



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

BRENO BEZERRA FREITAS

APLICAÇÃO DE SISTEMAS DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA
PARA O DIMENSIONAMENTO FOTOVOLTAICO URBANO:
UM ESTUDO DE CASO COM O ARCGIS

FORTALEZA

2022

BRENO BEZERRA FREITAS

APLICAÇÃO DE SISTEMAS DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA
PARA O DIMENSIONAMENTO FOTOVOLTAICO URBANO:
UM ESTUDO DE CASO COM O ARCGIS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.
Área de concentração: Energias Renováveis e Sistemas Elétricos.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Cesar Marques de Carvalho
Coorientador: Prof. Dr. Antonio Paulo de Hollanda Cavalcante

FORTALEZA

2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- F936a Freitas, Breno Bezerra.
Aplicação de Sistemas de Informação Geográfica para o Dimensionamento Fotovoltaico Urbano: Um Estudo de Caso com o ArcGIS / Breno Bezerra Freitas. – 2022.
102 f. : il. color.
- Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Fortaleza, 2022.
Orientação: Prof. Dr. Paulo Cesar Marques de Carvalho.
Coorientação: Prof. Dr. Antônio Paulo de Hollanda Cavalcante.
1. Fotovoltaica. 2. ArcGIS. 3. SIG. 4. Planejamento energético. 5. Planejamento urbano. I. Título.
CDD 621.3
-

BRENO BEZERRA FREITAS

APLICAÇÃO DE SISTEMAS DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA
PARA O DIMENSIONAMENTO FOTOVOLTAICO URBANO:
UM ESTUDO DE CASO COM O ARCGIS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.
Área de concentração: Energias Renováveis e Sistemas Elétricos.

Aprovado em ___/___/_____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Paulo Cesar Marques de Carvalho (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Antonio Paulo de Hollanda Cavalcante (Coorientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Francisco Kleber de Araújo Lima
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Fabrício Gonzalez Nogueira
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Ricardo Silva Thé Pontes
Universidade Federal do Ceará (UFC)

À Deus.

Aos meus pais, Luzia e Antônio.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, a Deus, por me dar sabedoria e força para superar as adversidades.

Aos meus pais, Luzia e Antônio, por estarem sempre ao meu lado e por serem meu grande ponto de apoio. Por apoiarem minha escolha na vida acadêmica e por todos os bons conselhos que sempre me deram em todos os aspectos da vida.

Aos meus orientadores, Prof. Paulo Carvalho e Prof. Antonio Paulo, pela paciência, pela disponibilidade, pelas valorosas contribuições ao meu trabalho e por entenderem as dificuldades que tive devido à pandemia do COVID-19.

Aos demais membros da banca examinadora, Prof. Ricardo Thé, Prof. Fabrício Nogueira e Prof. Kleber Lima, pela disponibilidade e pelos auxílios para tornar meu trabalho ainda melhor.

À FUNCAP, pela bolsa de mestrado fornecida.

Às amigadas que o mestrado me trouxe: Dayse, José Raimundo, Leonarda, Natasha e Talita, as quais, juntos, superamos as dificuldades causadas pela pandemia, ajudamo-nos durante os percalços da pós e que me proporcionaram muitas alegrias e aprendizados.

Aos amigos do Sukita: Handerson, Jhony, Kelly, Nick, Tamyris e Yuri, por todas as horas de diversão, risadas e de ótimas conversas.

Aos companheiros de pesquisa do LEA e do GPAR, que tornaram os dias na UFC mais leves em meio à pandemia.

Ao Gledson Lima pelos auxílios e pelos ensinamentos relacionados aos SIG.

Aos “felas”: Anderson, Eduardo, Lucas Jadilo e Walter, amigos os quais conheci na graduação e tenho grande carinho.

Aos amigos da graduação: Bruno, Caio, Davi, Pedro e Tiago, amigos que me acompanham desde o começo do curso.

Aos meus grandes amigos, tidos por mim como irmãos: Dhiego, Leandro e Raphael, que acompanham minha jornada desde o ensino fundamental, compartilhando alegrias, preocupações e me apoiando desde sempre.

À UFC, que é como uma segunda casa para mim.

Por fim, agradeço a todos que, de alguma forma, fizeram parte de mais essa etapa da minha jornada e que, independente de qual tenha sido a contribuição, sou grato de coração por ela.

“Eu não tenho nenhum talento especial.
Sou apenas apaixonadamente curioso”
(Albert Einstein)

“Não venci todas as vezes que lutei, mas
perdi todas as vezes que deixei de lutar”
(Cecília Meireles)

RESUMO

O aumento na demanda por energia elétrica e por formas de geração que causem menos impactos ao meio ambiente tem sido assunto cada vez mais recorrente ao redor do planeta. Nesse sentido, um planejamento energético que considera mais precisamente o ambiente em que a fonte e o consumidor estão inseridos vem sendo debatido. Com isso, a busca por estudos energéticos que avaliem a integração entre fontes de energia renováveis, sistemas de geração distribuída e planejamento urbano trouxe o conceito de Sistemas de Energia Inteligentes. Uma das motivações para esta tendência é o forte crescimento da tecnologia fotovoltaica nas cidades, integrando geração e planejamento urbano. Considerando isto, a presente dissertação avalia as funcionalidades de 20 ferramentas computacionais considerando 8 critérios: capacidade de simulação, geração de cenários, *bottom-up*, licença gratuita ou paga, condicionamento energético, aplicação fotovoltaica urbana, integração com GIS e integração com planos diretores para cidades. Além disso, propõe-se uma metodologia de dimensionamento fotovoltaico e planejamento energético utilizando a ferramenta ArcGIS, a partir de aerofotogrametria. Como forma de validação, desenvolveu-se um estudo de caso para uma região na cidade de Fortaleza (com área de 20.888 m²) e obteve-se uma geração anual de energia elétrica de 5,232 GWh no ArcGIS e de 5,240 GWh com o RETScreen, o que representa uma diferença percentual de 0,15 %. Também como validação, comparou-se a produtividade entre os dimensionamentos no ArcGIS e no RETScreen com os sistemas FV LEA1 e LEA2 em funcionamento no Laboratório de Energias Alternativas da UFC (LEA-UFC), obtendo os valores respectivos de 4,42, 4,41, 4,40 e 4,39 kWh/kWp, obtendo erros percentuais menores que 0,7 %. Além disso, percebeu-se que ArcGIS apresenta a maioria das funcionalidades avaliadas, contemplando capacidade de simulação, *bottom-up*, aplicação fotovoltaica urbana, integração com GIS e integração com planos diretores para cidades. Apesar de não gerar cenários, requerer licença paga e não aplicar o condicionamento de energia, pode ser considerado uma ferramenta para o planejamento energético e urbano, assim como mostra uma grande precisão no dimensionamento fotovoltaico.

Palavras chave: Fotovoltaica; ArcGIS; SIG; Planejamento energético; Planejamento urbano.

ABSTRACT

The increase in the demand for electric energy and for forms of generation that cause less impact on the environment has been an increasingly recurrent subject around the planet. In this sense, an energy planning that considers more precisely the environment in which the source and the consumer are inserted has been debated. With this, the search for energy studies that evaluate the integration between renewable energy sources, distributed generation systems, and urban planning has brought the concept of Intelligent Energy Systems. One of the motivations for this trend is the strong growth of photovoltaic technology in cities, integrating generation and urban planning. Thus the present dissertation evaluates the functionalities of 20 computational tools considering 8 criteria: simulation capability, scenario generation, bottom-up, free or paid license, energy conditioning, urban PV application, integration with GIS and integration with cities master plans. Furthermore, a methodology for PV sizing and energy planning using the ArcGIS tool from aerophotogrammetry is proposed. As a form of validation, a case study was developed for a region in the city of Fortaleza (with area of 20,888 m²) and an annual electricity generation of 5.232 GWh was obtained in ArcGIS and 5.240 GWh with RETScreen, which represents a percentage difference of 0.15 %. Also as validation, the yield was compared between the sizing in ArcGIS and RETScreen with the LEA1 and LEA2 PV systems operating in Laboratório de Energias Alternativas da UFC (LEA-UFC), obtaining the respective values of 4.42, 4.41, 4.40 and 4.39 kWh/kWp, obtaining percentage errors smaller than 0.7 %. Furthermore, it was realized that ArcGIS presents most of the evaluated functionalities, contemplating simulation capability, bottom-up, urban PV application, integration with GIS and integration with master plans for cities. Although it does not generate scenarios, requires paid license and does not apply power conditioning, it can be considered a tool for energy and urban planning, as well as shows great accuracy in PV sizing.

Keywords: Photovoltaic; ArcGIS; GIS; Energy planning, Urban planning.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação visual de azimute e ângulo de elevação	24
Figura 2 – Representação dos atributos de cada camada em um SIG	28
Figura 3 – Visão Geral de um SIG	29
Figura 4 – Estrutura da metodologia de avaliação das ferramentas	46
Figura 5 – Diagrama de Venn da avaliação das ferramentas de acordo com as novas funcionalidades.....	57
Figura 6 – DSM da área estudada.....	60
Figura 7 – Geolocalização da área estudada.....	61
Figura 8 – Derivação do <i>raster</i> de sombreamento	62
Figura 9 – Indicação das superfícies das coberturas das construções	63
Figura 10 – Camada com os níveis de irradiação solar para as superfícies identificadas	64
Figura 11 – Demonstração dos níveis de inclinação dos telhados	65
Figura 12 – Demonstração dos níveis de inclinação dos telhados	66
Figura 13 – Área aproveitável após a remoção de locais com inclinação maior que 45°	67
Figura 14 – Área aproveitável após a remoção de locais com inclinação maior que 45° e baixos índices de irradiação solar.....	68
Figura 15 – Edificações selecionadas pelo critério da área aproveitável ser maior ou igual à 30m ²	70
Figura 16 – Resultado da agregação por construção	71
Figura 17 – Resultado do dimensionamento usando ArcGIS.....	72
Figura 18 – Dados resultantes da geração com a metodologia do ArcGIS	73
Figura 19 – Localização da região avaliada no RETScreen.....	74
Figura 20 – Dados de irradiação solar da região avaliada no RETScreen	74
Figura 21 – Dados do dimensionamento no RETScreen.....	75
Figura 22 – Identificação da área avaliada e da base de dados usada	95
Figura 23 – Identificação da área avaliada e da base de dados usada	95
Figura 24 – Identificação da área avaliada e da base de dados usada	96
Figura 25 – Dados de latitude, longitude, elevação do solo e temperaturas máxima e mínima.....	96
Figura 26 – Informações sobre o tipo de instalação	97
Figura 27 – Seleção da tecnologia.....	97

Figura 28 – Dimensionamento simplificado da instalação.....	97
Figura 29 – Dimensionamento detallado da instalação	98
Figura 30 – Aba de análise de custos	98
Figura 31 – Aba de análise de emissões	99
Figura 32 – Aba de análise financeira	100
Figura 33 – Aba de análise de risco.....	101
Figura 34 – Aba de verificação dos dados.....	102
Figura 35 – Aba de análise gráfica do projeto.....	102

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Conexões de GD FV no Brasil	36
Gráfico 2 – Preço anual dos sistemas FV por faixa de potência para o cliente final	37
Gráfico 3 – Porcentagem da FV nas capitais em relação aos estados	37
Gráfico 4 – Percentual das ferramentas em relação ao número de itens avaliados	56
Gráfico 5 – Quantitativo de funcionalidades disponíveis.....	57
Gráfico 6 – Quantitativo das funcionalidades apresentadas por cada ferramenta.....	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resumo dos artigos apresentados	41
Tabela 2 – Resumo dos trabalhos identificados no Brasil.....	43
Tabela 3 – Resumo dos trabalhos desenvolvidos na UFC	44
Tabela 4 – Classificação das ferramentas de acordo com as funcionalidades.....	55

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

3D	Tridimensional
AHP	<i>Analytical Hierarchy Process</i>
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CEA	<i>City Energy Analyst</i>
CGH	Centrais Geradoras Hidroelétricas
CGIS	<i>Canada Geographic Information System</i>
CO ₂	Dióxido de Carbono
DHI	<i>Diffuse Horizontal Irradiation</i>
DSM	<i>Digital Surface Model</i>
EOL	Eólicas
FC	Fator de Capacidade
FER	Fontes de Energia Renovável
FV	Fotovoltaico
GC	Geração Centralizada
GD	Geração Distribuída
GEE	Gases do Efeito Estufa
GHI	<i>Global Horizontal Irradiation</i>
GIS	<i>Geographic Information System</i>
ICA	Instituto de Cultura e Arte
ID	Identificação
IDEAL	Instituto para o Desenvolvimento de Energias Alternativas na América Latina
IRENA	<i>International Renewable Energy Agency</i>
LEA	Laboratório de Energias Alternativas
LiDAR	<i>Lighting Detection And Ranging</i>
MCDM	<i>Multi-Criteria Decision Making</i>
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
PERS	Programa de Energia Renovável Social
PL	Projeto de Lei
PR	<i>Performance Ratio</i>
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional

RDF1	Redação Final 1
REN	Resolução Normativa
RPAS	<i>Remotely Piloted Aircraft System</i>
RU	Restaurante Universitário
SCEE	Sistema de Compensação de Energia Elétrica
SIE	Sistemas Inteligentes de Energia
SIG	Sistema de Informação Geográfica
UFC	Universidade Federal do Ceará
UFSM	Universidade Federal de Santa Maria
UTE	Usinas Termoeletricas

LISTA DE SÍMBOLOS E UNIDADES

%	Porcentagem
R\$	Real
U\$	Dolar
W	Watt
Wp	Watt-pico
kW	Quilowatt
kWp	Quilowatt-pico
kWh	Quilowatt-hora
MW	Megawatt
MWh	Megawatt-hora
GW	Gigawatt
GWh	Gigawatt-hora
m	Metro
m ²	Metro-quadrado
h	Hora
°C	Graus Celsius

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
1.1	Motivação	19
1.2	Objetivos	20
<i>1.2.1</i>	<i>Objetivo Geral</i>	20
<i>1.2.2</i>	<i>Objetivos Específicos</i>	20
1.3	Estrutura da Dissertação	20
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	22
2.1	Energia solar	22
<i>2.1.1</i>	<i>Histórico</i>	22
<i>2.1.2</i>	<i>Base Teórica</i>	23
<i>2.1.2.1</i>	<i>Terminologias</i>	23
<i>2.1.2.2</i>	<i>Tipos de sistemas</i>	24
2.2	Sistemas de Informação Geográfica	25
<i>2.2.1</i>	<i>Histórico</i>	25
<i>2.2.1.1</i>	<i>No mundo</i>	25
<i>2.2.1.2</i>	<i>No Brasil</i>	26
<i>2.2.2</i>	<i>Base Teórica</i>	27
<i>2.2.2.1</i>	<i>Geotecnologias</i>	27
<i>2.2.2.2</i>	<i>Visão geral de um SIG</i>	28
<i>2.2.2.3</i>	<i>Métodos de aquisição de imagens</i>	30
2.3	Planejamento Urbano	31
<i>2.3.1</i>	<i>Histórico</i>	31
<i>2.3.2</i>	<i>Base Teórica</i>	32
3	ESTADO DA ARTE	34
3.1	Geração Distribuída no Brasil	34
<i>3.1.1</i>	<i>Evolução Normativa</i>	34
<i>3.1.2</i>	<i>Desenvolvimento da Geração Fotovoltaica no Brasil</i>	36
3.2	Pesquisas sobre Potencial de Geração FV com SIG	38
<i>3.2.1</i>	<i>Artigos internacionais</i>	38
<i>3.2.2</i>	<i>No Brasil</i>	42
<i>3.2.3</i>	<i>Na UFC</i>	43
4	FERRAMENTAS DE PLANEJAMENTO ENERGÉTICO E URBANO	45

4.1	Cr�terios de Avalia�o das Ferramentas	45
4.2	Ferramentas Consolidadas	47
4.2.1	<i>Balmorel</i>	47
4.2.2	<i>CEA</i>	47
4.2.3	<i>Dieter</i>	47
4.2.4	<i>District ECA</i>	48
4.2.5	<i>EnergyPLAN</i>	48
4.2.6	<i>EnergyPRO</i>	49
4.2.7	<i>GridLAB-D</i>	49
4.2.8	<i>HOMER PRO</i>	49
4.2.9	<i>HUES</i>	50
4.2.10	<i>iHOGA</i>	50
4.2.11	<i>INSEL</i>	50
4.2.12	<i>Oemof</i>	51
4.2.13	<i>OSeMOSYS</i>	51
4.2.14	<i>RETScreen</i>	51
4.2.15	<i>SIREN</i>	52
4.2.16	<i>Solarius PV</i>	52
4.2.17	<i>SOLergo</i>	53
4.2.18	<i>Synergi Electric</i>	53
4.2.19	<i>Urbs</i>	53
4.2.20	<i>WebOpt</i>	54
4.3	Avalia�o das Ferramentas	56
5	O ARCGIS COMO FERRAMENTA DE DIMENSIONAMENTO FV	60
5.1	Cria�o do DSM	60
5.2	Cria�o de um Efeito de Sombreamento	61
5.3	Explora�o das Superf�cias do Topo das Constru�es	62
5.4	Cria�o de uma Camada de Irradia�o Solar	63
5.5	Identifica�o dos Telhados Adequados	64
5.6	Remo�o de �reas com Grandes Declividades	66
5.7	Remo�o das �reas com baixos �ndices de Irradia�o Solar	67
5.8	Remo�o de �reas com Orienta�o Inadequadas	68
5.9	C�culo da pot�ncia por edif�cio	69
5.9.1	<i>Agrega�o das c�lulas por constru�o</i>	69

5.9.2	<i>Identificação dos edifícios adequados</i>	69
5.9.3	<i>Conversão da Irradiação Solar em Energia</i>	70
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES	73
6.1	Estudos de Caso para Fortaleza	73
6.1.1	<i>Dimensionamento com ArcGIS</i>	73
6.1.2	<i>Dimensionamento com RETScreen</i>	74
6.1.3	<i>Diferença percentual nos dimensionamentos</i>	75
6.1.4	<i>Comparativo entre produtividades</i>	76
6.1.5	<i>Erro percentual entre as produtividades</i>	77
6.2	Avaliação do ArcGIS	78
6.3	Contribuições do SIG ao planejamento urbano	79
7	CONCLUSÕES	81
	ARTIGOS PUBLICADOS DURANTE O MESTRADO.....	82
	ARTIGOS SUBMETIDOS E EM AVALIAÇÃO DURANTE O MESTRADO	82
	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	83
	REFERÊNCIAS	84
	ANEXO A – MAPA MUNDIAL DA IRRADIAÇÃO GLOBAL HORIZONTAL MÉDIA.....	94
	APÊNDICE A – METODOLOGIA DO DIMENSIONAMENTO NO RETSCREEN	95

1 INTRODUÇÃO

O forte crescimento no uso da geração fotovoltaica (FV) tem relação direta com grande expansão mundial dos últimos anos. À medida que as cidades se desenvolvem, mais energia elétrica é requerida para suprir as mais diversas necessidades. Nesse sentido a FV é a tecnologia que mais se adequa a essa demanda, pois é uma fonte de fácil aplicação, baixa manutenção, pequena demanda inicial de espaço para instalação, baixo impacto ambiental e facilmente adaptável ao contexto urbano. Atrelado a isso, leis e disposições afins que tratam da Geração Distribuída (GD) para a produção de eletricidade são cada vez mais necessárias.

Segundo a *International Renewable Energy Agency* (IRENA), a capacidade instalada mundial FV até 2020 foi de 707,4 GW [1]; no Brasil, com a aprovação da Resolução Normativa (REN) N° 482/2012 e suas subseqüentes atualizações, a potência FV instalada até o final de 2020 era de 7,47 GW, de acordo com a Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (ABSOLAR) [2], chegando a 13,3 GW ao final de 2021, de acordo com a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) [3].

Devido à grande utilização de instalações FV em telhados de casas, indústrias, comércios e infraestruturas públicas em ambientes urbanos, a área disponível para a instalação desses sistemas se torna um fator determinante para o crescimento e para a expansão do setor. Também sobre isso, a integração entre produção de energia elétrica e planejamento urbano, considerando o controle de emissões de gases do efeito de estufa (GEE) e a redução da poluição atmosférica, está diretamente relacionada com aspectos físicos, sociais, econômicos e ambientais das cidades, tornando essa integração cada vez mais necessária [4].

Estudos recentes relacionam a forma urbana ao comportamento da demanda por eletricidade ou ainda propõem modelos de integração entre o planejamento urbano e energético como forma de reduzir o consumo de eletricidade e/ou torná-lo mais eficiente, assim como reduzir a emissão de GEE [5,6,7]. Com isso, a busca por sistemas de energia descentralizados, com maior integração de fontes de geração renovável, armazenamento energético e estratégias de controle pelo lado da demanda de energia acaba por trazer o conceito de Sistemas Inteligentes de Energia (SIE), que representa a abordagem em diversos sistemas de gestão que visam tornar mais econômico e melhorar o gerenciamento e a distribuição da energia elétrica. Dentre tais sistemas, o mais difundido é a rede inteligente (*smart grid*) [8].

A complexidade da transição do cenário atual para o SIE está diretamente relacionada com a capacidade de planejamento da integração das questões urbanas e energéticas, considerando que cada sector tem implicações em vários aspectos, que devem ser

abordados de uma forma específica. De acordo com [5], a complexidade pode ser atribuída: i) à dificuldade de isolar a forma urbana e outros parâmetros urbanos dos direcionadores da demanda de energia; ii) o fato de haver muitas variáveis nas cidades a serem consideradas e que o grau de interação entre cada uma delas ainda não está totalmente definido e compreendido; iii) alguns atributos urbanos podem ter um efeito antagônico. Por exemplo, usando o telhado do edifício para geração FV exclui seu uso para aquecimento solar de água ou como telhados verdes. Além disso, investir em arranha-céus para acomodar mais pessoas ou aumentar áreas verdes urbanas com árvores altas também pode impactar a irradiação solar que atinge os módulos FV; e iv) não existem muitos impactos empiricamente medidos em relação aos efeitos de adoção de estratégias de planejamento energético ao nível da cidade

Devido a esta complexidade, o uso de ferramentas com alta confiabilidade para ajudar na otimização do projeto e da etapa operacional são imprescindíveis no cenário dos SIE. 13 ferramentas são classificadas em [9] de acordo com as diferentes fases do planejamento: modelos geográficos para avaliação da localização espacial dos recursos, distribuição e morfologia do ambiente construído, modelos energéticos para a construção de curvas de demanda dos consumidores e modelos para avaliação de aspectos energéticos. 12 ferramentas são classificadas em [10] de acordo com sua aplicação: multi-escala, escala distrital e escala regional. É proposta uma revisão abrangente dos sistemas da GD em [11] e 14 modelos são classificados de acordo com sua fase de projeto. De acordo com [12], 90 % das ferramentas não são capazes de simular planejamento energético para todas as possibilidades de geração de energia renovável. Em [13], são apresentadas 17 ferramentas que podem avaliar sistemas de energia em um setor de construção em escala urbana

Considerando a utilização de ferramentas com integração de Sistema de Informação Geográfica (SIG), [14] analisa que o potencial FV baseado em SIG pode ser aplicado a diferentes escalas; já em [15] é calculada uma diferença média de até 30 % entre simulações com e sem ambientes geográficos e urbanos; e em [16] é proposto um estudo sobre locais adequados para o desenvolvimento de grandes projetos FV com a combinação de análise multicritério e SIG, indicando a eficiência dos SIG em lidar com diversos critérios.

1.1 Motivação

Com a motivação de integrar o planejamento urbano e energético, a presente dissertação inicialmente avalia 20 ferramentas computacionais para analisar as suas funcionalidades considerando: capacidade de simulação, projeção de cenários, *bottom-up*,

licença gratuita ou paga, condicionamento energético, aplicação FV urbana, integração com SIG e planos diretores de cidades, visando contribuir para a transição ordenada do planejamento para SIE. Numa segunda etapa, propõe uma aplicação do software ArcGIS como ferramenta de dimensionamento FV para planejamento energético.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Avaliar a viabilidade de uso do ArcGIS como uma ferramenta de planejamento energético e urbano.

1.2.2 Objetivos Específicos

Como objetivos específicos dessa dissertação:

- Comprovar a viabilidade de uso do ArcGIS como uma ferramenta de dimensionamento FV urbano por meio de metodologia aplicada a imagens obtidas a partir de drone;
- Apresentar um estudo de caso para um trecho da cidade de Fortaleza-CE, como primeiro local de aplicação da metodologia;

1.3 Estrutura da Dissertação

A presente dissertação está dividida em sete capítulos visando orientar a compreensão de todo o estudo.

No capítulo 2 é dada uma fundamentação teórica, juntamente com um breve contexto histórico, sobre energia solar, com foco em conceitos aplicados à FV, sobre SIG, caracterizando sua estrutura de funcionamento e as formas de obtenção de imagens para os estudos, e sobre planejamento urbano, mostrando os principais conceitos da legislação urbanística, para facilitar o entendimento dos demais capítulos.

No capítulo 3 é apresentada a evolução normativa da GD no Brasil e uma revisão bibliográfica sobre a aplicação dos SIG como ferramentas de planejamento energético, podendo ser em larga escala ou em âmbito municipal.

No capítulo 4 são apresentados os critérios de avaliação para ferramentas de planejamento energético urbano, assim como são identificadas, descritas e avaliadas vinte ferramentas de planejamento energético a fim de demonstrar suas adequabilidades.

No capítulo 5 é exposta a metodologia de dimensionamento FV aplicada no ArcGIS, detalhando cada etapa de forma descritiva e visual, desde a aquisição das imagens até o mapa com potencial de geração.

No capítulo 6 são apresentados resultados e discussões a respeito da aplicação da metodologia à cidade de Fortaleza, um comparativo ArcGIS e RETSreen a fim de comprovar a aplicabilidade do método e uma discussão sobre a aplicabilidade do ArcGIS como ferramenta de planejamento energético urbano.

No capítulo 7 constam as conclusões sobre as ferramentas de planejamento energético após a aplicação dos critérios, sobre do estudo realizado no ArcGIS e sobre a viabilidade do mesmo sob a condição de ferramenta de planejamento energético urbano.

Em seguida, apresentam-se os trabalhos publicados em congressos e revistas científicas durante a trajetória do mestrado, as referências bibliográficas e o anexo.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O presente capítulo tem como objetivo fornecer uma base de conhecimento teórico para facilitar a compreensão dos demais capítulos deste trabalho. O mesmo está organizado em três seções distintas, que tratam de aspectos gerais de energia solar, SIG e Planejamento Urbano, dando um breve contexto do desenvolvimento histórico e caracterizando os principais aspectos relevantes ao estudo em questão.

2.1 Energia solar

Essa seção apresenta a evolução histórica da tecnologia que culminou na aplicação FV atual, bem como do embasamento teórico para facilitar o entendimento.

2.1.1 Histórico

A origem do uso da conversão FV deu-se em 1839, após uma pesquisa desenvolvida pelo físico francês Alexandre Edmond Becquerel. Como consequência disso, em 1883, Charles Fritts desenvolveu a primeira célula FV, produzida por selênio revestido de ouro, representando um marco da tecnologia FV, onde foi possível gerar uma corrente contínua e constante para a conversão elétrica com eficiência de 1 % [17].

Em 1930, Walter Schottky instituiu a teoria do efeito fotovoltaico, onde, em 1932, foi descoberto o efeito no seleneto de cádmio (CdSe); em 1954 foi desenvolvida a célula FV pelo engenheiro Russell Shoemaker Ohl. Partindo disso, em 1958, foi utilizado um módulo FV pela primeira vez, ao ser anexado ao satélite Vanguard I para alimentar seu rádio na viagem ao espaço, e buscando novas tecnologias de matérias para aplicar o efeito FV, em 1976, foi desenvolvida a primeira célula de silício amorfo, com 1,1 % de eficiência [17].

Impulsionado pela busca por eficiência na conversão, em 1994, o *National Renewable Energy Laboratory* (NREL), criou a primeira célula de gálio fosforeto de índio/arsenieto de gálio (GaInP/GaAs), tornando-se a primeira a superar 30 % de eficiência de conversão em condições de teste. Após isso, em 1999, a potência FV instalada mundial ultrapassou 1 GW. Pouco tempo depois, em 2006, superou-se a eficiência de 40 % na conversão com o uso de silício policristalino [17].

No Brasil, o primeiro caso registrado de aplicação data de 1981, com a implantação de sistemas de bombeamento FV [18] e a primeira planta FV com foco em produção de energia

elétrica data de 2008, onde um sistema de potência instalada de 25 kWp foi usado em Bocaiuva, Minas Gerais [19]. Já em 2011, foi instalada a primeira usina FV da América Latina, no município de Tauá, localizada no Ceará, com capacidade de 1 MWp, com o uso de 4.680 módulos FV [20], mas até 2012, quase a totalidades das aplicações FV eram concentradas em regiões isoladas onde não havia acesso à rede elétrica [21].

2.1.2 Base Teórica

Como o objeto de estudo da presente dissertação é a aplicação da energia solar através da tecnologia FV, faz-se necessário entender os conceitos mais relevantes e as modalidades de uso da tecnologia, assim, esse subtópico apresenta tais informações.

2.1.2.1 Terminologias

Dentre os diversos conceitos relacionado a sistemas FV, é importante entender os principais relacionados ao funcionamento e ao desempenho do sistema, assim:

Entende-se como Fator de Capacidade (FC) a razão entre a energia elétrica gerada em determinado intervalo de tempo e sua geração nominal, caso estivesse operando com potência nominal no mesmo período [22].

Produtividade (*yield*) representa a relação entre a eletricidade produzida diariamente e a potência nominal do sistema, sendo expressa em kWh/kWp [22].

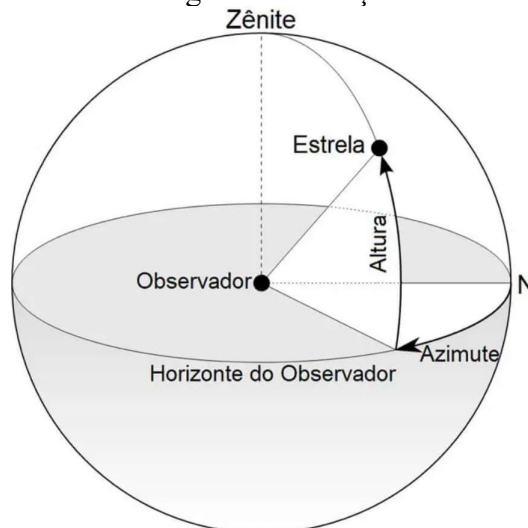
Desempenho Global (*Performance Ratio - PR*) é a relação entre o desempenho real do sistema e o desempenho máximo teórico possível, contabilizando todas as perdas envolvidas no sistema, como perdas por queda de tensão, devido à resistência elétrica de condutores e conectores, *mismatch*, sombreamento, espectro além das perdas por sujeira, rendimento do inversor, temperatura de operação dos módulos FV, indisponibilidade do sistema, entre outras [22]; Eficiência do módulo FV – é a porcentagem de energia da luz do Sol que o módulo FV converte em energia elétrica [23].

A definição de irradiação solar é a quantidade de energia que incide em uma determinada área durante certo intervalo de tempo, por unidade de área, sendo medida em Wh/m². Já irradiância é a energia emitida pelo sol na forma de radiação – ondas eletromagnéticas e irradiância representa o fluxo de energia instantâneo que atravessa uma determinada área, sendo medido em W/m² [24].

Irradiação Global Horizontal (*Global Horizontal Irradiation – GHI*) é a irradiação total do Sol em uma superfície horizontal, representando a soma da irradiação direta, que considera o ângulo zenital do Sol, e a Irradiação Horizontal Difusa (*Diffuse Horizontal Irradiation - DHI*), que considera a irradiação solar dispersa e refletida e que incide em uma superfície horizontal [25].

Por fim, azimute é o valor em graus de um ponto qualquer na linha do horizonte, contado no sentido horário a partir do Norte e ângulo de elevação representa a altura a qual um objeto se encontra no céu, sendo medida em graus a partir do ponto azimutal [26], como indicado na Figura 1.

Figura 1 – Representação visual de azimute e ângulo de elevação



Fonte: [26].

2.1.2.2 Tipos de sistemas

De acordo com a REN 482/2012 da ANEEL e suas atualizações, a geração de energia no Brasil se divide em Geração Centralizada (GC), com potência instalada superior a 5 MW, e GD, com potência até 5 MW. No caso da GD, possui quatro modalidades principais de sistemas *on-grid*, ou seja, conectados à rede elétrica, sendo eles [27]:

- Geração junto à carga – configura-se quando o sistema é instalado em uma unidade consumidora e a energia gerada é utilizada no próprio local;
- Autoconsumo remoto – o tipo de conexão em que o consumidor instala o sistema em um local diferente de onde reside e utiliza os créditos gerados

para compensar seu consumo e reduzir o valor da fatura de energia (desde que dentro da mesma área de concessão da concessionária);

- Geração compartilhada – Também conhecido como comunidade solar, é a modalidade em que partes interessadas se reúnem e investem em um sistema de GD. Os créditos de energia gerados e injetados na rede pelo sistema são divididos entre esse grupo de consumidores:
 - Consórcio – é o caso em que pessoas físicas se reúnem;
 - Cooperativa – pessoas jurídicas (empresas) se reúnem;
- Empreendimentos de múltiplas unidades consumidoras (EMUC) – categoria em que a energia gerada é repartida entre os condôminos em percentuais definidos pelos próprios consumidores, podendo ser utilizada para abastecer as áreas comuns do edifício.

2.2 Sistemas de Informação Geográfica

Dado o uso de um SIG no decorrer da presente dissertação, faz-se necessário contextualizar o que são os SIGs, tanto pelo processamento quanto pela aquisição de dados. Assim, a presente seção visa garantir o entendimento necessário sobre o assunto.

2.2.1 Histórico

2.2.1.1 No mundo

Do inglês, *Geographic Information System* (GIS), esse tipo de sistema foi implementado pela primeira vez pelo geógrafo britânico Roger Tomlinson em parceria com as empresas IBM e *Spartan Air Services*, em 1963. Por meio de um projeto do governo canadense com a finalidade de criar um inventário nacional de recursos naturais, desenvolveu-se o *Canada Geographic Information System* (CGIS). Contudo, era muito difícil de usar, pois não existiam monitores com resolução gráfica suficiente, assim como os computadores necessários custavam muito caro e a mão de obra tinha que ser altamente especializada [28].

Após esse fato, o termo SIG foi apresentado formalmente em 1965 em um artigo publicado por dois professores do Departamento de Geografia da Universidade de Illinois e intitula-se “*Some comments on certain technical aspects on geographic information systems*”. Em 1969, era fundada a *Environmental Systems Research Institute*, empresa responsável por

criar o ArcGIS. Com o crescimento no uso desses sistemas, em 1972, a *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) lançou ao espaço o Delta 900, o primeiro satélite desenvolvido especificamente para sensoriamento remoto [29]. E em 1981 foi lançado o primeiro software SIG comercial chamado de ARC/INFO [30].

Em 1999, foi lançado o ArcGIS, o programa baseado em SIG mais utilizado na atualidade. Desse ponto em diante, começaram a surgir os “mapas interativos”, em que os usuários dispõem de certas informações atualizadas em tempo real. Em 2004, foi lançado o *OpenStreetMap*, baseado em mapeamento colaborativo para criar um mapa livre e editável do mundo, inspirado por sites como a Wikipédia. Em 2005, foram lançados o *Google Maps*, usado para rastrear rotas locais de trânsito e tempo de deslocamento, trazendo à tona a lógica de mobilidade urbana, e o *Google Earth*, que fornece uma representação digital do globo e permite navegação e visualização de vários recursos em qualquer referência espacial. E em 2007 foi lançado o *Google Street View*, que permite ao usuário percorrer virtualmente por quaisquer locais mapeados por câmeras ao redor do mundo e atualizados no servidor da empresa [29].

2.2.1.2 No Brasil

Também na década de 60, o Governo Brasileiro demonstrou interesse na área de sensoriamento remoto, levando, em 1961 à criação da Comissão Nacional de Atividades Espaciais (CNAE), que ficou vinculada ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), esta que, em 1971, tornou-se o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). No mesmo ano, o CNPq e a NASA firmaram um projeto de cooperação para o desenvolvimento de sensores remotos visando a aquisição de dados dos recursos naturais, resultando no projeto RadamBrasil [31].

As primeiras aplicações de SIG vieram a partir da divulgação e formação técnica realizadas pelo professor Jorge Xavier da Silva da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), no início dos anos 80. A vinda de Roger Tomlinson ao Brasil para um congresso de geografia, em 1982, fortaleceu ainda mais o interesse de alguns grupos já existentes e incentivou o aparecimento de vários outros interessados em desenvolver essa tecnologia, como: INPE, UFRJ, UNESP, UFSCar, IME, MaxiDATA, CPqD-TELEBRÁS e CPRM [32].

Em 1988, destaca-se a assinatura do acordo entre o INPE e a *China Academy of Space Technology* (CAST) para o desenvolvimento de dois satélites avançados de sensoriamento remoto, denominado Programa CBERS (*China-Brazil Earth Resources Satellite*). Após isso, em 1993, foi lançado o SCD-1, sendo o primeiro satélite planejado e

construído no em território nacional. Em seguida a isso, foram lançados os satélites de observação da Terra CBERS-1, em 1999, CBERS-2, em 2003, CBERS-3, em 2013, CBERS-4, em 2014 e CBERS-4A, em 2019. Como caso mais recente, houve o lançamento do Amazonia 1, em fevereiro de 2021, o primeiro totalmente projetado no Brasil [33].

2.2.2 Base Teórica

Dito isso, os SIG são sistemas que processam e tratam dados geográficos, sejam estes gráficos ou alfanuméricos, com ênfase a análises espaciais e modelagens de superfícies. Os SIG são caracterizados por integrarem em uma única base de dados informações espaciais a partir de dados como cartográficos, de censo e cadastro urbano e rural, imagens de satélite, redes e modelos numéricos de terreno. Assim como oferecem mecanismos para combinar várias informações, através de algoritmos de manipulação e análise, para consultar, recuperar e visualizar um conteúdo e gerar mapas [34] e o ramo de atividades que trata de tais dados é o Geoprocessamento.

2.2.2.1 Geotecnologias

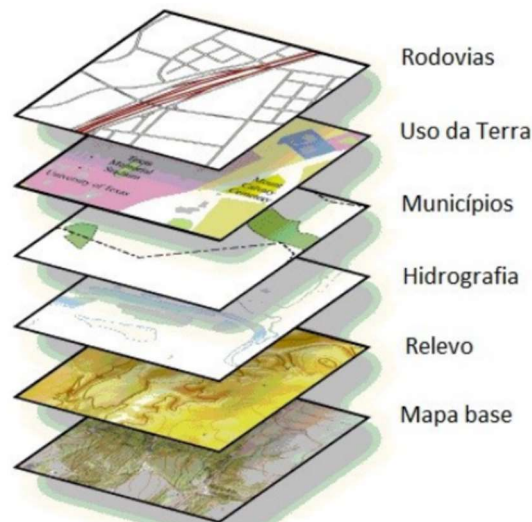
Dentro desse conceito, O termo “geotecnologias” é aplicado para abranger todo o conjunto de tecnologias focadas no tratamento de informações geográficas [35], sendo:

- Coleta (ou aquisição com terceiros) de dados por meio de receptores GNSS, sensores embarcados em satélites, aeronaves, VANT, etc;
- Armazenamento e recuperação dos dados através de sistemas especializados, associados a infraestruturas computacionais que envolvem *hardware*, *software* e algoritmos;
- Edição e processamento de forma manual ou automatizada;
- Análise através de técnicas de filtragem e mineração de dados espaciais visando resultados que representem digitalmente o mundo real;
- Disponibilização na forma de mapas, gráficos, camadas espaciais ou mesmo de dados brutos informações georreferenciadas.

Dentre os exemplos dessa terminologia estão os *softwares* de “propósito geral”, ou seja, que podem gerar resultados para diversas áreas do conhecimento e os SIG se encaixam

nessa definição. Na prática, um SIG representa as informações principalmente por geometrias espaciais, ou seja, avalia objetos no espaço tridimensional. Assim, tem-se que as geometrias devem conter atributos que exponham informações sobre a natureza da região avaliada, como indicado na Figura 2.

Figura 2 – Representação dos atributos de cada camada em um SIG



Fonte: [36].

2.2.2.2 Visão geral de um SIG

Partindo do que foi explicado na seção anterior, um SIG se estrutura em cinco componentes [37]:

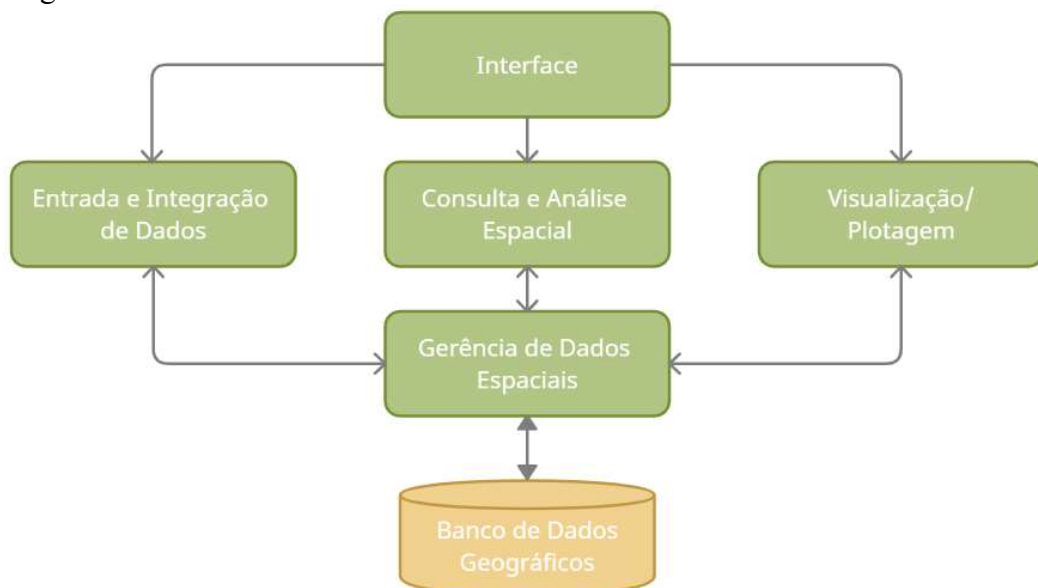
- Interface com usuário:
 - É a parte do sistema visível para o usuário, através da qual, ele se comunica para realizar suas tarefas;
 - Define como o sistema será operado com os mecanismos de processamento de dados espaciais (entrada, edição, análise, visualização e saída);
- Entrada e integração de dados:
 - A entrada de dados é a forma como o programa SIG recebe os dados a partir das fontes externas ao programa, sejam imagens geradas em outros programas ou bancos acessados via internet;
 - A integração é a tática de reunir dados de diferentes fontes a fim de produzir informações importantes e proporcionar uma visão mais

consistente acerca da organização, como o cruzamento de modelos de terreno e imagens de satélites;

- Funções de consulta e análise espacial:
 - A consulta define-se como a forma de busca dos dados por meio de coordenadas, por regiões e/ou classificações específicas;
 - E a análise espacial é uma técnica usada para descrever padrões existentes nos dados espaciais e estabelecer, de forma quantitativa, os relacionamentos entre as diferentes variáveis geográficas;
- Visualização e plotagem:
 - Representa dimensionamento e otimização das imagens para facilitar a compreensão dos dados e a publicação em meio físico e/ou digital;
- Armazenamento e recuperação de dados:
 - Organizados sob a forma de um banco de dados geográficos, são os responsáveis por possibilitar as atualizações na visualização dos dados.

Em resumo, a interface dá acesso à entrada de dados e permite escolher como integrá-los. Assim como disponibiliza a consulta dos dados obtidos e forma de analisá-los e gerar uma visualização dessa análise. No caso da gerência dos dados espaciais, há uma interdependência com o banco de dados geográficos, trazendo dados mais atualizados, novas possibilidades de análise e versões mais atuais de visualização das informações tratadas. Assim, de acordo com o INPE, a visão geral de um SIG é expressa na Figura 3.

Figura 3 – Visão Geral de um SIG



Fonte: INPE (adaptado) [37].

2.2.2.3 Métodos de aquisição de imagens

Entendido isso, a primeira etapa para fazer a avaliação com um SIG é a obtenção das imagens que servirão como base, ou seja, um Modelo Digital de Superfície (*Digital Surface Model* – DSM). Este DSM é uma camada *raster* que consiste num arranjo geralmente regular de células (*pixels*) onde para cada célula que cobre o espaço representado é atribuído um valor numérico.

A resolução espacial de um *raster* determina o tamanho que o pixel representa na realidade, ou seja, designa o tamanho do menor objeto que pode ser identificado na superfície. A resolução espacial dos *pixels* representa o quão preciso o dimensionamento poderá ser, uma vez que as superfícies das construções e afins estarão melhor definidas [38]. Esse tipo de dado espacial pode ser obtido a partir de diversas formas ou fontes, como:

- Levantamento aerofotogramétrico com veículos aéreos não tripulados (*Remotely Piloted Aircraft System* - RPAS)
- Levantamento por perfilamento a laser com RPAS
- Levantamento aerofotogramétrico com veículos aéreos tripulados
- Levantamento por perfilamento a laser com veículos aéreos tripulados
- Levantamento com sensores ativos (radar) com veículos aéreos tripulados
- Imageamento passivo a partir de sensores orbitais
- Imageamento ativo (radar) a partir de sensores orbitais
- Perfilamento a laser com uso de scanner a laser 3D
- Levantamento topográfico com uso de estação total ou receptores GNSS de dupla frequência.

Atualmente existem inúmeras empresas especializadas no fornecimento desse tipo de dado, outra fonte são os bancos de dados de órgãos, prefeituras, instituições e empresas que dado momento já geraram esse tipo de dado espacial para outras finalidades.

Dentre as formas de obtenção, destaca-se a aerofotogrametria, um método usado especificamente para mapear da superfície terrestre. No levantamento fotogramétrico, uma câmera é acoplada ao RPAS e são realizadas diversas fotografias a serem posteriormente sobrepostas para cobrir toda a área a ser mapeada.

2.3 Planejamento Urbano

Pela necessidade de desenvolver um planejamento urbano mais eficiente e completo, a legislação urbanística precisa cada vez mais se integrar com o planejamento energético. Assim, nessa seção, é apresentado um breve histórico do planejamento urbano de Fortaleza e uma base teórica das propostas de integração entre ambos os planejamentos.

2.3.1 Histórico

Como marco ao planejamento urbano de Fortaleza, em 1859, foi elaborada a primeira representação precisa de Fortaleza, conhecida como Planta Exacta da Capital do Ceará, por Adolpho Herbster. Adolpho também foi responsável por estabelecer o primeiro alinhamento de ruas seguindo um traçado em xadrez, visando disciplinar a expansão da cidade e facilitar o fluxo de pessoas e produtos [39].

Em 1945, foi feito primeiro levantamento aerofotogramétrico de Fortaleza, pelo Serviço Geográfico do Exército, assim como a proposta do primeiro Plano Diretor. O plano não foi posto em prática, mas proporcionou o primeiro mapa da cidade não desenhado à mão [39].

Apesar de outras tentativas de renovar o trabalho, apenas em 1963 foi aprovado o primeiro Plano Diretor de Fortaleza, pelos arquitetos Hélio Modesto e Adina Mera, sendo a primeira proposição que abrangia aspectos físicos, sociais e econômicos [39].

Em seguida, em 1972, foi elaborado o Plano de Desenvolvimento Integrado da Região Metropolitana de Fortaleza (PLANDIRF), com foco na Região Metropolitana de Fortaleza (RMF) e com propostas de zoneamento urbano e integração entre aspectos físico-territoriais, econômicos, sociais, político-institucionais e administrativos. Em 1979, coordenado pela Coordenadoria de Desenvolvimento Urbano de Fortaleza, foi desenvolvido o Plano Diretor Físico de Fortaleza, tendo como base o PLANDIRF e diagnósticos situacionais. Já em 1981 foi primeiro Código da Cidade [39].

Finalmente, em 1992, foi finalizado e aprovado pela Câmara Municipal de Fortaleza o Plano Diretor de Desenvolvimento Urbano de Fortaleza (PDDU), complementado em 1996 pela Lei de Uso e Ocupação do Solo (LUOS) [39].

Em 1999, foi elaborado, através de parcerias de diversos setores da sociedade, o Plano Estratégico de Fortaleza e Região Metropolitana (PLANEFOR), tendo como principal objetivo a promoção do desenvolvimento da RMF de forma equilibrada e sustentável. Essa foi a primeira vez, em todo o Brasil, que um documento elaborado pela sociedade civil e

organismos de representação setorial passou a influenciar na composição da Legislação Urbanística de uma cidade e se tornou referência para a organização de outras legislações urbanísticas nas demais cidades brasileiras [39].

Em 2002, de acordo com as determinações do Estatuto da Cidade, foi realizado pela Prefeitura Municipal de Fortaleza o Projeto LEGFOR, sob coordenação de professores do curso de arquitetura e do CT da UFC, o qual se tornou a base para o Plano Diretor Participativo. Destacavam-se entre as propostas do LEGFOR a revisão e a atualização da Legislação Urbanística; a revisão e o aprimoramento do PDDU e sua transformação em Plano Diretor de Desenvolvimento Urbano e Ambiental; e a revisão e o aprimoramento da LUOS [39].

Como legislação mais recente, tem-se o Plano Diretor de 2009 (Lei nº 62/2009), a LUOS de 2017 (Lei nº 236/2017) e Código da Cidade de 2019 (Lei Complementar nº 0270/2019), o qual substituiu o Código de Obras e Posturas de 1981 [40]. Finalmente, uma nova revisão ao Plano Diretor estava prevista para 2020, mas com o estopim da COVID-19, o processo teve que ser suspenso e se mantém em parado até a pandemia estar contida o suficiente para que as audiências possam recomeçar [41].

2.3.2 Base Teórica

Como forma de esclarecer a conexão do planejamento urbano com o presente estudo, essa seção trata da legislação vigente em Fortaleza, trazendo detalhes de projetos de âmbito municipal e estadual e que buscam exatamente estreitar a relação entre planejamento energético e urbano.

O Plano Diretor é uma lei municipal, elaborada pelo Prefeitura Municipal (poder executivo) e aprovada pela Câmara de Vereadores (poder legislativo) e que estabelece regras, parâmetros, mecanismos e formas de incentivo visando o desenvolvimento da cidade. Ele visa orientar a ocupação do solo urbano, levando em consideração os interesses coletivos, como a preservação de locais históricos e da natureza [42].

A LUOS é uma lei que proporciona à cidade uma forma de controle da utilização do espaço urbano e definição das atividades nela permitidas, sendo obrigado do município ou do Estado intervir quando necessário, para garantir o desenvolvimento integrado com a proteção ambiental [43].

O Código da Cidade compõe o conjunto de regulamentos relacionados ao ambiente urbano, tanto para o preservado como para o construído, às posturas municipais e aos

procedimentos para o compartilhamento de responsabilidades entre a Prefeitura Municipal, o Governo Estadual e a população [44].

Assim, Ceará 2050 é uma plataforma de desenvolvimento estratégico cujo principal propósito é traçar alternativas para o desenvolvimento social, econômico e sustentável do Ceará. A plataforma busca desenvolver um plano de ações que possam ser executadas a médio e longo prazo, com horizonte limite de 2050. Como proposta da plataforma, a partir do planejamento energético é encontrado na “Área de Resultado 2: Cadeias Produtivas”, que trata da produção de energia elétrica por fontes renováveis utilizando tecnologia de referência internacional [45].

O Plano Fortaleza 2040 é um planejamento colaborativo entre prefeitura e sociedade com caráter de desenvolvimento urbanístico, econômico e social para orientar as ações públicas e privadas de curto, médio e longo prazo [46]. O plano está dividido em 7 eixos estratégicos: 0) Equidade territorial, social e econômico; 1) Cidade conectada, acessível e justa; 2) Vida comunitária, acolhimento e bem estar; 3) Desenvolvimento da cultura e do conhecimento; 4) Qualidade do meio ambiente e dos recursos naturais; 5) Dinamização econômica e inclusão produtiva; e 6) Governança municipal.

Com destaque ao eixo 4, que, entre outros assuntos, trata da geração de energia elétrica por fonte renovável. Nesse sentido, o Fortaleza 2040 busca tornar a cidade uma “geradora líquida” de energia elétrica, ou seja, que o montante de energia gerado seja maior que o demandado.

3 ESTADO DA ARTE

Diversos pesquisadores ao redor do mundo tem efetuado e continuam efetuando pesquisas envolvendo a geração FV atrelada ao planejamento energético e urbano. Com isso, para o desenvolvimento do presente capítulo, realizou-se uma pesquisa acerca da evolução da GD no Brasil e fez-se uma revisão bibliográfica do que há de mais moderno no uso de ferramentas para auxiliar no planejamento energético e urbano com uso de SIG.

3.1 Geração Distribuída no Brasil

3.1.1 *Evolução Normativa*

Em 1995, a Lei nº 9.074, de 07 de julho, estabeleceu o conceito de produtor independente de energia elétrica [47]:

Art. 11. Considera-se produtor independente de energia elétrica a pessoa jurídica ou empresas reunidas em consórcio que recebam concessão ou autorização do poder concedente, para produzir energia elétrica destinada ao comércio de toda ou parte da energia produzida, por sua conta e risco.

Tal termo tornou-se a primeira designação para o que se conhece atualmente como GD. Apesar disso, o conceito de GD foi apresentado formalmente em 2004 com a Lei nº 10.848 de 15 de março [48], onde dispunha sobre a comercialização de energia elétrica de fontes provenientes de GD, e no mesmo ano com o Decreto nº 5.163 de 30 de julho [49], onde foi definido como:

Art.14. Para os fins deste Decreto, considera-se geração distribuída a produção de energia elétrica proveniente de empreendimentos de agentes concessionários, permissionários ou autorizados, incluindo aqueles tratados pelo art. 8º da Lei nº 9.074, de 1995, conectados diretamente no sistema elétrico de distribuição do comprador, exceto aquela proveniente de empreendimento: I - hidrelétrico com capacidade instalada superior a 30 MW; e II - termelétrico, inclusive de cogeração, com eficiência energética inferior a setenta e cinco por cento, conforme regulação da ANEEL, a ser estabelecida até dezembro de 2004.

Assim considerando GD como a produção de energia elétrica proveniente de empreendimentos de agentes conectados diretamente no sistema elétrico sob jurisdição da concessionária que distribui ao comprador.

Em abril de 2012 foi estabelecida a REN nº 482/2012 [27], a qual apresentava as condições gerais de acesso para micro e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, assim como o sistema de compensação de energia elétrica. Também em

2012, na versão 4 do Módulo 3 dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST), que trata do acesso ao sistema de distribuição, foi inserida Seção 3.7, que trata especificamente do acesso de micro e minigeração distribuída.

Arelada à essa resolução, em 2015, surgiu a REN nº 687/2015 da ANEEL [50], que passou a definir:

I - microgeração distribuída: central geradora de energia elétrica, com potência instalada menor ou igual a 75 kW e que utilize cogeração qualificada, conforme regulamentação da ANEEL, ou fontes renováveis de energia elétrica, conectada na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras;

E a mais recentemente, em 2017, foram apresentadas a REN nº 786/2017 da ANEEL [51], que define:

II - minigeração distribuída: central geradora de energia elétrica, com potência instalada superior a 75 kW e menor ou igual a 5MW e que utilize cogeração qualificada, ou fontes renováveis de energia elétrica, conectada na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras;

Também em 2017 entrou em vigência a versão 7 do Módulo 3 do PRODIST, a mais recente até o momento e que estabelece os procedimentos e as condições para o acesso de micro e minigeração distribuída ao sistema de distribuição [52].

E como resolução mais recente, em 2019, foi apresentado o Projeto de Lei (PL) 5829/2019 [53], que trata em sua Redação Final 1 (RDF1) do marco legal da micro e da minigeração distribuída, do Sistema de Compensação de Energia Elétrica (SCEE) e o Programa de Energia Renovável Social (PERS), assim como dispõe que consumidores livres que tenham efetuada a compra de energia elétrica, conforme as condições estabelecidas nos arts. 15 e 16 da Lei nº 9.074, de 7 de julho de 1995, ou consumidores especiais que tenham adquirido energia na forma estabelecida no § 5º do art. 26 da Lei nº 9.427, de 26 de dezembro de 1996, não poderão aderir ao SCEE. Assim, a RDF1 do PL 5829 indica:

Art. 1º: XIV - Sistema de Compensação de Energia Elétrica (SCEE): sistema no qual a energia ativa é injetada por unidade consumidora com microgeração ou minigeração distribuída na rede da distribuidora local, cedida a título de empréstimo gratuito e posteriormente compensada com o consumo de energia elétrica ativa ou contabilizada como crédito de energia de unidades consumidoras participantes do sistema;

Art. 36. Fica instituído o Programa de Energia Renovável Social (PERS), destinado a investimentos na instalação de sistemas fotovoltaicos e de outras fontes renováveis, na modalidade local ou remota compartilhada, aos consumidores da Subclasse Residencial Baixa Renda de que trata a Lei nº 12.212, de 20 de janeiro de 2010

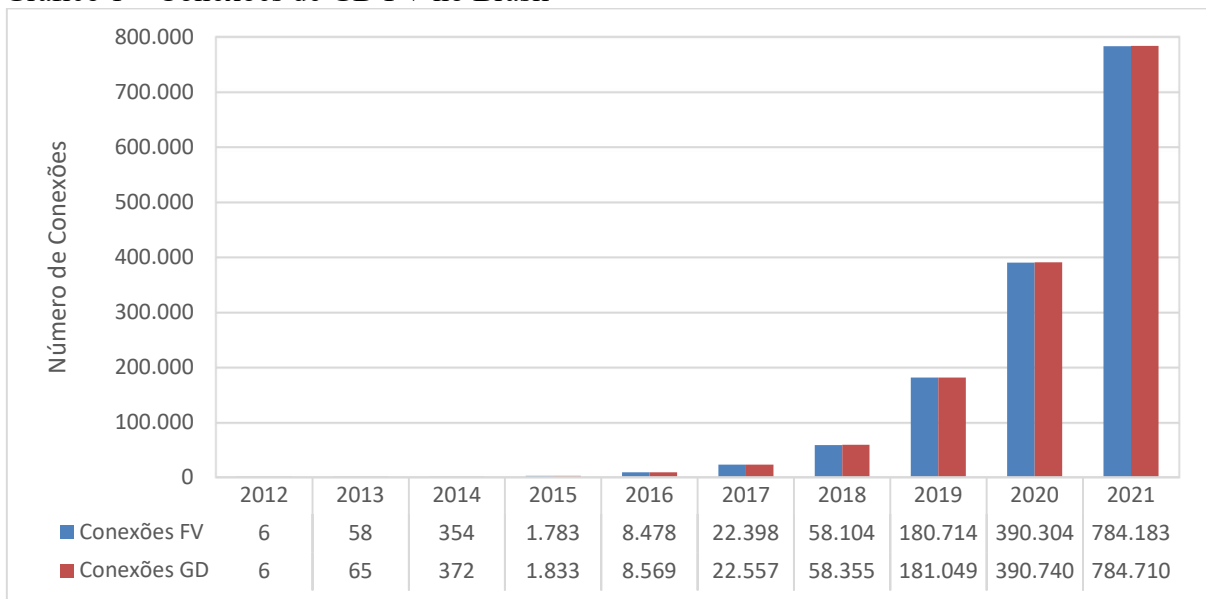
Chegando ao momento atual, em janeiro de 2022, onde a PL 5829, apesar dos atrasos devido ao isolamento e à crise sanitária causados pela COVID-19, acabou de ser formalizada.

3.1.2 Desenvolvimento da Geração Fotovoltaica no Brasil

De acordo com a base de dados da ANEEL, ao final de 2021, a geração FV atingiu 4.632,2 MW de Geração Centralizada (GC) [54] e 8.666,8 MW de GD [19], totalizando 13.299,0 MW de potência instalada.

Devido ao desenvolvimento legal da GD no Brasil, os incentivos à instalação de sistemas GD FV tem aumentado consideravelmente a cada ano. O Gráfico 1 apresenta o crescimento anual no número de conexões de sistemas FV e GD em geral no Brasil desde a formalização da REN 482, em que havia 6 sistemas FV, até o final de 2021, onde havia 784.183 sistemas FV, 372 Usinas Termoelétricas (UTE) à Biomassa, 84 Eólicas (EOL) e 71 Centrais Geradoras Hidroelétricas (CGH), de acordo com o banco de dados de GD da ANEEL [19].

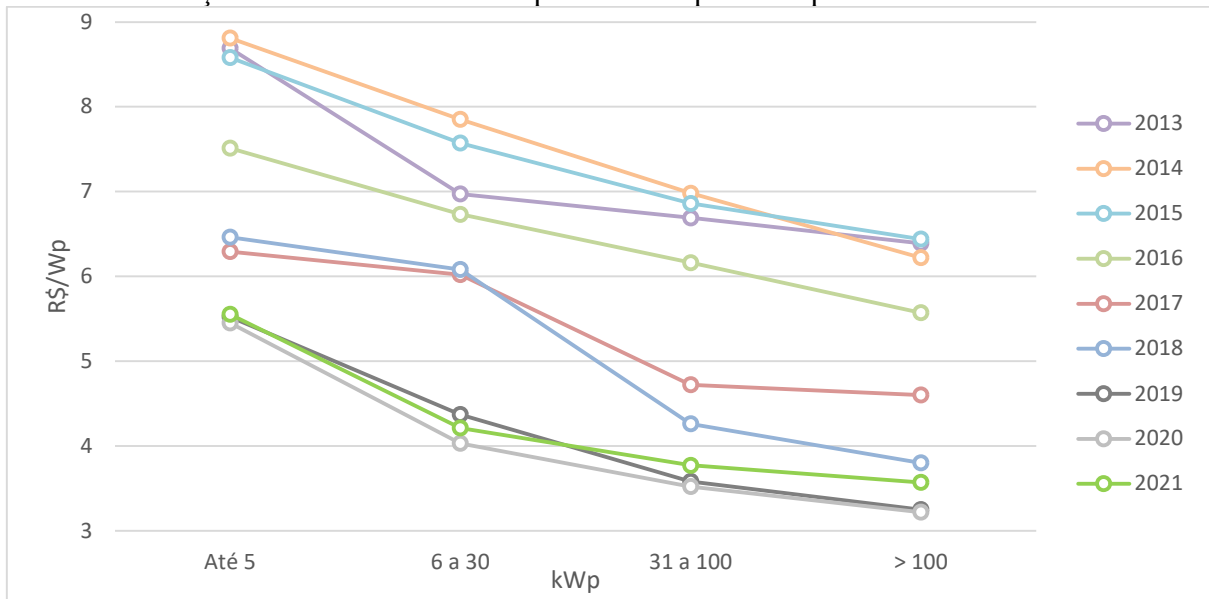
Gráfico 1 – Conexões de GD FV no Brasil



Fonte: ANEEL [19]. (Adaptado)

Sendo a fonte mais beneficiada pela legalização da GD e atrelada a esse forte crescimento, o custo final dos sistemas FV tem se tornado mais acessível à população, seja nos setores residencial, comercial ou industrial. Assim, com base no estudo “O Mercado Brasileiro de Geração Distribuída FV – 2019” do Instituto para o Desenvolvimento de Energias Alternativas na América Latina (IDEAL) [55] e no “Estudo Estratégico de Geração Distribuída 2021” da Greener [56], o Gráfico 2 apresenta os custos para o cliente final divididos por faixa de potência e representados anualmente de 2013 até 2021.

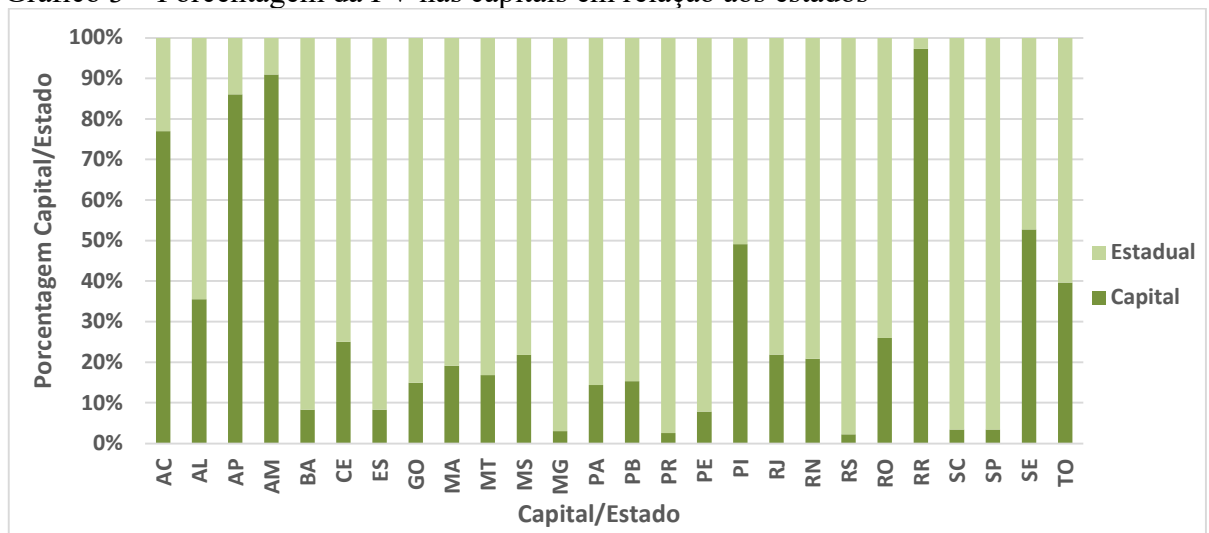
Gráfico 2 – Preço anual dos sistemas FV por faixa de potência para o cliente final



Fonte: IDEAL 2019 [55]; Greener 2021 [56]. (Adaptado)

Devido a fatores como concentração de investimentos, disponibilidade de mão de obra, transporte, tecnologia e baixa área relativa por construção, a FV é a que mais beneficia os ambientes urbanos e, apesar do grande potencial de geração em regiões interioranas, a concentração dos sistemas FV nas capitais brasileiras ganha destaque representando 11,34 % da potência instalada nacional, sendo apresentados tais dados no Gráfico 3.

Gráfico 3 – Porcentagem da FV nas capitais em relação aos estados



Fonte: ANEEL [19]. (Adaptado)

Mesmo representando uma área ínfima do Estado, muitas das capitais tem forte impacto na GD FV e isso se justifica por terem alta concentração da renda do Estado, da mão

de obra qualificada, de acesso a novas tecnologias e da malha de transporte, o que justifica a facilidade e a necessidade de projetos precisos e eficientes nesses locais.

3.2 Pesquisas sobre Potencial de Geração FV com SIG

3.2.1 Artigos internacionais

No estudo de Gassar e Cha (2021) [57], foram classificadas abordagens baseadas em SIG nos critérios amostragem, geoestatística, modelação e aprendizagem de máquinas, apresentando e discutindo aplicações, vantagens e desvantagens de cada abordagem. O estudo revelou que as abordagens de estimativa do potencial FV baseado em SIG podem ser aplicadas à avaliação espacial-temporal em larga escala de futuros sistemas energéticos descentralizados. Também revelou que os resultados da avaliação podem ser utilizados para propor políticas eficazes de integração FV em ambientes urbanos. Além disso, concluíram que o desenvolvimento de uma metodologia que integre os SIG com a aprendizagem de máquinas para fornecer uma alternativa precisa e menos exigente em termos computacionais às abordagens baseadas em *Lighting Detection And Ranging* (LiDAR) contribuirão significativamente para estimativas em larga escala do potencial FV de telhados de edifícios.

Saraswat *et al.* (2021) [58] avaliaram a adequação espacial de áreas para instalação de parques FV e eólicos na Índia com base na técnica, perspectivas econômicas e sócio-ambientais. A análise é realizada usando SIG e o Método de Decisão Multi-Critérios (*Multi-Criteria Decision Making* – MCDM). A análise do trabalho indicou que 4,13 % da área da área estudada (133.874 km²) é altamente adequada para implantação de sistemas FV, enquanto que 0,91 % da área total (29.457 km²) é altamente adequada para sistemas EOL. O estudo também conclui que o estado do Rajastão na Índia possui as terras mais adequadas para a instalação de ambas FER, sendo 20.881 km² para FV e 6323 km² para EOL, e que o modelo proposto pode ser utilizado para o desenvolvimento de políticas relacionadas a recursos energéticos renováveis e a avaliação de adequação de projetos já sancionados.

Sun *et al.* (2021) [59] identificaram, usando SIG para aplicar critérios restritivos como área protegida, cobertura terrestre e infra-estruturas de transporte, potenciais localizações para aplicação de sistemas FV e Solar Térmico Concentrados (*Concentrated Solar Power* – CSP). Usando o MCDM, a adequação da terra é avaliada considerando fatores como clima, orografia, disponibilidade de água e localização, na região de Ningxia, China, uma área com elevados índices relativos de irradiação solar. Os resultados indicam que a região é adequada

para a implantação de sistemas FV e o potencial estimado dos sistemas FV e CSP seria de 443 TWh/ano e 308 TWh/ano, respectivamente. Além disso, analisaram os impactos da variação da eficiência entre os sistemas tratados.

Rios e Duarte (2021) [60] detalharam uma metodologia para obtenção de áreas adequadas ao desenvolvimento da FV em grande escala, através da combinação de análise multicritério e SIG, sendo a primeira experiência de âmbito nacional no país. O estudo enumerou 33 fatores de restrição e identifica 7 critérios, os quais foram analisados utilizando o Processo Hierárquico Analítico (*Analytical Hierarchy Process – AHP*). Para obter o peso relativo a cada critério, consultou-se pesquisadores de referência relacionados a energias renováveis e projetos FV. O resultado foi mapa de aptidão agrupado em cinco categorias: Altamente Adequado, Muito Adequado, Adequado, Marginalmente Adequado e Inadequado. Com isso, concluiu-se que 69,52 % do país foi excluído do AHP, com cerca de 22.257 km² da área restante considerada “Altamente Adequada” (0,09 %) ou “Muito Adequado” (5,55 %), estando localizadas ao sul do país, bem como na costa norte e central do país.

Zhu *et al.* (2020) [61] propuseram uma solução para estimar a irradiação solar em ambiente urbanos tridimensionais (3D) para quantificar as irradiações anuais em envelopes urbanos e para avaliar o efeito da morfologia urbana sobre a capacidade solar resultante, a partir de um DSM obtido por nuvens de pontos 3D. Através de uma análise empírica em dez cidades, percebeu-se que as áreas urbanas em latitudes mais baixas tendem a ter valores maiores de irradiação anual; além disso, uma área com maiores alturas de construção tem consistentemente o maior índice de irradiação em comparação com edifícios mais baixos na mesma cidade. Inversamente, percebeu-se que áreas com muitos edifícios com baixos índices de radiação tem uma maior proporção de áreas utilizáveis e com essa configuração, as fachadas podem utilizar mais eficientemente a energia solar, o que indica que as grandes irradiações estão concentradas em certas fachadas. Com o uso da correlação Pearson, concluíram que os coeficientes de capacidade solar e os índices da morfologia urbana indicam que a morfologia urbana tem um efeito importante na capacidade solar.

Brito *et al.* (2019) [62] apresentaram um modelo de potencial solar 3D validado experimentalmente para telhados e fachadas a partir de dados LiDAR, o que considerava a anisotropia da DHI. Para tal, a visualização dos dados foi feita usando o ArcGIS e o CityEngine, responsável por gerar automaticamente modelos 3D a partir de geometrias 2D. O modelo foi validado cruzando medições de Verão e de Inverno do desempenho FV em fachadas. A partir disso, apresentaram um estudo de caso para duas zonas urbanas densamente povoadas em

Lisboa, Portugal. As fachadas apresentaram potencial de crescimento de 10 a 15 % na geração FV.

Doorga, Rughooputh e Boojhawon (2019) [63] avaliaram a adequabilidade espacial das Ilhas Maurício para instalações de sistemas FV montados em solo considerando dados ambientais, sociais, técnicos, econômicos, legislativos e perspectivas culturais por meio dos SIG combinado com MCDM. Para isso, aplicaram AHP para determinar os pesos de nove critérios de avaliação sobre a influência das áreas selecionadas nos sistemas FV. As camadas rasterizadas de proximidade foram derivadas de características como estradas e linhas de transmissão de alta tensão, sobrepostas a uma camada de terreno *raster* de 10x10 m, que inclui elevação, inclinação e aspecto e, em seguida, combinada com um conjunto de dados rasterizados sobre GHI, duração da luz solar, temperatura do ar e humidade relativa. Por fim, com uma técnica de combinação linear ponderada, gerou-se um atlas de recursos solares que classificou as regiões da ilha de acordo com seu potencial, assim como, por imagens aéreas de alta resolução, a identificação de três melhores locais para instalações FV.

Groppi *et al.* (2018) [64] analisaram o consumo energético de sistemas térmicos e elétricos e o potencial FV de edifícios residenciais em Landispoli, Itália, com uma abordagem baseada em SIG, a fim de aumentar a independência da região sob combustíveis fósseis. A partir de pesquisas anteriores, desenvolveram uma metodologia para estimar as necessidades térmicas (aquecimento de água) e avaliar os níveis de geração FV e a aplicaram a cada edifício, podendo estimar a diminuição das demandas térmicas e elétricas não renováveis. A metodologia foi aplicada em duas áreas urbanas distintas, um centro histórico e um distrito suburbano, e os resultados comprovaram a adequabilidade em ambos os casos, sendo o segundo mais adequados para aplicação da FV, e concluem que metodologia ajudará as autoridades locais a implementar estratégias de gestão de energia nas suas áreas urbanas.

Asif, Hassanain e Nahiduzzaman (2018) [65] estudaram as perspectivas de aplicação FV em telhados de edifícios com uso do ArcGIS, usado para determinar a área do telhado, e do PVsyst, usado para o dimensionamento FV. O trabalho também avalia a viabilidade econômica da FV sobre a relação custo-benefício e *payback* simples e desenvolveram uma análise ambiental com o RETScreen para determinar a redução nas emissões de GEE. O estudo considera os telhados de edifícios de um campus universitário como áreas utilizáveis para aplicação de PV. De uma área total de 857.408 m², obteve-se 406.467 m² de área útil, gerando um total de 83,8 GWh por ano, com um investimento estimado em 54 milhões de dólares e redução de até 40,2 toneladas de dióxido de carbono (CO₂).

Araya-Muñoz *et al.* (2014) [66] desenvolveram uma rotina computacional para estimar o potencial FV numa área urbana de Valparaíso, Chile, constituída de 366 casas e caracterizadas por uma elevada heterogeneidade de telhados em termos de geometria e orientação espacial. A rotina era capaz de fornecer dados para avaliação em grande escala de FV urbana, incluindo a GHI anual de cada telhado, de acordo com geometria, inclinação e orientação do telhado. Para obtenção das imagens a serem usadas no SIG, aplicou-se aerofotogrametria e, em seguida, técnicas de topografia para produzir uma base 3D das casas e, assim, mapear a radiação solar da zona de análise. Os resultados demonstraram como diferentes valores dos dados de entrada para ângulo de inclinação e orientação impactam nos valores finais da irradiação solar anual total incidente, assim como a possibilidade de uso pelas autoridades locais e profissionais para promover a adoção da FV em Valparaíso.

Choi *et al.* (2011) [67] apresentaram um meio para expandir o uso dos SIG na avaliação do potencial FV em zonas urbanas através da extensão *PV Analyst*. Propuseram uma metodologia para atrelar o ArcGIS com o TRNSYS, o qual permite ao *PV Analyst* utilizar os modelos de desempenho de matriz FV de múltiplos parâmetros e a irradiância para simulações de energia solar em contextos geoespaciais. Pelo *PV Analyst* estar incorporado ao ArcMap, parte do pacote ArcGIS, pode interagir plenamente com extensões como *3D Analyst*, *Spatial Analyst* e *Tracking Analyst*. Com isso, descreveram conceitualmente e detalhadamente o a extensão e sua aplicação na área de *Pollock Commons* na *Pennsylvania State University*.

Assim, os artigos apresentados estão resumidos na Tabela 1.

Tabela 1 – Resumo dos artigos apresentados

Autores	Ano	Local	Escala	Referência
Cha e Gassar	2021	–	Revisão Literatura	[57]
Saraswat <i>et al.</i>	2021	Índia	Larga escala	[58]
Sun <i>et al.</i>	2021	China	Larga escala	[59]
Rios e Duarte	2021	Peru	Larga escala	[60]
Zhu <i>et al.</i>	2020	–	Urbano	[61]
Brito <i>et al.</i>	2019	Portugal	Urbano	[62]
Doorga, Rughooputh e Boojhawon	2019	Ilhas Maurício	Larga escala	[63]
Groppi <i>et al.</i>	2018	Itália	Urbano	[64]
Asif, Hassanain e Nahiduzzaman	2018	Arábia Saudita	Urbano	[65]
Araya-Muñoz <i>et al.</i>	2014	Chile	Urbano	[66]
Choi <i>et al.</i>	2011	EUA	Municipal	[67]

Fonte: O próprio autor.

3.2.2 No Brasil

Averlan (2019) [68] desenvolveu uma aplicação conjunta de SIG e AHP, com foco em definir as áreas mais adequadas para instalação de sistemas FV, tendo Santa Catarina como objeto de estudo. Definiu um conjunto de critérios para implementação de usinas FV, sendo: a disponibilidade de irradiação solar na área, a distância das linhas de transmissão de energia elétrica, a distância de arruamentos, a distâncias de áreas urbanizadas, a declividade do terreno, as unidades de conservação ambiental, a hidrografia do local e o uso e ocupação do solo. Essa avaliação resultou nas áreas com maior aptidão para implantação das usinas FV, estando de acordo com os critérios ocupacionais e de irradiação solar de Santa Catarina. Além disso, quantificou as áreas identificadas de acordo com o nível de aptidão, apresentando-as em um mapa de potencial FV.

Martini (2019) [69] avaliou o comportamento da irradiação solar por SIG a fim de avaliar a inserção da GD FV na Universidade Federal de Santa Maria (UFSM). Para isso, desenvolveu no ArcGIS um mapeamento de ocupação volumétrica (topografia, edificações, arborização e pontos de ônibus) para estimar e calcular os níveis de irradiação solar disponíveis mensalmente e anualmente em toda área do campus. Os dados foram validados sendo comparados com dados reais medidos *in loco* pelo sistema FV instalado no Colégio Politécnico da UFSM e também com dados de irradiação obtido pelo software Radiasol2. Em seguida, identificou os níveis de irradiação solar na cobertura dos 26 pontos de ônibus, assim como os espaços livres no campus que recebiam os maiores níveis de irradiação solar para indicar áreas potenciais para novas instalações FV de 100 kW e 1 MW. Com isso, validou a confiabilidade dos dados fornecidos pelo ArcGIS e desenvolveu um ranking das coberturas das paradas de ônibus de acordo com os índices de irradiação. Em conjunto identificou sete zonas potenciais para usinas FV de 100 kW e uma para usina FV de 1 MW. Como finalização, indicou que com a implementação das oito usinas FV, estas seriam capazes de suprir 12,84 % desta demanda energética da UFSM.

Azevêdo (2016) [70] apresentou dois métodos distintos e de larga escala aplicados ao SIG para auxiliar a seleção de áreas para instalação de usinas solares termoelétricas: AHP, que trata o problema da localização sob uma organização hierárquica de critérios, e o Custo de Produção de Eletricidade (CPE), que define os locais aptos em função do custo nivelado da eletricidade. Ambas as metodologias foram aplicadas para Pernambuco e consideraram a implantação de usinas de coletores parabólicos de 80 MWe, do tipo SEGS, operando somente em modo solar, sem armazenadores térmicos. Dessa forma, confirmou-se que Pernambuco

apresentava potencial para esse tipo de sistema, principalmente no sertão pernambucano, local mais favorável à instalação. Na aplicação do Método AHP, o sertão apresentou alto potencial de instalação em todos os cenários avaliados. No Método CPE, o sertão também mostrou alto potencial de instalação uma vez que os custos de geração de energia elétrica encontrados foram os menores do estado. Por fim, concluiu que ambas as abordagens se mostraram consistentes e que revelaram um elevado potencial para o desenvolvimento da tecnologia em Pernambuco, assim como da confiabilidade do uso dos SIG como suporte aos estudos de localização de espaços adequados.

Miranda (2013) [71] analisou o potencial técnico-econômico de inserção da FV no setor residencial brasileiro com o auxílio de SIG. Para isto, utilizou dados socioeconômicos como rendimento domiciliar, consumo de energia, disponibilidade de telhados, curva de carga, e custo de capital. Também avaliou a possibilidade de financiamento, a evolução dos custos da tecnologia e curva de aprendizado. Para essa proposição, elaborou um modelo de inserção no Excel, em conjunto com o modelo System Advisor Model (SAM), para simulação da planta de GD. Além disso, integrou ambas as ferramentas a um SIG, permitindo uma análise espacial do estudo. O resultado obtido indicou viabilidade no uso da tecnologia para as áreas urbana e rural dos municípios, considerando faixa de rendimento domiciliar e sua curva de desenvolvimento

Tabela 2 – Resumo dos trabalhos identificados no Brasil

Autor	Ano	Tipo de Trabalho	Referência
Averlan	2019	TCC	[68]
Martini	2019	Dissertação	[69]
Azevêdo	2016	Tese	[70]
Miranda	2013	Dissertação	[71]

Fonte: O próprio autor.

3.2.3 Na UFC

Costa (2018) [72] pesquisou sobre a perspectiva da diversificação e descentralização da geração da energia elétrica no Campus Pici da UFC, tendo como base as fontes renováveis de energia e foco na solar FV. O estudo buscou estimar o potencial de geração FV do campus usando os telhados das construções como área útil de implantação dos sistemas FV, avaliando em cinco conjuntos diferentes, sendo Centro de Tecnologia, Centro de Ciências, Centro de Ciências Agrárias, Instituto de Cultura e Arte (ICA), Restaurante Universitário (RU) e Biblioteca do Centro de Tecnologia. O estudo utilizou imagens do *Google Earth* para o dimensionamento da área útil ao sistema a partir das coberturas das construções e indicou um

potencial de geração FV de 12,25 GWh/ano e 6,67 MWp de potência instalada, com estimativa de investimento e previsão do *payback* do mesmo em torno de quatro a seis anos.

Carvalho *et al.* (2007) [32] analisaram as aplicações dos SIG no contexto nacional, como tecnologia aplicada às energias renováveis, assim como, identificando potenciais e sugerindo ações para aplicação em projetos e programas de disseminação e uso de energia renováveis. Também identificaram os SIG como ferramentas com as quais dados sobre recursos e demandas energéticas dos locais a serem estudados podem ser agrupados e associados a uma plataforma de conhecimento geográfico, permitindo a visualização dos resultados em forma de imagens. Com isso, concluíram que os SIG propiciam maior segurança e agilidade nas tomadas de decisão e que facilitam o acompanhamento dos resultados de projetos que estejam em execução.

Jucá, Carvalho e Aguiar Júnior (2006) [73] avaliaram a importância de se aplicar conceitos de SIG, como o geoprocessamento, para definir soluções economicamente mais viáveis para o fornecimento de energia elétrica, indicando que ele pode integrar em uma mesma base dados de diversas áreas e combiná-los da forma que o avaliador considerar mais adequada. Assim como apresentou programas como o SOLARGIS, sendo o principal exemplo de ferramenta para eletrificação rural e já servindo como base para avaliar melhores locais para geração de energia elétrica descentralizada. Também enumerou o PVGIS como uma ferramenta de avaliação de recurso de energia solar para GD com bases de dados da Europa, África e do sudoeste asiático e o ENERGIS, um caso brasileiro onde o Centro de Pesquisas de Energia Elétrica desenvolveu uma ferramenta que auxiliasse no planejamento do fornecimento de energia para os sistemas isolados no Norte do país.

Tabela 3 – Resumo dos trabalhos desenvolvidos na UFC

Autor	Ano	Tipo de Trabalho	Referência
Costa	2018	Dissertação	[72]
Carvalho <i>et al.</i>	2007	Artigo	[32]
Jucá, Carvalho e Aguiar Júnior	2006	Artigo	[73]

Fonte: O próprio autor.

Com isso, uma avaliação sobre ferramentas de planejamento se faz necessária para identificar as mais adequadas à evolução das necessidades energéticas urbanas.

4 FERRAMENTAS DE PLANEJAMENTO ENERGÉTICO E URBANO

Buscando o melhor entendimento sobre as ferramentas avaliadas, são analisadas nesta seção os critérios de avaliação das funcionalidades, as principais características e aplicações dos programas e a possibilidade de integração entre planejamento energético em sistemas FV e planejamento urbano.

4.1 Critérios de Avaliação das Ferramentas

Inicialmente, fez-se uma revisão bibliográfica e uma pesquisa independente por ferramentas capazes de analisar o planejamento energético urbano. Como resultado, são identificadas vinte ferramentas de planejamento energético utilizadas para avaliar o potencial FV em ambientes urbanos.

A classificação aplicada baseia-se em três características definidas para facilitar a distinção entre as ferramentas, incluindo a necessidade de pagamento. A primeira funcionalidade diz respeito à capacidade de simulação, ou seja, se a ferramenta simula o funcionamento do sistema de energia e a sua capacidade de satisfazer uma determinada procura. Tipicamente, as ferramentas têm a capacidade de simular frações de uma hora até ao período de um ano. A segunda funcionalidade diz respeito à formação de cenários, ou seja, se a ferramenta permite a construção de cenários, tipicamente utilizando séries de um ano, que podem ser combinadas ao longo de vários anos para apresentar um cenário a longo prazo; podendo esta combinação de cenários anuais ser aplicada em intervalos entre vinte e cinquenta anos. A terceira característica refere-se à *bottom-up*, ou seja, se a ferramenta é capaz de identificar e analisar um tipo específico de tecnologia energética, investigando alternativas e possibilidades de investimento.

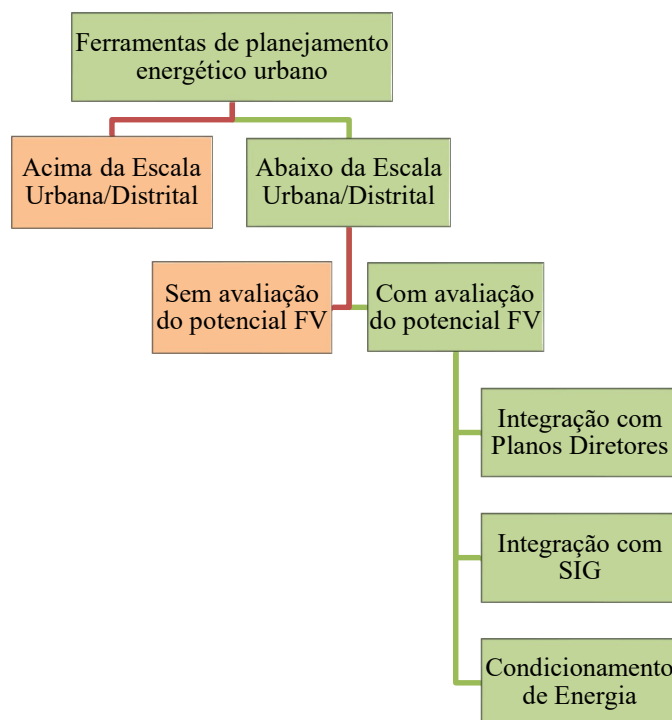
Para além dos estudos existentes, propõe-se quatro funcionalidades de classificação, sendo elas:

- A primeira refere-se à capacidade de planejamento específico da energia FV urbana, ou seja, se os programas podem avaliar um ambiente com elevada concentração de casas e edifícios;
- A segunda considera a capacidade de integração com planos diretores urbanos, ou seja, se a ferramenta permite a adição de dados tais como ocupação do solo, crescimento vertical e preservação ambiental;

- A terceira trata da integração com SIG, ou seja, com georreferenciamento e bases de dados climáticos, com o uso mapas e cenas em 3D considerando a informação atual sobre o planejamento urbano de cidades e distritos.
- A quarta refere-se à capacidade de avaliar o condicionamento energético, ou seja, se o programa considera a qualidade da eletricidade disponível.

A avaliação começa por considerar apenas as ferramentas com aplicabilidade para o planejamento energético urbano. Sequencialmente, são avaliadas a capacidade de escalonamento e a capacidade de aplicação da FV urbana. Em seguida, avalia-se se as ferramentas têm integração com SIG e espaço para a inserção de dados de planos diretores. A Figura 4 apresenta a nossa metodologia, partindo da classificação mais geral para as mais específicas.

Figura 4 – Estrutura da metodologia de avaliação das ferramentas



Fonte: O próprio autor.

4.2 Ferramentas Consolidadas

4.2.1 *Balmorel*

O Balmorel tem como premissa auxiliar os usuários na modelagem, na análise e na otimização dos custos de um sistema de energia com ênfase em eletricidade e em cogeração. O programa permite a avaliação de sistemas de energia tanto locais como nacionais, desenvolve cenários de curto e de longo prazo e responde por variações horárias dos fluxos de energia. Apesar de ser um modelo de código aberto para download gratuito, o programa está na linguagem GAMS, a qual requer licença comercial [74]. Além disso, possui a capacidade de simular projetos FV isoladamente [75].

4.2.2 *CEA*

O *City Energy Analyst* (CEA), desenvolvido na ETH Zurique, é um software livre integrado ao sistema SIG de código aberto, configurado como uma plataforma de simulação de edifícios urbanos para projetos de cidades com baixa emissão de carbono e alta eficiência [76]. O programa tem sido utilizado em estudos de caso tanto teóricos quanto reais para a caracterização do consumo de energia nos distritos urbanos e na otimização da produção de energia elétrica [77], podendo modelar projetos FV isoladamente [78]. Entre os módulos constituintes, inclui-se uma biblioteca de edifícios previamente modelados, baseada principalmente no contexto suíço, com dados sobre superfície e características de sistemas instalados calculados pela própria ferramenta. Os módulos em desenvolvimento incluem um sistema de otimização para múltiplos objetivos, biblioteca de tecnologias de suprimento de energia, análise de sensibilidade e avaliação de fontes de energia alternativas.

4.2.3 *Dieter*

Dispatch and Investment Evaluation Tool with Endogenous Renewables (Dieter) é um programa desenvolvido para estudar a aplicação do armazenamento de energia e outras opções de flexibilização relacionadas à introdução das Fontes de Energia Renováveis (FER) [79]. O modelo, por meio de cenários projetáveis, determina combinações que minimizam os custos de geração, proporcionando o gerenciamento da demanda e a capacidade de armazenamento com seu respectivo despacho, assim como avaliações de investimento. O

programa pode ser usado e modificado livremente pelos usuários, pois é um sistema de código aberto, embora seja necessária uma licença paga do GAMS para executá-lo, o que permite agregar funcionalidades como as de simulação, geração de cenários e condicionamento de energia [80].

4.2.4 *District ECA*

District ECA foi desenvolvido pelo Instituto Fraunhofer de Física da Construção em parceria com o IEA-ECBCS Annex 51 para apoiar os tomadores de decisão nos estágios iniciais do planejamento de distritos energeticamente eficientes para avaliar rapidamente os efeitos das políticas de oferta e demanda. O software é gratuito, mas necessita de um registro preliminar [81], compreendendo um conjunto de ferramentas com capacidade de simulação, criação de cenários e avaliação financeira de cada fonte de energia no projeto. O cerne do programa é ser uma ferramenta para realizar a avaliação mensal do balanço energético e das emissões relacionadas a um distrito; suas principais limitações são a necessidade de modelar cada edifício do distrito, o foco da biblioteca em tecnologias relacionadas ao aquecimento do ambiente e os dados climáticos estarem relacionados aos países participantes da IEA-ECBCS Annex 51.

4.2.5 *EnergyPLAN*

EnergyPLAN é um software determinístico com integração ao SIG que foi desenvolvido no Departamento de Desenvolvimento e Planejamento da Universidade de Aalborg para auxiliar no projeto de estratégias nacionais de planejamento energético, com base em simulação e geração de cenários, levando em consideração análises técnicas e econômicas. O EnergyPLAN é gratuito e pode ser baixado através de um registro preliminar [82]. O programa é usado para investigar a penetração ideal das FER na matriz elétrica nacional e em cenários inter-setoriais amplamente baseados em FER, como o aquecimento urbano de baixa temperatura. Duas análises alternativas também podem ser realizadas, sendo uma simulação técnica para equilibrar os fluxos de energia térmica e/ou elétrica e uma simulação econômica de mercado para avaliar a viabilidade do sistema com base nos custos anuais.

4.2.6 EnergyPRO

EnergyPRO foi desenvolvido pela empresa dinamarquesa *EMD International A/S* para realizar análises tecno-econômicas e otimizações de projetos de energia com fornecimento de energia elétrica e térmica, advindas de múltiplas unidades produtoras [83]. O programa é pago e tem capacidade simular, analisar cenários, incluindo aquecimento urbano, cogeração e refrigeração, mas também pode ser usado em projetos que incluam energia geotérmica, coletores solares, FV urbano, parques eólicos, estações de bombeamento e armazenamentos afins. Como exemplo, [84] aplicou o EnergyPRO na busca por melhorias de longo prazo nas redes de aquecimento urbano existentes na região de Helsinque e Varsóvia, em que agregou biomassa, energia geotérmica, calor residual e armazenamento de calor do ponto de vista energético, econômico e ambiental. Em [85], foram avaliados cenários de produção de energia visando atender demandas de aquecimento e eletricidade na cidade de Pécs, na Hungria, pelos pontos de vista energético, ambiental e econômico.

4.2.7 GridLAB-D

GridLAB-D foi desenvolvido pelo *Pacific Northwest National Laboratory* como uma ferramenta gratuita de modelagem baseada em código aberto que pode ser integrada a outros módulos para expandir seus recursos [86]. O programa é desenvolvido para modelar sistemas de energia e agregar sistemas subjacentes, como automação de distribuição, tecnologias em GD, produção local de energia elétrica e sistemas combinados de calor e energia, tanto para construções quanto para armazenamento. Adicionalmente, o programa possui capacidade de criação de cenários para avaliar os desempenhos e as projeções, assim como para modelar sistemas FV com integração SIG.

4.2.8 HOMER PRO

HOMER PRO é um programa pago desenvolvido no Laboratório Nacional de Energia Renovável dos EUA para ajudar no projeto de sistemas de micro energia e facilitar a comparação entre tecnologias de geração de energia elétrica em diversas aplicações [87]. O programa é integrado ao SIG, o que permite a geração de cenários altamente precisos e pode modelar fontes específicas a partir disso. Diversos estudos sobre otimização energética em ambiente urbano adotaram o HOMER, sendo o programa capaz de realizar três avaliações [88]:

simulação para modelar o comportamento do sistema de micro energia a cada hora e determinar a viabilidade tecno-econômica em sua vida útil, otimização para simular diferentes configurações do sistema buscando o que satisfaça as restrições técnicas para o Valor Presente Líquido mínimo e análise de sensibilidade para avaliar o impacto nos parâmetros de entrada nos resultados da otimização.

4.2.9 HUES

A *Holistic Urban Energy Simulation* (HUES) é uma plataforma com código aberto com recursos para apoiar projeto e controle de sistemas de GD [89]. A plataforma inclui um conjunto de modelos para simulação e otimização de sistemas de energia em edifícios e distritos, geração de cenários, bancos de dados de demanda agregada anual de calor e de potencial FV na Suíça, possibilitadas por sua integração com SIG e propriedades técnicas e econômicas de sistemas distribuídos. Além disso, um de seus códigos possui integração ao SIG e são livremente acessíveis e editáveis, entretanto devem ser executados nos programas comerciais MATLAB e Aimms.

4.2.10 iHOGA

O *Improved Hybrid Optimisation by Genetic Algorithm* (iHOGA) foi desenvolvido na Universidade de Zaragoza e é um programa focado em simulação e otimização de sistemas híbridos autônomos para geração de energia elétrica baseados em FER, como a FV para ambientes urbanos, e com capacidade para avaliar as FER independentemente. O programa possui uma versão educacional gratuita para download [90], mas bastante limitada se comparada à paga e com requisitos relacionados à conexão com a internet e com a versão do Windows, recursos esses que limitam amplamente seu uso, apesar de ainda ter capacidade para simular e gerar cenários. Como exemplo, [91] utiliza o iHOGA na otimização de sistemas híbridos independentes em Zaragoza.

4.2.11 INSEL

Integrated Simulation Environment Language (INSEL) foi desenvolvido na Faculdade de Física da Universidade de Oldenburg como um sistema gratuito de simulação com diagrama de blocos para aplicações de programação para integração de FER. O programa

oferece aos usuários modelos pré-prontos de simulação buscando agilidade nas fases iniciais da modelagem, como na de um sistema FV urbano, mas o usuário também pode projetar modelos completamente novos para todos os tipos de aplicações de sistema com o auxílio do editor de gráficos INSEL. Além disso, também oferece uma interface de extensão das bibliotecas de blocos em linguagens de programação como Fortran e C / C ++ [92].

4.2.12 Oemof

Open Energy Modelling Framework (Oemof) é uma ferramenta modular para modelagem e otimização de sistemas de energia. O programa é baseado na linguagem de programação de código aberto Python4 e também usa, para processar dados, o PostgreSQL5 e o Post-GIS6 [93]. A partir de códigos de programação disponibilizados por usuários, o programa possui a capacidade de simulação e geração de cenários, podendo avaliar isoladamente as FER previstas, como a FV aplicada a ambientes urbanos [94] e integrá-las ao SIG para maior confiabilidade e precisão no projeto [95].

4.2.13 OSeMOSYS

O *Open Source Energy Modeling System* (OSeMOSYS) é um programa de modelagem de código aberto usado para avaliação e planejamento energético a longo prazo e está disponível gratuitamente para download. Sua interface mais difundida é com o software comercial LEAP, mantido pelo *Stockholm Environment Institute* e é descrito como um programa de auxílio à tomada de decisão, que proporciona ao usuário capacidade de gerenciamento de dados, relatórios e avaliações de médio/longo prazo de cenários com integração SIG, permitindo abranger alterações no uso da energia, das emissões relacionadas e da implantação de recursos para qualquer setor econômico. Com relação aos dados energéticos, são requeridos valores anuais de demanda e produção no setor escolhido e a fonte usada como combustível. Ademais, podem ser indicados custos dos sistemas, eficiência energética, perfis de energia, fatores de emissão, juros e taxas de inflação [96].

4.2.14 RETScreen

O RETScreen é um programa desenvolvido pela Natural Resources Canada para ser um sistema de gerenciamento de energia limpa [97]; consiste em um programa baseado em

Excel e Windows, possuindo uma versão gratuita e uma paga, com diferença no nível de aprofundamento do projeto. Apesar disso, o programa permite modelar qualquer sistema de escala e desenvolver variados cenários, considerando medidas de eficiência energética, uso de múltiplas usinas para fornecimento de energia elétrica e térmica, integração com FER, sistemas híbridos e afins. De acordo com os manuais [98;99], as informações básicas para a modelagem incluem dados e configurações gerais sobre cálculo, localização climática, tipo de projeto, setor e recursos do sistema, potência instalada, energia fornecida e eficiência. O programa também permite a adição de dados como emissões de CO₂ por combustível, taxa de inflação, tempo de vida, incentivos fiscais, custos iniciais, manutenção e semelhantes

4.2.15 SIREN

SEN Integrated Renewable Energy Network (SIREN) é um conjunto de ferramentas de modelagem desenvolvido pela organização australiana *Sustainable Energy Now*, distribuído gratuitamente como uma versão beta [100]. O programa tem como objetivo calcular a geração em usinas com FER e desenvolver cenários de longo prazo. Especificamente, tem como objetivo determinar locais ideais para acessar as FER, minimizar os custos de conexão à rede e atender à demanda variável enquanto obtém a melhor eficiência, economia e segurança energética.

SIREN é composto por ferramentas de georreferenciamento, capacidade de simular e gerar cenários, tanto urbanos quanto distritais, e planilhas para otimização do sistema de energia, tendo sua base de dados direcionada à Austrália. A área do projeto pode ser definida com base nas coordenadas e em imagens de satélite importadas, sendo os mapas usados para visualizar, localizar e modelar a rede elétrica existente e as novas plantas de FER. As possíveis tecnologias de suprimento são FV (fixo, rastreamento ou telhado), solar térmica, geotérmica, biomassa, eólica, hidrelétrica e ondas; os dados necessários para a modelagem são localização, capacidade de energia, área, capital, custos de operação e manutenção e produção horária de energia.

4.2.16 Solarius PV

Solarius PV é um software pago que faz uso do *Building Information Modeling* para projetar sistemas FV, utilizado em diversos tipos de sistemas em todo o planeta [101]. O programa é capaz de modelar em 3D o sistema FV a ser projetado, calcular sombreamento,

avaliação econômica do sistema FV, simular e gerar cenários, bem como usar dados georreferenciados por meio do SIG e gerar o esquema elétrico da instalação. Solarius PV tem capacidade de se adaptar com as características de cada local avaliado e possui uma licença gratuita para testes durante um mês; suas bases de dados incluem dados climáticos Metenorm ou PV-GIS e as bibliotecas de módulos, inversores e baterias de acordo com o mercado.

4.2.17 SOLergo

SOLergo [102] é um programa pago desenvolvido pela empresa *Eletronic Graphics* e é focado em FV configurado para a realidade mercadológica brasileira. O programa permite realizar simulações com dimensionamentos completos de sistemas FV conectados à rede de distribuição, desconectados ou híbridos. Através de uma sequência guiada, o usuário tem o gerenciamento dos sistemas, o relatório técnico do projeto e o econômico com avaliação de rentabilidade, a ficha técnica final do projeto, modelagem topográfica do sistema e diagrama elétrico a serem enviados à concessionária, sendo os dados climáticos exigidos obtidos da base de dados SONDA, disponibilizada pelo INPE, com possibilidade de edição por meio de importação do PV-GIS; o sistema de localização possui uma interface com o Google Maps.

4.2.18 Synergi Electric

Synergi Electric é um programa pago desenvolvido pela DNV GL que modela e analisa sistemas de distribuição de energia em ambientes reais avaliando detalhes desde a subestação até o cliente. O programa fornece aos usuários a flexibilidade de modelar seus sistemas de distribuição de energia variando ao longo de um período de 10 anos até intervalo de segundos em sistemas de rede radial, em loop e em malha em múltiplas tensões e configurações [103]. O Synergi tem capacidade de simular e avaliar cenários por meio de parâmetros elétricos e financeiros, além de usar integração de dados com SIG, aquisições com os medidores dos clientes e sistema SCADA [104].

4.2.19 Urbs

Urbs é um programa gratuito e de código aberto focado na modelagem de sistemas de energia em diversas áreas e em otimização de custos, permitindo a criação de cenários de FV em ambientes urbanos, mas tendo foco em armazenamento [105]. A demanda por energia

e o suprimento intermitente desta são modelados a partir de conjuntos de dados de séries temporais, tanto por fornecimento de energia e como por emissões de GEE, os quais são definidos com valores anuais, mas que também podem ser subdivididos a fim de analisar o efeito das políticas locais. No caso dos armazenamentos são definidos pelos níveis de eficiência, capacidade, investimento e custos fixos e variáveis [106].

4.2.20 WebOpt

O *Distributed Energy Resources Web Optimisation Service* (WebOpt) [107] é uma versão on-line, acadêmica e acessível por meio do registro preliminar do software *Distributed Energy Resources Customer Adoption Model* (DER-CAM) desenvolvido no *Berkeley Lab*. O programa é uma ferramenta focada em avaliar um sistema de energia integrado e permite modelar e otimizar cenários de energia sob critérios de custos econômicos e emissões de CO₂.

Três estratégias alternativas de otimização podem ser realizadas com o WebOpt: minimização de custos, minimização de emissões de CO₂ e análise de múltiplos objetivos, que é a minimização de CO₂ com restrição de custo, necessária para fixar o custo máximo permitido de energia na compra de eletricidade da rede. Tanto as cargas elétricas e térmicas quanto os dados de emissões devem ser importados como perfis normalizados para 1 GWh. Estes podem ser inseridos usando um perfil padrão sugerido na primeira análise, copiando e colando em cada célula dados definidos pelo usuário ou selecionando um perfil nas regiões climáticas da *American Society of Heating and Air-Conditioning Engineers* (ASHRAE) nos EUA [108].

A Tabela 01 apresenta um resumo das principais características analisadas.

Tabela 4 – Classificação das ferramentas de acordo com as funcionalidades

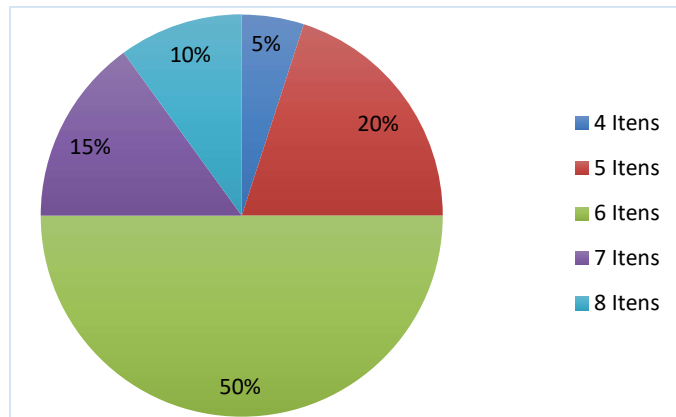
Ferramentas Avaliadas	Classificações							
	Simulação	Cenário	Bottom-up	Disponibilidade	Condicionamento de Energia	FV Urbano	SIG	Integração Planos Diretores
Balmorel	Sim	Sim	Sim	Livre acesso	Sim	Sim	Não	Não
CEA	Sim	Sim	Sim	Livre acesso	Sim	Sim	Sim	Sim
Dieter	Sim	Sim	Sim	Livre acesso	Sim	Não	Não	Não
District ECA	Sim	Sim	Não	Livre acesso	Sim	Não	Sim	Não
EnergyPlan	Sim	Sim	Sim	Livre acesso	Sim	Não	Sim	Não
EnergyPro	Sim	Sim	Sim	Pago	Sim	Sim	Não	Não
GridLAB-D	Sim	Sim	Sim	Livre acesso	Sim	Sim	Sim	Sim
Homer PRO	Sim	Sim	Sim	Pago	Sim	Sim	Sim	Sim
HUES	Sim	Sim	Sim	Livre acesso	Sim	Sim	Sim	Não
iHOGA	Sim	Sim	Sim	Versão Educativa/Comercial	Sim	Sim	Não	Não
Insel	Sim	Não	Não	Livre acesso	Sim	Sim	Não	Não
Oemof	Sim	Não	Sim	Livre acesso	Sim	Sim	Sim	Não
OSeMOSYS	Sim	Sim	Sim	Livre acesso	Sim	Não	Sim	Não
RETScreen	Sim	Sim	Sim	Livre acesso	Sim	Sim	Não	Não
SIREN	Sim	Sim	Sim	Livre acesso	Sim	Sim	Sim	Apenas Austrália
Solarus PV	Sim	Sim	Sim	Pago	Não	Sim	Sim	Sim
SOLergo	Sim	Sim	Sim	Pago	Não	Sim	Sim	Não
Synergi Electric	Sim	Sim	Sim	Pago	Sim	Sim	Sim	Não
Urbs	Sim	Sim	Sim	Livre acesso	Sim	Sim	Não	Não
WebOpt	Sim	Sim	Sim	Livre acesso	Sim	Sim	Não	Apenas EUA

Fonte: O próprio autor.

4.3 Avaliação das Ferramentas

Para a avaliação desenvolvida, observa-se que poucas ferramentas contemplam todas as funcionalidades. O Gráfico 4 apresenta o percentual das ferramentas em relação ao número de itens avaliados; a maior parte das ferramentas (50 %) considera 6 itens.

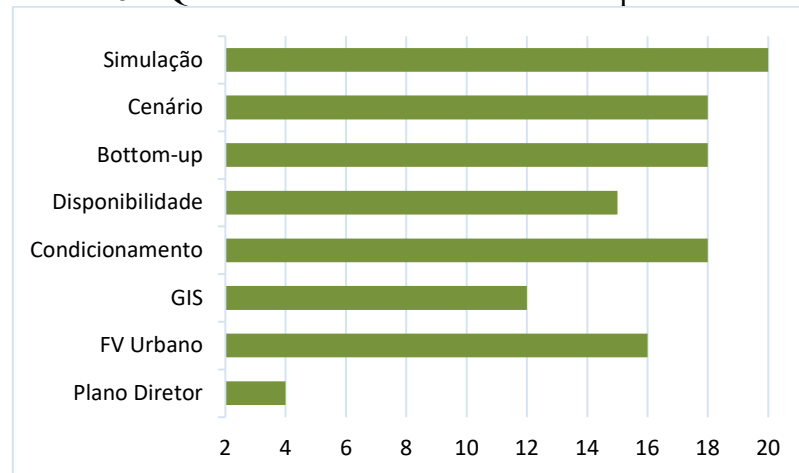
Gráfico 4 – Percentual das ferramentas em relação ao número de itens avaliados



Fonte: O próprio autor.

No quesito de simulação, todas possuem a função, mas tanto para a apresentação de cenários como para *bottom-up*, duas em cada quesito não o desenvolvem. Observando a disponibilidade sem custos, quinze ferramentas possuem acesso livre ou uma versão disponível com recursos limitados, com exceção de EnergyPro, HOMER PRO, iHOGA, Solarius PV, SOLergo e Synergi Electric. No quesito de condicionamento de energia, dezoito ferramentas possuem aptidão, com exceção de Solarius PV e SOLergo; no caso da integração ao SIG, doze ferramentas apresentam essa capacidade; na capacidade de integrar aos planos diretores dos locais avaliados, apenas quatro das vinte possuem essa atribuição: CEA, GirdLAB-D, HOMER PRO e Solarius PV. SIREN e WebOpt, apesar de possuírem a integração com planos diretores, estão limitados a um país específico. Tais dados são resumidos no Gráfico 5.

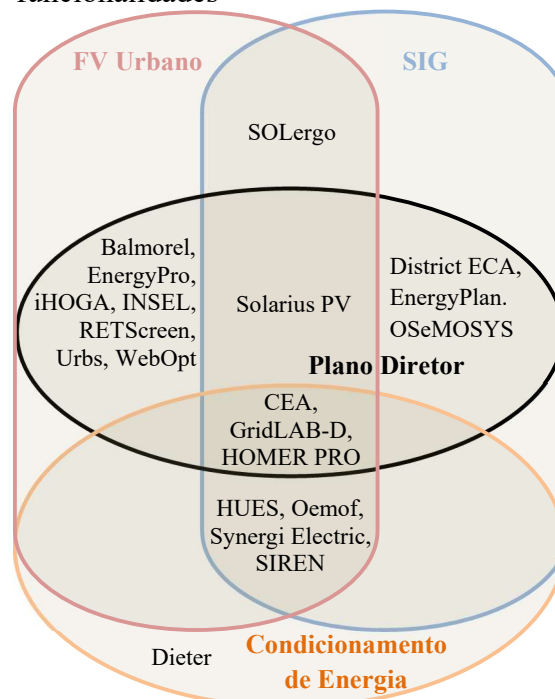
Gráfico 5 – Quantitativo de funcionalidades disponíveis



Fonte: O próprio autor.

No caso das quatro funcionalidades de classificação propostas no presente estudo, a Figura 5 demonstra como os programas se adequam a essas análises, com destaque à CEA, GridLAB-D e HOMER, que possuem todas.

Figura 5 – Diagrama de Venn da avaliação das ferramentas de acordo com as novas funcionalidades

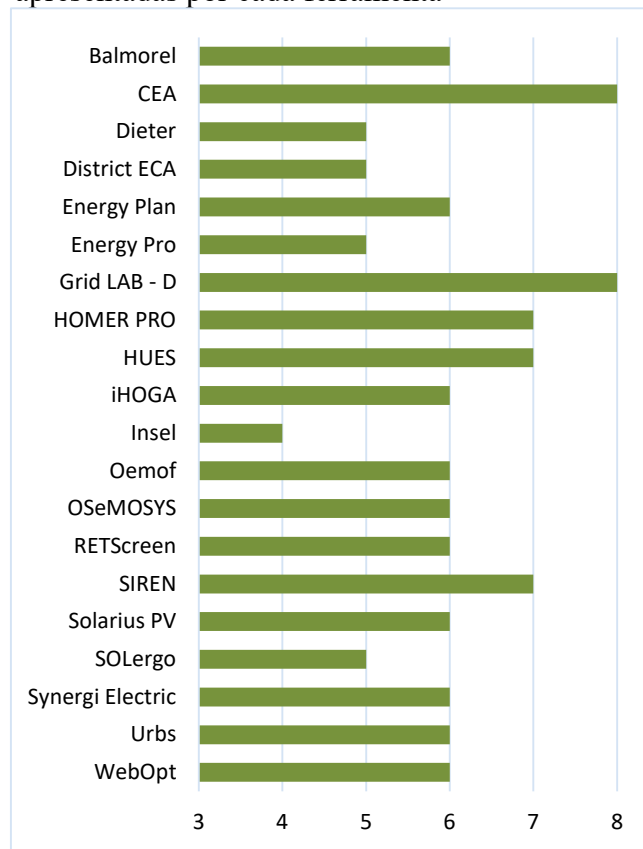


Fonte: O próprio autor.

Dentre as ferramentas avaliadas, aquelas que tiveram a melhor avaliação foram CEA e GridLAB-D, que apresentaram todas as funcionalidades e possuem acesso gratuito.

Dentre as pagas, HOMER PRO também possui todas as funções consideradas, seguido do Synergi Electric, que não possui apenas a integração com planos diretores, sendo que ambos necessitam do investimento para obtê-las. A ferramenta pior avaliada foi o INSEL, visto que, apesar da liberdade de programação com diagrama de blocos, não se identificou com as demais características. O Gráfico 6 apresenta a quantidade de funcionalidades confirmadas em cada ferramenta.

Gráfico 6 – Quantitativo das funcionalidades apresentadas por cada ferramenta



Fonte: O próprio autor.

Dieter, EnergyPro e Urbs, apesar de possuírem algumas das características avaliadas, são focados no armazenamento de energia, ou seja, apesar de ter capacidade para planejamento energético, a finalidade é projeção para armazenamento.

HUES, INSEL e Oemof, oferecem mais autonomia ao usuário, que tem a liberdade de desenvolver seus códigos para os estudos que pretende fazer. Apesar de Dieter e HUES terem modelos gratuitos, os programas que os operam, como GAMS e MATLAB são pagos.

No caso de RETScreen e WebOpt, ambos possuem versões gratuitas que contemplam as funções em estudo, mas ainda com recursos limitados em relação às versões

pagas. Solarius PV e SOLergo, não avaliam cenários com mais de uma fonte renovável, pois são focados apenas em geração FV.

Dentre os programas citados, não foram encontrados estudos de avaliação do Synergi Electric, do Solarius PV e do SOLergo, mesmo que o Synergi Electric apresente as principais funcionalidades requeridas no mercado, mas tendo como principal limitação ser um programa pago. No caso dos outros dois, ambos não possuem a capacidade de avaliar a diversificação da matriz energética por serem especializados em sistemas FV, assim como são programas pagos.

A partir disso, uma avaliação sob a ótica de um SIG pode trazer uma gama de possibilidades para o planejamento energético urbano.

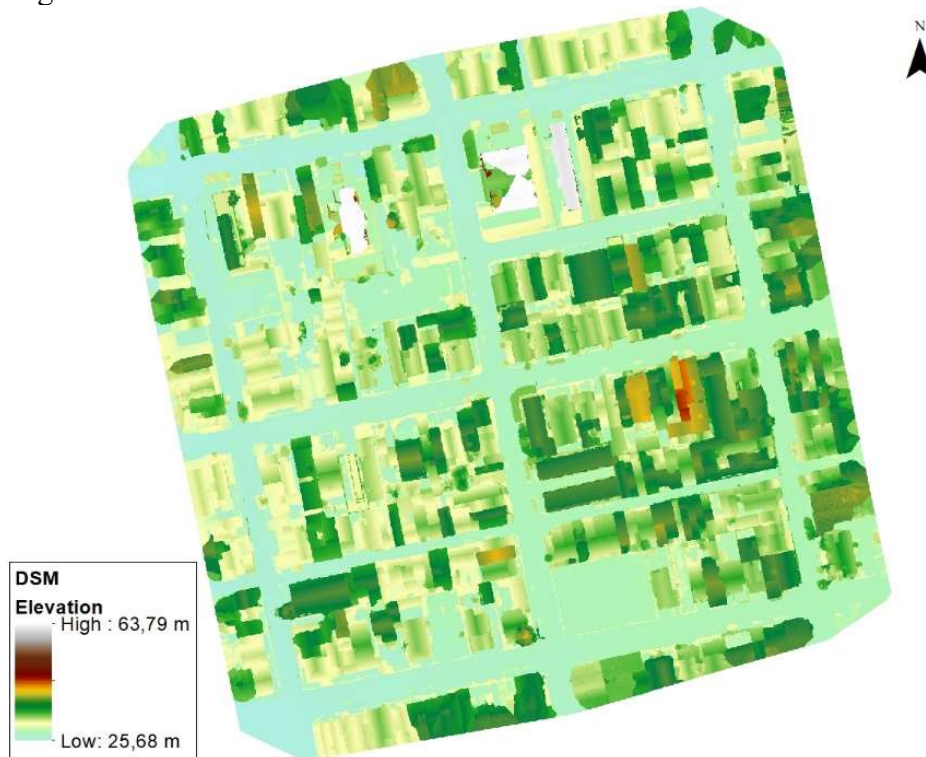
5 O ARCGIS COMO FERRAMENTA DE DIMENSIONAMENTO FV

Essa aplicação visa obter os níveis de irradiação solar no topo das construções ao longo de um ano, avaliar a viabilidade dessas superfícies e estimar a geração anual de energia elétrica através de plantas FV. A fim de apresentar a metodologia aplicada no ArcGIS [109] e considerando o uso de sua licença de testes, o usuário deve, inicialmente, possuir um DSM da área a ser avaliada, ou seja, uma estrutura que represente a elevação da superfície e seus aspectos geográficos, como edificações e vegetação.

5.1 Criação do DSM

Para a presente avaliação da metodologia, utilizaram-se imagens por levantamento fotogramétrico a partir de um RPAS, com um *raster* com resolução de 0,15 m, gerando um DSM, como na Figura 6, um trecho do bairro Parquelândia da cidade de Fortaleza-CE, como indicado na Figura 7.

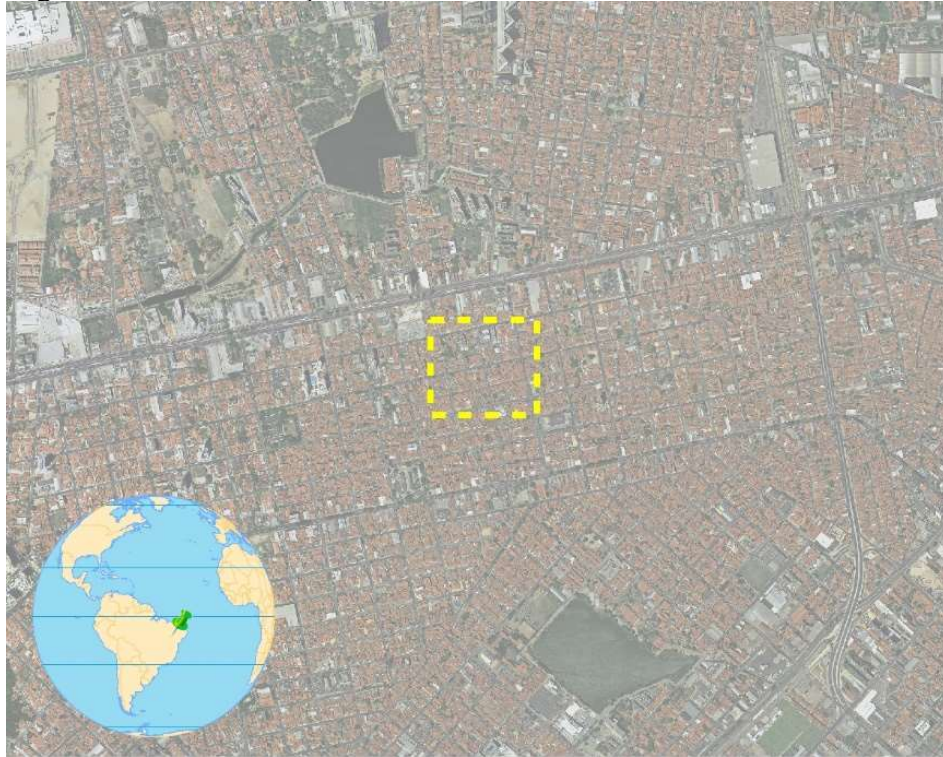
Figura 6 – DSM da área estudada



Fonte: o próprio autor.

Apesar da representação escolhida, o DSM pode ser representado em qualquer espectro de cores de acordo com o propósito desejado.

Figura 7 – Geolocalização da área estudada



Fonte: o próprio autor.

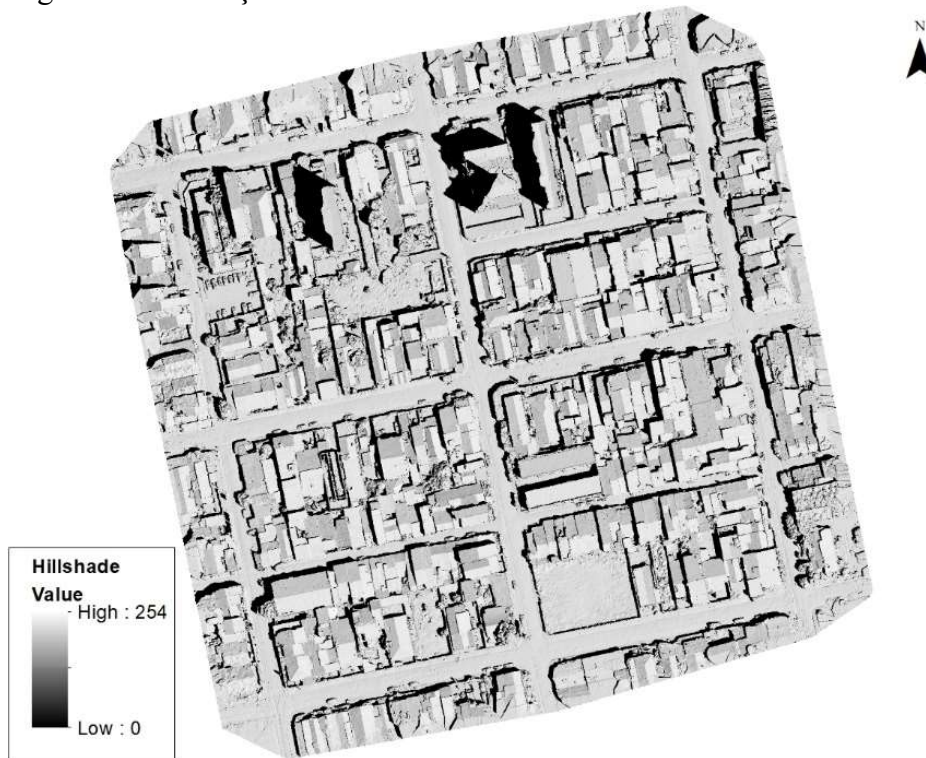
A área escolhida para a avaliação pertence a uma região que até o penúltimo plano diretor de Fortaleza, limitava a altura das construções, tornando-a predominantemente residencial e de baixa elevação; com a atualização do plano, prédios e construções de altura mais elevada tem sido construídos, o que tem causado sombreamentos até recentemente inexistentes, fato que torna a necessidade de uma avaliação precisa ainda mais necessária.

5.2 Criação de um Efeito de Sombreamento

Apesar do DSM já indicar a localização de estruturas e vegetação, ao criar um *raster* de sombreamento, pode-se visualizar de forma mais realista os efeitos da luz nas construções. Para tal, usa-se a ferramenta *Hillshade* do pacote ArcToolbox, a qual é habilitada no conjunto de ferramentas *3D Analyst Tools* ou *Spatial Analyst Tools*. Para tal, as entradas de dados requeridas são o DSM e os valores de ângulo do azimute da fonte de luz e ângulo da elevação da fonte de luz acima da linha do horizonte. Tais dados dependem da posição geográfica do local, da disposição dos prédios e do efeito almejado. Para esse estudo se adotou um valor de 120° para azimute e 60° para elevação, exemplificando os efeitos de sombreamento às 08:00 hs

em Fortaleza. Ao ser executada, a ferramenta adiciona a nova camada de sombra ao mapa, derivada do arquivo DSM original, como indicado na Figura 8.

Figura 8 – Derivação do *raster* de sombreado



Fonte: o próprio autor.

5.3 Exploração das Superfícies do Topo das Construções

Utilizando uma camada poligonal contendo o contorno do topo das construções, pode-se limitar a modelagem à área em estudo, como na Figura 9. Ao contrário das camadas DSM e *Hillshade*, que são estruturas *raster*, esta é uma camada vetorial, que exhibe informações espaciais a partir de pontos, linha ou polígonos, a qual pode ser obtida a partir das bases de dados cartográficos já existentes ou de edição cartográfica.

Figura 9 – Indicação das superfícies das coberturas das construções



Fonte: o próprio autor.

5.4 Criação de uma Camada de Irradiação Solar

Para criar a camada de irradiação solar, deve-se usar a ferramenta “*Area Solar Radiation*”, que modela o comportamento da irradiância no local desejado ao longo de um intervalo de tempo pré-estabelecido com cálculos espaçados durante o dia, levando em consideração os obstáculos que podem bloquear a luz solar, como árvores ou edifícios próximos e inclinação e orientação da superfície. Como o DSM já contém informações da geometria tridimensional dos obstáculos, da orientação e da declividade, a camada resultante será um *raster* em que cada pixel contém a quantidade de irradiação solar em Wh/m^2 na área estudada.

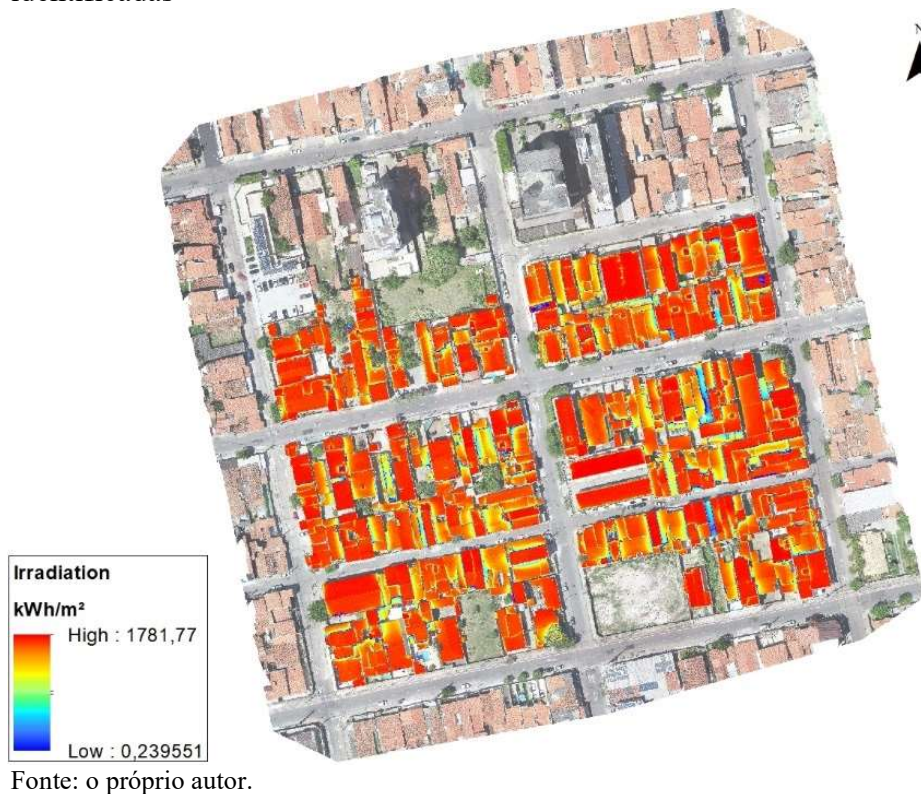
Essa ferramenta se encontra no pacote ArcToolbox do conjunto de ferramentas *Spatial Analyst Tools* e requer como entrada de dados o DSM. Na saída, é necessário nomear o arquivo e especificar a extensão desejada e no parâmetro de tempo é considerado o ano dividido em dias, com amostragem horária.

Pode-se optar por utilizar uma rampa de cores que variam de tonalidades frias para quentes representando a variação dos menores e maiores valores de irradiação solar e para observar os locais com maior ou menor incidência. A Figura 10 apresenta a aplicação da camada

de irradiação solar. As cores vermelha e laranja indicam maiores quantidades de irradiação solar, enquanto os tons de amarelo e azul indicam menores quantidades.

A depender da região onde estão sendo avaliadas as construções, as fachadas voltadas para o sul, por exemplo, tendem a receber menos energia solar do que as voltadas para o norte, o que as deixam com tons mais azulados. Além disso, telhados bloqueados por árvores ou outros edifícios tendem a receber menos energia solar.

Figura 10 – Camada com os níveis de irradiação solar para as superfícies identificadas



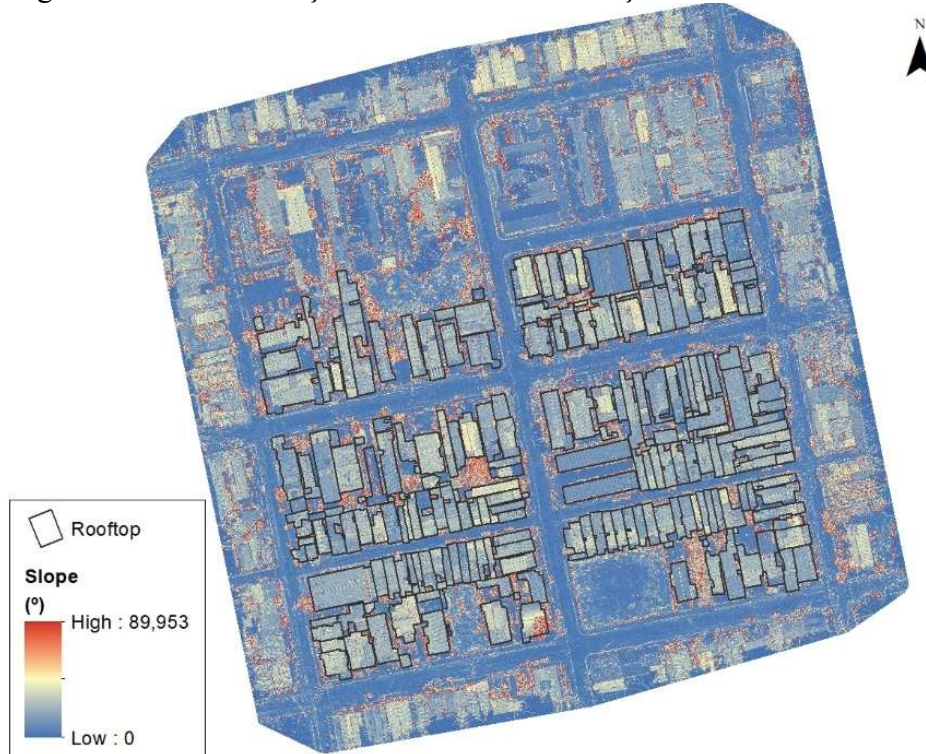
Como o resultado dessa etapa é dado em Wh/m² e esses valores são muito elevados para cada *pixel*, utiliza-se a *raster calculator* para convertê-los em kWh/m² para torna-los mais compreensíveis.

5.5 Identificação dos Telhados Adequados

Para identificar os telhados adequados, deve-se levar em conta as inclinações mínimas e máximas de cada um, os valores mínimos de irradiação solar incidente sobre eles e a orientação dos telhados para o caso de regiões de latitudes mais elevadas. Ao utilizar a

ferramenta “*Slope*” cada *pixel* da nova camada passa a conter um valor de inclinação variando de 0 a 90°, como na Figura 11.

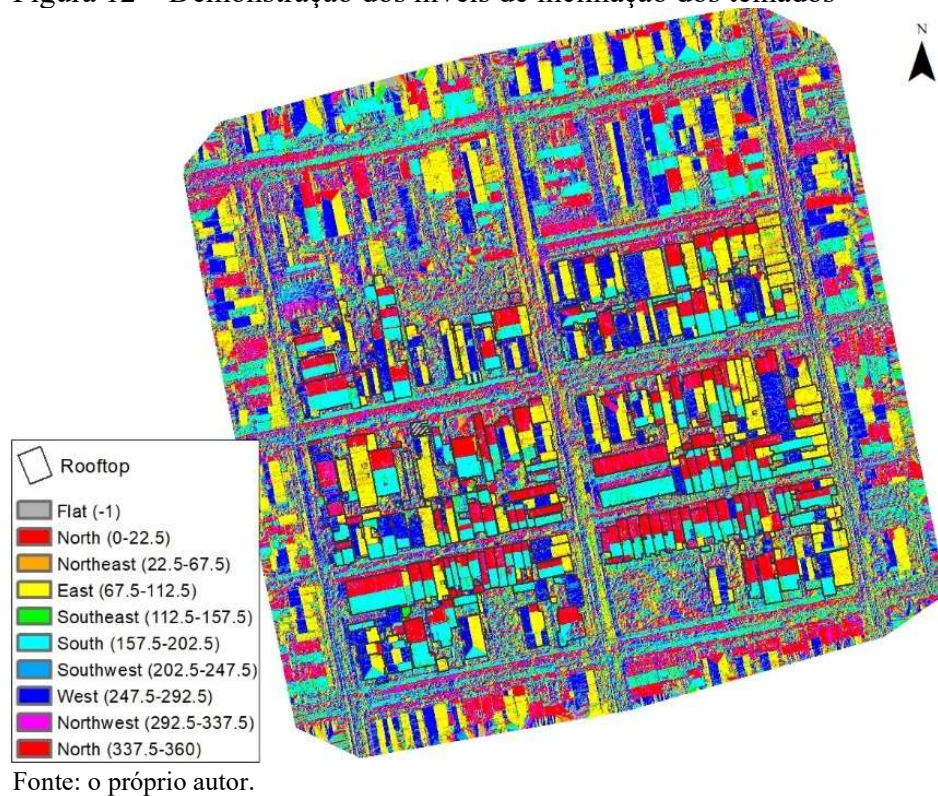
Figura 11 – Demonstração dos níveis de inclinação dos telhados



Fonte: o próprio autor.

Para definir a orientação dos telhados em estudos, utiliza-se em conjunto ao “*Slope*” a camada “*Aspect*”. Assim, cada *pixel* passa a conter um valor em graus de sua orientação, sendo 0° o norte e 180° o sul, como na Figura 12.

Figura 12 – Demonstração dos níveis de inclinação dos telhados

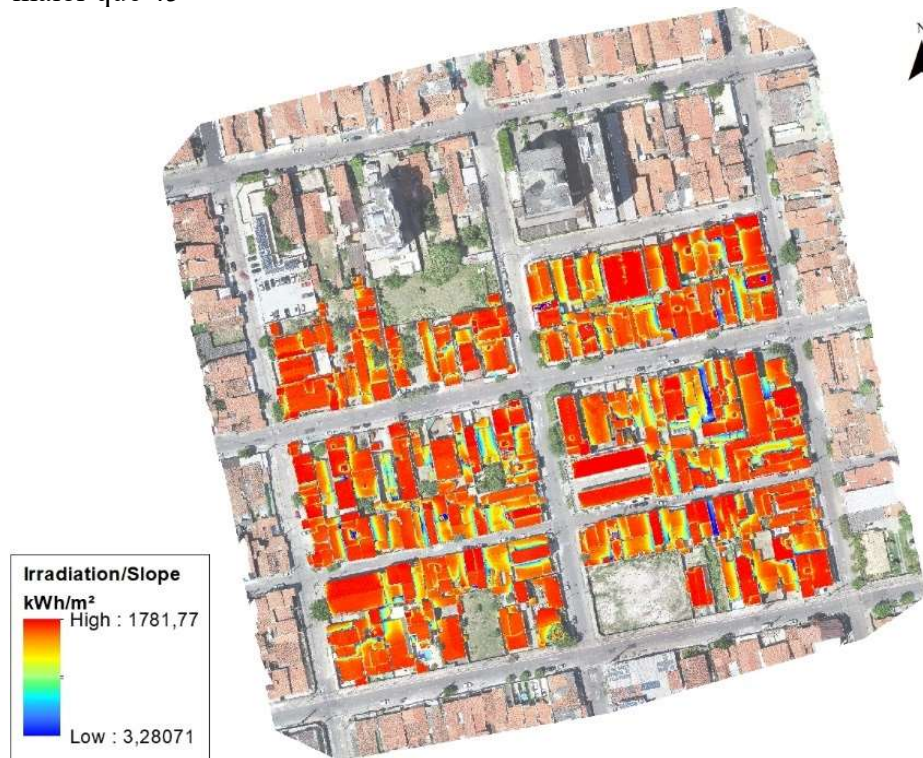


5.6 Remoção de Áreas com Grandes Declividades

Para essa aplicação da metodologia, define-se em 45° o ângulo máximo para manter as coberturas como superfícies aproveitáveis. Como todas as camadas *raster* usam a mesma grade de *pixels*, ou seja, os valores estão correlacionados, é possível fazer comparativos entre os valores das camadas de irradiação solar e inclinação. Utilizando a função “con”, que se refere à análise condicional, cria-se uma expressão que anule os valores dos *pixels* que apresentem inclinação maior que 45° , restando apenas aqueles com ângulos entre 0° e 45° e seus valores de irradiação solar correspondentes.

Como a nova camada apresenta dados mais refinados, o resultado é apresentado na Figura 13.

Figura 13 – Área aproveitável após a remoção de locais com inclinação maior que 45°

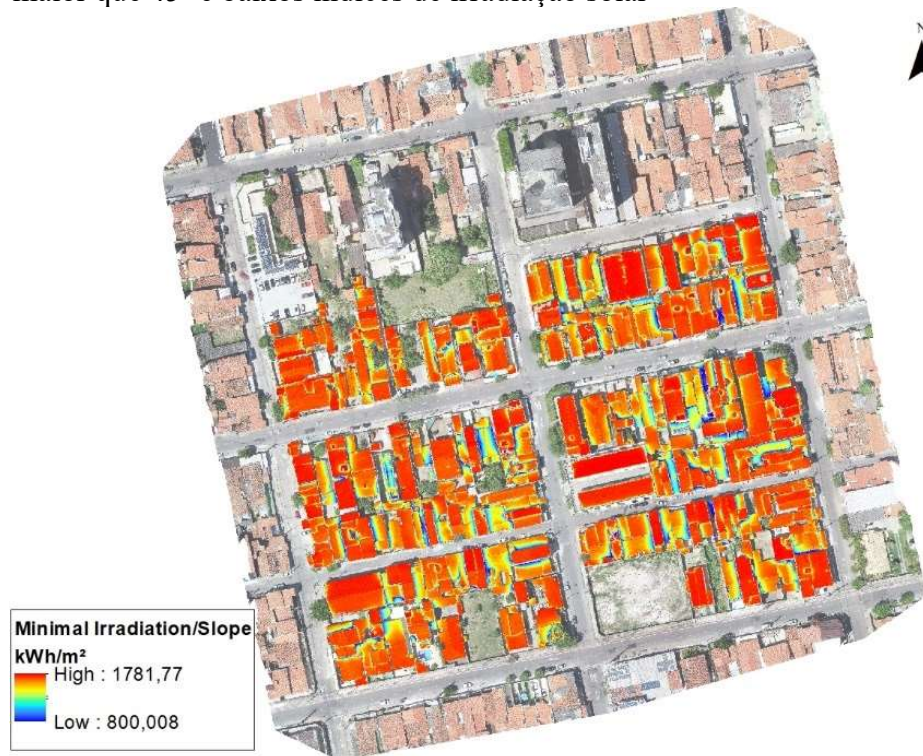


Fonte: o próprio autor.

5.7 Remoção das Áreas com baixos Índices de Irradiação Solar

De forma semelhante ao tópico anterior, define-se em 800 kWh/m² o valor mínimo para manter as coberturas como superfícies aproveitáveis. Tal valor é justificado pelo GHI mínimo apresentado no Mapa de Recurso Solar do *World Bank Group/ESMAP/SOLARGIS* [110] (apresentado no Anexo A). Nesse caso, aplicando a função “con”, a camada *raster* passa representar os *pixels* com inclinação menor que 45° e com índices de irradiação solar maiores que 800 kWh/m², como na Figura 14.

Figura 14 – Área aproveitável após a remoção de locais com inclinação maior que 45° e baixos índices de irradiação solar



Fonte: o próprio autor.

5.8 Remoção de Áreas com Orientação Inadequadas

Nessa etapa, busca-se remover áreas com uma orientação específica. Para regiões no hemisfério sul e com latitudes mais elevadas, as superfícies orientadas ao sul tendem a receber menos irradiação solar e, nesse caso, deve-se excluir o intervalo entre 157,5° e 202,5°. Para construções no hemisfério norte, as superfícies orientadas entre 337,5° e 360° e entre 0° e 22,5° são as que devem ser removidas, pois são as que tendem a receber menos irradiação solar. Condicionado à latitude, cabe avaliar os intervalos que englobam sudeste, sudoeste, nordeste e noroeste, sendo a camada “*Aspect*” é responsável por essa remoção em latitudes mais elevadas em conjunto com a ferramenta “Con”.

Como o caso avaliado possui baixa latitude, mesmo as áreas orientadas ao sul possuem elevada incidência de irradiação solar, tornado mais sutil a remoção de áreas nessa etapa. Mesmo assim, com os três filtros aplicados, o resultado representa as superfícies adequadas para a instalação dos módulos FV.

5.9 Cálculo da potência por edifício

Apesar de indicar o nível de irradiação solar por *pixel*, esse dado não representa o valor total de irradiação por edificação, assim faz-se necessário agregar os valores para saber quanto cada construção recebe anualmente de irradiação solar e quanto isso representa em potencial de geração de energia elétrica.

5.9.1 Agregação das células por construção

Como cada construção possui uma identificação (ID) única, esse campo da tabela de atributos permite que dos valores de irradiação solar contidos nos *pixels* das poligonais de cada telhado sejam agregados, sendo utilizada a ferramenta “*Zonal Statistics as Table*” para tal. Assim, é gerada uma tabela indicando a identificação de cada construção, o número de *pixels* respectivos, a área total disponível e a irradiação solar média em kWh/m².

Nesse momento da metodologia, essa tabela é independente, ou seja, não está conectada aos polígonos dos telhados, mas usando a ferramenta “*Add Join*” pode-se criar uma conexão, uma vez que ambos os componentes possuem o ID das construções.

5.9.2 Identificação dos edifícios adequados

Após todos os critérios de avaliação aplicados, deve-se considerar agora a limitação de área aproveitável da edificação, pois com uma área útil muito reduzida, torna-se inadequado instalar o sistema FV. Para efeito de aplicação da metodologia, define-se como 30m² o valor mínimo de área disponível em cada construção. Assim, na opção de selecionar por atributos na tabela recém criada, deve-se aplicar uma expressão que remova apenas as construções com área aproveitável inferior à 30m². Com isso, a Figura 15 apresenta o resultado do critério.

Figura 15 – Edificações selecionadas pelo critério da área aproveitável ser maior ou igual à 30m²



5.9.3 Conversão da Irradiação Solar em Energia

O próximo passo é criar um campo na tabela que deve conter a quantidade total de irradiação solar incidente no ano na área dimensionada anteriormente. Obtém-se esse valor multiplicando as colunas da área da edificação pela coluna da irradiação solar média. Como os valores tendem a ser muito elevados, durante a elaboração da equação, divide-se o resultado por 1000 a fim de obter os valores em MWh.

Definido os valores para cada construção, deve-se adicionar uma coluna chamada “Usable_SR_MWh”. Inicialmente não possui dados, mas pode-se inserir uma equação. Assim, os valores almejados para cada construção são dados pela multiplicação da sua área com a irradiação solar incidente, de acordo com a Figura 16.

Figura 16 – Resultado da agregação por construção

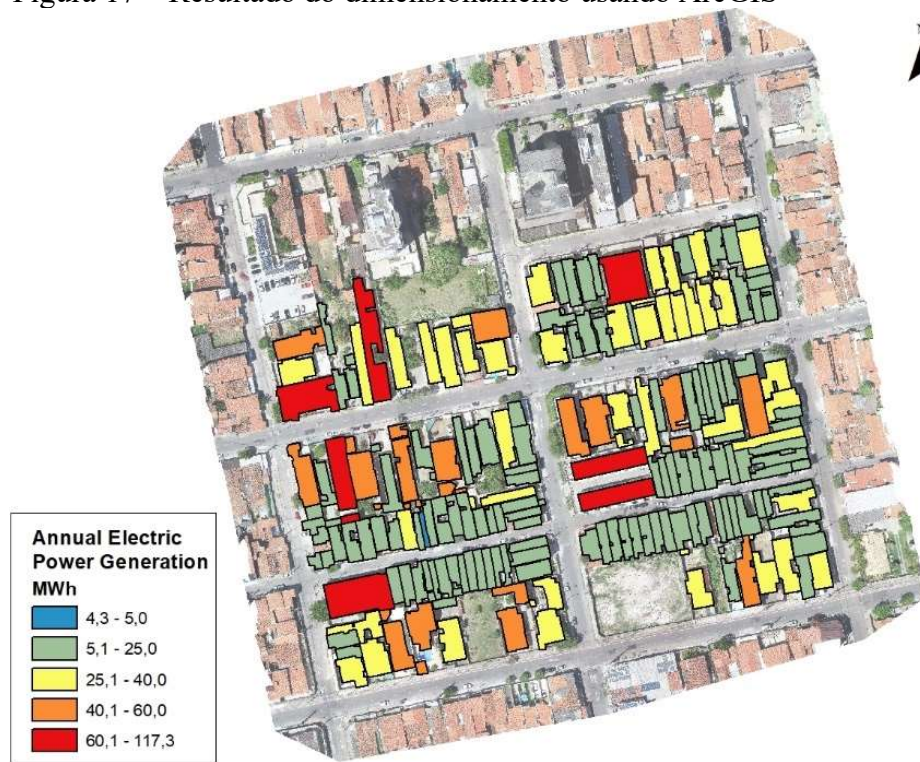
ID	COUNT	AREA	MEAN	RS Usa MWh	GerEletMWh
2	7075	70,75	1686,111356	119,292378	15,388717
3	7564	75,64	1611,113775	121,864646	15,720539
4	7620	76,2	1619,911198	123,437233	15,923403
5	35845	358,45	1684,380657	603,766246	77,885846
6	15709	157,09	1709,57411	268,556997	34,643853
7	16689	166,89	1644,452912	274,442747	35,403114
8	20463	204,63	1683,460989	344,486622	44,438774
9	37170	371,7	1626,929867	604,729832	78,010148
10	15498	154,98	1662,522303	257,657707	33,237844
11	14409	144,09	1559,750829	224,744497	28,99204
12	18710	187,1	1600,91923	299,531988	38,639626
13	17057	170,57	1666,854279	284,315334	36,676678
15	15532	155,32	1649,222964	256,157311	33,044293
16	20520	205,2	1689,048701	346,592794	44,71047
17	4365	43,65	1738,661924	75,892593	9,790144
18	21145	211,45	1700,278766	359,523945	46,378589
19	4789	47,89	1657,268832	79,366604	10,238292
20	4340	43,4	1687,341679	73,230629	9,446751

Fonte: o próprio autor.

Assim, pode-se calcular uma estimativa da produção anual de eletricidade, uma vez que os dados de irradiação são conhecidos, que, de acordo com a *Environmental Protection Agency* (EPA) dos Estados Unidos, a taxa de PR do sistema pode ser considerada igual a 86 %, em uma estimativa conservadora, [111] e o FC é assumido como sendo de 18,4 %, de acordo com os dados obtidos do Laboratório de Energias Alternativas (LEA) da UFC [112].

Para valorar o potencial de produção de energia elétrica, deve-se criar um campo e multiplicar os valores de irradiação solar, fator de capacidade e taxa de desempenho. Dessa forma, adiciona-se um campo chamado “Elet_Prod_MWh” na tabela de atributos. Após adicionado, deve-se definir a equação que dará valores ao mesmo. No caso, utiliza-se “Usable_SR_MWh! * 0,184 * 0,86”, que representa a estimativa de produção de energia elétrica categorizada por edificação com todos os dados já agregados. Como sugestão, alterar a escala de cores, como na Figura 17.

Figura 17 – Resultado do dimensionamento usando ArcGIS



Fonte: o próprio autor.

Com isso, pode-se discutir acerca da metodologia e avaliar os resultados apresentados.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Como forma de validação da metodologia de dimensionamento FV e do uso do ArcGIS como ferramenta de planejamento energético urbano, esta seção apresenta resultados dos cálculos desenvolvidos no ArcGIS, um comparativo com o mesmo dimensionamento feito no RETScreen e a validação com os dados de duas instalações reais no LEA. O capítulo também discute quais das funcionalidades consideradas no capítulo quatro são identificadas no ArcGIS e as particularidades da metodologia sobre o local utilizado.

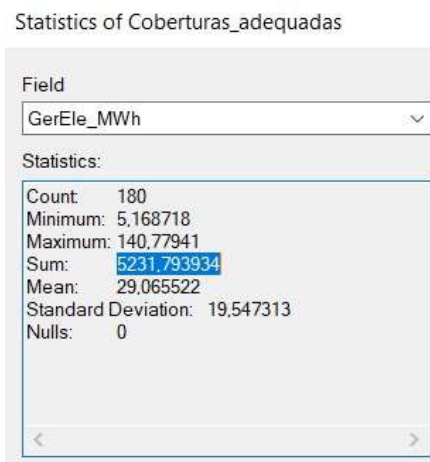
6.1 Estudos de Caso para Fortaleza

A partir da metodologia exposta, é possível fazer o dimensionamento para a região escolhida, tanto com o ArcGIS quanto em outra ferramenta para servir como comparativo. Para tal, foi escolhido o módulo HiKu poly CS3W-400W de 400 Wp.

6.1.1 Dimensionamento com ArcGIS

De acordo com o dimensionamento apresentado, foi obtida uma área total disponível de aproximadamente 20.888 m². Usando a equação "Usable_SR_MWh! * 0,184 * 0,86", obteve-se uma geração anual de 5,232 GWh, uma vez que foi aplicado FC de 18,4 % e 86 % como PR do sistema, como na Figura 18, retirada do ArcGIS.

Figura 18 – Dados resultantes da geração com a metodologia do ArcGIS

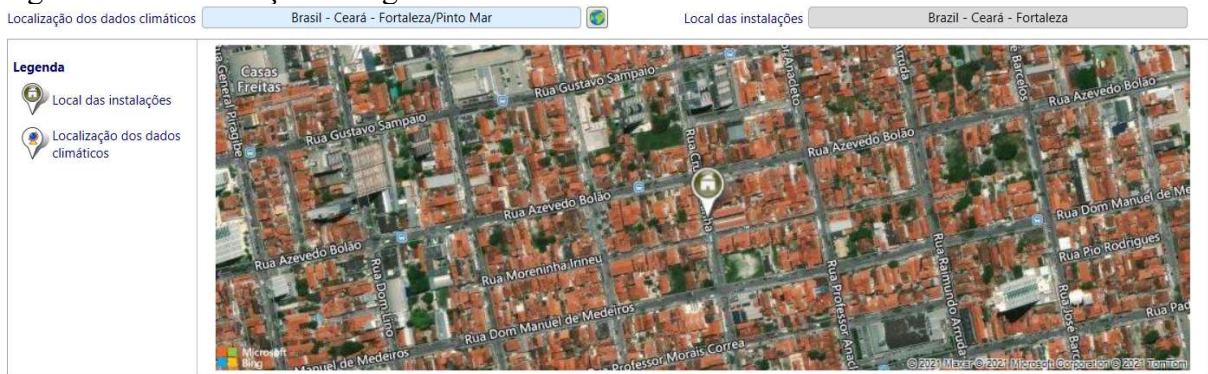


Fonte: o próprio autor.

6.1.2 Dimensionamento com RETScreen

Como forma de validar a metodologia proposta no ArcGIS, apresenta-se o dimensionamento FV a partir do RETScreen. A primeira etapa é identificar o local da instalação para o programa acessar uma base de dados predefinida e integrada a ele, como indicado na Figura 19. Por ter base de dados fixa, dispõe-se de dados de irradiação solar diária e temperatura ambiente obtidas por meio de estações meteorológicas prestabelecidas com dados indicados na Figura 20. Para além disso, a modelagem no RETScreen é detalhada no Apêndice A.

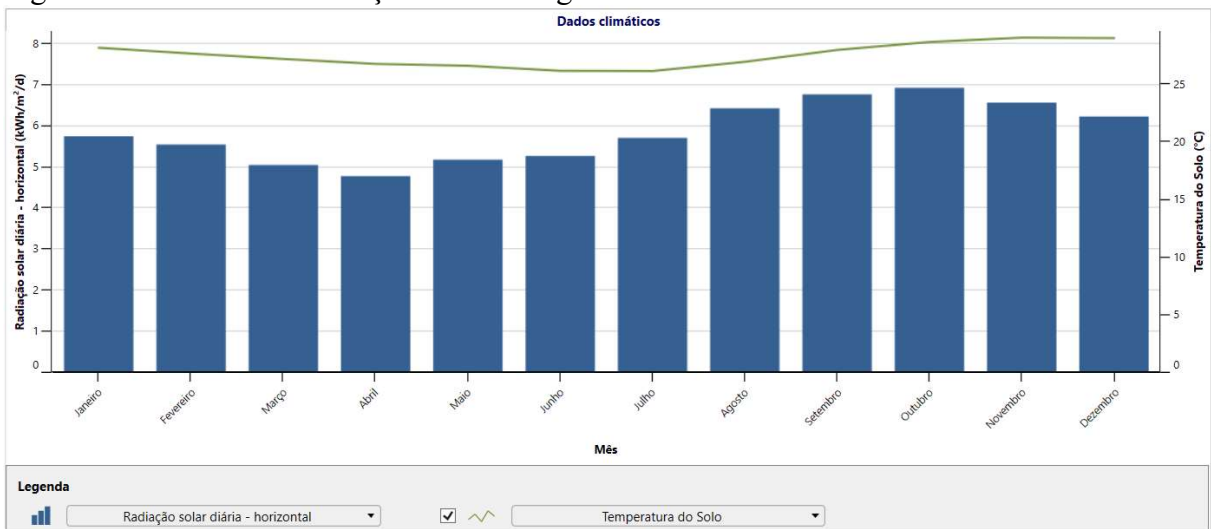
Figura 19 – Localização da região avaliada no RETScreen



	Unidade	Localização dos dados climáticos	Local das instalações	Fonte
Latitude		-3,8	-3,7	
Longitude		-38,5	-38,6	
Zona climática		0A - Extremamente quente - Úmido		
Elevação	m	25	23	Solo+NASA
Temperatura para projeto de aquecimento	°C	23,0		Solo - Mapa
Temperatura para projeto de refrigeração	°C	32,0		Solo
Amplitude da Temperatura do Solo	°C	4,6		NASA

Fonte: o próprio autor.

Figura 20 – Dados de irradiação solar da região avaliada no RETScreen



Fonte: o próprio autor.

Considerando a potência de 400 Wp do módulo FV, sua área de 2,21 m² (2108x1048 mm) indicada pelo catálogo do fabricante [113] e a área disponível obtida pelo ArcGIS, tem-se que:

$$N_{módulos} = \frac{Área_{Total}}{Área_{Módulo}} = \frac{20.888,00}{2,21} = 9.451 \text{ módulos} \quad (1)$$

Com o número de módulos definido, seleciona-se o tipo de instalação residencial e define-se o fator de utilização que, nesse caso refere-se ao FC, como na Figura 21.

Figura 21 – Dados do dimensionamento no RETScreen

Fotovoltaica - Nível 1		
Potência elétrica	kW	3.780,4
Fabricante		Canadian Solar
Modelo		poly-Si - CS3W-400P
Número de unidades		9.451
Fator de Utilização	%	18,4%
Custos iniciais	\$/kW	
	\$	
Custo de operações e manutenção (economia)	\$/kW-ano	
	\$	
Economia de energia	kWh	6.093.400

Fonte: o próprio autor.

Considerando que a “economia de energia” representa a geração anual da planta em kWh, aplica-se a taxa de PR:

$$G_{RETSreen} = 6.093.400 * 0,86 = 5,240 \text{ GWh. ano} \quad (2)$$

Assim, a geração anual usando RETScreen é de 5,240 GWh.

6.1.3 Diferença percentual nos dimensionamentos

Considerando que o dimensionamento no ArcGIS resultou em uma geração anual de 5,232 GWh e o dimensionamento com o RETScreen resultou em 5,240 GWh, esses valores representam uma diferença anual de:

$$D = G_{RETSscreen} - G_{ArcGIS} \quad (3)$$

$$D = 5,240 * 10^9 - 5,232 * 10^9 = 0.008 \text{ GWh} = 8 \text{ MWh}$$

Tal valor, em relação à geração estimada no ArcGIS, representa percentualmente:

$$P_{D-ArcGIS} = \frac{D}{G_{ArcGIS}} = \frac{8 * 10^6}{5,240 * 10^9} \approx 0,153 \% \quad (4)$$

Quando aplicado às considerações feitas no dimensionamento, representa uma potência instalada de:

$$P_D = \frac{8 * 10^6}{(0,86) * (24 * 365 * 0.184)} = 5.771,25 \text{ Wp} \quad (5)$$

Assim, a diferença entre as estimativas de geração representa uma diferença de 5.771,25 Wp. Sabendo que cada módulo tem 400 Wp, então:

$$N_D = \frac{P_D}{P_{\text{módulos}}} = \frac{5.771,25}{400} = 14,43 \text{ módulos} \quad (6)$$

Ou seja, uma quantia de menos de 15 módulos de diferença entre os dimensionamentos. Percentualmente, isso representa:

$$P_{ND} = \frac{14}{9.451} = 0,00148 \approx 0,15 \% \quad (7)$$

Assim, ao comparar ambos os dimensionamentos, percebe-se uma diferença percentual de 0,15 % no número de módulos FV que podem ser instalados.

6.1.4 Comparativo entre produtividades

Ainda como forma de validação dos resultados, pode-se comparar a produtividade calculada a partir dos dimensionamentos no ArcGIS e no RETScreen com as duas plantas em funcionamento instaladas no LEA [112]. Assim, produtividade (*yield*) é expressa por:

$$Y = \frac{\text{Geração}}{P_{\text{instalada}}} = \frac{\text{kWh}}{\text{kWp}} \quad (8)$$

De acordo com a Equação 8, as produtividades específicas são:

$$Y_{ArcGIS} = \frac{kWh}{kWp} = \frac{(5,240 * 10^6 / (0,86 * 365))}{3.780,4} = 4,42 \quad (9)$$

$$Y_{RETScreen} = \frac{kWh}{kWp} = \frac{(5,232 * 10^6 / (0,86 * 365))}{3.780,4} = 4,41 \quad (10)$$

Considerando que LEA1 se refere ao sistema com potência instalada de 1,5 kWp, que LEA2 se refere ao de 3,9 kWp e usando os dados disponíveis em [112], então:

$$Y_{LEA1} = 4,39 \text{ kWh/kWp} \quad (11)$$

$$Y_{LEA2} = 4,40 \text{ kWh/kWp} \quad (12)$$

Com isso, pode-se afirmar que a produtividade média prevista para a planta FV dimensionada pelo ArcGIS equivale e até supera a produtividade prevista com o RETScreen, assim como está bem próxima à LEA1 e à LEA2, que são plantas em atividade.

6.1.5 Erro percentual entre as produtividades

Considerando os respectivos resultados, avaliam-se os erros percentuais entre as produtividades do ArcGIS e do RETScreen sobre LEA1 e LEA2. Assim, o erro percentual é expresso por:

$$E_{\%} = \frac{Valor_{Medido} - Valor_{Referência}}{Valor_{Referência}} * 100\% \quad (13)$$

De acordo com a Equação 13, os erros percentuais entre Y_{ArcGIS} e os respectivos Y_{LEA1} e Y_{LEA2} são:

$$E_1 = \frac{Y_{ArcGIS} - Y_{LEA1}}{Y_{LEA1}} = \frac{4,42 - 4,39}{4,39} = 0,683 \% \quad (14)$$

$$E_2 = \frac{Y_{ArcGIS} - Y_{LEA2}}{Y_{LEA2}} = \frac{4,42 - 4,40}{4,40} = 0,455 \% \quad (15)$$

Ainda de acordo com a Equação 13, os erros percentuais entre $Y_{RETSscreen}$ e os respectivos Y_{LEA1} e Y_{LEA2} são:

$$E_3 = \frac{Y_{RETSscreen} - Y_{LEA1}}{Y_{LEA1}} = \frac{4,41 - 4,39}{4,39} = 0,456 \% \quad (16)$$

$$E_4 = \frac{Y_{RETSscreen} - Y_{LEA2}}{Y_{LEA2}} = \frac{4,41 - 4,40}{4,40} = 0,227 \% \quad (17)$$

Assim, tem-se que o erro percentual não ultrapassa 0,7 % para o caso do ArcGIS e 0,5 % para o caso do RETScreen.

6.2 Avaliação do ArcGIS

A partir do dimensionamento com o ArcGIS e com as características apresentadas, ao considerar as funcionalidades avaliadas nas outras ferramentas, percebe-se que o ArcGIS tem a capacidade de:

- Realizar simulações, visto que o resultado apresentado com a metodologia pode ser estratificado em intervalos anuais, mensais, diários e horários, devendo ser definido com o equacionamento na tabela gerada;
- *Bottom-up*, pois o ArcGIS consegue avaliar separadamente uma FER e o escalonamento entre distrital, estadual ou nacional também pode ser definido pelo usuário;
- Avaliar FV urbano, pois consegue avaliar ambientes com elevada concentração de casas e edifícios, tendo a própria metodologia exposta e seus resultados como comprovação;
- Integrar com SIG, visto que o ArcGIS já é um dos principais programas SIG;
- Integração com planos diretores da cidade, pois informações do planejamento urbano são dados que podem ser atrelados ao mapeamento, permitindo criar filtros e interseções com o DSM utilizado.

Apesar disso, o ArcGIS não tem a capacidade de:

- Formar cenários, uma vez que o programa não permite a avaliação com séries combinadas de vários anos.

- Avaliar o condicionamento energético, uma vez que não é uma ferramenta de estudos centrada na eletricidade, mas sim em mapeamento de informações e correlação entre estas informações;
- Além desses detalhes, é um programa pago (licença de testes gratuita por três semanas; versão estudantil e para uso pessoal por U\$ 100 (R\$ 1.100 em dezembro de 2021)) [114].

Como particularidade à metodologia, por estar em uma região equatorial, os telhados avaliados tem baixa inclinação. Com isso, o tópico 5.5, dedicado à remoção de superfícies com declives elevadas, trata principalmente da remoção dos pixels que representam as imagens de transição entre o telhado e o solo, já que quase não existem declives superiores a 45°, para além deste caso.

No caso do tópico 5.8, que trata da remoção de áreas com orientações específicas, uma vez que a região avaliada tem baixa latitude, a incidência de raios solares não é reduzida significativamente pelo fato dos módulos FV estarem orientados para o sul. Em latitudes mais elevadas, faz-se necessário avaliar em que medida a inclinação influencia a geração FV.

6.3 Contribuições do SIG ao planejamento urbano

O impacto de utilizar uma ferramenta SIG no desenvolvimento sustentável se relaciona com a “Área de Resultado 2: Cadeias Produtivas” do Ceará 2050. A metodologia traz ao planejamento energético a disponibilidade de uso e visualização dos dados de recursos energéticos em tempo real, assim como a previsão de geração de energia elétrica e correlação com o meio em que se pretende inserir os sistemas, considerando dados das prefeituras e do governo sobre zonas protegidas por lei, disponibilidade de uso da rede de transmissão de energia elétrica e podendo acelerar fases de viabilidade de projeto e prospecção de áreas disponíveis.

Em relação ao Plano Fortaleza 2040, o uso dos SIG em Fortaleza extrapola o eixo energético e se relaciona aos eixos:

- 0) Equidade territorial, social e econômica: com uma base de dados atualizada e interativa, pode-se avaliar com clareza mapas contendo zonas de interesse e de preservação, concentrações de renda e possibilidades de investimento para redução de desigualdades;

- 1) Cidade conectada, acessível e justa: contemplando a reestruturação viária com comparativos e interposições de mapas gerados em SIG e identificando serviços por macro e microrregião municipal;

No caso do eixo 4, que, entre outros assuntos, trata da recuperação e da conservação de recursos naturais com gestão sustentável, do conforto ambiental e geração de energia elétrica por fontes renováveis, o plano visa tornar Fortaleza uma cidade “geradora líquida” de energia elétrica, ou seja, que o montante de eletricidade gerado seja maior que o demandado. Esse objetivo se adequa ao uso dos SIG como ferramenta de planejamento energético urbano exatamente pela capacidade de tratamento e integração de dados nas plataformas e dos estudos de aproveitamento dos recursos renováveis como o solar.

7 CONCLUSÕES

A presente dissertação identifica ferramentas compatíveis com o conceito de SIE e indica as funcionalidades existentes ou não em cada uma separadamente. Por exemplo, SIREN e WebOpt, apesar da integração com planos diretores, só são válidos nos seus respectivos países. Neste caso, usuários de outros países têm CEA, GridLAB-D, HOMER PRO e Solarius PV como alternativas. Embora o Synergi Electric mostre todas as funcionalidades dos programas tradicionais, tais como HOMER PRO e RETScreen, há uma menor visibilidade sobre ele e o Solarius PV e o SOLergo não avaliam o condicionamento energético. Assim, destaca-se que todos os programas avaliados que possuem integração com planos diretores também tem integração com SIG e são capazes de avaliar a FV urbana.

Além disso, é apresentada uma metodologia para estimar o potencial FV para determinada região utilizando a ferramenta ArcGIS, obtendo e utilizando dados recentes, tais como irradiação solar e modelo 3D das edificações. Nesse caso, para validar a aplicação, comparou-se seu resultado com o mesmo dimensionamento feito no RETScreen, em que o ArcGIS identificou uma geração anual de 5,232 GWh e o RETScreen de 5,240 GWh em uma área de 20.888 m², e identificou-se uma diferença de apenas 0,15 % na quantidade de módulo FV. Assim como, ao avaliar a produtividade calculada com os dados do ArcGIS, percebeu-se que é praticamente igual à do RETScreen e, principalmente, à das plantas FV LEA1 e LEA2 instaladas no LEA, sendo respectivamente 4,42, 4,41, 4,39 e 4,40 kWh/kWp, apresentando erros percentuais menores que 0,7 %.

Ao considerar as características de outras ferramentas, o ArcGIS tem a capacidade de desenvolver simulações, *bottom-up*, avaliar a FV urbana, integração com SIG e com planos diretores da cidade; mas não possui capacidade de formação de cenários, uma vez que o programa não permite a avaliação com séries combinadas de vários anos. Além disso, por não ser um programa com foco em estudos sobre eletricidade, o ArcGIS não lida com condicionamento energético, além de ser um programa pago.

Assim, ArcGIS tem plena capacidade para ser utilizado como ferramenta de planejamento energético e urbano e também serve para a transição para aos SIE, considerando a inserção dos principais dados de energia eléctrica, acesso a bases de dados GIS e precisão superior no dimensionamento FV em comparação com outras ferramentas, uma vez que a metodologia usada no ArcGIS detalha com alta precisão os telhados e permite cálculos matemáticos relacionados à FV a partir das ferramentas matemáticas já presentes nele.

ARTIGOS PUBLICADOS DURANTE O MESTRADO

- **Na linha de pesquisa**

Freitas, B. B.; Castro, L. F. C.; Carvalho, P. C. M.. Energy planning tools applied into urban photovoltaic: the importance of compatibilizing with the constructions. *Renewable Energy & Power Quality Journal*, v. 19, p. 229, 2021. DOI: <https://doi.org/10.24084/repqj19.264>

Castro, L. F. C.; **Freitas, B. B.;** Carvalho, P. C. M.. A review on the integration between urban and energy planning considering the planning tools. *Renewable Energy & Power Quality Journal*, v. 19, p. 189, 2021. DOI: <https://doi.org/10.24084/repqj19.252>

- **Em áreas afins da fotovoltaica**

Freitas, B. B.; Teles, C. F.; Lins, D. R.; Loayza, D. M. J.; Ramalho, D. C. L.; Queiroz, D. M. B. de; Freitas, D. M. de; Silva, F. E. M. da; Silva, F. J. R. da; Palacio, G. B. A.; Ribeiro, J. C. C.; Uchôa, K. M.; Santos, L. de O.; Rabelo, M. L. N.; Batista, N. E.; Carvalho, P. C. M. de; Lima, R. A. de; Menezes, V. A. C. B.; Gualberto, V. S.; Nogueira, T. de O.. Scenarios for Ceará's Electricity Generation Matrix In 2050. *Ciência e Natura*, v. 42, p. e63, 2020. DOI: <https://www.doi.org/10.5902/2179460X42805>

Silva, A. W. B.; **Freitas, B. B.;** Filho, C. L. A.; Freitas, C. D.; Sousa Junior, E. A.; Araújo, E. M.; Correia, F. I. F.; Silva, F. R. P.; Souza, J. J. S.; Martins, L. L. P.; Coutinho, L. R. R.; Ces, N. P. L.; Castelo, R.; Carvalho, P. C. M.; Carneiro, T. C.. Methodology Based on Artificial Neural Networks for Hourly Forecasting of PV Plants Generation. *IEEE Latin America Transactions*, v 20(4), p 659-68, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1109/TLA.2022.9675472>.

Queiroz, D. M. B. de; **Freitas, B. B.;** Carvalho, P. C. M. de; Nogueira, F. G.. Análise de Irradiação Solar Para Acionamento de Unidades de Dessalinização por Osmose Reversa. XII Congresso Brasileiro de Planejamento Energético, Foz do Iguaçu/Online, 2020.

ARTIGOS SUBMETIDOS E EM AVALIAÇÃO DURANTE O MESTRADO

- **Na linha de pesquisa**

Freitas, B. B.; Castro, L. F. C.; Lima, G. S.; Carvalho, P. C. M.. Evaluation of Tools for Energy and Urban Planning: ArcGIS Application Proposal. *Applied Energy*. Dia: 08/02/2022. Situação: Em avaliação.

- **Em áreas afins da fotovoltaica**

Freitas, B. B.; Carvalho, P. C. M. de; Cavalcante, A. P. de H.; Costa, D. A. C.. Análise do Potencial de Geração Fotovoltaica Usando Metodologia Building Information Modeling. IX Congresso Brasileiro de Energia Solar, Florianópolis/Presencial e Online, 2022. Dia: 08/02/2022. Situação: Em avaliação.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Sugere-se alguns temas para futuros trabalhos a serem desenvolvidos na mesma linha de pesquisa:

- 1) Usar Python como complemento de “código aberto” para criar mais bibliotecas de cálculos energéticos no ArcGIS;
- 2) Aplicar estudos estatísticos para compensar a falta de fator de capacidade em regiões específicas;
- 3) Avaliar a capacidade do QGIS (um programa gratuito) de reproduzir a metodologia.
- 4) Avaliar a capacidade do Blender GIS de reproduzir a metodologia.

REFERÊNCIAS

- [1] IRENA. International Renewable Energy Agency. 2021 Disponível em: <https://www.irena.org/costs/Charts/Solar-photovoltaic>. Acesso em: 5 out. 2021.
- [2] ABSOLAR. Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica. Infográfico ABSOLAR, 2021. Disponível em: <https://www.absolar.org.br/mercado/infografico/>. Acessado em: 5 out. 2021.
- [3] ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. Sistema de Informações da Geração. Power BI – Matriz Elétrica Brasileira, 2021. Disponível em: <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiNjc4OGYyYjQtYWM2ZC00YjllLWJlYmEtYzdkNTQ1MTc1NjM2IiwidCI6IjQwZDZmOWI4LWVjYTctNDZhMi05MmQ0LWVhNGU5YzAxNzBIMSIsImMiOjR9>. Acessado em: 16 out. 2021.
- [4] YAZDAINE, M.; DENSING, M.; WOKAUN, A. Cost optimal urban energy systems planning in the context of national energy policies: A case study for the city of Basel. *Energy Policy* 2017;110:176-90. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.08.009>
- [5] SILVA, M.; OLIVEIRA, V.; LEAL, V. Urban Form and Energy Demand: A Review of Energy-relevant Urban Attributes. *Journal of Planning Literature* 2017;32(4):346-65. <https://doi.org/10.1177%2F0885412217706900>
- [6] CAJOTA, S.; PETER, M.; BAHU, J. M.; GUIGNET, F.; KOCH, A.; MARÉCHALA, F. Obstacles in energy planning at the urban scale. *Sustainable Cities and Society* 2017;20:223–36. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.02.003>
- [7] COLLAÇO, F. M. A.; SIMOES, S. G.; DIAS, L. P.; DUIC, N. SEIXAS, J.; BERMANN, C. The dawn of urban energy planning – Synergies between energy and urban planning for São Paulo (Brazil) megacity. *Journal of Cleaner Production* 2019;215:458-79. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.013>
- [8] ABESCO. Associação Brasileira das Empresas de Serviço de Conservação de Energia. Redes inteligentes permitem controlar e reduzir de energia elétrica, 2021. Disponível em: <http://www.abesco.com.br/novidade/redes-inteligentes-permitem-controlar-e-reduzir-de-energia-eletrica/>. Acessado dia: 5 out. 2021.
- [9] MARKOVIC, D.; CVETKOVIC, D.; MASIC, B. Survey of software tools for energy efficiency in a community. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2011;15(9):4897-903. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.06.014>
- [10] TOZZI, P.; JO, G. H. A comparative analysis of renewable energy simulation tools: Performance simulation model vs. system optimization. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2017;80:390-98. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.153>
- [11] MANFREM, M.; CAPUTO, P.; COSTA, G. Paradigm shift in urban energy systems through distributed generation: Methods and models. *Applied Energy* 2011;88(4):1032-48. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.10.018>

- [12]CONNOLLY, D.; LUND, H.; MATHIESEN, B. V.; LEAHY, M. A review of computer tools for analysing the integration of renewable energy into various energy systems. *Applied Energy* 2010;87(4):1059-82. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.09.026>
- [13]FERRARI, S.; ZAGARELLA, F.; CAPUTO, P.; BONOMOLO, M. Assessment of tools for urban energy planning. *Energy* 2019;176:544-51. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.04.054>
- [14]GASSAR, A. A. A.; CHA, S. H. Review of geographic information systems-based rooftop solar photovoltaic potential estimation approaches at urban scales. *Applied Energy* 2021;291:116817. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.116817>
- [15]MACHETE, R.; FALCÃO, A. P.; GOMES, M. G.; RODRIGUES, A. M. The use of 3D GIS to analyse the influence of urban context on buildings' solar energy potential. *Energy and Buildings*. 2018;177:290-302 <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.07.064>
- [16]RIOS, R.; DUARTE, S. Selection of ideal sites for the development of large-scale solar photovoltaic projects through Analytical Hierarchical Process – Geographic information systems (AHP-GIS) in Peru. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2021;149:111310 <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111310>
- [17]PORTAL SOLAR. História e origem da Energia Solar, 2021. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/blog-solar/energia-solar/historia-origem-da-energia-solar.html>. Acessado em: 6 out. 2021.
- [18]FEDRIZZI, M. C. Sistemas Fotovoltaicos de Abastecimento de Água para Uso Comunitário: Lições Aprendidas e Procedimentos para Potencializar sua Difusão. 2003. Tese (Doutorado em Energia) – Faculdade de Economia e Administração, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.
- [19]ANEEL. Power BI Geração Distribuída, 2021. Disponível em: <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiZjM4NjM0OWYtN2IwZS00YjViLTllMjltN2E5MzBkN2ZlMzVklwidCI6IjQwZDZmOWI4LWVjYtctNDZhMi05MmQ0LWVhNGU5YzAxNzBIMSIsImMiOiR9>. Acessado em: 16 out. 2021.
- [20]PRIGO ENERGIA. A história da energia solar no Brasil, 2020. Disponível em: <https://origoenergia.com.br/blog/a-historia-da-energia-solar-no-brasil>. Acessado em: 04 out. 2021.
- [21]PORTAL SOLAR. Energia Solar no Brasil, 2021. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/energia-solar-no-brasil.html>. Acessado em: 04 out. 2021.
- [22]DOLLA, R.; CHAVES, A. C.; PINTO, G. X. A.; NASPOLINI, H. F.; RÜTHER, R.. Estimativa da Produção Energética e de Desempenho de um Sistema Fotovoltaico Integrado ao Anteprojeto do Aeroporto Internacional de Florianópolis. VII Congresso Brasileiro de Energia Solar, 2018. Disponível em: https://fotovoltaica.ufsc.br/artigos_em_anais/CBENS_Ruany_Adrian_Gustavo_Helena_Ricardo.pdf

- [23]PORTAL SOLAR. Tudo sobre a Eficiência do Pannel Solar, 2021. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/tudo-sobre-a-eficiencia-do-pannel-solar.html#:~:text=A%20efici%C3%Aancia%20de%20um%20painel,por%20m2%2C%20em%20energia%20el%C3%A9trica>. Acessado em: 05 out. 2021.
- [24]ENERGES. Diferença entre Irradiância e Irradiação, 2021. Disponível em: <https://energes.com.br/diferenca-de-irradiancia-e-irradiacao/#:~:text=Irradi%C3%A2ncia%20representa%20o%20fluxo%20de,por%20unidade%20de%20%C3%A1rea%20desta>. Acessado em: 04 out. 2021.
- [25]PT SOLAR. Irradiância solar e irradiância solar: diferenças, origem e tipos, 2021. Disponível em: <https://pt.solar-energia.net/que-e-energia-solar/radiacao-solar/irradiacao-solar>. Acessado em: 04 out. 2021.
- [26]COSTA, I. I.; MAROJA, A. M. Astronomia diurna: medida da abertura angular do Sol e da latitude local. *Revista Brasileira de Ensino de Física*. 2018;40(1):e1501. <https://doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2016-0301>
- [27]ANEEL. Resolução Normativa Nº 482, de 17 de Abril de 2012. Agência Nacional de Energia Elétrica. 2012.
- [28]ESRI. *Origins of the Canada Geographic Information System*, 2012. Disponível em: <https://www.esri.com/news/arcnews/fall12/articles/origins-of-the-canada-geographic-information-system.html>. Acessado em 03 out. 2021.
- [29]ARCGIS. *Timeline History of GIS*, 2016. Disponível em: <https://www.arcgis.com/apps/MapSeries/index.html?appid=198f8f069eb249688ab350cf3072b106>. Acessado em: 03 out. 2021.
- [30]ESRI. *History of GIS*, 2021. Disponível em: <https://www.esri.com/en-us/what-is-gis/history-of-gis>. Acessado em: 03 out. 2021.
- [31]BOLFE, E. L.; MATIAS, L. F.; FERREIRA, M. C. *Sistemas de Informação Geográfica: Uma Abordagem Contextualizada na História*, 2008. Disponível em: <https://www.periodicos.rc.biblioteca.unesp.br/index.php/ageteo/article/view/1775>. Acessado em: 03 out. 2021.
- [32]CARVALHO, P. C. M.; AGUIAR JUNIOR, J. S.; JUCA, S. C. S.; BORGES NETO, M. R.; SANTOS, M. A. *Sistemas de Informação Geográfica (SIG) para Energias Renováveis. Congresso Brasileiro de Energia Solar (CBENS)*. 2007.
- [33]GOVERNO FEDERAL. *Satélite brasileiro Amazônia-1 é lançado com sucesso*, 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/pt-br/noticias/transito-e-transportes/2021/02/satelite-brasileiro-amazonia-1-e-lancado-com-sucesso>. Acessado em: 03 out. 2021.
- [34]INPE. *Introdução ao Geoprocessamento*, 2006. Disponível em: http://www.dpi.inpe.br/spring/portugues/tutorial/introducao_geo.html. Acessado em: 03 out. 2021.

- [35] EMBRAPA. O que é Geotecnologia?, 2021. Disponível em:
<https://www.embrapa.br/tema-geotecnologias/perguntas-e-respostas>. Acessado em: 03 out. 2021.
- [36] MINAS JR. O GIS e a importância na mineração, 2019. Disponível em:
<https://www.minasjr.com.br/gis-e-a-importancia-na-mineracao/>. Acessado em: 03 out. 2021.
- [37] INPE. Armazenamento e Recuperação de Dados Geográficos, 2012. Disponível em:
http://wiki.dpi.inpe.br/lib/exe/fetch.php?media=workshopvants:workshopvants:lubia_ws_vant.pdf. Acessado em: 03 out. 2021.
- [38] INPE. Sensoriamento Remoto, 2006. Disponível em:
http://www.dpi.inpe.br/spring/portugues/tutorial/introducao_sen.html. Acesso em: 03 out. 2021.
- [39] FRACALOSSI, I. Breve História do Planejamento Urbano de Fortaleza, de 1603 a 2007. 2007. DOI: <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.36581.91364>
- [40] PREFEITURA DE FORTALEZA. Legislação Urbana e Ambiental, 2021. Disponível em:
<https://urbanismoemeioambiente.fortaleza.ce.gov.br/codigo-da-cidade>. Acessado em: 03 out. 2021.
- [41] DIÁRIO DO NORDESTE. Retorno das discussões para o Plano Diretor de Fortaleza deve ocorrer no segundo semestre, 2021. Disponível em:
<https://diariodonordeste.verdesmares.com.br/politica/retorno-das-discussoes-para-o-plano-diretor-de-fortaleza-deve-ocorrer-no-segundo-semester-1.3081570>. Acessado em: 03 out. 2021.
- [42] PREFEITURA DE FORTALEZA. Plano Diretor de Fortaleza (Lei nº 62/2009) e suas alterações, 2021. Disponível em:
<https://urbanismoemeioambiente.fortaleza.ce.gov.br/urbanismo-e-meio-ambiente/124-plano-diretor-de-fortaleza-lei-n-62-2009>. Acessado em: 03 out. 2021.
- [43] PREFEITURA DE FORTALEZA. Parcelamento, Uso e Ocupação do Solo (Lei nº 236/2017), 2021. Disponível em:
<https://urbanismoemeioambiente.fortaleza.ce.gov.br/urbanismo-e-meio-ambiente/445-parcelamento-uso-e-ocupacao-do-solo-lei-n-236-2017>. Acessado em: 03 out. 2021.
- [44] PREFEITURA DE FORTALEZA. Código da Cidade. Disponível em:
<https://urbanismoemeioambiente.fortaleza.ce.gov.br/urbanismo-e-meio-ambiente/609-codigo-da-cidade>. Acessado em: 03 out. 2021.
- [45] CEARÁ 2050. O que é o Ceará 2050?, 2021. Disponível em:
<http://www.ceara2050.ce.gov.br/>. Acessado em: 03 out. 2021.
- [46] FORTALEZA 2040. Fortaleza 2040, 2021. Disponível em:
<https://fortaleza2040.fortaleza.ce.gov.br/site/>. Acessado: 03 out. 2021.

- [47]BRASIL. **Lei Nº 9.074, de 07 de julho de 1995**. Estabelece normas para outorga e prorrogações das concessões e permissões de serviços públicos e dá outras providências. Brasília, DF: Presidência da República, [2013]. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/19074cons.htm. Acesso em: 16 set. 2021.
- [48]BRASIL. **Lei Nº 10.848, de 14 de março de 2004**. Dispõe sobre a comercialização de energia elétrica, altera as Leis nºs 5.655, de 20 de maio de 1971, 8.631, de 4 de março de 1993, 9.074, de 7 de julho de 1995, 9.427, de 26 de dezembro de 1996, 9.478, de 6 de agosto de 1997, 9.648, de 27 de maio de 1998, 9.991, de 24 de julho de 2000, 10.438, de 26 de abril de 2002, e dá outras providências. Brasília, DF: Presidência da República, [2004]. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2004-2006/2004/lei/110.848.htm. Acesso em: 16 set. 2021.
- [49]BRASIL. **Decreto Nº 5.163, de 30 de julho de 2004**. Regulamenta a comercialização de energia elétrica, o processo de outorga de concessões e de autorizações de geração de energia elétrica, e dá outras providências. Brasília, DF: Presidência da República, [2004]. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2004-2006/2004/decreto/d5163.htm. Acesso em: 16 set. 2021.
- [50]ANEEL. **Resolução Normativa Nº 687, de 24 de Novembro de 2015**. Agência Nacional de Energia Elétrica. 2015.
- [51]ANEEL. **Resolução Normativa Nº 786, de 17 de Outubro de 2017**. Agência Nacional de Energia Elétrica. 2017.
- [52]ANEEL. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST, Módulo 3, Revisão 7, de 01 de junho de 2017**. Agência Nacional de Energia Elétrica. 2017.
- [53]BRASIL. **Projeto de Lei Nº 5829-A de 2019 – Redação Final 1, .18 de Agosto de 2021**. Institui o marco legal da microgeração e minigeração distribuída, o Sistema de Compensação de Energia Elétrica (SCEE) e o Programa de Energia Renovável Social (PERS); altera as Leis nºs 10.848, de 15 de março de 2004, e 9.427, de 26 de dezembro de 1996; e dá outras providências, [2021]. Disponível em: https://www.camara.leg.br/proposicoesWeb/prop_mostrarintegra?codteor=2062760&filename=RDF+1+%3D%3E+PL+5829/2019. Acesso em: 16 set. 2021.
- [54]ANEEL. Power BI Geração Centralizada, 2021. Disponível em: <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiNjc4OGYyYjQtYWM2ZC00YjllLWJlYmEtYzdkNTQ1MTc1NjM2IiwidCI6IjQwZDZmOWI4LWVjYTctNDZhMi05MmQ0LWVhNGU5YzAxNzBIMSIsImMiOiR9>. Acessado em: 16 out. 2021.
- [55]IDEAL. O Mercado Brasileiro de Geração Distribuída FV – 2019. Instituto para o Desenvolvimento de Energias Alternativas na América Latina
- [56]GREENER. Estudo Estratégico de Geração Distribuída 2021. Disponível em: <https://greener.greener.com.br/estudo-gd-1s2021>. Acessado em: 02 out. 2021.

- [57]GASSAR, A. A. A.; CHA, S. H. Review of geographic information systems-based rooftop solar photovoltaic potential estimation approaches at urban scales. *Applied Energy* 2021;291:116817. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.116817>
- [58]SARASWAT, S. K.; DAGALWAR, A. K.; YADAV, S. S.; KUMAR, G. MCDM and GIS based modelling technique for assessment of solar and wind farm locations in India. *Renewable Energy*. 2021;169:865-84. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.01.056>
- [59]SUN, L.; JIANG, Y.; GUO, Q.; JI, L.; XIE, Y.; QIAO, Q.; HUANG, G.; XIAO, K. A GIS-based multi-criteria decision making method for the potential assessment and suitable sites selection of PV and CSP plants. *Resources, Conservation and Recycling*. 2021;168:105306. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105306>
- [60]RIOS, R.; DUARTE, S. Selection of ideal sites for the development of large-scale solar photovoltaic projects through Analytical Hierarchical Process – Geographic information systems (AHP-GIS) in Peru. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2021;149:111310. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111310>
- [61]ZHU, R.; WONG, M. S.; YOU, L.; SANTI, P.; NICHOL, J.; HO, H. C.; LU, L.; RATTI, C. The effect of urban morphology on the solar capacity of threedimensional cities. *Renewable Energy*. 2020;153:1111-26. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.02.050>
- [62]BRITO, M. C.; REDWEIK, P.; CATITA, C.; FREITAS, S.; SANTOS, M. 3D Solar Potential in the Urban Environment: A Case Study in Lisbon. *Energies*. 2019;12(18):3457. <https://doi.org/10.3390/en12183457>
- [63]DOORGA, J. R. S.; RUGHOOPUTH, S. D. D. V.; BOOJHAWON, R. Multi-criteria GIS-based modelling technique for identifying potential solar farm sites: A case study in Mauritius. *Renewable Energy*. 2019;133:1201-19. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.08.105>
- [64]GROPPI, D.; SANTOLI, L.; CUMO, F.; GARCIA, D. A. A GIS-based model to assess buildings energy consumption and usable solar energy potential in urban areas. *Sustainable Cities and Society*. 2018;40:546-58. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.05.005>
- [65]ASIF, M.; HASSANAIN, M. A.; NAHIDUZZAMAN, K. M.; SAWALHA, H. Techno-economic assessment of application of solar PV in building sector A case study from Saudi Arabia. *Smart and Sustainable Built Environment*. 2019. <http://dx.doi.org/10.1108/SASBE-06-2018-0032>
- [66]MUNOZ, D. A.; CARVAJAL, D.; CARREÑO, A. S.; BENSALD, S.; MÁRQUEZ, E. S. Assessing the solar potential of roofs in Valparaíso (Chile). *Energy & Buildings*. 2014;69:62-73. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.10.014>
- [67]CHOI, Y.; RAYL, J.; TAMMINEEDI, C.; BROWNSON, J. R. S. PV Analyst: Coupling ArcGIS with TRNSYS to assess distributed photovoltaic potential in urban areas. *Solar Energy*. 2011;85(11):2924-39. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2011.08.034>

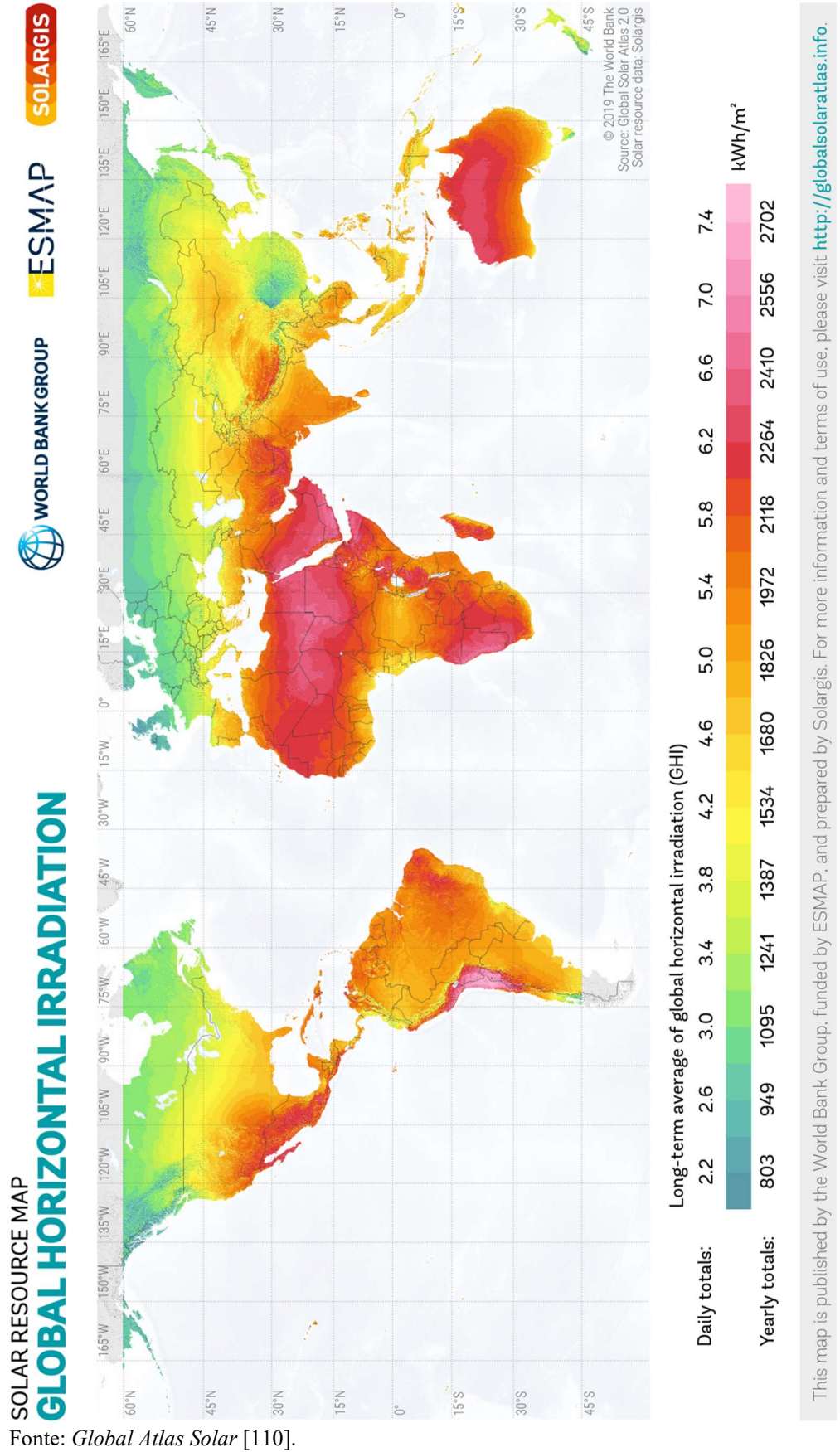
- [68]AVERLAN, M. S. Mapeamento do Potencial de Geração de Energia Fotovoltaica no Estado de Santa Catarina. TCC (Graduação) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, Florianópolis-SC, 2019.
- [69]MARTINI, L. E.. Análise da Irradiação Solar em um Campus Universitário no Sul do Brasil. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria-RS, 2019.
- [70]AZEVEDO, V. W. B.. Estudo de Localização de Usina Solar Termoelétrica no Estado de Pernambuco. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife-PE, 2016.
- [71]MIRANDA, R. F. C.. Análise da Inserção de Geração Distribuída de Energia Solar Fotovoltaica no Setor Residencial Brasileiro. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro-RJ, 2013.
- [72]COSTA, D. A. C.. Estimativa do Potencial de Geração Fotovoltaica do Campus do Pici da UFC. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza-CE, 2018.
- [73]JUCÁ, S. C. S.; CARVALHO, P. C. M.; AGUIAR JÚNIOR, J. S.. A relevância dos Sistemas de Informação Geográfica no desenvolvimento das energias renováveis. *Ciência & Cognição*. 2006;09:131-6.
- [74]Balmorel. Disponível em: <http://www.balmorel.com/>. Acessado em: 12 jul. 2021.
- [75]Balmorel. Disponível em: <https://ens.dk/en/our-responsibilities/global-cooperation/balmorel-lite>. Acessado em: 12 jul. 2021.
- [76]City Energy Analyst (CEA). Disponível em: <https://cityenergyanalyst.com/>. Acessado em: 13 jul. 2021.
- [77]FONSECA J A, NGUYEN T, SCHLUETER A and MARECHAL F. City Energy Analyst (CEA): integrated framework for analysis and optimization of building energy systems in neighborhoods and city districts. *Energy and Buildings* 2016;113:202-26. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.11.055>
- [78]City Energy Analyst (CEA). Disponível em: https://city-energy-analyst.readthedocs.io/en/latest/run_solar_technologies.html. Acessado em: 13 jul. 2021.
- [79]Dieter. DIW Berlin. Disponível em: https://www.diw.de/en/diw_01.c.599753.en/models.html. Acessado em: 12 jul. 2021.
- [80]Dieter. DIW Berlin. Disponível em: <http://www.energy-workshop.cz/pdf-wednesday/zerrahn.pdf>. Acessado em: 12 jul. 2021.
- [81]District ECA. Fraunhofer Institute for Building Physics IBP. Disponível em: <https://www.district-eca.de/index.php?>. Acessado em: 14 jul. 2021.
- [82]EnergyPLAN. Sustainable Energy Planning Research Group. Disponível em: <https://www.energyplan.eu/>. Acessado em: 14 jul. 2021.

- [83]EnergyPRO. EMD International. Disponível em: <https://www.emd.dk/energypro/>. Acessado em: 14 jul. 2021.
- [84]HAST A, SYRI S, LEKAVICIUS V and GALINIS A. District heating in cities as a part of lowcarbon energy system. *Energy* 2018;152:627-39. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.03.156>
- [85]KISS V M. Modelling the energy system of Pécs – The first step towards a sustainable city. *Energy* 2015;80:373-87. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.11.079>
- [86]GridLAB-D. U.S. Department of Energy (DOE). Disponível em: <https://www.gridlabd.org/>. Acessado em: 15 jul. 2021.
- [87]HOMER. HOMER Energy. Disponível em: <https://www.homerenergy.com/products/pro/index.html>. Acessado em: 15 jul. 2021.
- [88]LAMBERT T, GILMAN P and LILIENTHAL P. Micropower system modeling with HOMER. *Integration of alternative sources of energy*. 2006:379-418. <https://doi.org/10.1002/0471755621.ch15>
- [89]HUES. Disponível em: <https://hues-platform.github.io/>. Acessado em: 15 jul. 2021.
- [90]iHOGA. Disponível em: <https://ihoga.unizar.es/>. Acessado em: 16 jul. 2021.
- [91]BERNAL-AGUSTÍN JL, DUFO-LOPEZ R. Efficient design of hybrid renewable energy systems using evolutionary algorithms. *Energy Convers Manag* 2009;50:479-89. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2008.11.007>
- [92]INSEL. GmbH. Disponível em: <https://insel.eu/en/>. Acessado em: 13 jul. 2021.
- [93]Oemof. Disponível em: <https://oemof.org/>. Acessado em: 15 jul. 2021.
- [94]Oemof. Disponível em: <https://github.com/oemof/feedinlib>. Acessado em: 15 jul. 2021.
- [95]Oemof. Disponível em: https://github.com/znes/renpass_gis. Acessado em: 15 jul. 2021.
- [96]HOWELLS M, ROGNER H, STRACHAN N, HEAPS C, HUNTINGTON H, KYPREOS S, HUGHES A, SILVEIRA S, DECAROLIS J and BAZILLIAN M. OSeMOSYS: the open source energy modeling system: an introduction to its ethos, structure and development. *Energy Policy* 2011;39:5850–70. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.06.033>
- [97]RETSscreen. Natural Resources Canada. Disponível em: <https://www.nrcan.gc.ca/maps-tools-publications/tools/data-analysis-software-modelling/retscreen/7465>. Acessado em: 12 jul. 2021.
- [98]RENE EG, PAUL WS, RUSSELL JD. RETScreen plus software tutorial. 2014

- [99] Minister of Natural Resources Canada. RETScreen software online user manual, 2006
Disponível em: <http://publications.gc.ca/site/eng/9.688969/publication.html>. Acessado em: 12 jul. 2021.
- [100] SIREN. SEN. Disponível em: https://www.sen.asn.au/modelling_overview. Acessado em: 16 jul. 2021.
- [101] SOLergo. Electro Graphics. Disponível em:
<https://www.electrographics.com.br/produtos/solergo>. Acessado em: 18 jul. 2021.
- [102] Solarius PV. ACCA Software. Disponível em:
<https://www.accasoftware.com/ptb/software-fotovoltaico>. Acessado em: 18 jul. 2021.
- [103] Synergi Electric Disponível em: <https://innovatedefense.net/tools/custom-Object/viewCustomObject/78c17d53735b>. Acessado em: 18 jul. 2021.
- [104] Synergi Electric Disponível em: <https://www.dnvgl.com/services/power-distribution-system-and-electrical-simulation-software-synergi-electric-5005>. Acessado em: 18 jul. 2021.
- [105] Urbs. Universidade Técnica de Munique. Disponível em:
<https://urbs.readthedocs.io/en/latest/index.html>. Acessado em: 17 jul. 2021.
- [106] Urbs. Universidade Técnica de Munique. Disponível em: <https://wiki.openmod-initiative.org/wiki/URBS>. Acessado em: 17 jul. 2021.
- [107] Web Optimization Service (WebOpt). DER-CAM. Disponível em:
<https://china.lbl.gov/der-cam>. Acessado em: 17 jul. 2021.
- [108] Web Optimization Service (WebOpt). DER-CAM. Disponível em:
<https://www.osti.gov/servlets/purl/1163652>. Acessado em: 17 jul. 2021.
- [109] Learn ArcGIS. Estimate Solar Power Potential. Disponível em:
<https://learn.arcgis.com/en/projects/estimate-solar-power-potential/>. Acessado em: 11 set. 2021.
- [110] GLOBAL ATLAS SOLAR. *Map and Data Downloads*, 2021. Disponível em:
<https://globalsolaratlas.info/download/world>. Acessado em: 11 out. 2021.
- [111] EPA. United States Environmental Protection Agency. Disponível em:
<https://beta.epa.gov/greenpower/green-power-equivalency-calculator-calculations-and-references>. Acessado em: 11 set. 2021.
- [112] SILVA, F. E. C.; CARNEIRO, T. C. e CARVALHO, P. C. M. Análise Estatística da Geração de Eletricidade de Plantas Fotovoltaicas do Laboratório de Energias Alternativas da Universidade Federal do Ceará (LEA-UFC). I Congresso Internacional Virtual de Pesquisa, Pós-graduação e Inovação do Instituto Federal do Ceará (I CONINP). 2020.

- [113] CANADIAN SOLAR. Catálogo Técnico – Módulo HiKu poly CS3W-400W. Acessado em: https://www.canadiansolar.com/wp-content/uploads/2019/12/Canadian_Solar-Datasheet-HiKu_CS3W-P_EN.pdf. Acessado em: 11 out. 2021.
- [114] IMAGEM. ArcGIS para Uso Pessoal e Estudantil, 2021. Disponível em: <https://www.esri.com/pt-br/arcgis/products/arcgis-online/buy>. Acessado em: 27 dez. 2021.

ANEXO A – MAPA MUNDIAL DA IRRADIAÇÃO GLOBAL HORIZONTAL MÉDIA



Fonte: *Global Atlas Solar* [110].

APÊNDICE A – METODOLOGIA DO DIMENSIONAMENTO NO RETSCREEN

Ao iniciar o programa, na tela principal, o RETScreen apresenta o fluxo de trabalho padrão usado nas modelagens, como na Figura 22. Esse ciclo de atividades se divide em três grandes seções: indicadores de referência, análise de viabilidade e análise de desempenho.

Figura 22 – Identificação da área avaliada e da base de dados usada



Fonte: O próprio autor.

Cada um dos subtópicos pode ser acessado pela aba superior na tela, como na Figura 23, e estudado separadamente.

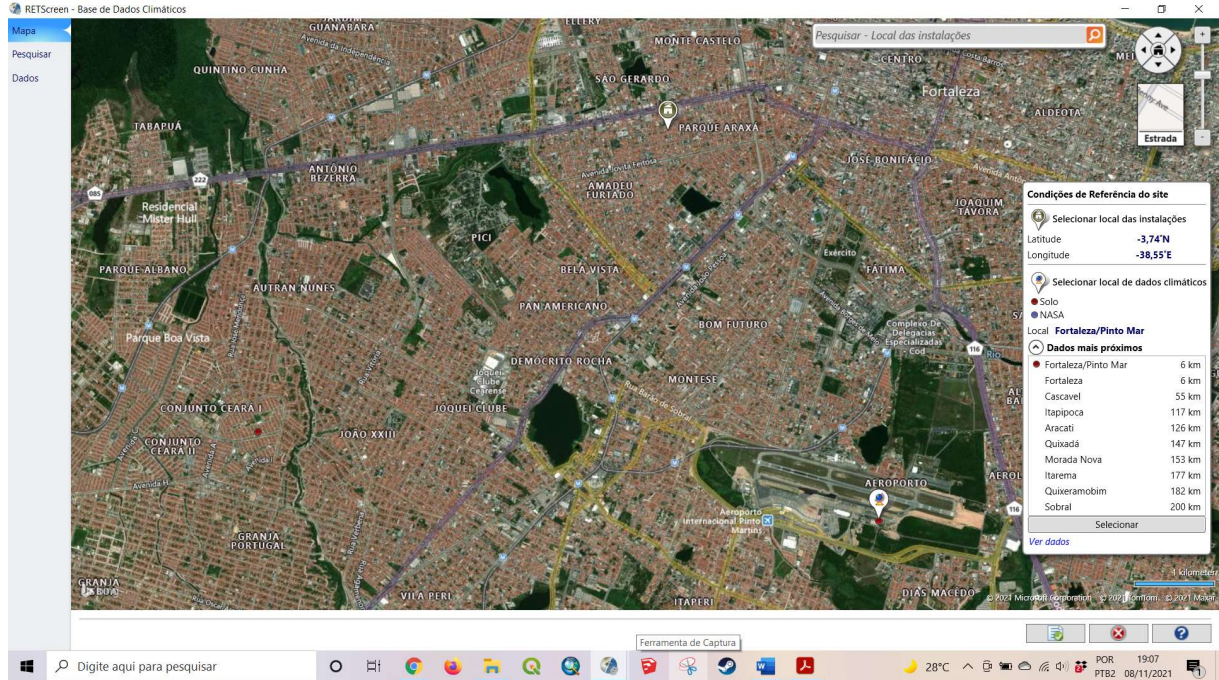
Figura 23 – Identificação da área avaliada e da base de dados usada



Fonte: O próprio autor.

O dimensionamento no RETScreen inicia-se com a identificação da região a ser avaliada e, com isso, da base meteorológica a qual os dados de irradiação e afins serão adquiridos, como na Figura 24.

Figura 24 – Identificação da área avaliada e da base de dados usada



Fonte: O próprio autor.

Definido isso, o programa apresenta dados de latitude, longitude e elevação do solo para a área estudada e para o local da estação, assim como temperaturas máxima e mínima no local da estação, como na Figura 25, e os dados de irradiação solar diária horizontal em kWh/m²/dia e da temperatura do solo em °C em registros mensais, como na Figura 20.

Figura 25 – Dados de latitude, longitude, elevação do solo e temperaturas máxima e mínima

	Unidade	Localização dos dados climáticos	Local das instalações
Latitude		-3,8	-3,7
Longitude		-38,5	-38,6
Zona climática		0A - Extremamente quente - Úmido	
Elevação	m	25	23
Temperatura para projeto de aquecimento	°C	23,0	
Temperatura para projeto de refrigeração	°C	32,0	
Amplitude da Temperatura do Solo	°C	4,6	

Fonte: O próprio autor.

Definidos esses valores, deve-se indicar o tipo de instalação a ser dimensionada. Nesse caso, seleciona-se a opção residencial com habitações múltiplas, como na Figura 26.

Figura 26 – Informações sobre o tipo de instalação

Informação sobre as instalações

Tipo de instalação: Residencial

Tipo: Prédio de apartamentos/Habitação multi unidades

Descrição: Casas e Condomínios

Preparado para: PPGEE-UFC

Preparado por: Breno Bezerra Freitas

Nome do equipamento: Comparativo com ArcGIS

Endereço: Parquelândia

Cidade/Município: Fortaleza

Prov./Estado: Ceará

País: Brasil

Elevação

Fonte: O próprio autor.

Caracterizado o tipo de instalação, define-se a fonte e a tecnologia a ser dimensionada, como na Figura 27. Na presente avaliação, selecionou-se a tecnologia FV.

Figura 27 – Seleção da tecnologia

RETScreen Expert

Arquivo Local Instalação Energia Custo Emissão Finanças Risco Dados Análise Relatório

Eletricidade e combustíveis

Horários

Aquecimento

Refrigeração

Energia

Aquecimento

Eletricidade

Inclui a medida

Etapa 1 - Combustíveis & horários

Etapa 2 - Equipamento

Etapa 3 - Utilização final

Etapa 4 - O

RETScreen - Modelo Energético

Fotovoltaica

Turbina eólica

Energia Verde

Fonte: O próprio autor.

Definida a tecnologia, a modelagem avança para o dimensionamento do sistema FV a ser aplicado. Nesse momento, o RETScreen possibilita dois tipos de modelagem, como nas Figuras 28 e 29, obtendo, assim, a potência FV instalada.

Figura 28 – Dimensionamento simplificado da instalação

Fotovoltaica

Descrição: Fotovoltaica

Nota:

Nível: Nível 1 Nível 2

E-learning

Fotovoltaica - Nível 1

Potência elétrica: kW

Fabricante:

Modelo:

Número de unidades:

Fator de Utilização: %

Custos iniciais: \$/kW

Custo de operações e manutenção (economia): \$/kW-ano

Economia de energia: kWh

Fonte: O próprio autor.

Figura 29 – Dimensionamento detalhado da instalação

Fotovoltaica

Descrição

Nota

Nível

E-learning

Fotovoltaica - Nível 2

Avaliação de recursos

Sistema de posicionamento solar

Inclinação

Azimet

Mostrar dado

Fotovoltaica

Tipo

Potência elétrica

Fabricante

Modelo

Número de unidades

Eficiência

Temperatura de operação normal da célula °C

Coefficiente de Temperatura % / °C

Área do coletor solar m²

Fator de ajuste de célula solar de dois lados

Perdas diversas

Inversor

Eficiência

Capacidade kW

Perdas diversas

Resumo

Fator de Utilização

Custos iniciais \$/kW

Custo de operações e manutenção (economia) \$ /kW-ano

Economia de energia kWh

Fonte: O próprio autor.

Seguindo o fluxo de trabalho, a etapa seguinte é a análise de custos, onde indicam-se os custos iniciais de projeto, os custos anuais e o retorno anual do investimento, como na Figura 30.

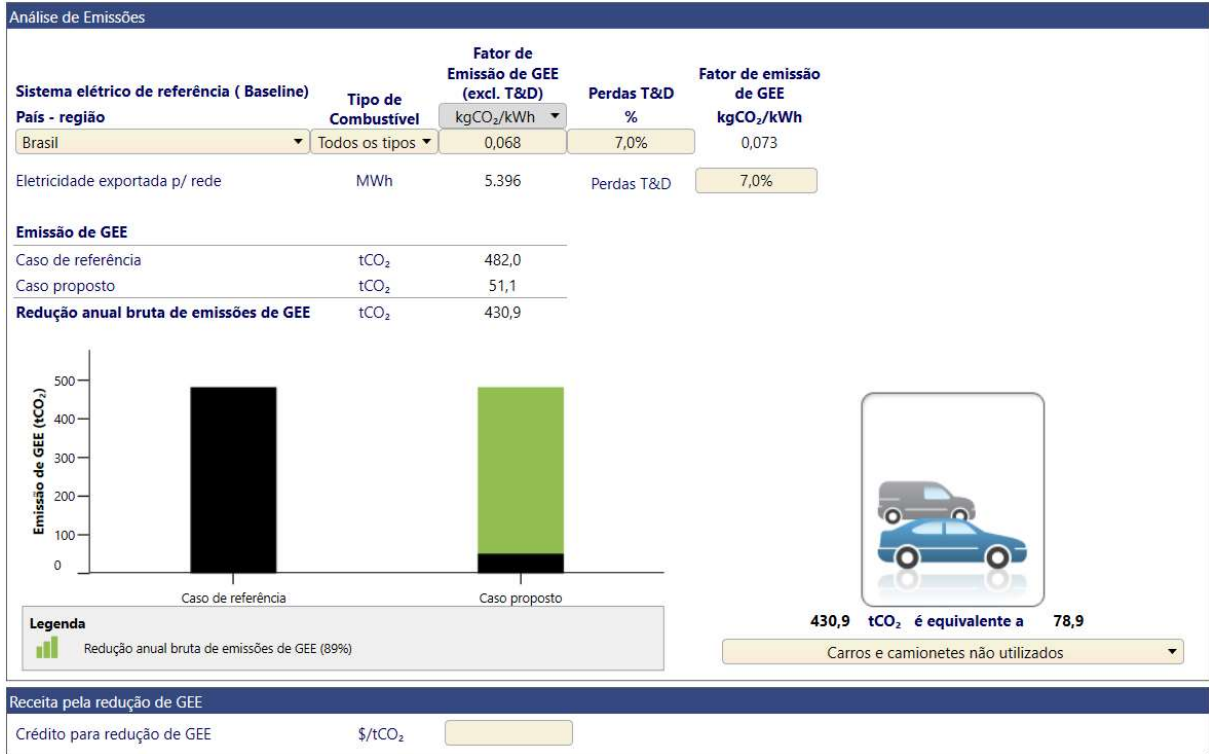
Figura 30 – Aba de análise de custos

Custos iniciais (créditos)	Unidade	Quantidade	Custo unitário	Quantidade
Custo inicial incremental				\$ 220.075
Mostrar dado				
Definido pelo usuário	custo	<input type="text"/>	<input type="text"/>	\$ -
Total de custos de investimento				\$ 220.075
Custo anual (créditos)	Unidade	Quantidade	Custo unitário	Quantidade
Custo de operações e manutenção (economia)	projeto		\$	(860)
Mostrar dado				
Custo combustível - caso proposto			\$	(256.744)
Definido pelo usuário	custo	<input type="text"/>	<input type="text"/>	\$ -
Total de custos anuais				\$ (257.605)
Economia anual	Unidade	Quantidade	Custo unitário	Quantidade
Custo combustível - caso de referência			\$	47.721
Definido pelo usuário	custo	<input type="text"/>	<input type="text"/>	\$ -
Economia total anual				\$ 47.721

Fonte: O próprio autor.

Em seguida é feita a análise de emissões, onde indicam-se o país de referência e o tipo de combustível a ser comparado, resultando no valor em tonelada de CO₂ não emitidos e os créditos de carbono equivalentes, como na Figura 31.

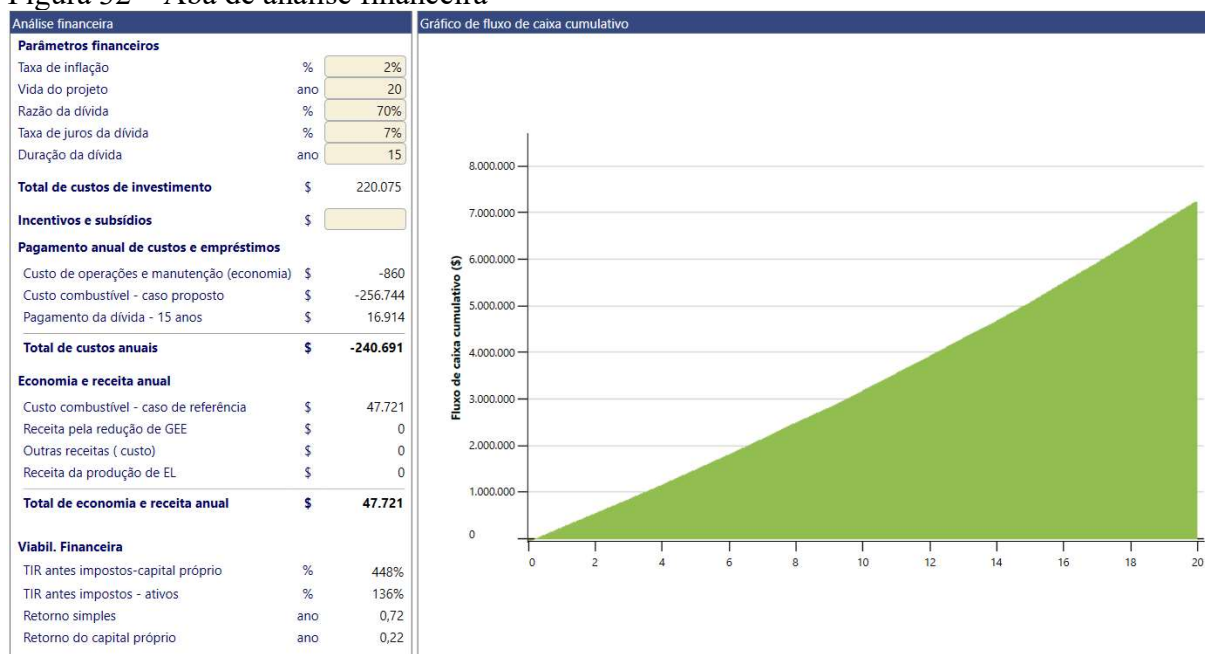
Figura 31 – Aba de análise de emissões



Fonte: O próprio autor.

A etapa seguinte é a análise financeira, onde valores como taxa de inflação, vida útil do projeto, razão da dívida, taxa de juros anual e expectativa de duração da dívida do projeto são estabelecidos, como na Figura 32. Em conjunto, também é apresentado um gráfico do fluxo de caixa cumulativo do projeto medido em R\$/ano.

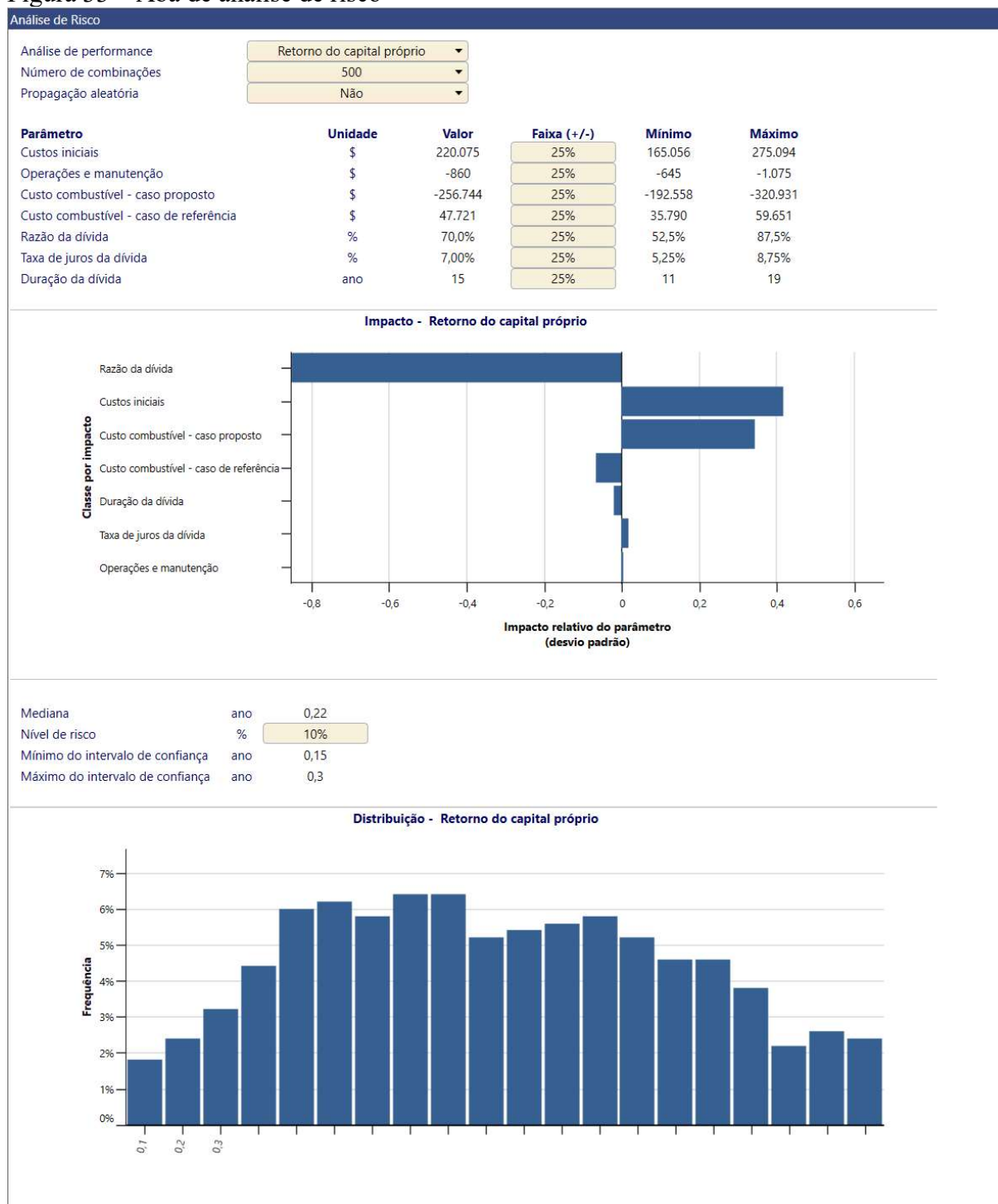
Figura 32 – Aba de análise financeira



Fonte: O próprio autor.

Em seguida é feita a análise de risco, fazendo uso de técnicas estatísticas, onde indicam-se o tipo de análise a ser feita, o intervalo aceito em % e o nível de risco permissível, como na Figura 33.

Figura 33 – Aba de análise de risco



Fonte: O próprio autor.

Após a análise de riscos, o RETScreen disponibiliza uma seção resumo com dados prioritários do projeto para o usuário conferir e corrigir quaisquer incongruências, como na Figura 34.

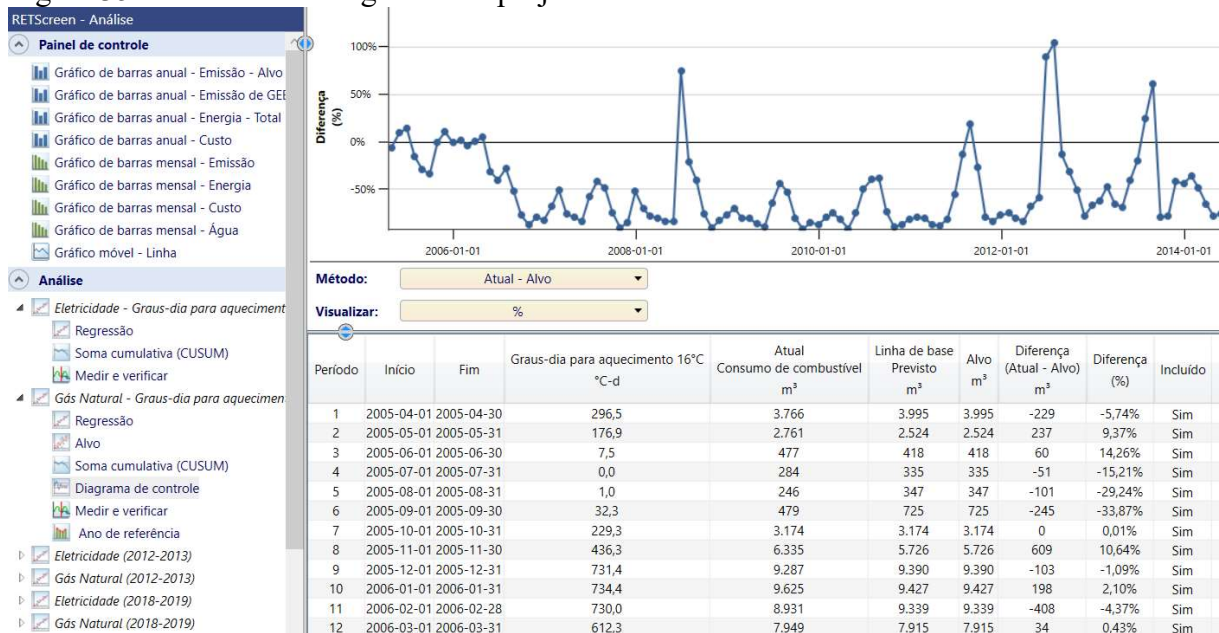
Figura 34 – Aba de verificação dos dados

RETScreen - Dados		Período	Início	Fim	Duração Dias	Eletricidade kWh	Custo \$	Graus-dia para aquecimento 16°C °C-d	Refrigeração graus-dias 18°C °C-d
Consumo de eletricidade	1	2005-04-01	2005-04-30	30	68.682	5.237	296,5	0,0	
Notas	2	2005-05-01	2005-05-31	31	86.490	6.238	176,9	0,0	
Gás Natural	3	2005-06-01	2005-06-30	30	81.948	5.966	7,5	85,2	
Consumo de água	4	2005-07-01	2005-07-31	31	85.539	6.152	0,0	94,3	
Tempo - Canada - QC - Varennes	5	2005-08-01	2005-08-31	31	90.633	6.537	1,0	87,4	
Registo de eventos	6	2005-09-01	2005-09-30	30	72.203	5.871	32,3	17,6	
	7	2005-10-01	2005-10-31	31	73.238	5.795	229,3	1,2	
	8	2005-11-01	2005-11-30	30	73.913	5.353	436,3	0,0	
	9	2005-12-01	2005-12-31	31	85.284	6.280	731,4	0,0	
	10	2006-01-01	2006-01-31	31	81.206	6.037	734,4	0,0	
	11	2006-02-01	2006-02-28	28	74.803	5.565	730,0	0,0	
	12	2006-03-01	2006-03-31	31	85.809	6.320	612,3	0,0	
	13	2006-04-01	2006-04-30	30	74.545	6.047	302,3	0,0	

Fonte: O próprio autor.

Após a aba de verificação dos dados, o RETScreen apresenta uma seção de análise gráfica com todos os dados inseridos e calculados para o projeto, permitindo avaliações anuais e mensais para geração, emissões e custos, como na Figura 35.

Figura 35 – Aba de análise gráfica do projeto



Fonte: O próprio autor.

Após todas essas etapas, culminando na seção de geração de um relatório completo do projeto, o qual pode ser salvo no computador ou diretamente impresso, para o caso da versão comercial do RETScreen.