Diva*[®] e *Ladybug*[®] são programas de simulação energética, os quais simulam os níveis de radiação solar. O *plug-in* *Kangaroo*[®], por sua vez, é um programa de relaxamento dinâmico que o autor utilizou para suavizar a estrutura da edificação estudada, e o *plug-in* *Galapagos* é um algoritmo genético, que o autor utilizou para definir a melhor combinação entre os algoritmos avaliados (ANTON; TĂNASE, 2016).

NG (2005) estudou a densidade urbana e sua relação com a disponibilidade de luz natural. De acordo com o autor, as edificações não deveriam ser projetadas com alturas semelhantes, mas com variações de altura, conforme ilustra a figura 17, onde NG ilustra que em uma malha de 5x5 metros, quando se alterna a altura dos blocos, a insolação é maximizada. NG, em seu estudo em Hong Kong, chegou a uma escala de altura considerada aceitável para os critérios do estudo em questão, segundo a qual os edifícios mais altos possuem 100 metros, os mais baixos 50 metros e os medianos 75 metros. Em tal estudo, o autor utilizou o programa *AutoCAD*[®] para desenvolvimento da malha de trabalho e o programa *Lightscape*[®] 3.2 para simulação da luz natural.

Figura 17: Estudo realizado por NG em uma malha de 5x5m, com alturas variadas de blocos (esquerda) e alturas semelhantes de blocos (direita)

Fonte: NG (2005)

Chatzipoulka, Compagnon e Nikolopoulou (2016) analisaram a morfologia urbana de Londres e a incidência solar nas calçadas e fachadas das edificações, com auxílio das ferramentas computacionais *Arcgis*® para desenvolvimento de imagens georreferenciadas, *Matlab*® para análise das imagens, *Radiance*® para simulação da irradiação solar e o *Meteonorm*® para obtenção de dados climáticos de Londres.

3.1. ANÁLISE E SELEÇÃO DE FERRAMENTAS

Em princípio, considerou-se utilizar quatro ferramentas neste trabalho, sendo elas *DesignBuilder*®, *Solargis*®, *Cityzoom*® e *Rhinoceros*®.

O *DesignBuilder*® é um programa de modelagem tridimensional, e sua principal característica é a simulação de CFD (dinâmica dos fluidos computacional), além de ser um sistema de interface gráfica para o programa de simulação térmica dinâmica *EnergyPlus*® (DESIGNBUILDER SOFTWARE LTD, 2017). O *Solargis*® é um programa que realiza simulação de radiação solar, com interface com *GIS* (sistema de informação geográfica); ou seja, o *Solargis*® é uma ferramenta muito útil para realização de mapas de radiação solar de um país ou estado, onde fatores tridimensionais, como edificações, não afetarão a escala de análise (SOLARGIS, 2017). O *Cityzoom*® é um sistema de suporte à decisão para planejamento urbano; ele provê um ambiente em que diferentes modelos de desempenho podem operar interativamente, com o objetivo de aperfeiçoar o processo de planejamento urbano. Esse sistema tem uma interface intuitiva de simulação do Plano Diretor Estratégico

que pode ser utilizado para análise de cidades existentes e para planejamento de novas cidades. A ferramenta possui *GIS* integrada, permite visualização tridimensional e importa e exporta arquivos para o formato *.dxf* (SIMMLAB, 2017).

Por sua vez, *Rhinoceros*[®] é um programa de modelagem tridimensional que trabalha com a tecnologia geométrica *nurbs* (RHINO3D, 2017). O diferencial do *Rhinoceros*[®] é a aplicação de *plug-ins* em seu *software*, fazendo a ferramenta se adaptar à necessidade do usuário. O *plug-in* mais usual do *Rhinoceros*[®] é o *Grasshopper*[®], o qual possibilita a modelagem por meio de parâmetros – ou seja, um desenho paramétrico. É possível instalar no *Rhinoceros*[®] *plug-ins* de simulação energética, como o *Diva*[®] e o *Ladybug*[®] (ANTON; TĂNASE, 2016).

O escopo da presente pesquisa demanda de recursos computacionais que incorporem na interface do modelo urbano a simulação da radiação solar, considerando edificações tridimensionais, já que a altura das edificações é crucial ao tratar de morfologia urbana. Por isso, entendeu-se que o *software* mais apropriado para a pesquisa deveria atender aspectos de desenho tridimensional, escala urbana e simulação energética. A relação entre os critérios e as ferramentas levantadas é reunida na tabela 3.

Tabela 3: Relação entre possíveis ferramentas à serem utilizadas na pesquisa

	3D	urbano	simulação energética
CityZoom		X
DesignBuilder SOFTWARE	X		X
Rhinoceros	X	X	X
SOLARGIS		X	X

Fonte: Elaborado pela autora.

A ferramenta *CityZoom*[®] foi descartada para a presente pesquisa por não ser um programa de simulação tridimensional e de simulação energética, itens essenciais do escopo do presente trabalho. Já o *DesignBuilder*[®] se mostrou uma ótima ferramenta para CFD e até mesmo para simulações energéticas em escala de edificação; no entanto, o programa não foi desenvolvido para atender à escala urbana. O *SolarGis*[®], por outro lado, foi criado de modo a contemplar tal escala e possui um simulador energético; porém, visto que não considera as edificações tridimensionais em seu programa – essencial para a análise de morfologia urbana –, tornou-se inviável para a pesquisa. Assim, a única ferramenta, dentre as pesquisadas, que atendeu aos

requisitos de desenho tridimensional, escala urbana e simulação energética foi o programa *Rhinoceros*[®].

O *Rhinoceros*[®] possui uma capacidade de interoperabilidade ampliada, através de *plug-ins*, o que o torna flexível com diversos tipos de projetos e problemas. O *Grasshopper*[®] é um editor algoritmo visual que desenvolve modelos paramétricos na plataforma de modelagem *Rhinoceros*[®], sendo o seu *plug-in* mais utilizado. No desenvolvimento de projeto paramétrico, a análise energética é incorporada como um parâmetro no desenvolvimento do projeto. Desse modo, a análise energética contribui ativamente no processo do projeto paramétrico (ANTON; TĂNASE, 2016; GAVIRIA; PEREIRA; MIZGIER, 2013; SANTOS; AUER; SOUZA, 2017).

As capacidades de programação e interoperabilidade com outras ferramentas de análise no *Grasshopper*[®] são estendidas por uma série de *plug-ins* que podem ser dedicados à análise energética, através de softwares como *GECO*[®], *Diva*[®] e *Ladybug*[®] (ANTON; TĂNASE, 2016). Além de *plug-ins* dedicados à análise energética, existe a possibilidade de implementar um *plug-in* algoritmo genético no *Grasshopper*[®], o *Galapagos*, que busca soluções que resolvam simultaneamente e satisfatoriamente os diferentes objetivos de um problema através de uma combinação de algoritmos (MARTINO; CELANI, 2014). Dessa forma, a pesquisa utiliza o programa de desenho tridimensional *Rhinoceros*[®] (ROBERT MCNEEL & ASSOCIATES, 2012a), associado aos *plug-ins* *Grasshopper*[®] (ROBERT MCNEEL & ASSOCIATES, 2012b) e *Diva*[®] (SOLEMMMA, 2016) e ao *plug-in* de algoritmo genético *Galapagos*, para investigar as melhores combinações entre os parâmetros da urbanísticos que maximizem os níveis de radiação solar.

CAPÍTULO 4: FORMA URBANA PARA A MAXIMIZAÇÃO DE GERAÇÃO DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA: PROCEDIMENTOS PARA MODELAGEM DOS PARÂMETROS UTILIZANDO AS FERRAMENTAS SELECIONADAS E REALIZAÇÃO DOS CÁLCULOS

Para analisar o cenário evolutivo da morfologia dos lotes selecionados na área de estudo foi construído o algoritmo no *Grasshopper*[®], por meio de quatro etapas principais, as quais estão detalhadas a seguir:

4.1. PRIMEIRA ETAPA: Aplicação do plug-in Diva

Denominado, no algoritmo *Grasshopper*[®], como “Sol Diva”, refere-se à localização do sol no modelo tridimensional. Os parâmetros de entrada no algoritmo são a representação tridimensional da área de estudo na plataforma *Rhinoceros*[®], com base em dados levantados manualmente, utilizando a ferramenta *Google Earth*[®] (GOOGLE, 2017) e dados georreferenciados disponíveis na plataforma GeoSampa, da Prefeitura de São Paulo (PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO, 2017). Também foi utilizado o arquivo *epw*. de São Paulo, que possui funcionalidade de uma carta solar. Foi necessário utilizar um raio de análise de 600 metros, por conta do tamanho da área de estudo de caso apresentado. O mês escolhido para a localização do sol na simulação foi o mês de junho, pois é quando o sol atinge a maior distância angular em relação ao plano da linha do Equador, devido ao solstício de inverno (portanto, período crítico de acesso da região estudada à radiação solar). O horário definido para a simulação foi 15 horas, por corresponder ao pico de demanda de eletricidade. A figura 18 ilustra o algoritmo “Sol Diva”.

Figura 18: Visão detalhada do algoritmo proposto “Sol Diva”

Fonte: Girotti, Marins e Lara (2019)

4.2. SEGUNDA ETAPA: Simulação dos níveis de radiação solar na cobertura das edificações da área de estudo, na configuração urbana atual

Após a aplicação do “Sol Diva” na área de estudo, foi possível realizar a simulação do nível de radiação solar, na configuração urbana atual da área estudada. A simulação foi realizada a

partir das edificações tridimensionais modeladas no programa *Rhinceros*³⁰ e por uma opção do *Diva*[®] denominada “*radiation map*”³⁰, conforme ilustra a figura 19.

4.3. TERCEIRA ETAPA: Simulação da variação isolada do coeficiente de aproveitamento e da taxa de ocupação do solo

Os valores dos parâmetros urbanísticos foram definidos conforme as variações permitidas para cada lote analisado, seguindo a legislação de parcelamento, uso e ocupação do solo do município de São Paulo (PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO, 2016). Foram ainda fixados os recuos mínimos permitidos em cada lote para a realização das simulações. A variação isolada dos parâmetros urbanísticos foi realizada a fim de possibilitar visualização dos impactos positivos e negativos em relação aos níveis de radiação solar. A simulação é dada em kWh/m².ano e em radiação solar incidente total, permitindo identificar o real impacto da morfologia urbana na intensidade da radiação solar incidente na cobertura do empreendimento analisado.

O algoritmo da terceira etapa combina os algoritmos energéticos das primeiras etapas com algoritmos morfológicos elaborados intitulados “Projeção edificação”, “Gabarito edificação” e “Localização edificação no terreno”. Na “Projeção edificação”, o lote de análise definido no programa *Rhinceros*[®] e os valores de taxa de ocupação são os parâmetros de entrada, conforme ilustra a figura 20.

³⁰ *Radiation map*: Desenvolve renderizações de exposição solar, calcula o nível de radiação solar e explora mapas dinâmicos através de cores na janela de visualização do *Rhinceros*[®] (SOLEMA LLC, 2018).

Figura 23: Visão detalhada do algoritmo proposto “Novo empreendimento”

Fonte: Girotti, Marins e Lara (2019)

O ângulo da edificação é um parâmetro criado para melhor posicionar a edificação no lote, considerando os níveis de radiação solar. Um algoritmo denominado “filtro recuo” foi criado no *Grasshopper*®, para que a edificação analisada, mesmo que rotacionada, respeitasse o perímetro do lote, observando os recuos mínimos. Ou seja, quando o empreendimento possuir mais que três pavimentos, ou dez metros de altura, é respeitado o recuo mínimo de três metros. O algoritmo do “filtro recuo” é detalhado pela figura 24.

Figura 24: Visão detalhada do algoritmo “filtro recuo” e ângulo da edificação em relação ao lote

Fonte: Girotti, Marins e Lara (2019)

4.4. QUARTA ETAPA: Aplicação do algoritmo genético Galapagos e visão geral do algoritmo grasshopper®

O algoritmo genético *Galapagos* foi aplicado ao resultado obtido na terceira etapa, a fim de combinar os parâmetros urbanísticos analisados anteriormente com o ângulo da edificação ou a localização da edificação no lote, bem como com os níveis de radiação solar. Assim, finalmente, identificam-se os valores pertinentes para maximizar o aproveitamento da radiação solar, para cada lote em estudo.

O *Galapagos* busca a configuração morfológica urbana que melhor atende à maximização ou à minimização para um dossel imposto pela programação do usuário. Nesse caso, os critérios adotados foram parâmetros urbanísticos, coeficiente de aproveitamento e taxa de ocupação do solo, bem como o ângulo da edificação e os níveis de radiação solar, entendidos como ‘genomas’ de pesquisa no *plug-in* em questão e a radiação solar é o “fitness” da pesquisa *Galapagos*, ou seja, o valor da função a ser otimizado. O solucionador evolutivo *Galapagos* determina os “genomas sobreviventes”, aqueles parâmetros urbanísticos que melhor atendem à maximização da forma urbana, para obtenção de melhores valores de radiação solar, conforme ilustra a figura 25.

Figura 25: Visão detalhada do otimizador algoritmo genético *Galapagos*

Fonte: Girotti, Marins e Lara (2019)

A visão geral das etapas apresentadas do algoritmo proposto e seus blocos algorítmicos, desenvolvidos no programa *Grasshopper*® é esquematizado pela figura 26.

Figura 26: Visão geral do algoritmo proposto e seus blocos algorítmicos, desenvolvidos no programa *Grasshopper*®

Fonte: Elaborado pela autora.

4.5. APRESENTAÇÃO DOS CÁLCULOS DA PESQUISA

Os resultados obtidos, tanto com a simulação dos parâmetros urbanos individuais, quanto com a aplicação do Galapagos, foram analisados por radiação solar por metro quadrado e por radiação solar incidente total. Como a pesquisa abrange a área de cobertura para aplicação de painéis fotovoltaicos, a análise radiação solar incidente total possui mais relevância. O cálculo para radiação solar incidente total por ano foi realizado conforme a equação 3.

Radiação Solar (kWh/m².ano) x área de cobertura (3)

Com os resultados morfológicos obtidos, foram calculadas a demanda de eletricidade³¹ e a energia fotovoltaica gerada em cada empreendimento. Foi priorizado o uso misto, estimulando comércio e serviço no térreo das edificações, integrando o uso residencial, comercial, de serviço e equipamentos – conforme o incentivo proporcionado pelo Plano Diretor vigente no município de São Paulo (PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO, 2014) – e visando amenizar a externalidade de intermitência da energia fotovoltaica conectada à rede (PAVANELLI, 2016).

Assim, a demanda de eletricidade foi calculada de forma que a geração de energia solar fotovoltaica do empreendimento em análise, fosse suficiente para atender à demanda de eletricidade de seu uso comercial. A demanda de eletricidade excedente do empreendimento foi calculada para uso residencial, considerando o desenvolvimento de empreendimentos mistos. O cálculo foi feito de modo a prever demanda de eletricidade média para uso comercial de 100 kWh/m².ano e demanda de eletricidade média para uso residencial de 40 kWh/m².ano (ROMERO³², *apud* MARINS, 2010).

A geração de energia solar fotovoltaica de cada empreendimento foi calculada prevendo a eficiência do painel fotovoltaico e a área de cobertura disponível para aplicação. Apesar de já existir tecnologia com painéis de silício de 24% e até mesmo 29% de eficiência (BLAKERS *et al.*, 2013; ZIN, 2017), a eficiência dos painéis fotovoltaicos disponíveis comercialmente no Brasil chega a 16% (DIAS *et al.*, 2017). Por isso, no cálculo de geração de energia deste trabalho, foi prevista a eficiência do painel fotovoltaico de 16%.

Entende-se por área de cobertura disponível para aplicação do painel fotovoltaico, a área de cobertura dos empreendimentos não ocupadas por áreas técnicas ou afins. Chegou-se ao percentual de área livre para aplicação de painéis fotovoltaicos em coberturas comerciais com base em levantamento por imagem de satélite (GOOGLE, 2017), realizado em um quarteirão da Vila Olímpia de São Paulo, conforme ilustra a figura 27. O bairro foi desenvolvido nos últimos anos, em São Paulo, mediante adensamento construído e verticalização, com

³¹ Demanda energética: compreende-se por demanda energética nessa pesquisa, a solicitação energética de um dado empreendimento (MARINS, 2010).

³² Informações fornecidas por pesquisas conduzidas pelo Prof^o. Marcelo de Andrade Romero, da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo, *apud*, MARINS (2010).

empreendimentos sobretudo comerciais, podendo ser, dessa forma, uma referência para o estudo de caso do presente trabalho.

Figura 27: Levantamento do percentual disponível de cobertura em empreendimentos comerciais em quarteirão da Vila Olímpia – São Paulo

Fonte: Elaborado pela autora com interface do programa Google Earth® (GOOGLE, 2017)

O levantamento realizado na Vila Olímpia indicou uma média de 89,61% de área disponível nos empreendimentos. Na pesquisa, para cálculo de geração de energia dos novos empreendimentos, utilizou-se 90% de área de cobertura para aplicação de painéis fotovoltaicos. O cálculo de geração de energia solar fotovoltaica é apresentado pela equação 4.

$$\text{Radiação solar incidente (kWh.ano)} \times \text{eficiência PV (16\%)} \times \text{área de cobertura livre (90\%)} \quad (4)$$

Com os parâmetros urbanísticos definidos e adicionados ao valor da cota-parte delimitado no Plano Diretor Estratégico do Município de São Paulo de cada lote, é possível estabelecer o número mínimo de unidades habitacionais e a área máxima por unidade habitacional, em cada cenário analisado. O número mínimo de unidades habitacionais é estabelecido pelo C.A. utilizado no projeto multiplicado pela área do terreno. O resultado obtido deve ser dividido pela multiplicação do C.A. máximo permitido pela legislação e a cota parte máxima permitida pela legislação³³, conforme indica a equação 5 (PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO, 2014).

³³ ZEU - Cota parte máxima de terreno por unidade: 20 m²

$$N.\text{mínimo de unidades habitacionais} = \frac{(C.A.u \times At)}{(C.A.máx \times \text{Cota parte máxima})} \quad (5)$$

A área máxima das unidades habitacionais (*Ahab máx*) é estabelecida pela área do terreno multiplicada pelo C.A. máximo permitido pela legislação. O resultado obtido deve ser dividido pelo número mínimo de unidades habitacionais, conforme indica equação 6 (PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO, 2014).

$$Ahab\ máx = \frac{(At \times C.A.máx)}{N^{\circ}\ min.\text{unidades habitacionais}} \quad (6)$$

CAPÍTULO 5: ESTUDO DE CASO: O BAIRRO BELENZINHO, EM SÃO PAULO

A região escolhida para objeto de estudo foi Belenzinho, bairro situado na zona leste do município de São Paulo, conforme ilustra a figura 28.

Figura 28: Bairro Belenzinho situado na cidade de São Paulo

Fonte: Elaborado pela autora com interface do programa Google Earth® (GOOGLE, 2017)

O bairro Belenzinho é marcado por lotes planos e possui dois eixos viários importantes, a Avenida Celso Garcia e a Avenida Alcântara Machado. Em termos de morfologia urbana, pode-se dividir o bairro de duas formas: aquela antiga, composta de tecido compacto de baixo gabarito, organizado em pequenos lotes com a maioria das casas de três pavimentos; por outro lado, parte do bairro passou por transformação recente, a qual possui tecido alto, ocupando grandes lotes com torres residenciais (PACIFICI *et al.*, 2017), o que é evidenciado pelo levantamento tridimensional da área de estudo, ilustrado pela figura 29.

Figura 29: Levantamento tridimensional com a morfologia urbana atual da área de estudo

Fonte: Elaborado pela autora

O bairro Belenzinho foi escolhido por compor os novos EETU e estar localizado em uma região central da cidade de São Paulo. O EETU proposto no Plano Diretor do Município de São Paulo de 2014 incentiva o adensamento onde há acesso facilitado à rede de infraestrutura urbana, como transporte público, água, esgoto, rede elétrica e coleta de resíduos sólidos (PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO, 2014). O uso e a ocupação do solo da área de estudo, predominantemente residencial, mas ainda com a presença de diversos galpões, no cenário dos incentivos construtivos previstos pelo Plano Diretor Estratégico para os EETU, torna o perímetro de estudo um local pertinente à realização da avaliação morfológica também no que se refere ao aproveitamento da energia solar fotovoltaica.

No perímetro de estudo, há zonas urbanas classificadas como ZEU (Zona Eixo de Estruturação Urbana), na maior parte da área de estudo; ZEUP (Zona Eixo de Estruturação Urbana Prevista), na região paralela à Avenida Celso Garcia; ZC-ZEIS (Zona Central-Zona Especial de Interesse Social), em uma pequena área próxima à Avenida Álvaro Ramos; e uma pequena área ZEIS-3 (Zona Especial de Interesse Social), próxima ao metrô Belém, conforme ilustra a figura 30.

Figura 30: Parcelamento, uso e ocupação do solo no perímetro de estudo

Fonte: Elaborado pela autora com dados do Plano Diretor Estratégico do Município de São Paulo (PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO, 2014)

A área de estudo engloba dois tipos de zoneamento (ZEU e ZEIS-3), que possuem incentivo de aumento na densidade construtiva e populacional, através do aumento do C.A. máximo no valor de 4, contra 2 da maior parte do município, conforme ilustra a tabela 4.

Tabela 4: Descrição das zonas urbanas no perímetro de estudo

Tipo de Zona	ZEU	ZEUP	ZC-ZEIS	ZEIS-3
Zona	Estruturação Urbana	Estruturação Urbana Previsto	Centralidades - Especiais de Interesse Social	Especiais de Interesse Social
Descrição	Próximos à eixos de transporte público - densidade construtiva mais altas	Próximos à eixos de transporte público previstos - Densidade construtiva relativamente alta	Incentivo à usos mistos e recuperação ambiental	Ocupações urbanas deterioradas, como cortiços, onde há infraestrutura urbana
C.A. mínimo	0,5	0,5	0,5	0,5
C.A. básico	1	1	1	1
C.A. máximo	4	2	2	2 (terreno até 500 m ²) 4 (terrenos >500m ²)
T.O. (até 500 m ²)	0,85	0,85	0,85	0,85
T.O. (= ou > 500 m ²)	0,7	0,7	0,7	0,7
Altura máxima (m)	não se aplica	28	não se aplica	não se aplica
Recuo frontal	não se aplica	não se aplica	5	5
Recuo lateral (edificação < ou = 10 m)	não se aplica	não se aplica	não se aplica	não se aplica
Recuo lateral (edificação > 10 m)	3	3	3	3
Cota parte (m ²)	20	não se aplica	não se aplica	não se aplica

Fonte: Elaborado pela autora com dados do Plano Diretor Estratégico do Município de São Paulo (PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO, 2014)

Assim, por ser um bairro em transformação morfológica, com adensamento e verticalização, inclusive processos incentivados pela legislação vigente, a área se torna uma amostra atraente para realizar um estudo associado dos possíveis efeitos simultâneos desses processos sobre o potencial de geração fotovoltaica na cobertura das edificações.

A escala de trabalho é a de unidade de vizinhança – segundo WALTON *et al.* (2007), uma unidade de vizinhança possui cerca de 50 ha. e deve estar organizada de forma integrada, proporcionando acesso a facilidades cotidianas com variedade suficiente por meio da caminhada. A escala de vizinhança viabiliza o estudo na mudança na morfologia urbana, além de avaliar as condições da maximização da energia solar fotovoltaica. Sendo assim, o perímetro de estudo envolve a Avenida Álvaro Ramos, a Rua Elói Cerqueira, a Rua Passos, a Avenida Celso Garcia e o eixo da linha da linha vermelha do metrô, conforme ilustra a figura 31.

Figura 31: Ruas e avenidas que configuram o perímetro de estudo

Fonte: Elaborado pela autora com interface do programa Google Earth® (GOOGLE, 2017)

A figura 32 ilustra o uso e a ocupação do solo da área de estudo, que é predominantemente residencial, com alguns usos mistos, comerciais e de uso institucional, como um hospital e algumas escolas.

Figura 32: Uso e ocupação do solo da área de estudo

Fonte: Elaborado pela autora

A área de estudo é próxima ao centro de São Paulo e da linha vermelha do Metrô, e existem alguns galpões industriais remanescentes do predominante uso industrial que a zona leste do município teve, sobretudo na segunda metade do século XX. As áreas próximas aos galpões são suscetíveis à baixa vitalidade urbana, sendo que tais áreas possuem menor quantidade de residentes atualmente.

Foi feito um levantamento acerca dos lotes com potencial de transformação na área de estudo, sendo estabelecidos três cenários para modelagem, simulação e análise do potencial de geração fotovoltaica, do ponto de vista dos efeitos morfológicos urbanos:

- Cenário 1: foi realizada a simulação com a morfologia urbana atual;
- Cenário 2: cenário evolutivo baseado no estudo do pesquisador Lamour (2018), composto por lotes dispersos com galpões, lotes sem uso e lotes com edificações deterioradas, com potencial de transformação do uso e ocupação do solo em curto

prazo – os lotes que compõem o cenário evolutivo 2 da presente pesquisa são destacados na figura 33;

Figura 33: Lotes selecionados para o cenário 2 com potencial de transformação do uso e ocupação do solo em curto prazo

Fonte: Elaborado pela autora

- Cenário 3: cenário evolutivo proposto por todos os lotes de três bairros vizinhos, atualmente ocupados por residências e comércios antigos com baixa densidade urbana e baixo gabarito de altura, com potencial de transformação do uso e ocupação do solo em médio prazo – os lotes que compõem o cenário evolutivo 3 da presente pesquisa são destacados na figura 34.

Figura 34: Lotes selecionados para o cenário 3 com potencial de transformação do uso e ocupação do solo em médio prazo

Fonte: Elaborado pela autora

As quadras selecionadas para compor o cenário 3, ilustradas pela figura 33, foram escolhidas por possuírem quadras vizinhas já verticalizadas, conforme ilustra a imagem tridimensional 35.

Figura 35: Levantamento tridimensional com a morfologia urbana atual da área de estudo do cenário 3

Fonte: Elaborado pela autora

CAPÍTULO 6: AVALIAÇÃO INTEGRADA DE CENÁRIOS MORFOLÓGICOS URBANOS E ACESSO AO SOL, NA ÁREA DE ESTUDO DO BAIRRO BELENZINHO

O capítulo 6 tem o objetivo de aplicar o método desenvolvido na pesquisa, cuja finalidade é analisar os parâmetros urbanísticos previstos na legislação do município de São Paulo com dados de incidência de radiação solar, em uma escala de unidade de vizinhança, prevendo a maximização da energia solar fotovoltaica. Por meio dos processos de modelagem e utilização das ferramentas de simulação descritas, foram configurados e analisados três cenários morfológicos:

- Cenário 1, onde foi simulada a configuração morfológica urbana atual;
- Cenário 2, onde foi simulada a configuração morfológica urbana evolutiva, com alterações previstas em 18 lotes distribuídos na área de estudo (ocupados atualmente por galpões e edificações deterioradas ou, ainda, sem uso), para os quais foram analisados diversos níveis de adensamento e verticalização;
- Cenário 3, onde foi simulada a configuração morfológica urbana evolutiva em uma área concentrada (atualmente ocupada por residências e comércios antigos) com baixa densidade urbana e baixo gabarito de altura – neste caso, também serão analisados diversos níveis de adensamento e verticalização.

Conforme detalhado no capítulo 4, para analisar os cenários evolutivos da morfologia dos lotes selecionados na área de estudo, foi realizada a simulação com a variação isolada dos parâmetros urbanísticos, através do algoritmo elaborado no *Grasshopper*®, além da simulação da variação simultânea dos parâmetros urbanísticos, por meio do algoritmo elaborado no *Grasshopper*®, somada à aplicação do algoritmo genético *Galapagos*. As premissas gerais das simulações estão detalhadas no item 6.1.

6.1 PREMISSAS GERAIS ADOTADAS

As principais premissas urbanísticas adotadas nas simulações abrangeram:

- A cota-parte³⁴ máxima de terreno por unidade aplicada de acordo com o zoneamento (PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO, 2014):
 - ZEU: 20 m²;

³⁴ Ver Glossário.

- ZEUP não estabelecida, adotado: 40 m²;
- ZEIS não estabelecida, adotado: 20 m²;
- O C.A. de acordo com o zoneamento (PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO, 2016):
 - ZEU – C.A. mínimo 0,5; C.A. básico 1,0; C.A. máximo 4,0;
 - ZEUP – C.A. mínimo 0,5; C.A. básico 1,0; C.A. máximo 2,0;
 - ZEIS – C.A. mínimo 0,5; C.A. básico 1,0; C.A. máximo 4,0;
 (PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO, 2016)
- A escala de C.A. adotada para simulação da variação isolada dos parâmetros urbanísticos de acordo com o zoneamento:
 - ZEU – C.A. 4,0; C.A. 2,0; C.A. 1,0;
 - ZEUP – C.A. 2,0; C.A. 1,0; C.A. 0,5;
 - ZEIS – C.A. 4,0; C.A. 2,0; C.A. 1,0;
- A T.O. de acordo com o zoneamento (PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO, 2016):
 - ZEU; ZEUP; ZEIS (lotes de até 500 m²) – T.O. 0,85;
 - ZEU; ZEUP; ZEIS (lotes iguais ou maiores que 500 m²) – T.O. 0,70;
- Escala de T.O. adotada para simulação da variação isolada dos parâmetros urbanísticos de acordo com o zoneamento:
 - ZEU; ZEUP; ZEIS (lotes de até 500 m²) – T.O. 0,85; T.O. 0,60; T.O. 0,40;
 - ZEU; ZEUP; ZEIS (lotes iguais ou maiores que 500 m²) – T.O. 0,70; T.O. 0,50; T.O. 0,30.

Para o cálculo de demanda de eletricidade dos empreendimentos, foi priorizado o uso misto, estimulando o comércio e o serviço no térreo das edificações, conforme emprega o Plano Diretor vigente no município de São Paulo (PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO, 2014) e também visando amenizar a externalidade negativa de intermitência da energia fotovoltaica conectada à rede elétrica. Assim, a demanda de eletricidade foi calculada

de forma que a geração de energia solar fotovoltaica do empreendimento fosse suficiente para atender à demanda de seu uso comercial; a demanda excedente do empreendimento foi calculada para uso residencial, considerando-se o desenvolvimento de empreendimentos mistos. O cálculo foi realizado da seguinte maneira:

- A demanda de eletricidade foi estimada prevendo-se demanda de eletricidade média para uso comercial de 100 kWh/(m².ano) e demanda de eletricidade média para uso residencial de 40 kWh/(m².ano) (ROMERO³⁵ *apud* MARINS, 2010).

Ademais, as principais premissas energéticas abrangeram os cálculos da geração de energia solar fotovoltaica:

- Prevendo 16% de eficiência dos painéis fotovoltaicos (DIAS *et al.*, 2017);
- Prevendo 90% de área de cobertura livre destinada à instalação dos painéis fotovoltaicos.

Acerca das principais premissas climáticas, destaca-se que:

- A base de simulação do programa Diva[®] foi o mês de junho e o horário das 15 horas, conforme detalhado no capítulo 4.

6.2 CONFIGURAÇÃO E ANÁLISE DO CENÁRIO 1: ESTRUTURA MORFOLÓGICA ATUAL

A avaliação dos níveis de acesso a radiação solar de acordo com a estrutura morfológica urbana atual, na área de estudo, foi realizada através do *plug-in* Diva[®], no cenário 1, a fim de determinar o nível de incidência de radiação solar disponível com a morfologia atual da área de estudo, conforme ilustrado pela figura 36.

³⁵ Informações fornecidas por pesquisas conduzidas pelo Prof. Marcelo de Andrade Romero, da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo, *apud*, MARINS (2010).

Figura 36: Mapa ilustrativo da simulação da incidência da radiação solar no topo das edificações da área de estudo, com a morfologia urbana atual

Fonte: Elaborado pela autora pelos programas *Rhinoceros*®, *Grasshopper*® e *Diva*® (ROBERT MCNEEL & ASSOCIATES, 2012a, 2012b; SOLEMMMA, 2016)

A simulação de incidência de radiação solar na área de estudo indica que 10% das edificações existentes possuem um excelente nível de incidência de radiação na cobertura das edificações, com valores acima de 1880 kWh/m².ano, estruturas representadas pela cor amarela da figura 36. Estas possuem edificações vizinhas com gabarito de altura inferior ou equivalente às suas, gerando, dessa forma, pouca ou nenhuma obstrução de sombreamento em sua cobertura.

As edificações que possuem poucas obstruções de sombreamento em sua cobertura representam 86% das edificações existentes na área de estudo, com valores de incidência de radiação solar entre 1840 e 1879 kWh/m².ano. Estas são representadas pelas estruturas de cor alaranjadas da figura 36.

As edificações que tiveram níveis de incidência de radiação solar desfavoráveis em sua cobertura são aquelas que não possuem recuos laterais e estão entre edificações com gabaritos

de altura mais alto. Esses casos representam 4% das edificações existentes na área de estudo, com valores de incidência de radiação solar abaixo de $1840 \text{ kWh/m}^2\text{.ano}$ e são representadas pelas estruturas de cores vinho, roxo e verde na figura 36.

6.3 CONFIGURAÇÃO E ANÁLISE DO CENÁRIO 2: *Evolução morfológica urbana conforme limites impostos pela legislação urbanística vigente e ocupação de grandes lotes vazios ou subutilizados*

A simulação da evolução morfológica da área em estudo foi realizada, no cenário 2, considerando a intervenção em dezoito lotes selecionados, conforme ilustra a figura 37. As simulações da variação isolada e da variação simultânea dos parâmetros urbanísticos foram baseadas em uma escala definida com base nos parâmetros urbanísticos permitidos pelo parcelamento, pelo uso e pela ocupação do solo do município de São Paulo (PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO, 2016), considerando o zoneamento de cada lote de estudo.

Figura 37: Cenário 2 – Lotes com intervenção – área de estudo bairro Belenzinho

Fonte: Elaborado pela autora com auxílio do software Google Earth® (GOOGLE, 2017)

Com os parâmetros urbanísticos descritos nas premissas gerais, foram realizados a simulação de radiação solar incidente por metro quadrado, o cálculo de radiação solar incidente por área total de cobertura e o cálculo da quantidade de unidades habitacionais, nos dezoito lotes de intervenção, do cenário 2, conforme indicado nas tabelas 5, 6 e 7.

Tabela 5: Cenário 2 – Tabela indicativa com valores de incidência do nível de radiação solar por m², cálculo da radiação solar incidente total e cálculo do número de unidades habitacionais (lotes 1 a 6)

Lote 1		3.926 m ²		Cálculo incidência de radiação solar					Cálculo unidades habitacionais		
	C.A.	T.O.	ângulo	Radiação Solar incidente por m ² (kWh/m ² .ano)	% *	Área de cobertura (m ²)	Radiação solar incidente total (kWh/área de cobertura. ano)	% *	Nº pav.	Número mínimo de unidades habitacionais	Área máximo por unidade habitacional (m ²)
C.A.4; T.O.0,70	4	0,70	0º	1.861,00	0%	2.704,5	5.033.074,50	125,4%	5	196	80,00
T.O. 0,50; C.A.4	4	0,50	0º	1.862,00	0%	1.923,7	3.581.929,40	60,4%	8	196	80,00
T.O. 0,30; C.A.4	4	0,30	0º	1.880,00	1%	1.187,6	2.232.688,00	0,0%	13	196	80,00
C.A. 2; T.O.0,70	2	0,70	0º	1.858,00	0%	2.704,5	5.024.961,00	125,1%	2	98	80,00
C.A. 1; T.O.0,70	1	0,70	0º	1.854,00	0%	2.704,5	5.014.143,00	124,6%	1	49	80,00
Galapagos	3	0,30	0º	1.874,00	1%	1.187,6	2.225.562,40	-0,3%	9	147	80,00
Lote 2		1.230 m ²		Cálculo incidência de radiação solar					Cálculo unidades habitacionais		
	C.A.	T.O.	ângulo	Radiação Solar incidente por m ² (kWh/m ² .ano)	% *	Área de cobertura (m ²)	Radiação solar incidente total (kWh/área de cobertura. ano)	% *	Nº pav.	Número mínimo de unidades habitacionais	Área máximo por unidade habitacional (m ²)
C.A.4; T.O.0,70	4	0,70	0º	1.865,00	1%	846,0	1.577.790,00	120,3%	5	62	80,00
T.O. 0,50; C.A.4	4	0,50	0º	1.885,00	2%	601,7	1.134.204,50	58,4%	8	62	80,00
T.O. 0,30; C.A.4	4	0,30	0º	1.888,00	2%	379,3	716.118,40	0,0%	13	62	80,00
C.A. 2; T.O.0,70	2	0,70	0º	1.864,00	1%	846,0	1.576.944,00	120,2%	2	31	80,00
C.A. 1; T.O.0,70	1	0,70	0º	1.844,00	0%	846,0	1.560.024,00	117,8%	1	15	80,00
Galapagos	3	0,40	0º	1.880,00	1%	497,7	935.676,00	30,7%	7	46	80,00
Lote 3		290 m ²		Cálculo incidência de radiação solar					Cálculo unidades habitacionais		
	C.A.	T.O.	ângulo	Radiação Solar incidente por m ² (kWh/m ² .ano)	% *	Área de cobertura (m ²)	Radiação solar incidente total (kWh/área de cobertura. ano)	% *	Nº pav.	Número mínimo de unidades habitacionais	Área máximo por unidade habitacional (m ²)
C.A.4; T.O.0,85	4	0,85	0º	1.884,00	1%	245,2	461.956,80	112,0%	4	15	80,00
T.O. 0,60; C.A.4	4	0,60	0º	1.885,00	1%	167,3	315.360,50	44,7%	6	15	80,00
T.O. 0,40; C.A.4	4	0,40	0º	1.895,00	2%	115,0	217.925,00	0,0%	7	15	80,00
C.A. 2; T.O.0,85	2	0,85	0º	1.859,00	0%	245,2	455.826,80	109,2%	2	7	80,00
C.A. 1; T.O.0,85	1	0,85	0º	1.859,00	0%	245,2	455.826,80	109,2%	1	4	80,00
Galapagos	3	0,70	0º	1.885,00	1%	199,6	376.246,00	72,6%	4	11	80,00
Lote 4		781 m ²		Cálculo incidência de radiação solar					Cálculo unidades habitacionais		
	C.A.	T.O.	ângulo	Radiação Solar incidente por m ² (kWh/m ² .ano)	% *	Área de cobertura (m ²)	Radiação solar incidente total (kWh/área de cobertura. ano)	% *	Nº pav.	Número mínimo de unidades habitacionais	Área máximo por unidade habitacional (m ²)
C.A.4; T.O.0,70	4	0,70	0º	1.872,00	1%	538,0	1.007.136,00	126,2%	5	39	80,00
T.O. 0,50; C.A.4	4	0,50	0º	1.882,00	2%	382,6	720.053,20	61,7%	8	39	80,00
T.O. 0,30; C.A.4	4	0,30	0º	1.885,00	2%	236,2	445.237,00	0,0%	13	39	80,00
C.A. 2; T.O.0,70	2	0,70	0º	1.869,00	1%	538,0	1.005.522,00	125,8%	2	20	80,00
C.A. 1; T.O.0,70	1	0,70	0º	1.850,00	0%	538,0	995.300,00	123,5%	1	10	80,00
Galapagos	3	0,40	0º	1.877,00	1%	310,0	581.870,00	30,7%	7	29	80,00
Lote 5		1.675 m ²		Cálculo incidência de radiação solar					Cálculo unidades habitacionais		
	C.A.	T.O.	ângulo	Radiação Solar incidente por m ² (kWh/m ² .ano)	% *	Área de cobertura (m ²)	Radiação solar incidente total (kWh/área de cobertura. ano)	% *	Nº pav.	Número mínimo de unidades habitacionais	Área máximo por unidade habitacional (m ²)
C.A.4; T.O.0,70	4	0,70	0º	1.857,00	1%	1.153,0	2.141.121,00	146,9%	5	84	80,00
T.O. 0,50; C.A.4	4	0,50	0º	1.885,00	3%	820,0	1.545.700,00	78,3%	8	84	80,00
T.O. 0,30; C.A.4	4	0,30	0º	1.885,00	3%	460,0	867.100,00	0,0%	13	84	80,00
C.A. 2; T.O.0,70	2	0,70	0º	1.842,00	0%	1.153,0	2.123.826,00	144,9%	2	42	80,00
C.A. 1; T.O.0,70	1	0,70	0º	1.833,00	0%	1.153,0	2.113.449,00	143,7%	1	21	80,00
Galapagos	4	0,70	0º	1.857,00	1%	1.153,0	2.141.121,00	146,9%	4	84	80,00
Lote 6		840 m ²		Cálculo incidência de radiação solar					Cálculo unidades habitacionais		
	C.A.	T.O.	ângulo	Radiação Solar incidente por m ² (kWh/m ² .ano)	% *	Área de cobertura (m ²)	Radiação solar incidente total (kWh/área de cobertura. ano)	% *	Nº pav.	Número mínimo de unidades habitacionais	Área máximo por unidade habitacional (m ²)
C.A.4; T.O.0,70	4	0,70	0º	1.872,00	1%	578,5	1.082.952,00	125,1%	5	42	80,00
T.O. 0,50; C.A.4	4	0,50	0º	1.877,00	1%	411,5	772.385,50	60,6%	8	42	80,00
T.O. 0,30; C.A.4	4	0,30	0º	1.894,00	2%	254,0	481.076,00	0,0%	13	42	80,00
C.A. 2; T.O.0,70	2	0,70	0º	1.866,00	0%	578,5	1.079.481,00	124,4%	2	21	80,00
C.A. 1; T.O.0,70	1	0,70	0º	1.858,00	0%	578,5	1.074.853,00	123,4%	1	11	80,00
Galapagos	3	0,70	0º	1.868,00	1%	578,5	1.080.638,00	124,6%	4	32	80,00

* percentual de incremento dos ganhos de radiação solar em relação ao pior resultado

Fonte: Elaborado pela autora

Tabela 6: Cenário 2 – Tabela indicativa com valores de incidência do nível de radiação solar por m², cálculo da radiação solar incidente total e cálculo do número de unidades habitacionais (lotes 7 a 12)

Lote 7		4.100 m ²		Cálculo incidência de radiação solar					Cálculo unidades habitacionais		
	C.A.	T.O.	ângulo	Radiação Solar incidente por m ² (kWh/m ² .ano)	% *	Área de cobertura (m ²)	Radiação solar incidente total (kWh/área de cobertura. ano)	% *	Nº pav.	Número mínimo de unidades habitacionais	Área máximo por unidade habitacional (m ²)
C.A.4; T.O.0,70	4	0,70	0º	1.880,00	1%	2.740,0	5.151.200,00	119,2%	5	205	80,00
T.O. 0,50; C.A.4	4	0,50	0º	1.889,00	1%	2.020,0	3.815.780,00	62,4%	8	205	80,00
T.O. 0,30; C.A.4	4	0,30	0º	1.889,00	1%	1.244,0	2.349.916,00	0,0%	13	205	80,00
C.A. 2; T.O.0,70	2	0,70	0º	1.874,00	1%	2.740,0	5.134.760,00	118,5%	2	103	80,00
C.A. 1; T.O.0,70	1	0,70	0º	1.862,00	0%	2.740,0	5.101.880,00	117,1%	1	51	80,00
Galapagos	4	0,70	5º	1.880,00	1%	2.740,0	5.151.200,00	119,2%	5	205	80,00
Lote 8		5.485 m ²		Cálculo incidência de radiação solar					Cálculo unidades habitacionais		
	C.A.	T.O.	ângulo	Radiação Solar incidente por m ² (kWh/m ² .ano)	% *	Área de cobertura (m ²)	Radiação solar incidente total (kWh/área de cobertura. ano)	% *	Nº pav.	Número mínimo de unidades habitacionais	Área máximo por unidade habitacional (m ²)
C.A.4; T.O.0,70	4	0,70	0º	1.867,00	0%	3.778,4	7.054.272,80	125,8%	5	274	80,00
T.O. 0,50; C.A.4	4	0,50	0º	1.876,00	1%	2.687,5	5.041.750,00	61,4%	8	274	80,00
T.O. 0,30; C.A.4	4	0,30	0º	1.883,00	1%	1.659,1	3.124.085,30	0,0%	13	274	80,00
C.A. 2; T.O.0,70	2	0,70	0º	1.865,00	0%	3.778,4	7.046.716,00	125,6%	2	137	80,00
C.A. 1; T.O.0,70	1	0,70	0º	1.861,00	0%	3.778,4	7.031.602,40	125,1%	1	69	80,00
Galapagos	3	0,60	182º	1.885,00	1%	3.251,9	6.129.831,50	96,2%	5	206	80,00
Lote 9		1.370 m ²		Cálculo incidência de radiação solar					Cálculo unidades habitacionais		
	C.A.	T.O.	ângulo	Radiação Solar incidente por m ² (kWh/m ² .ano)	% *	Área de cobertura (m ²)	Radiação solar incidente total (kWh/área de cobertura. ano)	% *	Nº pav.	Número mínimo de unidades habitacionais	Área máximo por unidade habitacional (m ²)
C.A.4; T.O.0,70	4	0,70	0º	1.878,00	1%	943,7	1.772.268,60	127,5%	5	69	80,00
T.O. 0,50; C.A.4	4	0,50	0º	1.882,00	1%	671,2	1.263.198,40	62,1%	8	69	80,00
T.O. 0,30; C.A.4	4	0,30	0º	1.880,00	1%	414,4	779.072,00	0,0%	13	69	80,00
C.A. 2; T.O.0,70	2	0,70	0º	1.858,00	0%	943,7	1.753.394,60	125,1%	2	34	80,00
C.A. 1; T.O.0,70	1	0,70	0º	1.858,00	0%	943,7	1.753.394,60	125,1%	1	17	80,00
Galapagos	3	0,70	0º	1.878,00	1%	943,7	1.772.268,60	127,5%	4	51	80,00
Lote 10		592 m ²		Cálculo incidência de radiação solar					Cálculo unidades habitacionais		
	C.A.	T.O.	ângulo	Radiação Solar incidente por m ² (kWh/m ² .ano)	% *	Área de cobertura (m ²)	Radiação solar incidente total (kWh/área de cobertura. ano)	% *	Nº pav.	Número mínimo de unidades habitacionais	Área máximo por unidade habitacional (m ²)
C.A.4; T.O.0,70	4	0,70	0º	1.882,00	1%	407,6	767.103,20	127,3%	5	30	80,00
T.O. 0,50; C.A.4	4	0,50	0º	1.884,00	1%	289,9	546.171,60	61,9%	8	30	80,00
T.O. 0,30; C.A.4	4	0,30	0º	1.885,00	2%	179,0	337.415,00	0,0%	13	30	80,00
C.A. 2; T.O.0,70	2	0,70	0º	1.857,00	0%	407,6	756.913,20	124,3%	2	15	80,00
C.A. 1; T.O.0,70	1	0,70	0º	1.861,00	0%	407,6	758.543,60	124,8%	1	7	80,00
Galapagos	3	0,70	0º	1.883,00	1%	407,6	767.510,80	127,5%	4	22	80,00
Lote 11		820 m ²		Cálculo incidência de radiação solar					Cálculo unidades habitacionais		
	C.A.	T.O.	ângulo	Radiação Solar incidente por m ² (kWh/m ² .ano)	% *	Área de cobertura (m ²)	Radiação solar incidente total (kWh/área de cobertura. ano)	% *	Nº pav.	Número mínimo de unidades habitacionais	Área máximo por unidade habitacional (m ²)
C.A.4; T.O.0,70	4	0,70	0º	1.860,00	1%	565,1	1.051.086,00	125,3%	5	41	80,00
T.O. 0,50; C.A.4	4	0,50	0º	1.875,00	2%	402,0	753.750,00	61,6%	8	41	80,00
T.O. 0,30; C.A.4	4	0,30	0º	1.880,00	2%	248,2	466.522,00	0,0%	13	41	80,00
C.A. 2; T.O.0,70	2	0,70	0º	1.842,00	0%	565,1	1.040.914,20	123,1%	2	21	80,00
C.A. 1; T.O.0,70	1	0,70	0º	1.842,00	0%	565,1	1.040.914,20	123,1%	1	10	80,00
Galapagos	4	0,50	0º	1.875,00	2%	402,0	753.750,00	61,6%	8	41	80,00
Lote 12		1.480 m ²		Cálculo incidência de radiação solar					Cálculo unidades habitacionais		
	C.A.	T.O.	ângulo	Radiação Solar incidente por m ² (kWh/m ² .ano)	% *	Área de cobertura (m ²)	Radiação solar incidente total (kWh/área de cobertura. ano)	% *	Nº pav.	Número mínimo de unidades habitacionais	Área máximo por unidade habitacional (m ²)
C.A.4; T.O.0,70	4	0,70	0º	1.864,00	0%	1.019,0	1.899.416,00	127,6%	5	74	80,00
T.O. 0,50; C.A.4	4	0,50	0º	1.865,00	0%	724,8	1.351.752,00	62,0%	8	74	80,00
T.O. 0,30; C.A.4	4	0,30	0º	1.865,00	0%	447,4	834.401,00	0,0%	13	74	80,00
C.A. 2; T.O.0,70	2	0,70	0º	1.861,00	0%	1.019,0	1.896.359,00	127,3%	2	37	80,00
C.A. 1; T.O.0,70	1	0,70	0º	1.860,00	0%	1.019,0	1.895.340,00	127,1%	1	19	80,00
Galapagos	3	0,70	0º	1.863,00	0%	1.019,0	1.898.397,00	127,5%	4	56	80,00

* percentual de incremento dos ganhos de radiação solar em relação ao pior resultado

Fonte: Elaborado pela autora

Tabela 7: Cenário 2 – Tabela indicativa com valores de incidência do nível de radiação solar por m², cálculo da radiação solar incidente total e cálculo do número de unidades habitacionais (lotes 13 a 18)

Lote 13		164 m ²		Cálculo incidência de radiação solar					Cálculo unidades habitacionais		
	C.A.	T.O.	ângulo	Radiação Solar incidente por m ² (kWh/m ² .ano)	% *	Área de cobertura (m ²)	Radiação solar incidente total (kWh/área de cobertura. ano)	% *	Nº pav.	Número mínimo de unidades habitacionais	Área máximo por unidade habitacional (m ²)
C.A.2; T.O.0,85	2	0,85	0º	1.858,00	0%	138,8	257.890,40	112,7%	2	4	80,00
T.O. 0,60; C.A.2	2	0,60	0º	1.860,00	0%	97,2	180.792,00	49,1%	3	4	80,00
T.O. 0,40; C.A.2	2	0,40	0º	1.865,00	0%	65,0	121.225,00	0,0%	5	4	80,00
C.A. 1; T.O.0,85	1	0,85	0º	1.856,00	0%	138,8	257.612,80	112,5%	1	2	80,00
C.A. 0,5; T.O.0,40	0,5	0,40	0º	1.858,00	0%	69,3	128.759,40	6,2%	1	1	80,00
Galapagos	2	0,60	0º	1.862,00	0%	97,6	181.731,20	49,9%	3	4	80,00
Lote 14		1.757 m ²		Cálculo incidência de radiação solar					Cálculo unidades habitacionais		
	C.A.	T.O.	ângulo	Radiação Solar incidente por m ² (kWh/m ² .ano)	% *	Área de cobertura (m ²)	Radiação solar incidente total (kWh/área de cobertura. ano)	% *	Nº pav.	Número mínimo de unidades habitacionais	Área máximo por unidade habitacional (m ²)
C.A.2; T.O.0,70	2	0,70	0º	1.868,00	0%	1.210,5	2.261.214,00	126,8%	2	44	80,00
T.O. 0,50; C.A.2	2	0,50	0º	1.870,00	1%	861,0	1.610.070,00	61,5%	4	44	80,00
T.O. 0,30; C.A.2	2	0,30	0º	1.876,00	1%	531,5	997.094,00	0,0%	6	44	80,00
C.A. 1; T.O.0,70	1	0,70	0º	1.862,00	0%	1.210,5	2.253.951,00	126,1%	1	22	80,00
C.A. 0,5; T.O.0,35	0,5	0,35	0º	1.860,00	0%	605,0	1.125.300,00	12,9%	1	11	80,00
Galapagos	2	0,60	0º	1.868,00	0%	1.041,8	1.946.082,40	95,2%	3	44	80,00
Lote 15		565 m ²		Cálculo incidência de radiação solar					Cálculo unidades habitacionais		
	C.A.	T.O.	ângulo	Radiação Solar incidente por m ² (kWh/m ² .ano)	% *	Área de cobertura (m ²)	Radiação solar incidente total (kWh/área de cobertura. ano)	% *	Nº pav.	Número mínimo de unidades habitacionais	Área máximo por unidade habitacional (m ²)
C.A.2; T.O.0,70	2	0,70	0º	1.860,00	0%	388,8	723.168,00	127,5%	2	14	80,00
T.O. 0,50; C.A.2	2	0,50	0º	1.862,00	0%	276,5	514.843,00	62,0%	4	14	80,00
T.O. 0,30; C.A.2	2	0,30	0º	1.862,00	0%	170,7	317.843,40	0,0%	6	14	80,00
C.A. 1; T.O.0,70	1	0,70	0º	1.858,00	0%	388,8	722.390,40	127,3%	1	7	80,00
C.A. 0,5; T.O.0,35	0,5	0,35	0º	1.855,00	0%	194,4	360.612,00	13,5%	1	4	80,00
Galapagos	2	0,60	175º	1.864,00	0%	334,6	623.694,40	96,2%	3	14	80,00
Lote 16		3.131 m ²		Cálculo incidência de radiação solar					Cálculo unidades habitacionais		
	C.A.	T.O.	ângulo	Radiação Solar incidente por m ² (kWh/m ² .ano)	% *	Área de cobertura (m ²)	Radiação solar incidente total (kWh/área de cobertura. ano)	% *	Nº pav.	Número mínimo de unidades habitacionais	Área máximo por unidade habitacional (m ²)
C.A. 2; T.O. 0,70	2	0,70	0º	1.878,00	0%	2.157,0	4.050.846,00	127,2%	2	78	80,00
T.O. 0,50; C.A.2	2	0,50	0º	1.880,00	0%	1.534,0	2.883.920,00	61,7%	4	78	80,00
T.O. 0,30; C.A.2	2	0,30	0º	1.882,00	1%	947,4	1.783.006,80	0,0%	6	78	80,00
C.A. 1; T.O. 0,70	1	0,70	0º	1.874,00	0%	2.157,0	4.042.218,00	126,7%	1	39	80,00
C.A. 0,5; T.O.0,35	0,5	0,35	0º	1.872,00	0%	1.078,5	2.018.952,00	13,2%	1	20	80,00
Galapagos	2	0,50	191º	1.876,00	0%	1.534,7	2.879.097,20	61,5%	4	78	80,00
Lote 17		1.176 m ²		Cálculo incidência de radiação solar					Cálculo unidades habitacionais		
	C.A.	T.O.	ângulo	Radiação Solar incidente por m ² (kWh/m ² .ano)	% *	Área de cobertura (m ²)	Radiação solar incidente total (kWh/área de cobertura. ano)	% *	Nº pav.	Número mínimo de unidades habitacionais	Área máximo por unidade habitacional (m ²)
C.A. 2; T.O. 0,70	2	0,70	0º	1.863,00	0%	810,6	1.510.147,80	127,6%	2	29	80,00
T.O. 0,50; C.A.2	2	0,50	0º	1.863,00	0%	576,6	1.074.205,80	61,9%	4	29	80,00
T.O. 0,30; C.A.2	2	0,30	0º	1.864,00	0%	355,9	663.397,60	0,0%	6	29	80,00
C.A. 1; T.O. 0,70	1	0,70	0º	1.860,00	0%	810,6	1.507.716,00	127,3%	1	15	80,00
C.A. 0,5; T.O.0,35	0,5	0,35	0º	1.858,00	0%	405,0	752.490,00	13,4%	1	7	80,00
Galapagos	2	0,50	0º	1.864,00	0%	576,6	1.074.782,40	62,0%	4	29	80,00
Lote 18		443 m ²		Cálculo incidência de radiação solar					Cálculo unidades habitacionais		
	C.A.	T.O.	ângulo	Radiação Solar incidente por m ² (kWh/m ² .ano)	% *	Área de cobertura (m ²)	Radiação solar incidente total (kWh/área de cobertura. ano)	% *	Nº pav.	Número mínimo de unidades habitacionais	Área máximo por unidade habitacional (m ²)
C.A. 2; T.O. 0,85	2	0,85	0º	1.871,00	1%	375,0	701.625,00	111,7%	2	11	80,00
C.A. 2; T.O. 0,60	2	0,60	0º	1.872,00	1%	263,0	492.336,00	48,6%	3	11	80,00
C.A. 2; T.O. 0,40	2	0,60	0º	1.884,00	1%	175,9	331.395,60	0,0%	5	11	80,00
C.A. 1; T.O. 0,85	1	0,85	0º	1.851,00	0%	375,0	694.125,00	109,5%	1	6	80,00
C.A. 0,5; T.O. 0,40	0,5	0,40	0º	1.851,00	0%	187,5	347.062,50	4,7%	1	3	80,00
Galapagos	1	0,70	0º	1.865,00	1%	305,0	568.825,00	71,6%	1	6	80,00

* percentual de incremento dos ganhos de radiação solar em relação ao pior resultado

Fonte: Elaborado pela autora

A análise das simulações da variação dos parâmetros urbanísticos isolados de todos os lotes indica que a variação da T.O. para 0,30 gerou melhor desempenho em relação à incidência de radiação solar, quando considerado o kWh/m².ano. Nos lotes 5, 7, 12 e 15, o valor de incidência de radiação solar foi equivalente para variações de T.O. de 0,30 e 0,50. A melhor resposta com a variação da T.O. indica que, quando analisado o kWh/m².ano, a distância entre as edificações vizinhas amplia o acesso da radiação solar à cobertura dos empreendimentos, já que diminui o sombreamento causado pelas construções vizinhas, considerando que, na simulação da variação dos parâmetros urbanísticos isolados, o empreendimento fica localizado sempre no centro do lote.

Além disso, a melhor resposta com a variação da T.O. indica que um maior gabarito de altura do empreendimento analisado é mais satisfatório quando se analisa kWh/m².ano, pois quando há a diminuição da T.O., mantendo-se o C.A. no máximo permitido pela legislação vigente, a área de projeção horizontal é reduzida, necessitando-se, assim, aumentar o número de pavimentos para manter o C.A. previsto. O gabarito de altura maior beneficia, na escala do empreendimento, o nível de incidência de radiação solar.

Porém, quando se analisa a incidência de radiação solar total na cobertura, a redução da T.O. se destaca como sendo o parâmetro que gerou pior desempenho. Isso ocorre, pois, essa redução resulta na diminuição da área total de cobertura – ou seja, a área de projeção horizontal da edificação exposta à incidência de radiação solar. Quando se analisa a radiação solar total incidente sobre a cobertura, as variações com os índices urbanísticos máximos permitidos pela legislação vigente no município de São Paulo indicam melhor desempenho, por possuírem maior área de cobertura combinada com maior gabarito de altura.

O *Galapagos* aplicado ao lote 1 alterou o C.A. e a T.O. para 3 e 0,30, respectivamente, e o ângulo da edificação permaneceu em 0 graus, conforme ilustrado pela figura 38. Os valores são bastante expressivos para o lote 1 por atualmente se encontrar vago; ele sofre com o sombreamento dos empreendimentos vizinhos.

Figura 38: Cenário 2 – Figura comparativa da incidência de radiação solar no lote 1 e na vizinhança imediata: morfologia urbana atual e intervenção morfológica simuladas pelo *Galapagos*

Fonte: Elaborado pela autora

O *Galapagos* aplicado ao lote 2 alterou o C.A. e a T.O. para 3 e 0,40, respectivamente, e o ângulo da edificação permaneceu em 0 graus. No caso da aplicação ao lote 3, o C.A. foi alterado para 3, a T.O. permaneceu no máximo permitido pela legislação vigente (0,70), e o ângulo da edificação permaneceu em 0 graus, conforme ilustrado pela figura 39.

Figura 39: Cenário 2 – Figura comparativa da incidência de radiação solar nos lotes 2, 3 e na vizinhança imediata: morfologia urbana atual e intervenção morfológica simuladas pelo *Galapagos*

Fonte: Elaborado pela autora

O *Galapagos* aplicado ao lote 4 alterou o C.A. e a T.O. para 3 e 0,40, respectivamente, e o ângulo da edificação permaneceu em 0 graus. Já a aplicação ao lote 5 manteve o C.A. e a T.O. nos valores máximos permitidos pela legislação (4 e 0,70, respectivamente), deixando a edificação com densidade construída maior, e o ângulo da edificação permaneceu em 0 graus, conforme ilustrado pela figura 40.

Figura 40: Cenário 2 – Figura comparativa da incidência de radiação solar nos lotes 4, 5 e na vizinhança imediata: morfologia urbana atual e intervenção morfológica simuladas pelo *Galapagos*

Fonte: Elaborado pela autora

O *Galapagos* aplicado ao lote 6 alterou o C.A. para 3 e manteve a T.O. no valor máximo permitido pela legislação (0,70), e ângulo da edificação permaneceu em 0 graus. Já o lote 7 teve o C.A. e a T.O. mantidos nos valores máximos permitidos pela legislação (4 e 0,70, respectivamente), deixando a edificação com densidade construída maior, e o ângulo da edificação foi alterado em 5 graus, conforme ilustrado pela figura 41.

Figura 41: Cenário 2 – Figura comparativa da incidência de radiação solar nos lotes 6, 7 e na vizinhança imediata: morfologia urbana atual e intervenção morfológica simuladas pelo *Galapagos*

O *Galapagos* aplicado ao lote 8 alterou o C.A. e a T.O. para 3 e 0,60, respectivamente, além de alterar o ângulo da edificação em 182 graus. A aplicação aos lotes 9 e 10 alterou o C.A. para 3, a T.O. permaneceu no máximo permitido pela legislação vigente no município (0,70), e o ângulo das edificações permaneceu em 0 graus, conforme ilustrado pela figura 42.

Figura 42: Cenário 2 – Figura comparativa da incidência de radiação solar nos lotes 8, 9, 10 e na vizinhança imediata: morfologia urbana atual e intervenção morfológica simuladas pelo *Galapagos*

Fonte: Elaborado pela autora

O *Galapagos* aplicado ao lote 11 manteve o valor de C.A. no máximo permitido pela legislação vigente no município (4), a T.O. foi alterada para 0,50, e o ângulo da edificação permaneceu em 0 graus, conforme ilustrado pela figura 43.

Figura 43: Cenário 2 – Figura comparativa da incidência de radiação solar no lote 11 e na vizinhança imediata: morfologia urbana atual e intervenção morfológica simuladas pelo *Galapagos*

Fonte: Elaborado pela autora

O *Galapagos* aplicado ao lote 12 alterou o valor de C.A. para 3, manteve a T.O. no máximo permitido pela legislação vigente no município (0,70), e o ângulo da edificação permaneceu em 0 graus, conforme ilustrado pela figura 44.

Figura 44: Cenário 2 – Figura comparativa da incidência de radiação solar no lote 12 e na vizinhança imediata: morfologia urbana atual e intervenção morfológica simuladas pelo *Galapagos*

Fonte: Elaborado pela autora

O *Galapagos* aplicado ao lote 13 manteve o valor de C.A. no máximo permitido pela legislação vigente no município (2), a T.O. foi alterada para 0,60, e o ângulo da edificação permaneceu em 0 graus, conforme ilustrado pela figura 45.

Figura 45: Cenário 2 – Figura comparativa da incidência de radiação solar no lote 13 e na vizinhança imediata: morfologia urbana atual e intervenção morfológica simuladas pelo *Galapagos*

Fonte: Elaborado pela autora

A aplicação ao lote 14 manteve o valor de C.A. no máximo permitido pela legislação vigente (2), a T.O. foi alterada para 0,60, e o ângulo da edificação permaneceu em 0 graus, conforme ilustrado pela figura 46.

Figura 46: Cenário 2 – Figura comparativa da incidência de radiação solar no lote 14 e na vizinhança imediata: morfologia urbana atual e intervenção morfológica simuladas pelo *Galapagos*

Fonte: Elaborado pela autora

No caso do lote 15, o valor de C.A. foi mantido no máximo permitido pela legislação vigente (2), a T.O. foi alterada para 0,60, e o ângulo da edificação foi alterado para 175 graus, conforme ilustrado pela figura 47.

Figura 47: Cenário 2 – Comparativo entre radiação solar no lote 15 e na vizinhança imediata: morfologia urbana atual e intervenção morfológica *Galapagos*

Fonte: Elaborado pela autora

O *Galapagos* aplicado ao lote 16 manteve o valor de C.A. no máximo permitido pela legislação vigente (2), a T.O. foi alterada para 0,50, e o ângulo da edificação foi alterado para

191 graus. A aplicação ao lote 17 manteve o valor de C.A. no máximo permitido pela legislação vigente (2), a T.O. foi alterada para 0,50, e o ângulo da edificação permaneceu em 0 graus. Já no caso do lote 18, o C.A. e a T.O. foram alterados para 1 e 0,70, respectivamente, e o ângulo da edificação permaneceu em 0 graus, conforme ilustrado pela figura 48.

Figura 48: Cenário 2 – Comparativo de radiação solar entre lotes 16, 17, 18 e vizinhança imediata: morfologia urbana atual e intervenção morfológica *Galapagos*

É importante ressaltar que o algoritmo genético *Galapagos* busca a melhor combinação entre os parâmetros, visando maximizar os níveis de incidência de radiação solar no empreendimento analisado e em sua vizinhança imediata.

O número mínimo de habitações é relativo em cada lote, conforme indicam as tabelas 5, 6 e 7, e a área máxima das habitações não deve exceder 80 m². Com os valores de radiação solar incidente por área total de cobertura, foi calculada a demanda de eletricidade dos dezoito empreendimentos previstos, conforme descrição das premissas gerais e cálculo do capítulo 4.5; o cálculo de demanda de eletricidade é ilustrado pelas tabelas 8, 9 e 10.

Tabela 8: Cenário 2 – Tabela indicativa com cálculo de demanda de eletricidade (lotes 1 a 6)

Lote 1				Cálculo demanda energética		
	Nº pav.	Área total (m²)	Geração de Energia PV (kWh.ano)	Demanda Energética Residencial (kWh.ano)*		
C.A.4; T.O.0,70	5	13.522,5	724.762,73	540.900,00		
T.O. 0,50; C.A.4	8	15.389,6	515.797,83	615.584,00		
T.O. 0,30; C.A.4	13	15.438,8	321.507,07	617.552,00		
C.A. 2; T.O.0,70	2	5.409,0	723.594,38	216.360,00		
C.A. 1; T.O.0,70	1	2.704,5	722.036,59	108.180,00		
Galapagos	9	10.688,4	320.480,99	427.536,00		
Lote 2				Cálculo demanda energética		
	Nº pav.	Área total (m²)	Geração de Energia PV (kWh.ano)	Demanda energética Comercial (kWh.ano) - Térreo + 1pav.	Demanda energética Residencial (kWh.ano) - demais pavs.	Demanda energética total (kWh.ano)
C.A.4; T.O.0,70	5	4.230,0	227.201,76	169.200,00	101.520,00	270.720,00
T.O. 0,50; C.A.4	8	4.813,6	163.325,45	120.340,00	144.408,00	264.748,00
T.O. 0,30; C.A.4	13	4.930,9	103.121,05	75.860,00	166.892,00	242.752,00
C.A. 2; T.O.0,70	2	1.692,0	227.079,94	169.200,00	**	169.200,00
C.A. 1; T.O.0,70	1	846,0	224.643,46	84.600,00	**	84.600,00
Galapagos	7	3.483,9	134.737,34	99.540,00	99.540,00	199.080,00
Lote 3				Cálculo demanda energética		
	Nº pav.	Área total (m²)	Geração de Energia PV (kWh.ano)	Demanda energética Comercial (kWh.ano) - Térreo + 1pav.	Demanda energética Residencial (kWh.ano) - demais pavs.	Demanda energética total (kWh.ano)
C.A.4; T.O.0,85	4	980,8	66.521,78	49.040,00	19.616,00	68.656,00
T.O. 0,60; C.A.4	6	1.003,8	45.411,91	33.460,00	26.768,00	60.228,00
T.O. 0,40; C.A.4	7	805,0	31.381,20	23.000,00	23.000,00	46.000,00
C.A. 2; T.O.0,85	2	490,4	65.639,06	49.040,00	**	49.040,00
C.A. 1; T.O.0,85	1	245,2	65.639,06	24.520,00	**	24.520,00
Galapagos	4	798,4	54.179,42	39.920,00	15.968,00	55.888,00
Lote 4				Cálculo demanda energética		
	Nº pav.	Área total (m²)	Geração de Energia PV (kWh.ano)	Demanda energética Comercial (kWh.ano) - Térreo + 1pav.	Demanda energética Residencial (kWh.ano) - demais pavs.	Demanda energética total (kWh.ano)
C.A.4; T.O.0,70	5	2.690,0	145.027,58	107.600,00	64.560,00	172.160,00
T.O. 0,50; C.A.4	8	3.060,8	103.687,66	76.520,00	91.824,00	168.344,00
T.O. 0,30; C.A.4	13	3.070,6	64.114,13	47.240,00	103.928,00	151.168,00
C.A. 2; T.O.0,70	2	1.076,0	144.795,17	107.600,00	**	107.600,00
C.A. 1; T.O.0,70	1	538,0	143.323,20	53.800,00	**	53.800,00
Galapagos	7	2.170,0	83.789,28	62.000,00	62.000,00	124.000,00
Lote 5				Cálculo demanda energética		
	Nº pav.	Área total (m²)	Geração de Energia PV (kWh.ano)	Demanda energética Comercial (kWh.ano) - Térreo + 1pav.	Demanda energética Residencial (kWh.ano) - demais pavs.	Demanda energética total (kWh.ano)
C.A.4; T.O.0,70	5	5.765,0	308.321,42	230.600,00	138.360,00	368.960,00
T.O. 0,50; C.A.4	8	6.560,0	222.580,80	164.000,00	196.800,00	360.800,00
T.O. 0,30; C.A.4	13	5.980,0	124.862,40	92.000,00	202.400,00	294.400,00
C.A. 2; T.O.0,70	2	2.306,0	305.830,94	230.600,00	**	230.600,00
C.A. 1; T.O.0,70	1	1.153,0	304.336,66	115.300,00	**	115.300,00
Galapagos	4	4.612,0	308.321,42	230.600,00	92.240,00	322.840,00
Lote 6				Cálculo demanda energética		
	Nº pav.	Área total (m²)	Geração de Energia PV (kWh.ano)	Demanda energética Comercial (kWh.ano) - Térreo + 1pav.	Demanda energética Residencial (kWh.ano) - demais pavs.	Demanda energética total (kWh.ano)
C.A.4; T.O.0,70	5	2.892,5	155.945,09	115.700,00	69.420,00	185.120,00
T.O. 0,50; C.A.4	8	3.292,0	111.223,51	82.300,00	98.760,00	181.060,00
T.O. 0,30; C.A.4	13	3.302,0	69.274,94	50.800,00	111.760,00	162.560,00
C.A. 2; T.O.0,70	2	1.157,0	155.445,26	115.700,00	**	115.700,00
C.A. 1; T.O.0,70	1	578,5	154.778,83	57.850,00	**	57.850,00
Galapagos	4	2.314,0	155.611,87	115.700,00	46.280,00	161.980,00

Demanda energética superior à geração energética do cenário

*ZEIS 3 são áreas destinadas para promoção de Empreendimentos de Habitação de Interesse Social;

**Quando o cenário possui até dois pavimentos a demanda energética do empreendimento é suprida apenas pelo uso comercial.

Fonte: Elaborado pela autora

Tabela 9: Cenário 2 –Tabela indicativa com cálculo de demanda de eletricidade (lotes 7 a 12)

Lote 7			Cálculo demanda energética			
	Nº pav.	Área total (m²)	Geração de Energia PV (kWh.ano)	Demanda energética Comercial (kWh.ano) - Térreo + 1pav.	Demanda energética Residencial (kWh.ano) - demais pavs.	Demanda energética total (kWh.ano)
C.A.4; T.O.0,70	5	13.700,0	741.772,80	548.000,00	328.800,00	876.800,00
T.O. 0,50; C.A.4	8	16.160,0	549.472,32	404.000,00	484.800,00	888.800,00
T.O. 0,30; C.A.4	13	16.172,0	338.387,90	248.800,00	547.360,00	796.160,00
C.A. 2; T.O.0,70	2	5.480,0	739.405,44	548.000,00	**	548.000,00
C.A. 1; T.O.0,70	1	2.740,0	734.670,72	274.000,00	**	274.000,00
Galapagos	5	13.700,0	741.772,80	548.000,00	328.800,00	876.800,00
Lote 8			Cálculo demanda energética			
	Nº pav.	Área total (m²)	Geração de Energia PV (kWh.ano)	Demanda energética Comercial (kWh.ano) - Térreo + 1pav.	Demanda energética Residencial (kWh.ano) - demais pavs.	Demanda energética total (kWh.ano)
C.A.4; T.O.0,70	5	18.892,0	1.015.815,28	755.680,00	453.408,00	1.209.088,00
T.O. 0,50; C.A.4	8	21.500,0	726.012,00	537.500,00	645.000,00	1.182.500,00
T.O. 0,30; C.A.4	13	21.568,3	449.868,28	331.820,00	730.004,00	1.061.824,00
C.A. 2; T.O.0,70	2	7.556,8	1.014.727,10	755.680,00	**	755.680,00
C.A. 1; T.O.0,70	1	3.778,4	1.012.550,75	377.840,00	**	377.840,00
Galapagos	5	16.259,5	882.695,74	650.380,00	390.228,00	1.040.608,00
Lote 9			Cálculo demanda energética			
	Nº pav.	Área total (m²)	Geração de Energia PV (kWh.ano)	Demanda energética Comercial (kWh.ano) - Térreo + 1pav.	Demanda energética Residencial (kWh.ano) - demais pavs.	Demanda energética total (kWh.ano)
C.A.4; T.O.0,70	5	4.718,5	255.206,68	188.740,00	113.244,00	301.984,00
T.O. 0,50; C.A.4	8	5.369,6	181.900,57	134.240,00	161.088,00	295.328,00
T.O. 0,30; C.A.4	13	5.387,2	112.186,37	82.880,00	182.336,00	265.216,00
C.A. 2; T.O.0,70	2	1.887,4	252.488,82	188.740,00	**	188.740,00
C.A. 1; T.O.0,70	1	943,7	252.488,82	94.370,00	**	94.370,00
Galapagos	4	3.774,8	255.206,68	188.740,00	75.496,00	264.236,00
Lote 10			Cálculo demanda energética			
	Nº pav.	Área total (m²)	Geração de Energia PV (kWh.ano)	Demanda energética Comercial (kWh.ano) - Térreo + 1pav.	Demanda energética Residencial (kWh.ano) - demais pavs.	Demanda energética total (kWh.ano)
C.A.4; T.O.0,70	5	2.038,0	110.462,86	81.520,00	48.912,00	130.432,00
T.O. 0,50; C.A.4	8	2.319,2	78.648,71	57.980,00	69.576,00	127.556,00
T.O. 0,30; C.A.4	13	2.327,0	48.587,76	35.800,00	78.760,00	114.560,00
C.A. 2; T.O.0,70	2	815,2	108.995,50	81.520,00	**	81.520,00
C.A. 1; T.O.0,70	1	407,6	109.230,28	40.760,00	**	40.760,00
Galapagos	4	1.630,4	110.521,56	81.520,00	32.608,00	114.128,00
Lote 11			Cálculo demanda energética			
	Nº pav.	Área total (m²)	Geração de Energia PV (kWh.ano)	Demanda energética Comercial (kWh.ano) - Térreo + 1pav.	Demanda energética Residencial (kWh.ano) - demais pavs.	Demanda energética total (kWh.ano)
C.A.4; T.O.0,70	5	2.825,5	151.356,38	113.020,00	67.812,00	180.832,00
T.O. 0,50; C.A.4	8	3.216,0	108.540,00	80.400,00	96.480,00	176.880,00
T.O. 0,30; C.A.4	13	3.226,0	67.179,17	49.630,00	109.186,00	158.816,00
C.A. 2; T.O.0,70	2	1.130,2	149.891,64	113.020,00	**	113.020,00
C.A. 1; T.O.0,70	1	565,1	149.891,64	56.510,00	**	56.510,00
Galapagos	8	3.216,0	108.540,00	80.400,00	96.480,00	176.880,00
Lote 12			Cálculo demanda energética			
	Nº pav.	Área total (m²)	Geração de Energia PV (kWh.ano)	Demanda energética Comercial (kWh.ano) - Térreo + 1pav.	Demanda energética Residencial (kWh.ano) - demais pavs.	Demanda energética total (kWh.ano)
C.A.4; T.O.0,70	5	5.095,0	273.515,90	203.800,00	122.280,00	326.080,00
T.O. 0,50; C.A.4	8	5.798,4	194.652,29	144.960,00	173.952,00	318.912,00
T.O. 0,30; C.A.4	13	5.816,2	120.153,74	89.480,00	196.856,00	286.336,00
C.A. 2; T.O.0,70	2	2.038,0	273.075,70	203.800,00	**	203.800,00
C.A. 1; T.O.0,70	1	1.019,0	272.928,96	101.900,00	**	101.900,00
Galapagos	4	4.076,0	273.369,17	203.800,00	81.520,00	285.320,00

Demanda energética superior à geração energética do cenário

**Quando o cenário possui até dois pavimentos a demanda energética do empreendimento é suprida apenas pelo uso comercial.

Fonte: Elaborado pela autora

Tabela 10: Cenário 2–Tabela indicativa com cálculo de demanda de eletricidade (lotes 13 a 18)

Lote 13			Cálculo demanda energética			
	Nº pav.	Área total (m²)	Geração de Energia PV (kWh.ano)	Demanda energética Comercial (kWh.ano) - Térreo + 1pav.	Demanda energética Residencial (kWh.ano) - demais pavs.	Demanda energética total (kWh.ano)
C.A.2; T.O.0,85	2	277,6	37.136,22	27.760,00	**	27.760,00
T.O. 0,60; C.A.2	3	291,6	26.034,05	19.440,00	3.888,00	23.328,00
T.O. 0,40; C.A.2	5	325,0	17.456,40	13.000,00	7.800,00	20.800,00
C.A. 1; T.O.0,85	1	138,8	37.096,24	13.880,00	**	13.880,00
C.A. 0,5; T.O.0,40	1	69,3	18.541,35	6.930,00	**	6.930,00
Galapagos	3	292,8	26.169,29	19.520,00	3.904,00	23.424,00
Lote 14			Cálculo demanda energética			
	Nº pav.	Área total (m²)	Geração de Energia PV (kWh.ano)	Demanda energética Comercial (kWh.ano) - Térreo + 1pav.	Demanda energética Residencial (kWh.ano) - demais pavs.	Demanda energética total (kWh.ano)
C.A.2; T.O.0,70	2	2.421,0	325.614,82	242.100,00	**	242.100,00
T.O. 0,50; C.A.2	4	3.444,0	231.850,08	172.200,00	68.880,00	241.080,00
T.O. 0,30; C.A.2	6	3.189,0	143.581,54	106.300,00	85.040,00	191.340,00
C.A. 1; T.O.0,70	1	1.210,5	324.568,94	121.050,00	**	121.050,00
C.A. 0,5; T.O.0,35	1	605,0	162.043,20	60.500,00	**	60.500,00
Galapagos	3	3.125,4	280.235,87	208.360,00	41.672,00	250.032,00
Lote 15			Cálculo demanda energética			
	Nº pav.	Área total (m²)	Geração de Energia PV (kWh.ano)	Demanda energética Comercial (kWh.ano) - Térreo + 1pav.	Demanda energética Residencial (kWh.ano) - demais pavs.	Demanda energética total (kWh.ano)
C.A.2; T.O.0,70	2	777,6	104.136,19	77.760,00	**	77.760,00
T.O. 0,50; C.A.2	4	1.106,0	74.137,39	55.300,00	22.120,00	77.420,00
T.O. 0,30; C.A.2	6	1.024,2	45.769,45	34.140,00	27.312,00	61.452,00
C.A. 1; T.O.0,70	1	388,8	104.024,22	38.880,00	**	38.880,00
C.A. 0,5; T.O.0,35	1	194,4	51.928,13	19.440,00	**	19.440,00
Galapagos	3	1.003,8	89.811,99	66.920,00	13.384,00	80.304,00
Lote 16			Cálculo demanda energética			
	Nº pav.	Área total (m²)	Geração de Energia PV (kWh.ano)	Demanda energética Comercial (kWh.ano) - Térreo + 1pav.	Demanda energética Residencial (kWh.ano) - demais pavs.	Demanda energética total (kWh.ano)
C.A. 2; T.O. 0,70	2	4.314,0	583.321,82	431.400,00	**	431.400,00
T.O. 0,50; C.A.2	4	6.136,0	415.284,48	306.800,00	122.720,00	429.520,00
T.O. 0,30; C.A.2	6	5.684,4	256.752,98	189.480,00	151.584,00	341.064,00
C.A. 1; T.O. 0,70	1	2.157,0	582.079,39	215.700,00	**	215.700,00
C.A. 0,5; T.O.0,35	1	1.078,5	290.729,09	107.850,00	**	107.850,00
Galapagos	4	6.138,8	414.590,00	306.940,00	122.776,00	429.716,00
Lote 17			Cálculo demanda energética			
	Nº pav.	Área total (m²)	Geração de Energia PV (kWh.ano)	Demanda energética Comercial (kWh.ano) - Térreo + 1pav.	Demanda energética Residencial (kWh.ano) - demais pavs.	Demanda energética total (kWh.ano)
C.A. 2; T.O. 0,70	2	1.621,2	217.461,28	162.120,00	**	162.120,00
T.O. 0,50; C.A.2	4	2.306,4	154.685,64	115.320,00	46.128,00	161.448,00
T.O. 0,30; C.A.2	6	2.135,4	95.529,25	71.180,00	56.944,00	128.124,00
C.A. 1; T.O. 0,70	1	810,6	217.111,10	81.060,00	**	81.060,00
C.A. 0,5; T.O.0,35	1	405,0	108.358,56	40.500,00	**	40.500,00
Galapagos	4	2.306,4	154.768,67	115.320,00	46.128,00	161.448,00
Lote 18			Cálculo demanda energética			
	Nº pav.	Área total (m²)	Geração de Energia PV (kWh.ano)	Demanda energética Comercial (kWh.ano) - Térreo + 1pav.	Demanda energética Residencial (kWh.ano) - demais pavs.	Demanda energética total (kWh.ano)
C.A. 2; T.O. 0,85	2	750,0	101.034,00	75.000,00	**	75.000,00
C.A. 2; T.O. 0,60	3	789,0	70.896,38	78.900,00	10.520,00	89.420,00
C.A. 2; T.O. 0,40	5	879,5	47.720,97	87.950,00	21.108,00	109.058,00
C.A. 1; T.O. 0,85	1	375,0	99.954,00	37.500,00	**	37.500,00
C.A. 0,5; T.O. 0,40	1	187,5	49.977,00	18.750,00	**	18.750,00
Galapagos	1	305,0	81.910,80	30.500,00	**	30.500,00

Demanda energética superior à geração energética do cenário

**Quando o cenário possui até dois pavimentos a demanda energética do empreendimento é suprida apenas pelo uso comercial.

Fonte: Elaborado pela autora

O cálculo de demanda de eletricidade ilustrado pelas tabelas 8, 9 e 10 indica que quando o empreendimento analisado é de uso residencial e excede 7 pavimentos, a demanda de eletricidade do empreendimento se torna superior à geração de energia fotovoltaica do mesmo. Quando o empreendimento analisado é de uso misto e excede 3 pavimentos, a demanda de eletricidade do empreendimento se torna superior a sua geração de energia fotovoltaica. A maior parte dos resultados indica quando o empreendimento analisado é de uso comercial e excede 2 pavimentos, de modo que a demanda de eletricidade do empreendimento se torna superior à geração de energia fotovoltaica do mesmo. A única exceção do estudo é o lote 18, em que dois pavimentos já foram suficientes para que a demanda de eletricidade fosse superior à geração de energia fotovoltaica do mesmo.

De forma geral, o *Galapagos* aplicado nos lotes analisados gerou resultados em que a demanda anual do empreendimento ficou superior à sua geração de energia fotovoltaica. Nesses casos, a demanda de eletricidade anual do empreendimento não é suprida por sua própria geração de energia fotovoltaica. As exceções foram os lotes 13, 14, 15 e 18, onde o *Galapagos* gerou resultados em que a demanda anual do empreendimento ficou inferior à geração de energia fotovoltaica do mesmo. Nesses casos, a demanda de eletricidade anual do empreendimento é suprida por sua própria geração de energia fotovoltaica.

6.3.1. Cenário 2: Análise dos resultados

Ao comparar as simulações das variações dos parâmetros isolados do cenário 2, no conjunto de lotes analisados, constatou-se que os resultados concorrem quando analisados por radiação solar incidente por m^2 e por radiação solar incidente por área total de cobertura.

Quando a análise é feita por radiação solar incidente por m^2 , os melhores resultados referem-se a taxas de ocupação menores, já que, dessa forma, os volumes construídos têm gabarito de altura mais elevado e, portanto, estão mais expostos à incidência por metro quadrado. No entanto, quando a análise é feita considerando a radiação solar incidente por área total de cobertura, os melhores resultados encontram-se nas variações que empregam, sobretudo, maiores taxas de ocupação e coeficientes de aproveitamento, segundo os valores permitidos pela legislação vigente no município de São Paulo, conforme ilustra a figura 49.

Figura 49: Cenário 2 – Gráfico comparativo de incremento das melhores respostas dos ganhos de radiação solar incidente por m² e por radiação solar incidente total, nos dezoito lotes analisados através das simulações da variação isolada dos parâmetros urbanísticos

Fonte: Elaborado pela autora

Os resultados obtidos pelo algoritmo genético *Galapagos*, de forma geral, convergem com os resultados obtidos através da variação isolada dos parâmetros urbanísticos. Quando o parâmetro é variado de forma isolada, apenas o nível da incidência de radiação solar da cobertura do empreendimento analisado é considerado; ou seja, o algoritmo elaborado no *Grasshopper*[®] busca o melhor desempenho para o empreendimento analisado isoladamente, sem considerar seu impacto no acesso à incidência de radiação solar do entorno.

Já na simulação com algoritmo genético *Galapagos*, este busca a melhor combinação entre os parâmetros, visando maximizar o nível de incidência de radiação solar na cobertura do empreendimento e de seu entorno. As simulações realizadas no *Galapagos* indicam que os resultados mais satisfatórios em relação à radiação solar incidente por área total de cobertura referem-se ao valor de T.O. de 0,70 combinado com C.A. máxima ou intermediária, conforme ilustra a figura 50.

Figura 50: Cenário 2 – Gráfico comparativo de incremento das melhores respostas dos ganhos de radiação solar incidente por radiação solar incidente total, nos dezoito lotes analisados, por meio das simulações simultânea com o *Galapagos*

Fonte: Elaborado pela autora

A figura 50 indica que quando o C.A. máximo de 4 é permitido institucionalmente, representa 25% dos resultados satisfatórios, contra 75% representados pelo valor intermediário de C.A. de 3. Porém, quando apenas o C.A. máximo de 2 é permitido institucionalmente, o C.A. máximo representa 84% dos resultados satisfatórios, contra 26% representados pelo valor intermediário de C.A. de 1. Conclui-se, dessa forma, que visando maximizar o potencial de geração energética solar fotovoltaica na cobertura das edificações, o C.A. de 2 mostra-se um valor insuficiente.

Em relação à T.O., o gráfico da figura 49 indica que o valor de T.O. igual a 0,70 representa 45% dos melhores resultados, mesmo quando a T.O. máxima de 0,85 é permitida institucionalmente. Tal resultado indica que 0,70 é o valor mínimo a ser considerado quando se analisa as condicionantes para afastamento entre as edificações, item essencial quando o objetivo é maximizar o potencial de geração energética solar fotovoltaica nas coberturas, considerando que na simulação da variação dos parâmetros urbanísticos, os recuos delimitados pela legislação vigente no município de São Paulo são respeitados. A relação entre os diferentes tipos de forma urbana e suas respectivas relações com a maximização de geração de energia fotovoltaica é ilustrada pela figura 51.

Figura 51: Cenário 2 – Comparativo entre diferentes tipos de forma urbana e suas respectivas relações com a maximização energética fotovoltaica na cobertura das edificações, considerando um recorte da área de estudo

Fonte: Elaborado pela autora

A figura 51 ilustra um recorte do cenário 2 que indica o comparativo das variações da forma urbana, considerando a radiação solar incidente por metro quadrado. Conforme indica os resultados das simulações, quanto menor a T.O. e, conseqüentemente, mais elevado o gabarito de altura do empreendimento analisado, melhor será o nível da radiação solar incidente por metro quadrado; em contrapartida, o sombreamento causado nas edificações vizinhas será prejudicial. Dessa forma, o cenário ideal, desenvolvido pelo algoritmo genético *Galapagos*, exibiu a melhor combinação entre os parâmetros urbanísticos, com o objetivo de maximizar os níveis de radiação solar incidente por metro quadrado no empreendimento analisado, além de evitar prejuízos à radiação incidente, em decorrência do sombreamento, nas edificações vizinhas.

O *Galapagos* emprega número de pavimentos variados no cenário 2, sobretudo porque o número de pavimentos possui influência direta no sombreamento causado nas edificações vizinhas. Conforme indicam as tabelas apresentadas nos resultados, 4 pavimentos representam 46% dos empreendimentos cuja morfologia urbana foi maximizada pelo algoritmo; 3 pavimentos representam 17% dos empreendimentos; 5 e 7 pavimentos representam 11% dos empreendimentos; 9, 8 e 1 pavimentos representam apenas 5% dos empreendimentos. A comparação entre a morfologia urbana atual frente à morfologia urbana evolutiva *Galapagos*, no cenário 2, está ilustrada pela imagem tridimensional 52.

Figura 52: Cenário 2 – Comparativo tridimensional entre morfologia urbana atual frente ao cenário evolutivo *Galapagos*

Fonte: Elaborado pela autora

No que se refere ao cálculo de demanda de eletricidade dos empreendimentos analisados, quando a estrutura em questão é de uso residencial e excede 7 pavimentos, sua demanda de eletricidade se torna superior a sua geração de energia fotovoltaica. No caso de o empreendimento analisado ser de uso misto e exceder 3 pavimentos, sua demanda de eletricidade se torna superior a sua geração de energia fotovoltaica. Por último, quando se analisa empreendimento de uso comercial e este excede 2 pavimentos, sua demanda de eletricidade se torna superior a sua geração de energia fotovoltaica.

A tabela 11 apresenta a síntese da análise dos resultados obtidos no cenário 2.

Tabela 11: Cenário 2 – Resumo da análise dos resultados obtidos

Resultados satisfatórios cenário 2 – lotes distribuídos - Grasshopper	C.A. 4 (quando o máximo permitido é 4) C.A. 2 (quando o máximo permitido é 2) T.O. de 0,70 (quando o máximo permitido é 0,70) T.O. de 0,85 (quando o máximo permitido é 0,85)
Média percentual de incremento de ganhos de radiação solar do empreendimento em relação com o pior resultado - Grasshopper	120%
Resultados satisfatórios cenário 2 – lotes distribuídos - Galapagos	C.A. 3 (quando o máximo permitido é 4) C.A. 2 (quando o máximo permitido é 2) T.O. de 0,70 (mesmo quando o máximo permitido é 0,85)
Média percentual de incremento de ganhos de radiação solar do empreendimento em relação com o pior resultado - Galapagos	60%
Demanda de eletricidade superior à geração de energia do empreendimento	Uso residencial: quando excede 7 pavimentos Uso comercial: quando excede 2 pavimentos Uso misto: quando excede 3 pavimentos

Fonte: Elaborado pela autora

6.4 CONFIGURAÇÃO E ANÁLISE DO CENÁRIO 3: Evolução morfológica urbana conforme limites impostos pela legislação urbanística vigente, com adensamento e verticalização de tecido urbano baixo selecionado

A simulação da evolução morfológica da área em estudo realizada, no cenário 3, considerou a intervenção em onze lotes selecionados, conforme ilustra a figura 53, utilizando as ferramentas computacionais anteriormente descritas. A seleção dessas quadras se justifica por se tratar de tecido urbano horizontalizado, vizinho às quadras onde ocorreu a maior verticalização do bairro (torres de apartamentos), e onde se poderia, então, analisar os efeitos da verticalização no aproveitamento de energia fotovoltaica na cobertura das edificações, na microescala urbana. As simulações das variações isolada e simultânea dos parâmetros urbanísticos foram baseadas em uma escala definida com base nos parâmetros urbanísticos máximos permitidos pelo parcelamento, pelo uso e pela ocupação do solo do município de São Paulo (PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO, 2016), considerando o zoneamento de cada lote de estudo.

Figura 53: Lotes analisados no cenário 3 – área de estudo: bairro Belenzinho

Fonte: Elaborado pela autora com auxílio do software Google Earth® (GOOGLE, 2017)

Com os parâmetros urbanísticos descritos nas premissas gerais, foram realizados a simulação de radiação solar incidente por metro quadrado, o cálculo de radiação solar incidente por área total de cobertura e o cálculo da quantidade de unidades habitacionais, nos onze lotes selecionados, no cenário 3, conforme indicado nas tabelas 12 e 13.

Tabela 12: Cenário 3 – Tabela indicativa com valores de incidência do nível de radiação solar por m², cálculo da radiação solar incidente total e cálculo do número de unidades habitacionais (lotes 1 a 6)

Lote 1		Cálculo incidência de radiação solar							Cálculo unidades habitacionais		
2.484 m ²		C.A.	T.O.	ângulo	Radiação Solar incidente por m ² (kWh/m ² .ano)	% *	Área de cobertura (m ²)	Radiação solar incidente total (kWh/área de cobertura. ano)	% *	Nº pav.	Área máximo por unidade habitacional (m ²)
C.A.4; T.O.0,70		4	0,70	0°	1.871,00	1%	1.711,0	3.201.281,00	127%	5	80,00
T.O. 0,50; C.A.4		4	0,50	0°	1.873,00	1%	1.217,1	2.279.647,03	62%	8	80,00
T.O. 0,30; C.A.4		4	0,30	0°	1.876,00	1%	751,4	1.409.588,88	0%	13	80,00
C.A. 2; T.O.0,70		2	0,70	0°	1.864,00	0%	1.711,0	3.189.304,00	126%	2	80,00
C.A. 1; T.O.0,70		1	0,70	0°	1.859,00	0%	1.711,0	3.180.749,00	126%	1	80,00
Galapagos		2	0,40	194°	1.865,00	0%	985,9	1.838.628,90	30%	5	80,00
Lote 2		Cálculo incidência de radiação solar							Cálculo unidades habitacionais		
2.208 m ²		C.A.	T.O.	ângulo	Radiação Solar incidente por m ² (kWh/m ² .ano)	% *	Área de cobertura (m ²)	Radiação solar incidente total (kWh/área de cobertura. ano)	% *	Nº pav.	Área máximo por unidade habitacional (m ²)
C.A.4; T.O.0,70		4	0,70	0°	1.871,00	1%	1.521,4	2.846.483,27	127%	5	80,00
T.O. 0,50; C.A.4		4	0,50	0°	1.873,00	1%	1.082,1	2.026.810,76	62%	8	80,00
T.O. 0,30; C.A.4		4	0,30	0°	1.876,00	1%	668,0	1.253.168,00	0%	13	80,00
C.A. 2; T.O.0,70		2	0,70	0°	1.860,00	0%	1.521,4	2.829.748,20	126%	2	80,00
C.A. 1; T.O.0,70		1	0,70	0°	1.859,00	0%	1.521,4	2.828.226,83	126%	1	80,00
Galapagos		3	0,40	199°	1.874,00	1%	876,5	1.642.561,00	31%	7	80,00
Lote 3		Cálculo incidência de radiação solar							Cálculo unidades habitacionais		
1.689 m ²		C.A.	T.O.	ângulo	Radiação Solar incidente por m ² (kWh/m ² .ano)	% *	Área de cobertura (m ²)	Radiação solar incidente total (kWh/área de cobertura. ano)	% *	Nº pav.	Área máximo por unidade habitacional (m ²)
C.A.4; T.O.0,70		4	0,70	0°	1.871,00	1%	1.163,5	2.176.908,50	127%	5	80,00
T.O. 0,50; C.A.4		4	0,50	0°	1.874,00	1%	827,6	1.550.866,18	62%	8	80,00
T.O. 0,30; C.A.4		4	0,30	0°	1.876,00	1%	511,0	958.636,00	0%	13	80,00
C.A. 2; T.O.0,70		2	0,70	0°	1.855,00	0%	1.163,5	2.158.292,50	125%	2	80,00
C.A. 1; T.O.0,70		1	0,70	0°	1.850,00	0%	1.163,5	2.152.475,00	125%	1	80,00
Galapagos		4	0,40	183°	1.884,00	2%	691,8	1.303.351,20	36%	9	80,00
Lote 4		Cálculo incidência de radiação solar							Cálculo unidades habitacionais		
2.732 m ²		C.A.	T.O.	ângulo	Radiação Solar incidente por m ² (kWh/m ² .ano)	% *	Área de cobertura (m ²)	Radiação solar incidente total (kWh/área de cobertura. ano)	% *	Nº pav.	Área máximo por unidade habitacional (m ²)
C.A.4; T.O.0,70		4	0,70	0°	1.880,00	1%	1.882,5	3.539.100,00	128%	5	80,00
T.O. 0,50; C.A.4		4	0,50	0°	1.873,00	1%	1.339,0	2.507.947,00	62%	8	80,00
T.O. 0,30; C.A.4		4	0,30	0°	1.876,00	1%	826,6	1.550.701,60	0%	13	80,00
C.A. 2; T.O.0,70		2	0,70	0°	1.858,00	0%	1.882,5	3.497.685,00	126%	2	80,00
C.A. 1; T.O.0,70		1	0,70	0°	1.857,00	0%	1.882,5	3.495.802,50	125%	1	80,00
Galapagos		2	0,40	166°	1.875,00	1%	1.119,3	2.098.687,50	35%	4	80,00
Lote 5		Cálculo incidência de radiação solar							Cálculo unidades habitacionais		
2.204 m ²		C.A.	T.O.	ângulo	Radiação Solar incidente por m ² (kWh/m ² .ano)	% *	Área de cobertura (m ²)	Radiação solar incidente total (kWh/área de cobertura. ano)	% *	Nº pav.	Área máximo por unidade habitacional (m ²)
C.A.4; T.O.0,70		4	0,70	0°	1.871,00	1%	1.518,0	2.840.178,00	127%	5	80,00
T.O. 0,50; C.A.4		4	0,50	0°	1.873,00	1%	1.080,0	2.022.840,00	61%	8	80,00
T.O. 0,30; C.A.4		4	0,30	0°	1.879,00	1%	666,8	1.252.823,25	0%	13	80,00
C.A. 2; T.O.0,70		2	0,70	0°	1.859,00	0%	1.518,0	2.821.962,00	125%	2	80,00
C.A. 1; T.O.0,70		1	0,70	0°	1.852,00	0%	1.518,0	2.811.336,00	124%	1	80,00
Galapagos		4	0,50	9°	1.869,00	1%	1.111,0	2.076.459,00	66%	7	80,00
Lote 6		Cálculo incidência de radiação solar							Cálculo unidades habitacionais		
1.602 m ²		C.A.	T.O.	ângulo	Radiação Solar incidente por m ² (kWh/m ² .ano)	% *	Área de cobertura (m ²)	Radiação solar incidente total (kWh/área de cobertura. ano)	% *	Nº pav.	Área máximo por unidade habitacional (m ²)
C.A.4; T.O.0,70		4	0,70	0°	1.871,00	1%	1.103,8	2.065.209,80	127%	5	80,00
T.O. 0,50; C.A.4		4	0,50	0°	1.874,00	1%	785,1	1.471.277,40	62%	8	80,00
T.O. 0,30; C.A.4		4	0,30	0°	1.876,00	1%	484,7	909.297,20	0%	13	80,00
C.A. 2; T.O.0,70		2	0,70	0°	1.863,00	0%	1.103,8	2.056.379,40	126%	2	80,00
C.A. 1; T.O.0,70		1	0,70	0°	1.859,00	0%	1.103,8	2.051.964,20	126%	1	80,00
Galapagos		3	0,40	193°	1.872,00	1%	636,0	1.190.592,00	31%	7	80,00

* percentual de incremento dos ganhos de radiação solar em relação ao pior resultado

Fonte: Elaborado pela autora

Tabela 13: Cenário 3 – Tabela indicativa com valores de incidência do nível de radiação solar por m², cálculo da radiação solar incidente total e cálculo do número de unidades habitacionais (lotes 7 a 11)

Lote 7		2.533 m ²		Cálculo incidência de radiação solar					Cálculo unidades habitacionais		
	C.A.	T.O.	ângulo	Radiação Solar incidente por m ² (kWh/m ² .ano)	% *	Área de cobertura (m ²)	Radiação solar incidente total (kWh/área de cobertura. ano)	% *	Nº pav.	Número mínimo de unidades habitacionais	Área máximo por unidade habitacional (m ²)
C.A.4; T.O.0,70	4	0,70	0°	1.871,00	1%	1.744,9	3.264.707,90	127%	5	127	80,00
T.O. 0,50; C.A.4	4	0,50	0°	1.875,00	1%	1.241,1	2.327.062,50	62%	8	127	80,00
T.O. 0,30; C.A.4	4	0,30	0°	1.876,00	1%	766,2	1.437.391,20	0%	13	127	80,00
C.A. 2; T.O.0,70	2	0,70	0°	1.868,00	0%	1.744,9	3.259.473,20	127%	2	63	80,00
C.A. 1; T.O.0,70	1	0,70	0°	1.861,00	0%	1.744,9	3.247.258,90	126%	1	32	80,00
Galapagos	4	0,40	166°	1.878,00	0%	1.005,3	1.887.953,40	31%	10	127	80,00
Lote 8		2.026 m ²		Cálculo incidência de radiação solar					Cálculo unidades habitacionais		
	C.A.	T.O.	ângulo	Radiação Solar incidente por m ² (kWh/m ² .ano)	% *	Área de cobertura (m ²)	Radiação solar incidente total (kWh/área de cobertura. ano)	% *	Nº pav.	Número mínimo de unidades habitacionais	Área máximo por unidade habitacional (m ²)
C.A.4; T.O.0,70	4	0,70	0°	1.871,00	1%	1.396,4	2.612.664,40	127%	5	101	80,00
T.O. 0,50; C.A.4	4	0,50	0°	1.873,00	1%	993,2	1.860.301,06	62%	8	101	80,00
T.O. 0,30; C.A.4	4	0,30	0°	1.876,00	1%	613,2	1.150.269,40	0%	13	101	80,00
C.A. 2; T.O.0,70	2	0,70	0°	1.868,00	1%	1.396,4	2.608.475,20	127%	2	51	80,00
C.A. 1; T.O.0,70	1	0,70	0°	1.857,00	0%	1.396,4	2.593.114,80	125%	1	25	80,00
Galapagos	4	0,40	350°	1.877,00	1%	804,0	1.509.108,00	31%	10	101	80,00
* percentual de incremento dos ganhos de radiação solar em relação ao pior resultado											
Lote 9		2.654,0 m ²		Cálculo incidência de radiação solar					Cálculo unidades habitacionais		
	C.A.	T.O.	ângulo	Radiação Solar incidente por m ² (kWh/m ² .ano)	% *	Área de cobertura (m ²)	Radiação solar incidente total (kWh/área de cobertura. ano)	% *	Nº pav.	Número mínimo de unidades habitacionais	Área máximo por unidade habitacional (m ²)
C.A.4; T.O.0,70	4	0,70	0°	1.871,00	1%	1.828,5	3.421.123,50	127%	5	133	80,00
T.O. 0,50; C.A.4	4	0,50	0°	1.873,00	1%	1.300,5	2.435.836,50	62%	8	133	80,00
T.O. 0,30; C.A.4	4	0,30	0°	1.876,00	1%	802,9	1.506.240,40	0%	13	133	80,00
C.A. 2; T.O.0,70	2	0,70	0°	1.857,00	0%	1.828,5	3.395.524,50	125%	2	66	80,00
C.A. 1; T.O.0,70	1	0,70	0°	1.853,00	0%	1.828,5	3.388.210,50	125%	1	33	80,00
Galapagos	1	0,40	13°	1.865,00	1%	1.053,5	1.964.684,25	30%	2	33	80,00
Lote 10		1.883 m ²		Cálculo incidência de radiação solar					Cálculo unidades habitacionais		
	C.A.	T.O.	ângulo	Radiação Solar incidente por m ² (kWh/m ² .ano)	% *	Área de cobertura (m ²)	Radiação solar incidente total (kWh/área de cobertura. ano)	% *	Nº pav.	Número mínimo de unidades habitacionais	Área máximo por unidade habitacional (m ²)
C.A.4; T.O.0,70	4	0,70	0°	1.871,00	1%	1.297,1	2.426.874,10	127%	5	94	80,00
T.O. 0,50; C.A.4	4	0,50	0°	1.873,00	1%	922,6	1.728.029,80	62%	8	94	80,00
T.O. 0,30; C.A.4	4	0,30	0°	1.876,00	1%	569,6	1.068.513,32	0%	13	94	80,00
C.A. 2; T.O.0,70	2	0,70	0°	1.864,00	0%	1.297,1	2.417.794,40	126%	2	47	80,00
C.A. 1; T.O.0,70	1	0,70	0°	1.860,00	0%	1.297,1	2.412.606,00	126%	1	24	80,00
Galapagos	3	0,50	0°	1.873,00	1%	922,6	1.728.029,80	62%	6	71	80,00
Lote 11		802 m ²		Cálculo incidência de radiação solar					Cálculo unidades habitacionais		
	C.A.	T.O.	ângulo	Radiação Solar incidente por m ² (kWh/m ² .ano)	% *	Área de cobertura (m ²)	Radiação solar incidente total (kWh/área de cobertura. ano)	% *	Nº pav.	Número mínimo de unidades habitacionais	Área máximo por unidade habitacional (m ²)
C.A.4; T.O.0,70	4	0,70	0°	1.871,00	1%	552,0	1.032.792,00	127%	5	40	80,00
T.O. 0,50; C.A.4	4	0,50	0°	1.873,00	1%	392,8	735.714,40	62%	8	40	80,00
T.O. 0,30; C.A.4	4	0,30	0°	1.876,00	1%	242,5	454.930,00	0%	13	40	80,00
C.A. 2; T.O.0,70	2	0,70	0°	1.861,00	1%	552,0	1.027.272,00	126%	2	20	80,00
C.A. 1; T.O.0,70	1	0,70	0°	1.850,00	0%	552,0	1.021.200,00	124%	1	10	80,00
Galapagos	3	0,50	0°	1.869,00	1%	392,8	734.143,20	61%	6	30	80,00
* percentual de incremento dos ganhos de radiação solar em relação ao pior resultado											

Fonte: Elaborado pela autora

A análise das simulações da variação dos parâmetros urbanísticos isolados emprega, sobretudo, melhor desempenho em relação à incidência de radiação solar para a variação de T.O. para 0,30, quando considerado o kWh/m².ano. Isso indica que quando a análise é

realizada por radiação solar incidente por metro quadrado, o resultado está em consonância com o cenário 2, sugerindo que a distância entre as edificações vizinhas amplia o acesso da radiação solar à cobertura dos empreendimentos, já que diminui o sombreamento causado pelas edificações vizinhas, além de o gabarito de altura maior beneficiar, na escala do empreendimento, o nível de incidência de radiação solar. Porém, quando se analisa a incidência de radiação solar total sobre a cobertura, conforme indicado nos resultados do cenário 2, a redução da T.O. se destaca como sendo o parâmetro que gerou pior desempenho.

As tabelas 12 e 13 indicam que o *Galapagos* aplicado ao lote 1 alterou o valor de C.A. e a T.O. para 2 e 0,40, respectivamente, e o ângulo da edificação foi modificado em 194 graus. No caso do lote 2, o algoritmo alterou os valores de C.A. e a T.O. para 3 e 0,40, respectivamente, e o ângulo da edificação foi modificado em 199 graus. O *Galapagos* aplicado ao lote 3 manteve o valor de C.A. no máximo permitido pela legislação vigente no município (4), a T.O. foi alterada para 0,40, e o ângulo da edificação foi modificado em 183 graus. A aplicação ao lote 4 alterou os valores de C.A. e a T.O. para 2 e 0,40, respectivamente, e o ângulo da edificação foi modificado em 166 graus. No lote 5, manteve-se o valor de C.A. no máximo permitido pela legislação vigente no município (4), a T.O. foi alterada para 0,50, e o ângulo da edificação foi modificado em 9 graus. O *Galapagos* aplicado ao lote 6 alterou os valores de C.A. e a T.O. para 3 e 0,40, respectivamente, e o ângulo da edificação foi modificado em 193 graus. Por sua vez, o lote 7 teve o valor de C.A. mantido no máximo permitido pela legislação vigente no município (4), a T.O. foi alterada para 0,40, e o ângulo da edificação foi modificado em 166 graus. O *Galapagos* aplicado ao lote 8 manteve o valor de C.A. no máximo permitido pela legislação vigente no município (4), a T.O. foi alterada para 0,40, e o ângulo da edificação foi modificado em 350 graus. No caso da aplicação ao lote 9, os valores de C.A. e a T.O. foram alterados para 1 e 0,40, respectivamente, e o ângulo da edificação foi modificado em 13 graus. Já no lote 10, os valores de C.A. e a T.O. alteraram-se para 3 e 0,50, respectivamente, e o ângulo da edificação permaneceu em 0 graus. Por fim, o *Galapagos* aplicado ao lote 11 alterou os valores de C.A. e a T.O. para 3 e 0,50, respectivamente, e o ângulo da edificação permaneceu em 0 graus.

Nota-se, por meio do comparativo da figura 54 que ilustra os níveis de radiação solar do cenário morfológico atual de ocupação frente ao cenário morfológico evolutivo, que este maximiza os níveis de incidência da radiação solar nos lotes analisados.

Figura 54: Cenário 3 – Figura comparativa da incidência de radiação solar nos lotes 1 a 11: morfologia urbana atual e intervenção morfológica simulada pelo *Galapagos*

Fonte: Elaborado pela autora

Conforme enfatizado no cenário 2, o algoritmo genético *Galapagos* busca maximizar os níveis de incidência da radiação solar no empreendimento analisado e em sua vizinhança imediata. O número mínimo de habitações é relativo em cada lote, conforme indicam as tabelas 11 e 12, e a área máxima das habitações não deve exceder 80 m².

Com os valores de radiação solar incidente por área total de cobertura, foi calculada a demanda de eletricidade dos onze empreendimentos previstos, conforme descrição das premissas gerais e descrição dos cálculos no capítulo 4.5. O cálculo da demanda é ilustrado pelas tabelas 14 e 15.

Tabela 14: Cenário 3 – Tabela indicativa com cálculo de demanda de eletricidade (lotes 1 a 6)

Lote 1						
Cálculo demanda energética						
	Nº pav.	Área total (m²)	Geração de Energia PV (kWh.ano)	Demanda energética Comercial (kWh.ano) - Térreo + 1pav.	Demanda energética Residencial (kWh.ano) - demais pavs.	Demanda energética total (kWh.ano)
C.A.4; T.O.0,70	5	8.555,0	460.984,46	342.200,00	205.320,00	547.520,00
T.O. 0,50; C.A.4	8	9.736,9	328.269,17	243.422,00	292.106,40	535.528,40
T.O. 0,30; C.A.4	13	9.767,9	202.980,80	150.276,00	330.607,20	480.883,20
C.A. 2; T.O.0,70	2	3.422,0	459.259,78	342.200,00	**	342.200,00
C.A. 1; T.O.0,70	1	1.711,0	458.027,86	171.100,00	**	171.100,00
Galapagos	5	4.929,3	264.762,56	197.172,00	118.303,20	315.475,20
Lote 2						
Cálculo demanda energética						
	Nº pav.	Área total (m²)	Geração de Energia PV (kWh.ano)	Demanda energética Comercial (kWh.ano) - Térreo + 1pav.	Demanda energética Residencial (kWh.ano) - demais pavs.	Demanda energética total (kWh.ano)
C.A.4; T.O.0,70	5	7.606,9	409.893,59	304.274,00	182.564,40	486.838,40
T.O. 0,50; C.A.4	8	8.657,0	291.860,75	216.424,00	259.708,80	476.132,80
T.O. 0,30; C.A.4	13	8.684,0	180.456,19	133.600,00	293.920,00	427.520,00
C.A. 2; T.O.0,70	2	3.042,7	407.483,74	304.274,00	**	304.274,00
C.A. 1; T.O.0,70	1	1.521,4	407.264,66	152.137,00	**	152.137,00
Galapagos	7	6.135,5	236.528,78	175.300,00	175.300,00	350.600,00
Lote 3						
Cálculo demanda energética						
	Nº pav.	Área total (m²)	Geração de Energia PV (kWh.ano)	Demanda energética Comercial (kWh.ano) - Térreo + 1pav.	Demanda energética Residencial (kWh.ano) - demais pavs.	Demanda energética total (kWh.ano)
C.A.4; T.O.0,70	5	5.817,5	313.474,82	232.700,00	139.620,00	372.320,00
T.O. 0,50; C.A.4	8	6.620,6	223.324,73	165.514,00	198.616,80	364.130,80
T.O. 0,30; C.A.4	13	6.643,0	138.043,58	102.200,00	224.840,00	327.040,00
C.A. 2; T.O.0,70	2	2.327,0	310.794,12	232.700,00	**	232.700,00
C.A. 1; T.O.0,70	1	1.163,5	309.956,40	116.350,00	**	116.350,00
Galapagos	9	6.226,2	187.682,57	138.360,00	193.704,00	332.064,00
Lote 4						
Cálculo demanda energética						
	Nº pav.	Área total (m²)	Geração de Energia PV (kWh.ano)	Demanda energética Comercial (kWh.ano) - Térreo + 1pav.	Demanda energética Residencial (kWh.ano) - demais pavs.	Demanda energética total (kWh.ano)
C.A.4; T.O.0,70	5	9.412,5	509.630,40	376.500,00	225.900,00	602.400,00
T.O. 0,50; C.A.4	8	10.712,0	361.144,37	267.800,00	321.360,00	589.160,00
T.O. 0,30; C.A.4	13	10.745,8	223.301,03	165.320,00	363.704,00	529.024,00
C.A. 2; T.O.0,70	2	3.765,0	503.666,64	376.500,00	**	376.500,00
C.A. 1; T.O.0,70	1	1.882,5	503.395,56	188.250,00	**	188.250,00
Galapagos	4	4.477,2	302.211,00	223.860,00	89.544,00	313.404,00
Lote 5						
Cálculo demanda energética						
	Nº pav.	Área total (m²)	Geração de Energia PV (kWh.ano)	Demanda energética Comercial (kWh.ano) - Térreo + 1pav.	Demanda energética Residencial (kWh.ano) - demais pavs.	Demanda energética total (kWh.ano)
C.A.4; T.O.0,70	5	7.590,0	408.985,63	303.600,00	182.160,00	485.760,00
T.O. 0,50; C.A.4	8	8.640,0	291.288,96	216.000,00	259.200,00	475.200,00
T.O. 0,30; C.A.4	13	8.667,8	180.406,55	133.350,00	293.370,00	426.720,00
C.A. 2; T.O.0,70	2	3.036,0	406.362,53	303.600,00	**	303.600,00
C.A. 1; T.O.0,70	1	1.518,0	404.832,38	151.800,00	**	151.800,00
Galapagos	7	7.777,0	299.010,10	222.200,00	222.200,00	444.400,00
Lote 6						
Cálculo demanda energética						
	Nº pav.	Área total (m²)	Geração de Energia PV (kWh.ano)	Demanda energética Comercial (kWh.ano) - Térreo + 1pav.	Demanda energética Residencial (kWh.ano) - demais pavs.	Demanda energética total (kWh.ano)
C.A.4; T.O.0,70	5	5.519,0	297.390,21	220.760,00	132.456,00	353.216,00
T.O. 0,50; C.A.4	8	6.280,8	211.863,95	157.020,00	188.424,00	345.444,00
T.O. 0,30; C.A.4	13	6.301,1	130.938,80	96.940,00	213.268,00	310.208,00
C.A. 2; T.O.0,70	2	2.207,6	296.118,63	220.760,00	**	220.760,00
C.A. 1; T.O.0,70	1	1.103,8	295.482,84	110.380,00	**	110.380,00
Galapagos	7	4.452,0	171.445,25	127.200,00	127.200,00	254.400,00

Demanda energética superior à geração energética do cenário

**Quando o cenário possui até dois pavimentos a demanda energética do empreendimento é suprida apenas pelo uso comercial.

Fonte: Elaborado pela autora

Tabela 15: Cenário 3 –Tabela indicativa com cálculo de demanda de eletricidade (lotes 7 a 11)

Lote 7						
Cálculo demanda energética						
	Nº pav.	Área total (m²)	Geração de Energia PV (kWh.ano)	Demanda energética Comercial (kWh.ano) - Térreo + 1pav.	Demanda energética Residencial (kWh.ano) - demais pav.	Demanda energética total (kWh.ano)
C.A.4; T.O.0,70	5	8.724,5	470.117,94	348.980,00	209.388,00	558.368,00
T.O. 0,50; C.A.4	8	9.928,8	335.097,00	248.220,00	297.864,00	546.084,00
T.O. 0,30; C.A.4	13	9.960,6	206.984,33	153.240,00	337.128,00	490.368,00
C.A. 2; T.O.0,70	2	3.489,8	469.364,14	348.980,00	**	348.980,00
C.A. 1; T.O.0,70	1	1.744,9	467.605,28	174.490,00	**	174.490,00
Galapagos	10	10.053,0	271.865,29	201.060,00	321.696,00	522.756,00
Lote 8						
Cálculo demanda energética						
	Nº pav.	Área total (m²)	Geração de Energia PV (kWh.ano)	Demanda energética Comercial (kWh.ano) - Térreo + 1pav.	Demanda energética Residencial (kWh.ano) - demais pav.	Demanda energética total (kWh.ano)
C.A.4; T.O.0,70	5	6.982,0	376.223,67	279.280,00	167.568,00	446.848,00
T.O. 0,50; C.A.4	8	7.945,8	267.883,35	198.644,00	238.372,80	437.016,80
T.O. 0,30; C.A.4	13	7.971,0	165.638,79	122.630,00	269.786,00	392.416,00
C.A. 2; T.O.0,70	2	2.792,8	375.620,43	279.280,00	**	279.280,00
C.A. 1; T.O.0,70	1	1.396,4	373.408,53	139.640,00	**	139.640,00
Galapagos	10	8.040,0	217.311,55	160.800,00	257.280,00	418.080,00
Lote 9						
Cálculo demanda energética						
	Nº pav.	Área total (m²)	Geração de Energia PV (kWh.ano)	Demanda energética Comercial (kWh.ano) - Térreo + 1pav.	Demanda energética Residencial (kWh.ano) - demais pav.	Demanda energética total (kWh.ano)
C.A.4; T.O.0,70	5	9.142,5	492.641,78	365.700,00	219.420,00	585.120,00
T.O. 0,50; C.A.4	8	10.404,0	350.760,46	260.100,00	312.120,00	572.220,00
T.O. 0,30; C.A.4	13	10.437,7	216.898,62	160.580,00	353.276,00	513.856,00
C.A. 2; T.O.0,70	2	3.657,0	488.955,53	365.700,00	**	365.700,00
C.A. 1; T.O.0,70	1	1.828,5	487.902,31	182.850,00	**	182.850,00
Galapagos	2	2.106,9	282.914,53	210.690,00	**	210.690,00
Lote 10						
Cálculo demanda energética						
	Nº pav.	Área total (m²)	Geração de Energia PV (kWh.ano)	Demanda energética Comercial (kWh.ano) - Térreo + 1pav.	Demanda energética Residencial (kWh.ano) - demais pav.	Demanda energética total (kWh.ano)
C.A.4; T.O.0,70	5	6.485,5	349.469,87	259.420,00	155.652,00	415.072,00
T.O. 0,50; C.A.4	8	7.380,8	248.836,29	184.520,00	221.424,00	405.944,00
T.O. 0,30; C.A.4	13	7.404,4	153.865,92	113.914,00	**	364.524,80
C.A. 2; T.O.0,70	2	2.594,2	348.162,39	259.420,00	**	259.420,00
C.A. 1; T.O.0,70	1	1.297,1	347.415,26	129.710,00	**	129.710,00
Galapagos	6	5.535,6	248.836,29	184.520,00	147.616,00	332.136,00
Lote 11						
Cálculo demanda energética						
	Nº pav.	Área total (m²)	Geração de Energia PV (kWh.ano)	Demanda energética Comercial (kWh.ano) - Térreo + 1pav.	Demanda energética Residencial (kWh.ano) - demais pav.	Demanda energética total (kWh.ano)
C.A.4; T.O.0,70	5	2.760,0	148.722,05	110.400,00	66.240,00	176.640,00
T.O. 0,50; C.A.4	8	3.142,4	105.942,87	78.560,00	94.272,00	172.832,00
T.O. 0,30; C.A.4	13	3.152,5	65.509,92	48.500,00	106.700,00	155.200,00
C.A. 2; T.O.0,70	2	1.104,0	147.927,17	110.400,00	**	110.400,00
C.A. 1; T.O.0,70	1	552,0	147.052,80	110.400,00	**	110.400,00
Galapagos	6	2.356,8	105.716,62	78.560,00	62.848,00	141.408,00

Demanda energética superior à geração energética do cenário

**Quando o cenário possui até dois pavimentos a demanda energética do empreendimento é suprida apenas pelo uso comercial.

Fonte: Elaborado pela autora

O cálculo de demanda de eletricidade ilustrado pelas tabelas 14 e 15 indica que, em concordância com o cenário 2, quando o empreendimento analisado é de uso residencial e excede 7 pavimentos, sua demanda de eletricidade se torna superior a sua geração de energia fotovoltaica. Quando o empreendimento é de uso misto e excede 3 pavimentos, sua demanda de eletricidade se torna superior a sua geração de energia fotovoltaica. A maior parte dos

resultados indica que quando o empreendimento analisado é de uso comercial e excede 2 pavimentos, sua demanda de eletricidade se torna superior a sua geração de energia fotovoltaica – a única exceção do estudo é o lote 18, em que dois pavimentos já foram suficientes para que a demanda de eletricidade fosse superior a sua geração de energia fotovoltaica.

De forma geral, o *Galapagos* aplicado nos lotes analisados gerou resultados em que a demanda anual do empreendimento superou sua geração de energia fotovoltaica. Nesses casos, a demanda de eletricidade anual do empreendimento não é suprida por sua própria geração de energia. A exceção foi a demanda de eletricidade do lote 9: neste, o *Galapagos* gerou resultado em que a demanda anual do empreendimento ficou inferior a sua geração de energia fotovoltaica – nesse caso, a demanda de eletricidade anual do empreendimento é suprida por sua própria geração de energia fotovoltaica.

6.4.1. Cenário 3: Análise dos resultados

Ao comparar as simulações das variações dos parâmetros isolados, no cenário 3, do conjunto de lotes analisados, constatou-se que os resultados concorrem quando analisados por radiação solar incidente por m^2 e por radiação solar incidente por área total de cobertura.

Quando a análise é feita por radiação solar incidente por m^2 , boa parte dos melhores resultados referem-se a taxas de ocupação menores, já que, dessa forma, os volumes construídos têm gabarito de altura mais elevado e, portanto, estão mais expostos à radiação solar incidente por metro quadrado. Porém, quando a análise é feita considerando-se a radiação solar incidente por área total de cobertura, todos os melhores resultados encontram-se nas variações que empregam, sobretudo, maiores taxas de ocupação e coeficientes de aproveitamento, segundo os valores permitidos pela legislação vigente no município de São Paulo, conforme ilustra a figura 55.

Figura 55: Cenário 3 – Gráfico comparativo de incremento das melhores respostas dos ganhos de radiação solar incidente por m^2 e por radiação solar incidente total, nos onze lotes analisados das simulações da variação isolada dos parâmetros urbanísticos

Fonte: Elaborado pela autora

Os resultados obtidos pelo algoritmo genético *Galapagos*, de forma geral, não são condizentes com os resultados obtidos a partir da variação isolada dos parâmetros, pois quando o parâmetro é variado de forma isolada, apenas o nível da radiação solar da cobertura do empreendimento analisado é considerado. Ou seja, a parametrização encontra o melhor desempenho para o empreendimento em questão, de forma individual, sem considerar seus impactos no acesso à radiação solar do entorno. Já na simulação do *Galapagos*, o algoritmo genético busca uma melhor combinação entre os parâmetros, de forma que encontre o melhor nível de radiação solar incidente na cobertura do empreendimento, mas mantendo níveis adequados na vizinhança. As simulações no *Galapagos* que encontraram os melhores resultados em relação ao nível de radiação solar referem-se à taxas de ocupação de 0,40 e 0,50 combinada com densidades construídas máximas ou intermediárias, conforme ilustra o gráfico da figura 56.

Figura 56: Cenário 3 – Gráfico comparativo entre simulações *Galapagos* para C.A e T.O., nos onze lotes analisados

Fonte: Elaborado pela autora

A figura 56 indica que quando a legislação permite C.A. máximo de 4, o C.A. máximo representa 36% dos melhores resultados contra 36% representados pelo valor intermediário de C.A. 3 e 28% representados pelos valores de C.A. 2 e C.A. 1.

Em relação à T.O., o gráfico da figura 56 indica que o valor de 0,40 de T.O. representa 73% dos melhores resultados, contra 27% atribuído a valor de 0,50 de T.O. O resultado indica que quando os lotes com intervenção morfológica estão concentrados, valores de T.O. menores possuem melhores respostas no caso em que o objetivo é maximizar o nível de radiação solar na cobertura dos empreendimentos. A relação entre os diferentes tipos de forma urbana e suas respectivas relações com a maximização de geração de energia fotovoltaica é ilustrada pela figura 57.

Figura 57: Cenário 3 – Comparativo entre diferentes tipos de forma urbana e suas respectivas relações com a maximização energética fotovoltaica na cobertura das edificações

Fonte: Elaborado pela autora

A figura 57 ilustra um comparativo morfológico das variações do cenário 3, considerando a radiação solar incidente por metro quadrado. Conforme indicam os resultados das simulações, quanto menor a T.O. e, consequentemente, mais elevado o gabarito de altura do empreendimento analisado, melhor será o nível da radiação solar incidente por metro quadrado. Em contrapartida, o sombreamento causado nas edificações vizinhas será prejudicial à geração fotovoltaica nas respectivas coberturas. Dessa forma, o cenário desenvolvido pelo algoritmo genético *Galapagos* combinou os parâmetros urbanísticos visando maximizar os níveis de radiação solar incidente por metro quadrado no empreendimento analisado e evitou prejuízos à radiação solar incidente nas edificações vizinhas devido ao sombreamento causado pelo empreendimento cuja morfologia urbana passou por intervenção.

O *Galapagos* emprega número de pavimentos variados no cenário 3. Conforme indicam as tabelas apresentadas nos resultados, 7 pavimentos representam 28% dos empreendimentos cuja morfologia urbana foi maximizada pelo *Galapagos*; 10 e 6 pavimentos representam 18%;

e 9, 5, 4 e 2 pavimentos representam 9%. A variação do número de pavimentos, quando se objetiva maximizar o potencial de energia fotovoltaica, na cobertura das edificações em lotes concentrados, não é um resultado esperado. Conclui-se, portanto, que o valor entre 0,40 e 0,50 empregado para T.O. foi fundamental para tal resultado. A comparação entre a morfologia urbana atual frente à morfologia urbana evolutiva *Galapagos*, no cenário 3, está ilustrada pela imagem tridimensional 58.

Figura 58: Cenário 3 – Comparativo tridimensional entre morfologia urbana atual frente ao cenário evolutivo *Galapagos*

Fonte: Elaborado pela autora

O empreendimento que possui menor número de pavimentos é o empreendimento localizado no lote 9, com dois pavimentos. Entende-se que por essa edificação estar localizada em frente a um conjunto de casas com pouco acesso à incidência de radiação solar, o *Galapagos* encontrou a melhor combinação com gabarito baixo para o empreendimento em questão, buscando não prejudicar, ainda mais, o acesso à radiação solar incidente dos vizinhos, conforme ilustra a figura 58.

No que se refere ao cálculo de demanda de eletricidade dos empreendimentos analisados, assim como no cenário 2, quando o empreendimento analisado é de uso residencial e excede 7 pavimentos, sua demanda de eletricidade se torna superior à sua geração de energia fotovoltaica. Já quando o empreendimento analisado é de uso misto e excede 3 pavimentos, sua demanda de eletricidade se torna superior à sua geração de energia fotovoltaica. Por último, quando o empreendimento analisado tem uso comercial e excede 2 pavimentos, sua demanda de eletricidade se torna superior à sua própria geração de energia fotovoltaica.

A tabela 16 apresenta a síntese da análise dos resultados obtidos no cenário 3.

Tabela 16: Cenário 3 – Resumo da análise dos resultados obtidos

Resultados satisfatórios cenário 3 – lotes concentrados - Grasshopper	C.A. 4 (quando o máximo permitido é 4) T.O. de 0,70 (quando o máximo permitido é 0,70)
Média percentual de incremento de ganhos de radiação solar do empreendimento em relação com o pior resultado - Grasshopper	127%
Resultados satisfatórios cenário 3 – lotes concentrados - Galapagos	50% dos melhores resultados: C.A. 3 (quando o máximo permitido é 4) 50% dos melhores resultados: C.A. 4 (quando o máximo permitido é 4) T.O. de 0,40 (quando o máximo permitido é 0,70)
Média percentual de incremento de ganhos de radiação solar do empreendimento em relação com o pior resultado - Galapagos	40%
Demanda de eletricidade superior à geração de energia do empreendimento	Uso residencial: quando excede 7 pavimentos Uso comercial: quando excede 2 pavimentos Uso misto: quando excede 3 pavimentos

Fonte: Elaborado pela autora

CONCLUSÕES DA PESQUISA

O método desenvolvido através da ferramenta *Grasshopper*[®] mostrou-se uma metodologia eficiente aplicável à análise integrada dos parâmetros urbanísticos previstos na legislação do município de São Paulo, sobretudo quando se analisa condições morfológicas urbanas para maximização de incidência de radiação solar, em uma escala de unidade de vizinhança. Por se tratar de um estudo de caso, destaca-se a limitação da pesquisa realizada, além de outros fatores que se encontram fora do escopo considerado, como a análise do potencial de aproveitamento fotovoltaico nas fachadas das edificações – as quais poderiam modificar os resultados deste estudo –, além da ponderação da presença de vegetações – que podem gerar sombreamento adicional na cobertura das edificações, especialmente daquelas com menores gabaritos de altura.

Quanto à análise de demanda de eletricidade dos empreendimentos simulados, em todas as edificações, independentemente de sua configuração morfológica, nos cenários 2 e 3, se previsto o uso misto, sua demanda de eletricidade se torna maior que a geração de energia fotovoltaica dos próprios empreendimentos, quando estes possuem quatro ou mais pavimentos. Quando o uso é residencial, a demanda de eletricidade se torna maior que a geração de energia fotovoltaica do empreendimento, quando ele possui mais de sete pavimentos, conforme indica a tabela 17 com o resumo dos resultados obtidos na pesquisa.

Tabela 17: Resumo dos resultados obtidos nos cenários 1, 2 e 3.

CENÁRIO 1 - CENÁRIO ATUAL	
10% das edificações existentes = valores de incidência de radiação acima de 1880 kWh/m ² .ano	
86% das edificações existentes = valores de incidência de radiação solar entre 1840 e 1879 kWh/m ² .ano	
4% das edificações existentes = valores de incidência de radiação solar abaixo de 1840 kWh/m ² .ano	
CENÁRIO 2 - LOTES DISTRIBUÍDOS	
Resultados satisfatórios - Grasshopper (>1800 kWh/m ² .ano)	C.A. 4 (quando o máximo permitido é 4)
	C.A. 2 (quando o máximo permitido é 2)
	T.O. de 0,70 (quando o máximo permitido é 0,70)
	T.O. de 0,85 (quando o máximo permitido é 0,85)
Média percentual de incremento em relação com o pior resultado - Grasshopper	120%
Resultados satisfatórios - Galapagos (>1800 kWh/m ² .ano)	C.A. 3 (quando o máximo permitido é 4)
	C.A. 2 (quando o máximo permitido é 2)
	T.O. de 0,70 (mesmo quando o máximo permitido é 0,85)
Média percentual de incremento em relação com o pior resultado - Galapagos	60%
Demanda energética superior à geração de energia do empreendimento	Uso residencial: quando excede 7 pavimentos
	Uso comercial: quando excede 2 pavimentos
	Uso misto: quando excede 3 pavimentos
CENÁRIO 3 - LOTES CONCENTRADOS	
Resultados satisfatórios - Grasshopper (>1800 kWh/m ² .ano)	C.A. 4 (quando o máximo permitido é 4)
	T.O. de 0,70 (quando o máximo permitido é 0,70)
Média percentual de incremento em relação com o pior resultado - Grasshopper	127%
Resultados satisfatórios - Galapagos (>1800 kWh/m ² .ano)	50% dos melhores resultados: C.A. 3 (quando o máximo permitido é 4)
	50% dos melhores resultados: C.A. 4 (quando o máximo permitido é 4)
	T.O. de 0,40 (quando o máximo permitido é 0,70)
Média percentual de incremento em relação com o pior resultado - Galapagos	40%
Demanda de eletricidade superior à geração de energia do empreendimento	Uso residencial: quando excede 7 pavimentos
	Uso comercial: quando excede 2 pavimentos
	Uso misto: quando excede 3 pavimentos

Fonte: Elaborado pela autora

A pesquisa constatou, ainda, que o urbanismo paramétrico, combinado ao algoritmo genético *Galapagos*, constitui uma ferramenta prática poderosa para aplicação em planejamento e projeto urbano, por permitir a simulação de diferentes valores para os parâmetros urbanísticos considerados, frente ao aproveitamento da energia solar fotovoltaica, considerando o efeito de intervenções pontuais dispersas ou associadas em quadras adjacentes – no entorno urbano, na escala de vizinhança. A análise dos resultados das simulações da variação isolada dos parâmetros urbanísticos, nos cenários 2 e 3, indica que, conforme Martins *et al.* (2014) ressaltam, quanto maior o número de pavimentos, maior será a radiação solar recebida pela edificação. Além disso, a distância entre as edificações é benéfica à maximização dos níveis de radiação solar incidente nas respectivas coberturas, por meio da adequação da taxa de ocupação. Em contrapartida, valores superiores de taxa de ocupação regulam a área de

cobertura disponível para aplicação de painéis fotovoltaicos, o que também é essencial para maximizar o potencial de energia solar fotovoltaica.

Por sua vez, a análise dos resultados das simulações simultâneas dos parâmetros urbanísticos, realizada através do algoritmo genético *Galapagos*, condiz com os autores Martins *et al.* (2016) e Martins *et al.* (2014) a respeito da distância entre as edificações. Os resultados mostram que é necessário afastar as edificações em um tecido urbano como um todo, observando-se valores mínimos de 0,70 de taxa de ocupação, no cenário 2 (intervenções distribuídas) e valores mínimos de 0,50, no cenário 3 (intervenções concentradas). Porém, quanto ao número de pavimentos, a simulação com o *Galapagos* não confirma o estudo de Martins *et al.* (2014), no sentido de que quanto maior o número de pavimentos, maior será a radiação solar recebida. Os resultados das simulações realizadas no presente trabalho mostram que valores máximos de C.A. e, conseqüentemente, maiores gabaritos de altura, em uma área urbana existente, podem afetar negativamente o sombreamento causado nas edificações vizinhas, o que reduz o desempenho do bairro como um todo quanto à maximização do nível de radiação solar incidente. Dessa forma, o *Galapagos* se mostrou uma ferramenta eficaz quando o objetivo é maximizar o nível de radiação solar na cobertura do conjunto de edificações, em microescala urbana.

Os resultados das simulações realizadas, para este estudo de caso específico, mostraram que o emprego dos valores máximos permitidos pela legislação vigente no município de São Paulo para C.A. e T.O., de forma associada, nem sempre são adequados a uma política de ampla inserção de sistemas fotovoltaicos em coberturas de edificações em bairros, como um todo, especialmente em zonas onde é permitida T.O. máxima de 0,85. Ademais, quando se considera o C.A., depende-se muito da morfologia do entorno para se obter valores de radiação solar satisfatórios em escala de vizinhança.

Finalmente, o estudo indicou que a definição de uma possível política energética municipal para aproveitamento fotovoltaico na cobertura de edificações passa pela análise da viabilidade e do desempenho de soluções de geração de energia concentradas ou distribuídas no território urbano. Ainda, o trabalho mostrou que a criação de um programa de aproveitamento solar fotovoltaico em edificações novas e/ou existentes em âmbito urbano requer a realização de uma análise detalhada de impactos no bairro e no entorno, respaldado por uma legislação urbanística que defina valores mínimos, básicos e máximos dos parâmetros urbanísticos também com base nessa funcionalidade.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O estudo desenvolvido na presente pesquisa pode ser otimizado e/ou ampliado em alguns aspectos, tais como: ponderar valores intermediários do coeficiente de aproveitamento e da taxa de ocupação que maximizam a geração de energia solar fotovoltaica, bem como incorporar ao estudo da morfologia urbana a consideração de aspectos microclimáticos urbanos, tais como condições de sombreamento causado por vegetações e ventilação, em áreas sujeitas à verticalização e ao adensamento populacional e construído.

Faz-se relevante considerar o estudo da geração de energia solar fotovoltaica na fachada das edificações e considerar o nível de incidência da radiação solar na fachada das edificações para fins de conforto térmico e luminoso no interior dos empreendimentos. A ampliação da análise para a fachada das edificações, por exemplo, provavelmente alteraria significativamente o resultado da presente pesquisa. Ademais, seria produtivo considerar a aplicação da metodologia desenvolvida em outros cenários de otimização morfológica, especialmente em cenários envolvendo em áreas sujeitas à verticalização, ao adensamento populacional e construído.

Também é fundamental a realização de avaliação do impacto econômico- financeiro na mudança morfológica, a influência no mercado mobiliário e possíveis ganhos com a economia de energia, ao se usar a fonte fotovoltaica. Seria produtivo avaliar os instrumentos urbanísticos associados à otimização da radiação solar além do que é permitido pela legislação.

Por fim, espera-se o desenvolvimento de um *plug-in Grasshopper*[®] com a sistematização da metodologia desenvolvida na presente pesquisa. Entende-se que um *plug-in*, desenvolvido especialmente para planejamento urbano, tornará a simulação amplamente acessível para planejadores urbanos.

A figura 59 apresenta, de forma simplificada, as sugestões para trabalhos futuros.

Figura 59: Apresentação sugestões trabalhos futuros

Ponderar valores intermediários do C.A. e da T.O. que maximizam a geração de energia solar fotovoltaica.

Incorporar ao estudo consideração de aspectos microclimáticos urbanos, tais como condições de sombreamento causado por vegetações.

Considerar o estudo da geração de energia solar fotovoltaica na fachada das edificações e considerar o nível de incidência da radiação solar na fachada das edificações para fins de conforto térmico e luminoso no interior dos empreendimentos.

Avaliação econômica - financeira da alteração morfológica proposta.

Desenvolvimento de um plug-in Grasshopper® com a sistematização da metodologia desenvolvida na presente pesquisa.

Fonte: Elaborado pela autora

REFERÊNCIAS

- ABBUD, O. A.; TANCREDI, M. Transformações Recentes da Matriz Brasileira de Geração de Energia Elétrica – Causas e Impactos Principais. **Centro de Estudos da Consultoria do Senado. Brasil**, p. 64, 2010.
- ABIKO, A. K. **Texto Técnico Introdução à Gestão Habitacional**. São Paulo, 1995.
- ALEXANDER, E. R. Density Measures: A Review and Analysis. **Journal of Architectural and Planning Research**, v. 10, n. 3, p. 181–203, 1993.
- ANEEL. **Tarifa Branca**. Disponível em: <www.aneel.gov.br/tarifa-branca>. Acesso em: 14 jan. 2017.
- ANEEL. **Nota Técnica nº 0056/2017-SRD/ANEEL: Atualização das projeções de consumidores residenciais e comerciais com microgeração solar fotovoltaicos no horizonte 2017-2024**. Brasil, 2017.
- ANEEL. **Bandeiras Tarifárias** - ANEEL. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/bandeiras-tarifarias>>. Acesso em: 21 fev. 2019.
- ANTON, I.; TĂNASE, D. Informed Geometries. Parametric Modelling and Energy Analysis in Early Stages of Design. **Energy Procedia**, v. 85, p. 9–16, 2016.
- BLAKERS, A. et al. High efficiency silicon solar cells. **Energy Procedia**, v. 33, p. 1–10, 2013.
- BRASIL. Resolução Normativa nº 482 de 2012 da ANEEL. **ANEEL**, p. 9, 2012.
- BRASIL. Resolução Normativa nº 687 de 2015 da ANEEL. **ANEEL**, p. 24, 2015.
- CALDEIRA, T. P. DO R. **Cidade de muros: crime, segregação e cidadania em São Paulo**. São Paulo: 34/Edusp, 2000.
- CHATZIPOULKA, C.; COMPAGNON, R.; NIKOLOPOULOU, M. Urban geometry and solar availability on façades and ground of real urban forms: using London as a case study. **Solar Energy**, v. 138, p. 53–66, 2016.
- DANTAS, G. et al. Public policies for smart grids in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 92, p. 501–512, 2018.
- DESIGNBUILDER SOFTWARE LTD. **DesignBuilder**. Disponível em: <www.designbuilder.co.uk>. Acesso em: 1 fev. 2017.
- DIAS, C. L. DE A. et al. Performance estimation of photovoltaic technologies in Brazil. **Renewable Energy**, v. 114, p. 367–375, 2017.
- EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Nota técnica 001/17 - Projeção da demanda de energia elétrica**. Brasil, 2017.

EWING, R.; CERVERO, R. Travel and the built environment. **Journal of the American Planning Association**, v. 76, n. 3, p. 265–294, 2010.

FALCETTA, F. A. M. **Evolução da Capacidade de Regularização do Sistema Hidrelétrico Brasileiro**. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2015.

FEARNSIDE, P. M. Social Impacts of Brazil ' s Tucuruí Dam. **Environmental Management**, v. 24, n. 4, p. 483–495, 1999.

FEARNSIDE, P. M. Dams in the Amazon: Belo Monte and Brazil's hydroelectric development of the Xingu River Basin. **Environmental Management**, v. 38, n. 1, p. 16–27, 2006.

FUCHS, A. S. E. P. G. Desenvolvimento tecnológico e inserção da energia solar no Brasil. **Revista do BNDS**, v. 40, p. 85–114, 2013.

FUTCHER, J. A.; MILLS, G. The role of urban form as an energy management parameter. **Energy Policy**, v. 53, p. 218–228, fev. 2013.

GAVIRIA, L. R.; PEREIRA, F. O. R.; MIZGIER, M. O. Influência da configuração urbana na geração fotovoltaica com sistemas integrados às fachadas. **Ambiente Construído**, v. 13, n. 4, p. 07-23, dez. 2013.

GIROTTI, C.; MARINS, K. R. DE C.; LARA, A. H. Análise da morfologia urbana para maximização de geração de energia fotovoltaica no Belenzinho, em São Paulo. **Ambiente Construído**, v. no prelo, 2019.

GOLDEMBERG, J. **Energia e Desenvolvimento Sustentável**. 4. ed. São Paulo: Blucher, 2010.

GOLDEMBERG, J.; LUCON, O. **Energia, Meio Ambiente e Desenvolvimento**. 3. ed. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2008.

GOOGLE. **Google Earth: versão 7.3.0.3832**, 2017.

HARGREAVES, A. et al. Forecasting how residential urban form affects the regional carbon savings and costs of retrofitting and decentralized energy supply. **Applied Energy**, v. 186, p. 549–561, 2017.

HUI, S. C. M. Low energy building design in high density urban cities. **Renewable Energy**, v. 24, n. 3–4, p. 627–640, 2001.

ICMC-USP. **Algoritmos Genéticos**. Disponível em: <http://conteudo.icmc.usp.br/pessoas/andre/research/genetic/>. Acesso em: 10 abr. 2019.

IEA - INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Key World Energy Statistics 2016**, 2016.

JABAREEN, Y. Sustainable Urban Forms: Their Typologies, Models, and Concepts. **Journal of Planning Education and Research**, v. 26, n. 1, p. 38–52, 2006.

JARDIM, C. DA S. et al. The strategic siting and the roofing area requirements of building-integrated photovoltaic solar energy generators in urban areas in Brazil. **Energy and Buildings**, v. 40, n. 3, p. 365–370, 2008.

JEGEN, M.; PHILION, X. D. Smart grid development in Quebec: A review and policy approach. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 82, n. June 2017, p. 1922–1930, 2018.

LAMOUR, Q. **Avaliação da estratégia dos eixos de estruturação da transformação urbana, do município de São Paulo, frente à teoria do desenvolvimento orientado pelo transporte (DOT), estudo de caso: área de influência da estação Belém do metrô**. São Paulo: Escola politécnica da universidade de São Paulo, 2018.

LAMOUR, Q.; MARINS, K. R. DE C. C. Análise dos eixos de estruturação da transformação urbana de São Paulo, segundo indicadores selecionados. **XVI Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído**, p. 5179–5196, 2016.

MANKIW, N. G. **Introdução à Economia**. 5º ed. São Paulo: Cengage Learning, 2012.

MARINS, K. R. DE C. et al. **MODELAGEM E COMPARAÇÃO DE EFEITOS SIMULTÂNEOS DA FORMA URBANA SOBRE A GERAÇÃO DE ENERGIA FOTOVOLTAICA E O CONFORTO DOS ESPAÇOS EXTERNOS. O CASO DO BELENZINHO, EM SÃO PAULO**. ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, Anais... **Anais...**Porto Alegre: ANTAC, 2018

MARINS, K. R. DE C. C. **Proposta metodológica para planejamento energético no desenvolvimento de áreas urbanas. O potencial da integração de estratégias e soluções em morfologia e mobilidade urbanas, edifícios, energia e meio ambiente: o caso da operação urbana Água Branca**. São Paulo: Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo, 2010.

MARINS, K. R. DE C. C.; ROMÉRO, M. DE A. Integração de condicionantes de morfologia urbana no desenvolvimento de metodologia para planejamento energético urbano. **Ambiente Construído**, v. 12, n. 4, p. 117–137, 2012.

MARINS, K. R. DE C. C.; ROMÉRO, M. DE A. Urban and Energy Assessment from a Systemic Approach of Urban Morphology, Urban Mobility, and Buildings: Case Study of Agua Branca in Sao Paulo. **Journal of Urban Planning and Development**, v. 139, n. 4, p. 280–291, dez. 2013.

MARTINO, J. A. DE; CELANI, G. Sistema Generativo Evolutivo como Método no Processo Criativo. **Proceedings of the XVIII Conference of the Iberoamerican Society of Digital Graphics - SIGraDi: Design in Freedom**, n. November, p. 380–383, 2014.

MARTINS, T. A. DE L. **De condicionantes solares à oportunidades de desenho urbano: otimização de tipo-morfologias urbanas em contexto de clima tropical**. Rio de Janeiro: Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2014.

MARTINS, T. A. DE L. et al. Sensitivity analysis of urban morphology factors regarding solar energy potential of buildings in a Brazilian tropical context. **Solar Energy**, v. 137, p. 11–24, 2016.

MARTINS, T. A. DE L.; ADOLPE, L.; BASTOS, L. E. G. From solar constraints to urban design opportunities: Optimization of built form typologies in a Brazilian tropical city. **Energy and Buildings**, v. 76, p. 43–56, 2014.

MERLIN, P.; CHOAY, F. **Dictionnaire de l'urbanisme et de l'aménagement**. 3e éd. rev ed. Paris: Presses universitaires de France, 1988.

MIANA, A. C. **Adensamento e forma urbana: inserção de parâmetros ambientais do processo de projeto**. São Paulo: Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo, 2010.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Balanco Energético Nacional (BEN) - Ano base 2016**. EPE - Empresa de Pesquisa Energética, , 2017.

MUNIZ-GÄAL, L. P. et al. Parâmetros urbanísticos e o conforto térmico de cânions urbanos: o exemplo de Campinas, SP. **Ambiente Construído**, v. 18, n. 2, p. 177–196, 2018.

NAKABAYASHI, R. **Nota Técnica: Microgeração Fotovoltaica no Brasil: Viabilidade Econômica**. São Paulo: Instituto de Energia e Ambiente, 2015.

NG, E. A study of the relationship between daylight performance and height difference of buildings in high density cities using computational simulation. **International Building Performance Simulation**, p. 847–852, 2005.

NG, E. **DESIGNING HIGH-DENSITY CITIES: For Social & Environmental Sustainability**. 1ª ed. London: Earthscan, 2010.

NG, E. et al. Improving the wind environment in high-density cities by understanding urban morphology and surface roughness: A study in Hong Kong. **Landscape and Urban Planning**, v. 101, n. 1, p. 59–74, 2011.

NOGUEIRA, L.; COSTA, J. **Opções tecnológicas em energia: uma visão brasileira**. 1ª ed. Brasília: FBDS, 2012.

ONS. **Sistema de Transmissão - Horizonte 2017**. Disponível em: <www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/mapas>. Acesso em: 19 out. 2018.

ONU - NAÇÕES UNIDAS NO BRASIL. **Glossário de termos do Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 11: Tornar as cidades e os assentamentos humanos inclusivos, seguros, resilientes e sustentáveis**, 2018. Disponível em: <<http://www.br.undp.org/content/brazil/pt/home/library/ods/glossario-ods-11.html>>

OXMAN, R. Performance-Based Design: Current Practices and Research Issues. **International Journal of Architectural Computing**, v. 6, n. 1, p. 1–17, 2008.

PACIFICI, M. et al. Morphological and climate balance: Proposal for a method to analyze neighborhood urban forms by way of densification. **Sustainable Cities and Society**, v. 35, p. 145–156, 2017.

PACIFICI, M.; RAMA, F.; MARINS, K. R. DE C. Urban Climate Analysis of temperature variability within outdoor urban spaces at multiple scales. **Urban Climate**, v. 27, n. November 2018, p. 90–104, 2019.

PAVANELLI, J. M. M. **A integração da geração fotovoltaica distribuída à matriz elétrica brasileira : uma análise sob a ótica institucional**. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2016.

PEREIRA, E. B. et al. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. 2. ed. ed. São José dos Campos: INPE, 2017.

PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO. **Plano Diretor Estratégico do Município de São Paulo**. Brasil, 2014.

PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO. **Lei de parcelamento, uso e ocupação do solo**. Brasil, 2016.

PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO. **GeoSampa Prefeitura de São Paulo**. Disponível em: <www.geosampa.prefeitura.sp.gov.br>. Acesso em: 2 maio. 2017.

RAPOPORT, A. Toward a Redefinition of Density. **Environment and Behavior**, v. 7, n. 2, p. 133–158, 1975.

REINHART, C. F.; DAVILA, C. C. Urban building energy modeling - A review of a nascent field. **Building and Environment**, v. 97, p. 196–202, 2016.

RHINO3D. **Rhino3D**. Disponível em: <www.rhino3d.com/features>. Acesso em: 6 abr. 2017.

ROBERT MCNEEL & ASSOCIATES. **Rhinoceros: versão 5.0**, 2012a.

ROBERT MCNEEL & ASSOCIATES. **Grasshopper: versão 5.0**, 2012b.

SANTOS, I. G. DOS; AUER, T.; SOUZA, R. V. G. DE. Optimized indoor daylight for tropical dense urban environments. **Ambiente Construído**, v. 17, n. 3, p. 87–102, 2017.

SARRALDE, J. J. et al. Solar energy and urban morphology: Scenarios for increasing the renewable energy potential of neighbourhoods in London. **Renewable Energy**, v. 73, p. 10–17, jan. 2015.

SCALCO, V. A.; PEREIRA, F. O. R.; RIGATTI, D. Impacto de novas edificações na vizinhança: proposta de método para a análise das condições de iluminação natural e de insolação. **Revista Ambiente Construído**, v. 10, n. 2, p. 171–187, 2010.

SIMMLAB. **CityZoom**. Disponível em: <<http://www.simmlab.ufrgs.br/software/software.html>>. Acesso em: 2 fev. 2017.

SOLARGIS. **SolarGis**. Disponível em: <www.solargis.com/>. Acesso em: 5 fev. 2017.

SOLEMMA. **Diva: versão 4.0**, 2016.

SOLOMON, B. D.; KRISHNA, K. The coming sustainable energy transition: History, strategies, and outlook. **Energy Policy**, v. 39, n. 11, p. 7422–7431, 2011.

UNITED NATIONS. The World's Cities in 2016: Data Booklet. **Economic and social affair**, p. 29, 2016.

VICENTINI, E. **Curva de Carga - São Paulo** (J. M. M. Pavanelli, Ed.) **Comunicação Pessoal**. Barueri, 2015.

VILLALVA, M. G.; GAZOLI, J. R. **Energia Solar Fotovoltaica**. 1º ed. São Paulo: Érica, 2012.

WALTON, D. et al. **Urban design compendium**. second ed. London: English partnerships, 2007.

WEO. **World Energy Outlook 2015**. IEA - International Energy Agency, 2015.

WOLFE, P. The implications of an increasingly decentralised energy system. **Energy Policy**, v. 36, n. 12, p. 4509–4513, 2008.

ZILLES, R. et al. **Sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica**. 1ª ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2012.

ZIN, N. Recombination-free reactive ion etch for high efficiency silicon solar cells. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, v. 172, p. 55–58, 2017.

GLOSSÁRIO

A

Algoritmo genético – Baseados na seleção natural da genética, são algoritmos de otimização que buscam uma combinação satisfatória entre funções, as quais podem ser minimizada ou maximizada (ICMC-USP, 2019).

C

Coefficiente de aproveitamento - Multiplicador que, quando aplicado à área do lote e dividido pela área do pavimento-tipo, resulta na quantidade de pavimentos que terá o empreendimento.

Cota parte de terreno - Quantidade de unidades habitacionais segundo unidade de área do terreno. Define a densidade habitacional a partir da relação entre o número de unidades habitacionais a serem idealmente produzidas e a área total do terreno.

D

Demanda de eletricidade - Compreende-se por demanda de eletricidade nessa pesquisa, a solicitação energética de um dado empreendimento (MARINS, 2010).

Densidade Urbana – Consiste na relação entre um indicador estatístico, o qual, pode ser de população, habitação, e uma superfície (MERLIN e CHOAY, 1988).

Densidade construída – Corresponde à relação da superfície total construída e a superfície no solo.

E

Energia descentralizada – Geração de energia elétrica nos próprios centros urbanos e/ou próxima aos consumidores

Escala de vizinhança – Ver unidade de vizinhança.

Externalidade - Conceito econômico, sendo um efeito causado em um terceiro que não participa da ação, a externalidade pode ser positiva ou negativa (MANKIW; TAYLOR, 2012).

F

Fitness - É o valor da função a ser otimizado. De modo geral, representa uma medida da capacidade de sobrevivência de um cromossomo no processo de evolução e, consequentemente, a probabilidade dele se reproduzir com mais frequência. No caso de um problema de maximização, por exemplo, quanto maior o valor da função objetivo, maior a aptidão de um determinado indivíduo (MARTINS, 2014).

Forma urbana – Ver morfologia urbana

G

Genomas- Representam as variáveis de projeto. Correspondem ao elemento constituinte de um cromossomo, geralmente responsável pela codificação de um único parâmetro, ou seja, consiste em um elemento do vetor que representa um cromossomo (MARTINS, 2014).

Grupo A de energia elétrica – Grupamento composto de unidades consumidoras de energia elétrica com fornecimento em tensão igual ou superior a 2,3 kV, ou atendidas a partir de sistema subterrâneo de distribuição de energia elétrica em tensão secundária.

Grupo B de energia elétrica – Grupamento composto de unidades consumidoras de energia elétrica com fornecimento em tensão inferior a 2,3 kV, caracterizado pela tarifa monômnia e subdividido nos seguintes subgrupos: a) subgrupo B1 - residencial; b) subgrupo B2 - rural; c) subgrupo B3 - demais classes; e d) subgrupo B4 - Iluminação pública.

I

Interoperabilidade - Capacidade de diversos sistemas e organizações trabalharem em conjunto.

M

Metropolização – Crescimento da população urbana no entorno do limite da cidade.

Morfologia Urbana – “Resultado da combinação de diversos elementos que formam as áreas ocupadas, livres, com vegetação ou pavimentação, com volumetrias, materiais e cores diversas, [...] o que influi diretamente nos sistemas de transporte, circulação e no projeto de edifícios” (MARINS; ROMÉRO, 2012, p. 118).

O

off grid - Sistema de armazenamento energético que necessitam de baterias para seu funcionamento.

on grid - Sistema de armazenamento energético que dispensam o uso baterias para seu funcionamento; sistemas conectados à rede elétrica, que dispensa o uso de baterias.

P

Parâmetros urbanísticos - Parâmetros que tratam como a forma urbana e instalações serão implantados no lote, ou mesmo da restrição à ocupação por construções (PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO, 2014)

Periferização – Crescimento rápido nos municípios em torno das metrópoles, a taxas mais elevadas que o município central da região metropolitana (ABIKO, 1995).

R

Recuo – Distância entre a edificação e os limites do lote.

Rede inteligente – Tradução do inglês “smart grids”. Trata-se de uma rede de distribuição de energia caracterizado por um fluxo bidirecional de eletricidade e de informações. A rede inteligente é capaz de controlar e solicitar instalações de produção, armazenamento e utilização da energia (MARTINS, 2014).

S

Segregação urbana – Padrões de organização, separação e diferenciação social do espaço público (CALDEIRA, 2000).

Smart Grid - Ver rede inteligente

T

Taxa de ocupação do solo - Relação entre área de projeção da edificação e a área do lote.

U

Unidade de vizinhança - Unidade de vizinhança possui cerca de 50 hectares e deve estar organizada de forma integrada, proporcionando acesso a facilidades cotidianas com variedade suficiente por meio da caminhada (WALTON *et al.*, 2007).

Urbanização – Processo de transformação das características rurais de uma localidade ou região para características urbanas;

“Processo de adequação de assentamentos com a manutenção da população (ou de grande parcela desta) no local. Compreende a abertura e consolidação de sistema viário, implantação de infraestrutura completa, reparcelamento do solo (quando couber), execução de obras de consolidação geotécnica, construção (quando necessária) de equipamentos sociais, promoção de melhorias habitacionais e da regularização fundiária. A urbanização pode ser simples ou complexa, dependendo da densidade e do traçado urbano do local” (ONU - NAÇÕES UNIDAS NO BRASIL, 2018).

Uso misto - “Exercício concomitante do uso residencial e não residencial” (MARTINS, 2014); “Desenvolvimento onde é necessária densidade habitacional mínima para sustentar usos não residenciais” (WALTON *et al.*, 2007).

APÊNDICE A – CÁLCULOS

Taxa de Ocupação (T.O.)

Multiplicador (T.O.) x Área do lote = Área projetada do empreendimento

Coeficiente de aproveitamento (C.A.)

Multiplicador (C.A.) x Área do lote = Área total do empreendimento

Demanda energética comercial anual

Área total do empreendimento x 100

Demanda energética residencial Anual

Área total do empreendimento x 40

Geração de energia solar fotovoltaica

Radiação solar incidente total (kWh.ano) x eficiência PV (16%) x área da cobertura livre para PV (90%)

Área total do empreendimento

área de cobertura x nº de pavimentos

Radiação solar incidente total (kWh.ano)

Radiação Solar (kWh/m².ano) x área de cobertura

Número mínimo de unidades habitacionais e área máxima por unidade habitacional

Nº min. unidades	$(C.A.u \times A.t.) / (C.A.máx \times \text{Cota parte máxima})$
Área max. Unidades	$(A.t \times C.A.máx) / \text{Nº min. Unidades}$
C.A.u	Coeficiente de aproveitamento utilizado
A.t.	Área do lote
C.A.max	Coeficiente de aproveitamento máximo permitido pela legislação vigente