

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

LOHANE BARCELOS PALAORO

**Mapa Solar Interativo: proposta de método para
Vitória/ES**

Vitória
Junho, 2019

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

LOHANE BARCELOS PALAORO

Mapa Solar Interativo: proposta de método para Vitória/ES

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo do Centro de Artes da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Arquitetura e Urbanismo, na área de concentração Patrimônio, sustentabilidade e tecnologia.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Cristina Engel de Alvarez

Vitória
Junho, 2019

LOHANE BARCELOS PALAORO

**MAPA SOLAR INTERATIVO: PROPOSTA DE MÉTODO
PARA VITÓRIA/ES**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo do Centro de Artes da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Arquitetura e Urbanismo, na área de concentração Patrimônio, sustentabilidade e tecnologia.

Avaliada em 19 de junho de 2019 por:

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof.^a Dr.^a Cristina Engel de Alvarez
Doutora em Arquitetura e Urbanismo
Universidade Federal do Espírito Santo
Orientadora

Prof.^a Dr.^a Jussara Farias Fardin
Doutora em Engenharia Elétrica
Universidade Federal do Espírito Santo
Membro interno

Prof. Dr. Rodrigo Garcia Alvarado
Doutor em Comunicação Visual
Universidad del Bío-Bío (Chile)
Membro externo

AGRADECIMENTOS

À Deus, agradeço as inspirações e a proteção.

À Prof.^a Dr.^a Cristina Engel de Alvarez, minha orientadora, agradeço a oportunidade em poder trabalhar com um tema tão significativa. Agradeço também a receptividade, a confiança e as motivações.

Agradeço ao Prof. Dr. Rodrigo Garcia Alvarado e à Prof.^a Dr.^a Jussara Farias Fardin, membros da banca avaliadora, pela disposição e contribuições com a pesquisa realizada.

Ao Laboratório de Planejamento e Projetos (LPP), agradeço a estrutura sem a qual o desenvolvimento desta pesquisa não seria possível.

Aos familiares, em especial, minha mãe, Marlene, e meu pai, Salésio, primeiros incentivadores na minha caminhada acadêmica. Agradeço também o olhar carinhoso e a força motivadora da matriarca, Dona Iracema. Aos tios queridos, Rose, Douglas, Lúcia e Marilza, pelo afeto de sempre. Às primas Débora e Michele pela alegria de tantos momentos.

Aos caríssimos amigos de longa data, sou grata pelo apoio e compreensão. Em especial, agradeço à Fernanda Merízio, Thiago Madeira, Wagner Santos, Jéssica Corona, Rodrigo Schena, Rafael Barbieri, Kaline Firmo e Emanuel Santana.

Aos amigos que o mestrado me proporcionou, agradeço a generosidade na partilha do conhecimento. Em especial, agradeço ao Anderson Fraga, Jéssica Machado, Renata Salvalaio, Bruna Perovano, Dielly Montarroios, Daniela Pawelski, Laiz Reis, Ana Karol, Nathalia Simonetti, Prof.^a. Edna, Mariana Vallory e Thiago Lima.

Aos amigos geógrafos, Jordano Brito e Wesley Correa, agradeço o auxílio com ferramentas e análises geográficas. Igualmente, agradeço ao geógrafo Wolfram Lange pelas contribuições sólidas neste trabalho.

À FAPES (Fundação de amparo à Pesquisa e Inovação dos Espírito Santo) agradeço a bolsa concedida, o que viabilizou a realização desta pesquisa.

Muito obrigada a todos.

*“nada que o sol
não explique”.*

(P. Leminski)

RESUMO

Face à necessidade da diversificação da matriz energética urbana, da equidade de acesso à energia elétrica e da redução dos impactos ambientais causados pela exploração de recursos naturais como fonte de energia, esta pesquisa propõe o desenvolvimento de uma metodologia para a elaboração de uma ferramenta informativa capaz de investigar o emprego de sistemas de aproveitamento da energia solar, em residências urbanas, para a cidade de Vitória, no Espírito Santo. Essa ferramenta se apresenta como um mapa solar interativo, disponibilizada gratuitamente em uma plataforma *online*, com a finalidade de indicar o potencial solar nas coberturas das edificações urbanas. Além disso, com esse instrumento, pretende-se apontar as viabilidades técnica e econômica da implantação de sistemas de aproveitamento solar. A metodologia adotada se baseia no método de elaboração do “Mapa Solar de Concepción/Chile” (BAERISWYL-RADA, GARCÍA-ALVARADO, SANDOVAL-QUEZADA, 2016), e considera as seguintes etapas: revisão bibliográfica; recorte espacial; aplicação do método de criação do mapa solar (incluindo *softwares* e dados disponíveis); avaliação e divulgação dos resultados. Os estudos desenvolvidos demonstraram maiores dificuldades na elaboração do Modelo Digital Superficial, na calibração dos parâmetros de simulação e no desenvolvimento da plataforma *online*. Por isso, foi necessário realizar adaptações na metodologia de referência a fim de viabilizar o método proposto. Com essa ferramenta, espera-se democratizar a informação acerca da geração distribuída, fomentar o uso de energia renovável não convencional e colaborar para o desenvolvimento de uma cidade mais eficiente.

Palavras-chave: Matriz energética. Fontes renováveis. Energia Solar. Mapa solar.

ABSTRACT

Given the need of diversity in the urban primary energy supply, as the wish of equality in access to electric energy and extenuate the environmental impact caused by natural resources exploitation as energy source, this research aims to set up a methodology assembling an informative tool capable of measure the applicability of a solar energy harvesting system in urban houses at Vitória, capital of Espírito Santo. The tool presents itself as an interactive solar map, available for free onto online platform with the purpose of indicate the roof solar potential on urban houses. Also, it is intended to point out the technical and economical viabilities of assembling a solar energy harvesting system. The adopted methodology is based on the preparation method used for “Mapa Solar de Concepción/Chile” (BAERISWYL-RADA, GARCÍA-ALVARADO, SANDOVAL-QUEZADA, 2016) and it considers the following steps: bibliography review; spatial cutout; applying method of solar map creation’s (including software and available data); evaluation and disclosure of results. The studies shown great difficulties in arranging the Superficial Digital Model, in calibration of simulation parameters’ and the development of the online platform. Though, it was required adaptations in the reference’s methodology in order to turn the proposed model viable. Using this tool, is expected to democratize the info around distributed energy generation, as well as support the use of not-conventional renewable energy and contribute to the development of a city more efficient.

Keywords: Primary energy supply. Renewable sources. Solar energy. Solar map.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Média anual do total diário de irradiação solar global.....	18
Figura 2 - Média anual da irradiação solar global, do Espírito Santo, com destaque para a Região Metropolitana da Grande Vitória.....	19
Figura 3 - Componentes da Irradiância Solar.....	24
Figura 4 - Órbita da Terra em relação ao Sol.....	25
Figura 5 - Trajetória do movimento aparente do Sol ao longo do ano, no hemisfério sul.....	26
Figura 6 - Posição do céu e a definição dos ângulos azimutal, zenital e da altura solar...26	
Figura 7 - Oferta interna de energia elétrica por fonte (a) e Participação setorial no consumo de energia elétrica no Brasil (b), em 2017.....	27
Figura 8 - Consumo de energia elétrica por equipamento (%).	28
Figura 9 - Geração de energia elétrica por fonte (%) no ES.....	29
Figura 10 - Participação setorial no consumo de energia elétrica no ES (a) e consumo de energia elétrica por município (b), em 2017.....	29
Figura 11 - Energia Elétrica Distribuída pelas Concessionárias* – Importação X Geração Local (%),.....	30
Figura 12 - Capacidade solar térmica instalada no Estado do Espírito Santo por meio do programa Bairro Solar.....	31
Figura 13 - Principais mudanças relacionadas à micro e minigeração distribuída fotovoltaica entre as Resoluções de 2012 e 2015.....	33
Figura 14 - <i>Ranking</i> estadual de geração distribuída.....	34
Figura 15 - Metodologia frequente de elaboração de mapas solares.....	37

Figura 16 - Resolução espacial das técnicas e resultados por quantidade de cidades cobertas	39
Figura 17 - Interface do mapa solar Mapdwell de Cambridg	40
Figura 18 - Interface do mapa solar Google Project Sunroof da Califórnia	41
Figura 19 - Interface do mapa solar de Concepción	43
Figura 20 - Janela Informações apresentada ao selecionar um telhado.....	43
Figura 21 - Interface do Mapa Solar do Rio de Janeiro.....	45
Figura 22 - Janela com as Informações apresentada ao selecionar uma cobertura	45
Figura 23 - Configuração básica de um sistema de aquecimento solar de água.	48
Figura 24 - Elementos de um coletor solar plano.	49
Figura 25 - Esquema de um sistema FV integrado a uma residência urbana e interligado à rede elétrica convencional.....	51
Figura 26 - Fluxograma metodológico da pesquisa.....	60
Figura 27 - Vista do Residencial Jabaeté, Vila Velha/ES – Habitações unifamiliares.....	63
Figura 28 - Vista do Residencial Jabaeté, Vila Velha/ES – Habitações multifamiliares.....	63
Figura 29 - Recorte territorial do Residencial Jabaeté, Vila Velha/ES.	64
Figura 30 – Modelo Digital Territorial do Residencial Jabaeté.....	67
Figura 31 - Ambiente e ferramentas do ArcScene.	68
Figura 32 - Camadas de polígonos incorporadas ao MDT.	70
Figura 33 - Modelo das edificações realizado por extrusão de polígonos.....	71
Figura 34 - Planta de cobertura e modelo digital 3D das habitações unifamiliares.....	72

Figura 35 - Planta de cobertura e modelo digital 3D da habitação multifamiliar (edifício 1)	72
Figura 36 - Planta de cobertura e modelo digital da habitação multifamiliar PCD (edifício 2)	72
Figura 37 - Planta de cobertura e modelo 3D da EEEM Mário Gurgel.	73
Figura 38 - Planta de cobertura e modelo 3D da UMEI Helida Figueiredo Milagres.	73
Figura 39 - Planta de cobertura e modelo 3D da UMEI Normília Cunha dos Santos.	74
Figura 40 - Planta de cobertura e modelo 3D do CAIC.....	74
Figura 41 - Planta de cobertura e modelo 3D do Centro Comunitário Jabaeté	74
Figura 42 - Modelo 3D das quadras poliesportivas.....	75
Figura 43 - MDS em 3D.....	76
Figura 44 - Vista hemisférica.....	78
Figura 45 - Exemplo de sobreposição (c) da vista hemisférica resultante (a) com o mapa de posição solar (b).....	79
Figura 46 - Exemplo de sobreposição (c) da vista hemisférica resultante (a) com o mapa de céu (b).	79
Figura 47 - Mapa da radiação solar nas coberturas das edificações do Residencial Jabaeté para o solstício de inverno, modelo 2,5D.	83
Figura 48 - Mapa da radiação solar nas coberturas das edificações do Residencial Jabaeté para o solstício de inverno, modelo 3D.	85
Figura 49 - Mapa da radiação solar nas coberturas das edificações do Residencial Jabaeté para o solstício de verão, modelo 3D.	86
Figura 50 - Mapa da radiação solar nas coberturas das edificações do Residencial Jabaeté para a média anual (2018), modelo 3D.....	87

Figura 51 - Mapa Solar Interativo do Residencial Jabaeté.....	108
Figura 52 - Metodologia do Mapa Solar Interativo de Vitória.....	109
Figura 53 - Modelos de habitações unifamiliares do Jabaeté, segundo orientação.	124
Figura 54 - Figura 1 Tipologias selecionadas para análise no Residencial Jabaeté: (a) Tipologia 1 – Quadra A; (b) Tipologia 2 – Quadra B; (c) Tipologia 3 – Quadra C; (d) Tipologia 4 – Quadra D	126
Figura 55 - Mapa do Potencial Solar do Residencial Jabaeté.	130

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros utilizados em simulações.....	80
Tabela 2 - Resultados de simulação: solstício de inverno.....	89
Tabela 3 - Resultados de simulação: solstício de verão.....	90
Tabela 4 - Resultados de simulação: Média anual (2018).	91
Tabela 5 - Irradiação solar no plano horizontal - Vila Velha/ES.	91
Tabela 6 – Área da cobertura das edificações residenciais com maior potencial solar. ...	92
Tabela 7 - Dimensionamento de SAS para edificações residenciais.	97
Tabela 8 – Características dos elementos dos Sistemas de Aquecimento de Água.....	97
Tabela 9 – Características dos Módulos Fotovoltaicos para aplicação residencial.....	99
Tabela 10 - Dimensionamento de sistemas FV para edificações residenciais.	101
Tabela 11 – Características dos elementos dos sistemas fotovoltaicos.....	102
Tabela 12 - Custos da Modalidade Convencional, subgrupo B1.....	103
Tabela 13 - Estimativa de energia gerada pelos sistemas FV.....	104
Tabela 14 - Custos dos Sistemas FV analisados	105
Tabela 15 - Definição dos níveis de irradiação do Mapa Solar Interativo do Residencial Jabaeté.....	107
Tabela 16 - Energia gerada por sistemas fotovoltaicos nos modelos simulados.....	127
Tabela 17 - Tipologias selecionadas para análise no Residencial Jabaeté: (a) Tipologia 1 – Quadra A; (b) Tipologia 2 – Quadra B; (c) Tipologia 3 – Quadra C; (d) Tipologia 4 – Quadra D.....	128

LISTA DE SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ABSOLAR – Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

ARSPES – Agência de Regulação de Serviços Públicos do Espírito Santo

BEES – Balanço Energético do Espírito Santo

BEN – Balanço Energético Nacional

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

EPE – Empresa de Pesquisa Energética

ES – Espírito Santo

FV – Fotovoltaico

GD – Geração Distribuída

HIS – Habitação de interesse social

ICMS – Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços

IEA – *International Energy Agency*

IJSN – Instituto Jones dos Santos Neves

IPP – Instituto Pereira Passos

LiDAR – *Light Detection And Ranging*

MDE – Modelo Digital de Elevação

MDT – Modelo Digital do Terreno

PCD – Pessoa com deficiência

PDE – Plano Decenal de Expansão de Energia

PMV – Prefeitura Municipal de Vitória

PRODIST – Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional

SEDURD – Secretaria de Estado de Saneamento, Habitação e Desenvolvimento Urbano

SIG – Sistemas de Informação Geográfica

SRTM – *Shuttle Radar Topography Mission*

RMGV – Região Metropolitana da Grande Vitória

RN – Resolução Normativa

ZEIS – Zona Especial de Interesse Social

LISTA DE SÍMBOLOS

% – Porcentagem

° – Graus

h – Horas

m – Metros

m² – Metros quadrados

W/m² – Watts por metro quadrado

δ – Declinação do Sol

ρ – Massa específica da água

C_p – Calor específico da água

β – Inclinação do coletor em relação ao plano horizontal

$\beta_{\text{ótimo}}$ – Inclinação ótima do coletor para o local de instalação

γ – Ângulo de orientação dos coletores solares em relação ao norte geográfico

η_m – Eficiência do módulo fotovoltaico

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	17
1.1 <i>Objetivos</i>	20
1.1.1 Objetivo Geral.....	20
1.1.2 Objetivos Específicos	20
1.2 <i>Estrutura do trabalho</i>	21
2 ENERGIA SOLAR: CONCEITOS E APLICAÇÕES.....	23
2.1 <i>Panorama Energético: Brasil x Espírito Santo</i>	27
2.2 <i>Políticas Públicas de Incentivo à Geração Distribuída</i>	31
2.3 <i>Os Mapas Solares</i>	35
2.3.1 Mapas Solares Internacionais.....	36
2.3.2 Mapas Solares Brasileiros	43
2.4 <i>Sistemas de captação solar</i>	46
2.4.1 Sistemas de Aquecimento Solar (SAS).....	46
2.4.2 Sistemas Fotovoltaicos (FV).....	50
3 METODOLOGIA.....	54
3.1 <i>Descrição do Método Base</i>	54
3.2 <i>Procedimentos adotados</i>	59
3.2.1 Recorte Territorial	61
3.2.2 Elaboração do Modelo Digital	65
3.2.2.1 Elaboração do Modelo Digital Territorial (MDT).....	66
3.2.2.2 Elaboração do Modelo Digital de Superfície (MDS)	67
3.2.3 Simulações.....	77
3.2.4 Resultados obtidos nas simulações.....	82
3.2.5 Aplicação dos Resultados	92
3.2.5.1 Dimensionamento de Sistemas de Aquecimento de Água	92
3.2.5.2 Dimensionamento de Sistemas Fotovoltaicos (FV).....	97

3.2.5.3	Análise da Viabilidade Econômica	102
3.2.6	Divulgação dos resultados	106
4	RESULTADOS	109
4.1	<i>Elaboração do Modelo Digital de Superfície (MDS)</i>	<i>109</i>
4.2	<i>Simulações</i>	<i>110</i>
4.3	<i>Avaliação e Aplicação dos Resultados</i>	<i>111</i>
4.4	<i>Divulgação dos resultados</i>	<i>112</i>
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	114
6	REFERÊNCIAS	118
APÊNDICE A	124

1 INTRODUÇÃO

Em consequência do acréscimo populacional nos centros urbanos, o consumo de insumos básicos inerentes à vida humana citadina, como água e energia elétrica, tem sido cada vez maior, provocando assim, a escassez de tais bens. Nesse contexto, a necessidade de aproximar o planejamento urbano do conceito de sustentabilidade é cada vez mais presente, visando principalmente proporcionar melhor qualidade de vida à população e tornar democrático o acesso aos referidos insumos (ACSELRAD, 2009).

No que se refere ao aumento das demandas energéticas, uma alternativa capaz de solucionar os impasses mencionados é o aproveitamento do sol como fonte geradora de energia. Essa alternativa, além de destinar eficientemente esse recurso natural, gratuito e inesgotável, possibilita a promoção da diversificação da matriz energética, bem como a aproximação das unidades geradoras aos centros de consumo, tornando, assim, o sistema elétrico mais eficiente e, conseqüentemente, mais sustentável (PINHO; GALDINO, 2014).

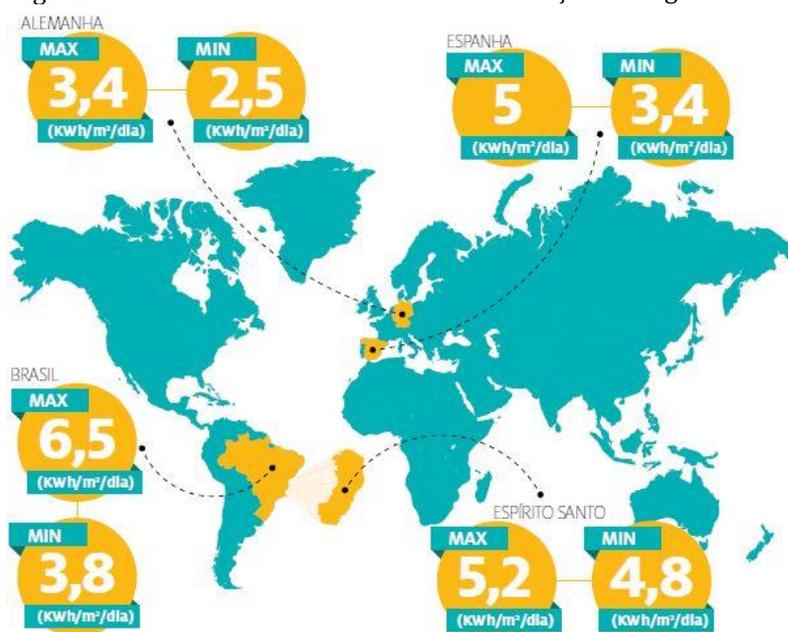
Segundo Rüter e Salamoni (2011), adotar uma estratégia baseada em dois eixos – geração descentralizada e eficiência energética – pode sanar as dificuldades futuras de abastecimento energético de um país. A adoção de tal medida permite o aumento da segurança no suprimento de energia, bem como reduz as perdas com transmissão e distribuição, da rede de energia.

Pereira e outros (2017) reiteram que diversas são as formas de aproveitamento da energia solar, partindo de sistemas fotovoltaicos autônomos até a escala de grandes centrais que utilizam energia solar concentrada.

No Brasil, o aproveitamento do sol como fonte geradora é considerado um empreendimento viável em grande parte dos estudos em razão do recurso solar que atinge seu território. Tal recurso é capaz de obter médias anuais de energia entre 3,8 e 6,5 kWh/m²/dia, superando países europeus, conhecidos por investirem fortemente no aproveitamento de energia solar, como a Alemanha, onde a mesma média varia entre 2,5 e 3,4 kWh/m²/dia (LIMA *et al.*, 2013).

Dessa forma, observa-se que mesmo em regiões brasileiras mais distantes da linha do Equador, também é possível encontrar potenciais significativos para o aproveitamento da energia solar. O Estado do Espírito Santo, por exemplo, situado na Região Sudeste, apresenta uma média anual de irradiação entre 5,07 e 5,58 kWh/m²/dia (LIMA *et al.*, 2013), também superior à média alemã. A Figura 1 compara as referidas médias anuais de irradiação solar.

Figura 1 - Média anual do total diário de irradiação solar global.

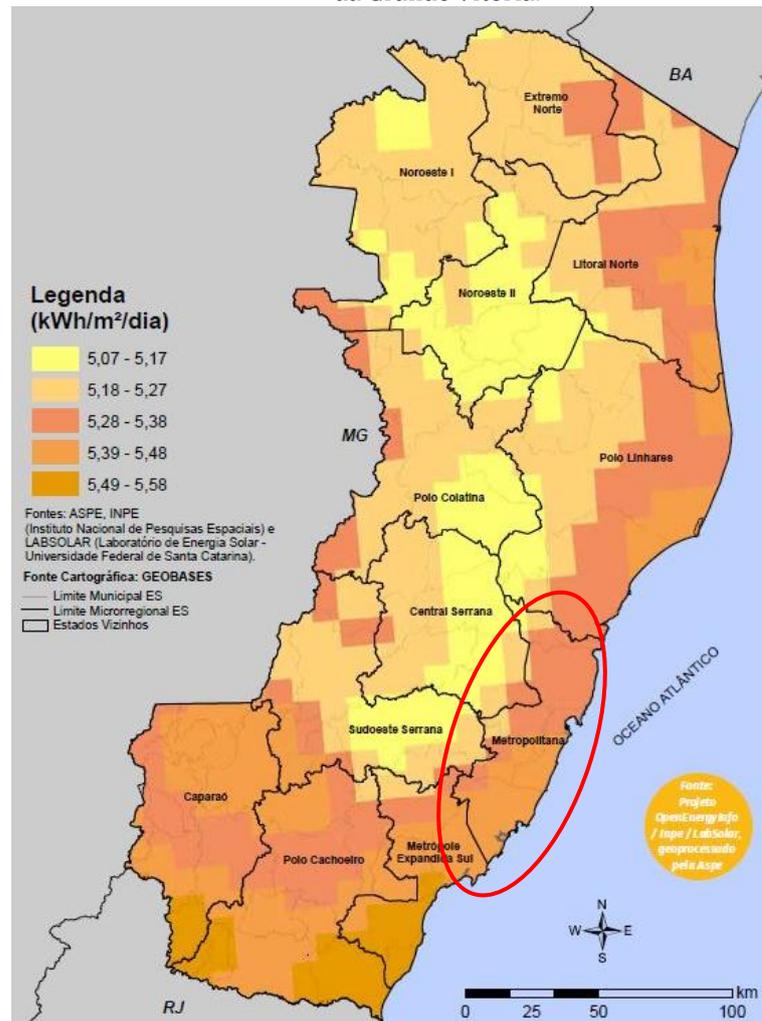


Fonte: LIMA *et al.*, 2013.

Adicionalmente, o mapa apresentado pela Figura 2 demonstra a distribuição da radiação solar no território do Estado do Espírito Santo, representada pela média anual diária de irradiação (kWh/m²/dia). Observa-se, também, uma intensidade expressiva na irradiação correspondente à região metropolitana, em destaque na Figura 2, revelando assim, condições favoráveis ao aproveitamento solar.

Vitória, capital do estado do Espírito Santo, localizada na Região Metropolitana, é responsável por 27,5% do consumo de energia elétrica estadual (ARSPEs, 2018) e se caracteriza pela forte presença de unidades habitacionais, onde 72,08% do território municipal é ocupado por edificações exclusivamente residenciais (PMV, 2019).

Figura 2 - Média anual da irradiação solar global, do Espírito Santo, com destaque para a Região Metropolitana da Grande Vitória.



Fonte: ASPE, 2013. Modificado pela autora.

Quanto à produção de energia elétrica, o abastecimento do Espírito Santo possui, em sua maioria, a participação de fontes não renováveis, como térmicas a gás natural e óleo combustível, demonstrando um movimento ainda tímido na direção de fontes renováveis não convencionais (ARSPES, 2018).

A implementação de sistemas de captação solar no Espírito Santo já ocorre por meio de programas de governo, através dos quais residências de bairros selecionados foram contemplados com sistemas de aquecimento solar, gratuitamente. Segundo a Lima e outros (2013), esse tipo de medida pode gerar uma economia média de 26% com energia elétrica.

Diante da problemática apresentada, emerge a necessidade de promover meios que auxiliem a utilização de fontes seguras e renováveis, como forma de descongestionar a rede convencional de energia, bem como proporcionar geração distribuída.

À vista disso, muitas cidades em torno do mundo estão implementando ferramentas, como mapas solares interativos, a fim de divulgar dados acerca do potencial solar encontrado nas coberturas residenciais. Essa ferramenta pretende, por meio da informação disponível na *web*, encorajar a aplicação de sistemas de captação solar, nos centros urbanos (GARCÍA-ALVARADO *et al.*, 2016).

Sarralde e outros (2015) e Martins e outros (2016) mencionam que a utilização de recursos computacionais como uma ferramenta de análise da radiação solar disponível, nos estágios iniciais do projeto urbano, contribui para a eficácia das decisões tomadas referentes ao aproveitamento do potencial solar das edificações.

Ademais, políticas de planejamento urbano podem ser reavaliadas diante dos resultados obtidos, a partir do emprego de tais ferramentas, contribuindo assim, para a maximização do potencial solar nas novas edificações.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Com base nos aspectos apresentados anteriormente, o objetivo principal da presente pesquisa é avaliar as metodologias de elaboração de mapas solares existentes, a fim de desenvolver um método específico para confecção do Mapa Solar Interativo de Vitória/ES. Tal ferramenta deve divulgar, gratuitamente, informações acerca do potencial solar, contribuir para o aproveitamento da energia solar no setor residencial e promover geração distribuída.

1.1.2 Objetivos Específicos

Para alcançar o objetivo principal, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- i. A partir de revisão bibliográfica sobre as metodologias de desenvolvimento de mapas solares, estabelecer critérios e selecionar um método a ser aplicado às edificações urbanas da região analisada;

- ii. Aplicar o método ao recorte territorial definido e identificar as potencialidades e os problemas do método base;
- iii. Adequar o método de base à realidade da região de estudo e definir a metodologia de desenvolvimento do Mapa Solar Interativo de Vitória/ES.

1.2 Estrutura do trabalho

No capítulo de introdução foi apresentado uma contextualização do problema e a justificativa da presente pesquisa, abordando assuntos pertinentes ao tema deste trabalho. Nesse sentido, tal capítulo tratou da situação energética no ambiente urbano, bem como formas alternativas de geração de energia que aproximam a cidade do conceito de sustentabilidade, apontando, principalmente, argumentos relativos ao uso da energia solar. Além disso, foram apresentados os objetivos geral e específicos, da presente pesquisa.

O Capítulo 2 aborda os principais assuntos que envolvem este estudo, iniciando com uma explanação sobre os conceitos básicos relativos à energia solar. Em seguida, a primeira seção discute sobre o panorama energético do Brasil e do Espírito Santo. Depois, na segunda seção, são discutidas as políticas públicas de incentivo à geração distribuída. Posteriormente, na terceira seção, são apresentadas as principais metodologias de elaboração dos mapas solares internacionais, atualmente em vigor, como forma de compará-las com os mapas solares do Brasil. E, por fim, a quarta seção aborda as principais formas de aproveitamento da energia solar.

O Capítulo 3 trata das etapas metodológicas adotadas para o desenvolvimento da presente pesquisa, indicando as estratégias e os métodos utilizados. Inicialmente, o capítulo apresenta uma descrição do método selecionado como referência para o desenvolvimento do mapa solar proposto. Em seguida, o método adotado é aplicado à região de análise, sofrendo adequações quando necessário.

Na sequência, o Capítulo 4 apresenta uma proposta de metodologia para o desenvolvimento do Mapa Solar Interativo de Vitória, considerando os procedimentos realizados no capítulo anterior. Assim, esse capítulo versa sobre as principais etapas metodológicas recomendadas para a concepção do referido mapa.

O Capítulo 5, com as considerações finais, aponta as principais conclusões constatadas a partir da análise dos resultados; avalia se os objetivos foram alcançados, além de propor sugestões para trabalhos futuros.

Após o último capítulo, nas Referências, encontram-se listadas as principais fontes de dados e informações utilizadas no desenvolvimento da pesquisa. E ao final, o APÊNDICE A, onde foram incluídas as informações inerentes ao modelo habitacional adotado para o teste da metodologia.

2 ENERGIA SOLAR: CONCEITOS E APLICAÇÕES

A superfície terrestre recebe diariamente mais energia proveniente do sol do que sua demanda total anual (RÜTHER, 2004). Com essa disponibilidade de energia, gratuita e inesgotável, considera-se que o aproveitamento do sol é uma das alternativas mais promissoras na busca pela sustentabilidade energética.

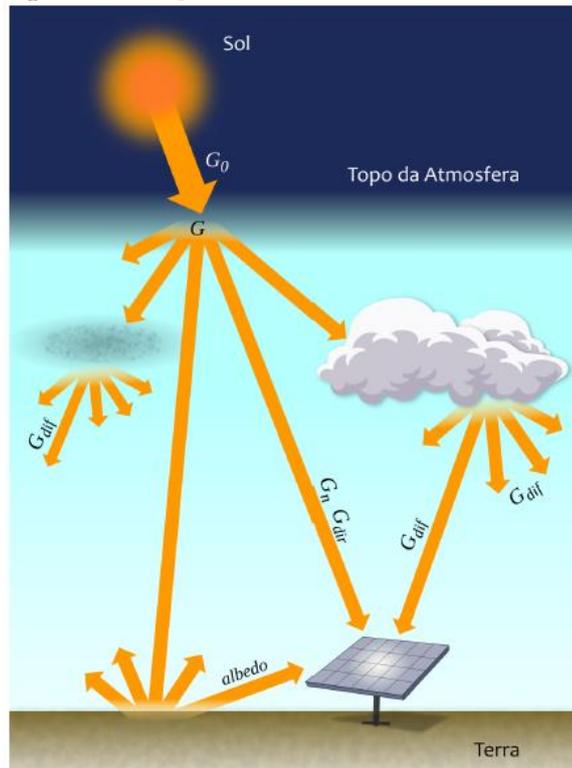
O sol é uma estrela, de dimensões médias, que irradia uma taxa de energia aproximadamente constante há bilhões de anos. Essa energia é oriunda de reações de fusão nuclear dos átomos de hidrogênio para formar átomos de hélio. Estima-se que a potência da radiação solar, atualmente, seja de $3,86 \cdot 10^{26} \text{W}$ (PEREIRA *et al.*, 2017).

A radiação solar é uma onda eletromagnética, constituída por outras ondas de características físicas diversas. O sol é a fonte natural mais importante de radiação eletromagnética que, ao interagir com a superfície terrestre, possibilita a ocorrência de diversos fenômenos físicos, como o aquecimento, a reflexão e a transmissão de energia (FITZ, 2008).

Estudos de viabilidade para instalação de sistemas de aproveitamento da energia do sol demandam a quantificação do recurso solar aproveitável. Assim, o fluxo de radiação solar, ou irradiância (W/m^2), pode ser medido por instrumentos como os piranômetros e os pireliômetros (LIMA *et al.*, 2013).

A irradiância solar global é constituída por suas componentes: difusa e direta. A irradiância direta representa a parcela que não sofreu espalhamento ou absorção pela atmosfera, atingindo a superfície terrestre sem qualquer desvio. Já a componente difusa representa a irradiância proveniente de todas as direções decorrentes dos processos de espalhamento. Além dessas, existe também a irradiação que a superfície reflete, chamada de albedo (PEREIRA *et al.*, 2017). A Figura 3 ilustra as componentes da irradiação solar.

Figura 3 - Componentes da Irradiância Solar



Fonte: PEREIRA, 2017

Além das irradiâncias global (G), direta (G_{dir}) e difusa (G_{dif}), a Figura 3 também representa o comportamento das irradiâncias extraterrestre (G_0) e direta normal (G_n). A irradiância extraterrestre é a taxa de energia incidente em um plano horizontal imaginário situado no topo da atmosfera. Já a irradiância direta normal representa a taxa de energia por unidade de área proveniente do Sol, de maneira direta, que incide perpendicularmente à superfície (PEREIRA *et al.*, 2017).

Ainda de acordo com Pereira e outros (2017), a integral da irradiância no tempo é definida como a energia radiante incidente acumulada em um intervalo de tempo, ou irradiação solar (Wh/m^2).

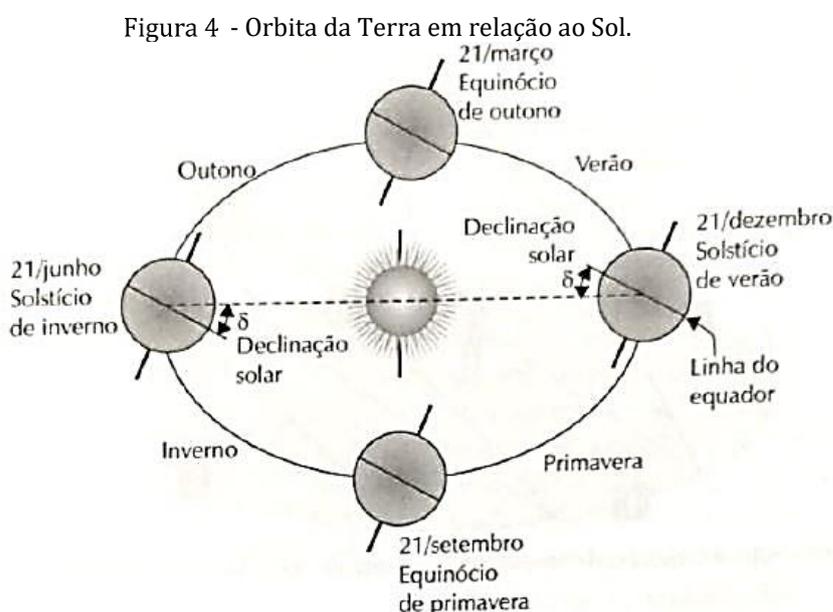
Cabe ressaltar também que a radiação direta que atinge o solo incide com uma inclinação diferente para cada ponto do planeta. Tal inclinação varia de acordo com os dias e meses do ano, dependendo da posição da Terra e do Sol no espaço (VILLALVA, M; GAZOLA, 2013).

O eixo de rotação da Terra, que é o eixo entre os Polos Norte e Sul geográficos, é suavemente inclinado em aproximadamente $23,5^\circ$. Essa inclinação faz com que os

hemisférios, Norte e Sul, fiquem mais perto e mais afastados do Sol, ao longo dos dias do ano, dando, assim, origem às estações do ano (VILLALVA, M; GAZOLA, 2013).

Além disso, a duração dos dias e as diferentes massas de ar percorridas pelos raios solares, são fatores de suma importância na quantidade de energia solar recebida em cada local do planeta.

Outro fator que influencia no recebimento de energia solar é o ângulo de declinação do Sol (δ), que nada mais é do que o ângulo dos raios solares em relação ao plano do Equador, assim como mostrado na Figura 4.

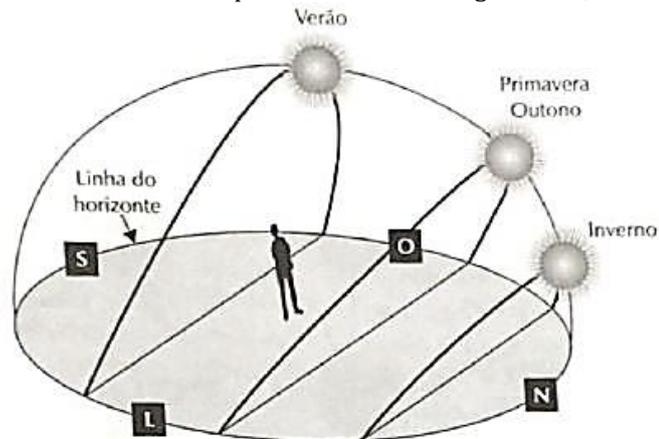


Fonte: (VILLALVA, M; GAZOLA, 2013)

Durante os solstícios, que é quando se inicia o verão e o inverno, o ângulo de declinação solar (δ) é máximo. Ao passo que, nos equinócios, início do outono e da primavera, o mesmo ângulo é equivalente a zero, incidindo paralelamente ao Equador (VILLALVA, M; GAZOLA, 2013).

A existência do ângulo de declinação solar faz com que o Sol nasça e se ponha em diferentes pontos do céu, descrevendo, assim, uma trajetória com inclinações diferentes, ao longo dos dias do ano, como ilustrado na Figura 5.

Figura 5 - Trajetória do movimento aparente do Sol ao longo do ano, no hemisfério sul.

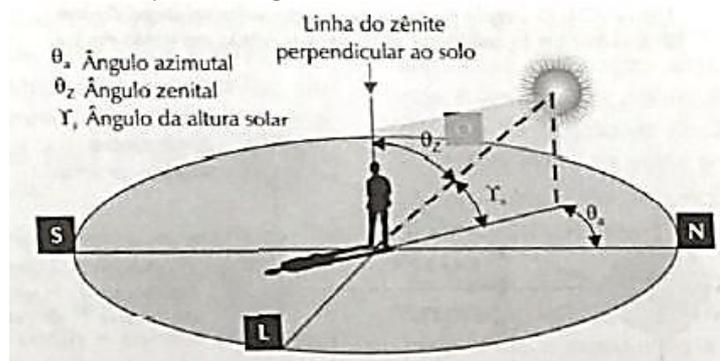


Fonte: (VILLALVA, M; GAZOLA, 2013)

Durante o verão a altura do Sol no céu é maior, apresentando assim, um ângulo zenital (θ_z) menor. Já no inverno, a altura solar é menor, refletindo em um ângulo zenital maior.

Por outro lado, o azimutal, que é o ângulo de orientação dos raios solares em relação ao Norte geográfico, varia ao longo das horas do dia. Isso quer dizer que, para um observador localizado no hemisfério Sul, olhando para o Norte, verá o Sol em ângulos variáveis à direita, pela manhã, e à esquerda, à tarde. Ao meio dia solar, que é quando o azimutal coincide com o Norte geográfico, o observador verá o Sol exatamente à sua frente, indicando ângulo do azimute igual a zero. Nesse momento é quando ocorre a maior incidência solar. A Figura 6 indica os ângulos azimutal, zenital e da altura solar (VILLALVA, M; GAZOLA, 2013).

Figura 6 - Definição dos ângulos azimutal, zenital e da altura solar.



Fonte: (VILLALVA, M; GAZOLA, 2013)

Todos esses fatores influenciam diretamente no recurso solar que atinge a superfície terrestre, de modo que a instalação correta de um módulo fotovoltaico, ou de um coletor solar, deve levar em consideração, principalmente, o movimento diário do Sol. Assim, a

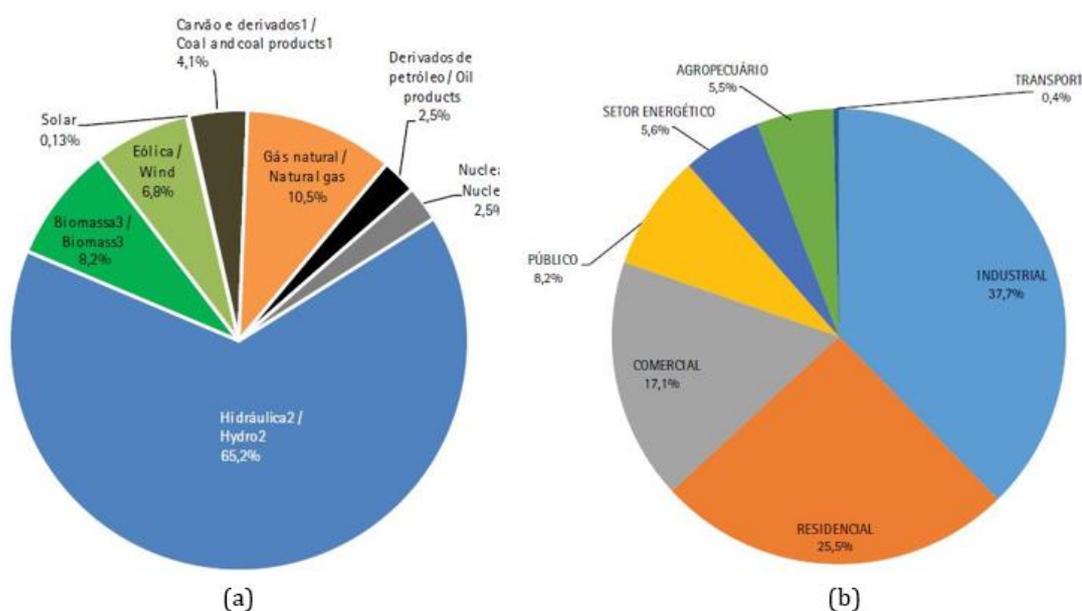
melhor maneira de se instalar um sistema de captação solar, em cidades do hemisfério Sul, é orientá-lo para o Norte geográfico. Dessa forma, é possível maximizar o aproveitamento da luz solar, ao longo do dia. Deve-se ter em vista também que esse recurso solar pode se potencializar de acordo com a estação do ano, sendo maior no verão e menor no inverno (VILLALVA, M; GAZOLA, 2013).

2.1 Panorama Energético: Brasil x Espírito Santo

De acordo com o Balanço Energético Nacional de 2018, verificou-se que no Brasil o consumo de energia elétrica sofreu aumento de 22,83%, entre os períodos de 2008 e 2017. Para suprir sua demanda, o País conta com uma oferta interna fortemente caracterizada por fonte hidráulica, 65,2%, seguida do gás natural, 10,5%, e da Biomassa, 8,2% (EPE, 2018).

No que se refere ao consumo de eletricidade, o mesmo estudo apontou maior expressividade nos setores industrial, 37,7%, residencial, 25,5%, e comercial, 17,1%. A Figura 7 mostra a distribuição das fontes de energia elétrica na matriz brasileira (a) e a participação de cada setor no consumo total (b) (EPE, 2018).

Figura 7 - Oferta interna de energia elétrica por fonte (a) e Participação setorial no consumo de energia elétrica no Brasil (b), em 2017.



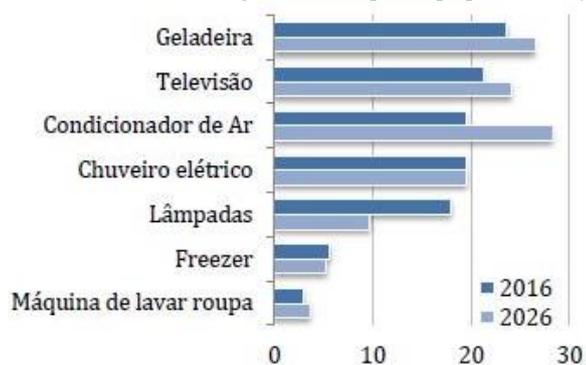
Fonte: EPE, 2018. Modificada pela autora.

Os resultados apresentados no BEN de 2018 também apontaram um crescimento de 40,11% no consumo de eletricidade no setor residencial, entre 2008 e 2017. De forma

semelhante, o PDE 2026 (Plano Decenal de Expansão de Energia 2026) estima que o consumo de energia elétrica nas residências brasileiras crescerá 1,8% ao ano, entre 2016 e 2026. Tal crescimento deverá ser, de acordo com as estimativas, em função da universalização dos serviços de distribuição, ao estoque de eletrodomésticos e ao surgimento de novos domicílios (EPE, 2017).

Adicionalmente, a estimativa realizada no PDE 2026 aponta o ar condicionado como maior responsável no crescimento do consumo de eletricidade. Em contrapartida, o referido plano indica a lâmpada como dispositivo com redução da participação no consumo total. A Figura 8 mostra o percentual de consumo por equipamento, nas residências brasileiras.

Figura 8 - Consumo de energia elétrica por equipamento (%).



Fonte: EPE, 2017.

Do mesmo modo, o Balanço Energético do Espírito Santo (BEES 2018) caracterizou a geração e o consumo de energia elétrica do Estado, apontando as fontes e os setores de destaque. Assim, foi possível constatar a participação predominante das fontes não renováveis, 65,1%, na produção de energia elétrica, com destaque para as térmicas e gases de processo, 36,4%, e térmicas a gás natural, 20,8% (ARSPES, 2018), como mostra a Figura 9.

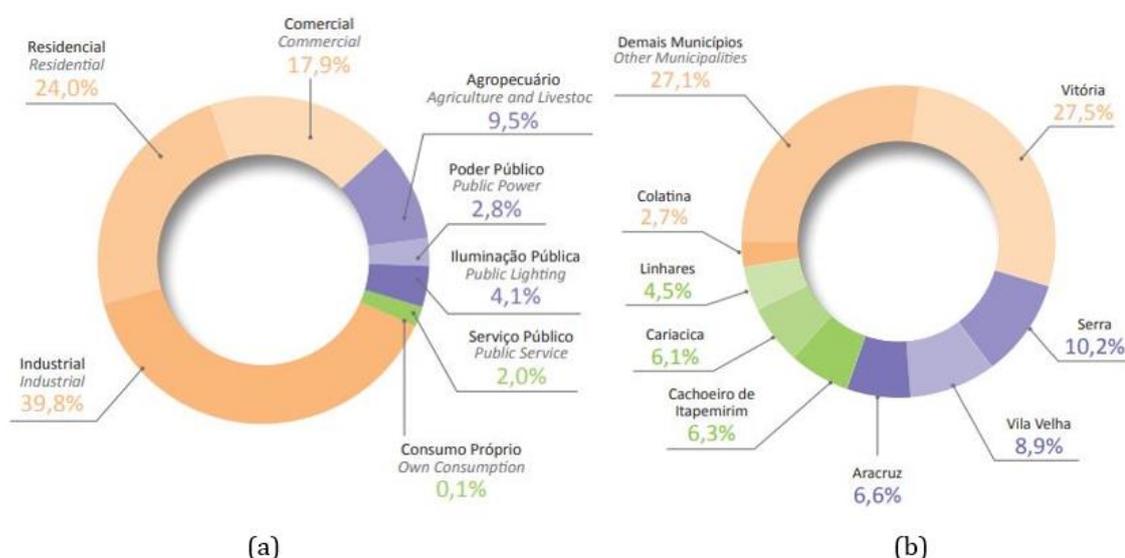
Figura 9 - Geração de energia elétrica por fonte (%) no ES.

Geração de Energia Elétrica por Fonte (MWh)*	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2017/2016%
RENOVÁVEL	49,2	60,3	59,3	60,8	54,8	45,9	38,3	31,3	33,4	34,9	4,5
Hidráulica	24,1	35,0	33,8	35,9	31,3	26,5	20,0	11,3	13,2	14,4	8,6
CGH**	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
PCH	4,1	12,3	12,9	14,4	12,0	10,5	7,4	4,3	4,9	5,0	2,6
UHE	20,0	22,6	20,9	21,6	19,2	15,9	12,6	7,0	8,3	9,4	12,2
Térmica Renovável	25,1	25,3	25,5	24,9	23,5	19,4	18,3	20,0	20,2	20,5	1,8
Biomassa Cana***	2,0	1,6	1,4	1,5	1,4	1,2	1,0	0,9	0,6	1,0	69,6
Lixívia	23,1	23,7	24,1	23,4	22,2	18,2	17,3	19,2	19,6	19,6	-0,1
NÃO RENOVÁVEL	50,8	39,7	40,7	39,2	45,2	54,1	61,7	68,7	66,6	65,1	-2,3
Térmicas a Gases de Processo (Aciaria, Coqueria, Alto-forno)	50,8	39,7	40,6	38,0	32,6	23,2	28,9	35,6	40,5	36,4	-10,1
Térmica Gás Natural	0,0	0,0	0,0	1,0	8,1	19,7	18,9	20,9	21,4	20,8	-2,6
Térmica Óleo Combustível	0,0	0,0	0,0	0,2	4,5	11,2	13,8	12,2	4,7	7,8	67,4
Total Geração (SP+PIE+APE)	100,0	0,0									

Fonte: ARSPES, 2018.

Em relação ao consumo, o referido balanço apontou semelhança com o cenário nacional, destacando os setores industrial (39,8%), residencial (24,0%) e comercial (17,9%) como os de maior consumo. Além disso, foi possível analisar o consumo de energia elétrica discriminado por município, onde foram identificados como maiores consumidores os municípios de Vitória (27,5%), Serra (10,2%) e Vila Velha (8,9%), conforme ilustrado na Figura 10.

Figura 10 - Participação setorial no consumo de energia elétrica no ES (a) e consumo de energia elétrica por município (b), em 2017.

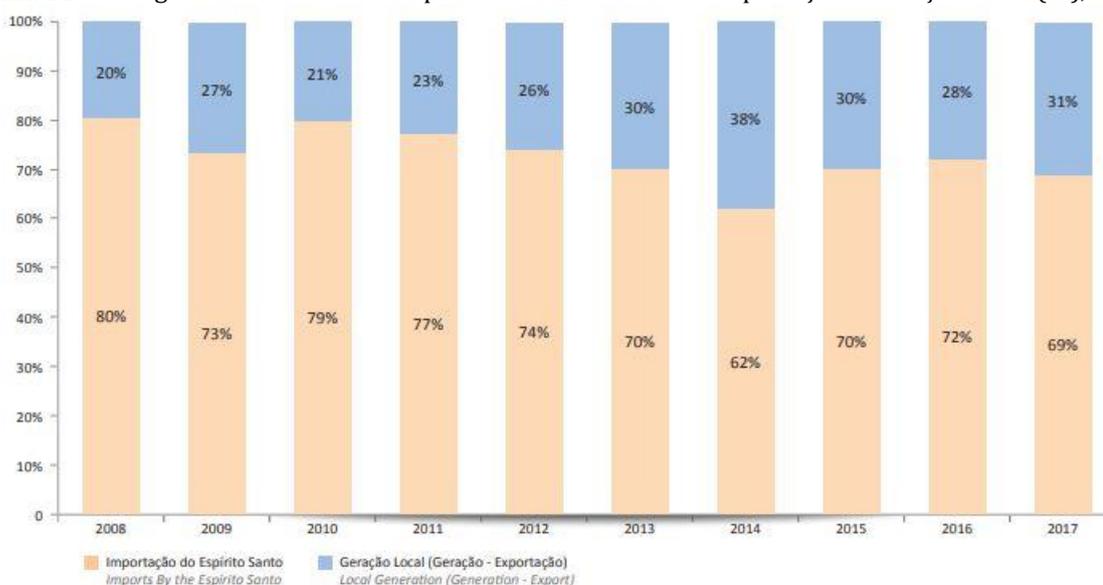


Fonte: ARSP, 2018.

A Figura 11, por sua vez, apresenta o montante de energia elétrica distribuída pelas concessionárias, relacionando a energia gerada com a energia importada pelo Espírito

Santo, entre 2008 e 2017. Por meio desses dados é possível constatar a forte dependência energética que o estado possui de outras regiões, chegando a atingir 80% de importação em 2008, caindo para 69% em 2017, devido ao aumento da geração local por hidrelétricas e óleo combustível.

Figura 11 - Energia Elétrica Distribuída pelas Concessionárias* - Importação X Geração Local (%),



Fonte: ARSPES, 2018.

Com base nas informações apresentadas, fica evidente a necessidade de alternativas que supram a crescente demanda energética, de maneira renovável, limpa e segura. Dessa forma, a EDP Escelsa (concessionária local), apoiada pelo Governo do Estado do Espírito Santo implantou o programa Bairro Solar. Tal programa promoveu a instalação de sistemas de aquecimento solar de água, em edificações residenciais da Região Metropolitana de Vitória (LIMA *et al.*, 2013).

No total, 2.149 residências receberam gratuitamente os sistemas mencionados. Segundo a EDP, a previsão é que 4.240 residências sejam contempladas até o final do programa (LIMA *et al.*, 2013). A Figura 12 mostra os bairros atendidos pelo Programa Bairro Solar até 2012.

Figura 12 - Capacidade solar térmica instalada no Estado do Espírito Santo por meio do programa Bairro Solar.

Município	Bairros	Unidades residenciais	Consumo de energia elétrica evitado (KWh)
Serra	Serra dourada I, II e III	2.149	106.161
	Eldorado	218	10.769
	Novo Horizonte	179	8.843
Vila Velha	Jacarenema	288	14.227
	Jabaeté	909	44.905
Cariacica	Prolar	98	4.841
	Itanguá	240	11.856
Castelo	Cava Roxa	112	5.533
Vitória	Nova Palestina	26	1.284
	Estrelinha	21	1.037
Total		4.240	209.456
Potência Solar Térmica Instalada (KW_{th})			5.936

Fonte: LIMA *et al.*, 2013.

Outro projeto realizado no Espírito Santo com o objetivo de difundir ações de eficiência energética e promover geração distribuída, foi a implantação de painéis fotovoltaicos na residência oficial do governador, localizada em Vila Velha, também dentro da Região Metropolitana de Vitória. Nesse caso, foi instalada uma central geradora, composta por 11 módulos fotovoltaicos, com potência nominal de 2 kW (LIMA *et al.*, 2013). Atualmente esse sistema está desativado, porém com planejamento de reativação e ampliação do potencial instalado.

Segundo a ARSPES (2018), a geração distribuída (GD) fotovoltaica no Espírito Santo é responsável apenas por 0,21% do montante total, ocupando, assim, a 17ª posição no ranking nacional, com uma capacidade instalada de 6 MW.

De maneira geral o cenário exposto demonstra, a partir dos empreendimentos solares supracitados, um forte interesse na direção de soluções energéticas baseadas no aproveitamento da energia solar, tanto por parte do poder público quanto dos próprios consumidores e, conseqüentemente, para a ampliação de fornecedores locais.

2.2 Políticas Públicas de Incentivo à Geração Distribuída

Não se pode negar a veracidade dos benefícios que a geração distribuída pode proporcionar ao sistema elétrico de um país. Pensando assim, alguns mecanismos de incentivo à geração distribuída foram criados com o objetivo não só de diversificar a matriz energética, como também de reduzir o carregamento das redes, reduzir as perdas, melhorar o nível de tensão nos períodos de pico, além de minimizar os impactos

ambientais. Dentre os mecanismos de incentivo, destacam-se o sistema *Feed-in*, o *Net-Metering*, o Sistema de Quotas e os Certificados de Energia Renovável (ANEEL, 2010).

O sistema *Feed-in* consiste no pagamento de uma tarifa vantajosa para as centrais geradoras que empregam fontes renováveis não convencionais de energia, objetivando assim, a viabilização de empreendimentos com custos de produção de energia mais elevados (ANEEL, 2010).

Já o *Net-Metering* se caracteriza pela medição do fluxo bidirecional de energia de uma unidade consumidora-geradora, a fim de registrar o montante líquido de energia no ponto de conexão, de modo que se a geração for maior que a demanda, o consumidor-gerador recebe crédito em energia ou em dinheiro, na fatura seguinte. Em contrapartida, se a geração for menor que a demanda, o consumidor-gerador pagará apenas a diferença a energia consumida e a gerada (ANEEL, 2010).

Quanto ao Sistema de Quotas, é estabelecida uma quota de energia a ser compulsoriamente adquirida pelas distribuidoras, repassando os custos de compra dessa energia mais cara aos consumidores (ANEEL, 2010).

Os Certificados de Energia são destinados a pequenas centrais geradoras, a fim de atestar a expectativa de energia renovável a ser produzida. Dessa forma, as referidas centrais recebem reconhecimento ambiental, podendo comercializar com empresas que buscam atender metas ambientais (ANEEL, 2010).

No caso do Brasil, o mecanismo de incentivo adotado é o sistema de compensação. Tal mecanismo é baseado no *Net-Metering*, onde os créditos gerados, quando a produção é maior que o consumo, são em energia (kWh), ou seja, nesse caso, não há reembolso em espécie monetária. Assim, nos meses onde o consumo é maior que a produção, esses créditos poderão ser abatidos nas próximas faturas de energia.

No Brasil, a geração distribuída só foi formalmente incentivada a partir de 2012, por meio da Resolução Normativa 482/2012. Com essa resolução foram estabelecidos, principalmente, o mecanismo de incentivo à GD e a definição de micro e minigeração. Em 2015, a referida resolução foi atualizada, entrando em vigor a Resolução Normativa 687/2015, que beneficiou ainda mais a evolução da geração distribuída no país. O quadro

da Figura 13 relaciona as principais características das resoluções mencionadas, a fim de evidenciar as mudanças ocorridas.

Figura 13 - Principais mudanças relacionadas à micro e minigeração distribuída fotovoltaica entre as Resoluções de 2012 e 2015

Resolução Normativa ANEEL n.º 482/2012	Resolução Normativa ANEEL n.º 687/2015
Microgeração distribuída – com potência instalada menor ou igual a 100kW; minigeração distribuída – com potência instalada superior a 100kW e menor ou igual a 1MW.	Microgeração distribuída – com potência instalada menor ou igual a 75kW; minigeração distribuída – com potência instalada superior a 75kW e menor ou igual a 5MW.
Minigeração distribuída – central geradora de energia elétrica, com potência instalada superior a 100 kW e menor ou igual a 1 MW para fontes com base em energia hidráulica, solar, eólica, biomassa ou cogeração qualificada, conectada na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras.	Minigeração distribuída – central geradora de energia elétrica, com potência instalada superior a 75 kW e menor ou igual a 3 MW para fontes hídricas ou menor ou igual a 5 MW para cogeração qualificada, ou para as demais fontes renováveis de energia elétrica, conectada na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras.
Sistema de compensação de energia elétrica – a energia ativa gerada por unidade consumidora com microgeração ou minigeração distribuída é cedida, por meio de empréstimo gratuito, à distribuidora local e posteriormente compensada com o consumo de energia elétrica ativa dessa mesma unidade consumidora ou outra unidade consumidora de mesma titularidade da unidade consumidora onde os créditos foram gerados, desde que possua o mesmo Cadastro de Pessoa Física ou Cadastro de Pessoa Jurídica junto ao Ministério da Fazenda.	Sistema de compensação de energia elétrica – a energia ativa injetada por unidade consumidora com microgeração ou minigeração distribuída é cedida, por meio de empréstimo gratuito, à distribuidora local e posteriormente compensada com o consumo de energia elétrica ativa.
No sistema de compensação de energia elétrica, a energia ativa gerada por UC distribuída (microgeração ou minigeração) é cedida, através de empréstimo gratuito, à distribuidora local e, após, é compensada com o consumo de energia elétrica ativa.	No sistema de compensação de energia elétrica, a energia ativa gerada por UC distribuída (microgeração ou minigeração) é cedida, através de empréstimo gratuito, à distribuidora local e, após, é compensada com o consumo de energia elétrica ativa dessa mesma UC ou de outra de mesma titularidade da UC onde os créditos foram gerados, desde que tenha o mesmo CPF ou CNPJ no Ministério da Fazenda chamado de autoconsumo remoto.
Quem pode: renováveis e cogeração qualificada.	Permite empreendimentos com múltiplas unidades consumidoras (condomínios) e geração compartilhada, caracterizada pela reunião de consumidores, dentro da mesma área de concessão ou permissão, por meio de consórcio ou cooperativa.

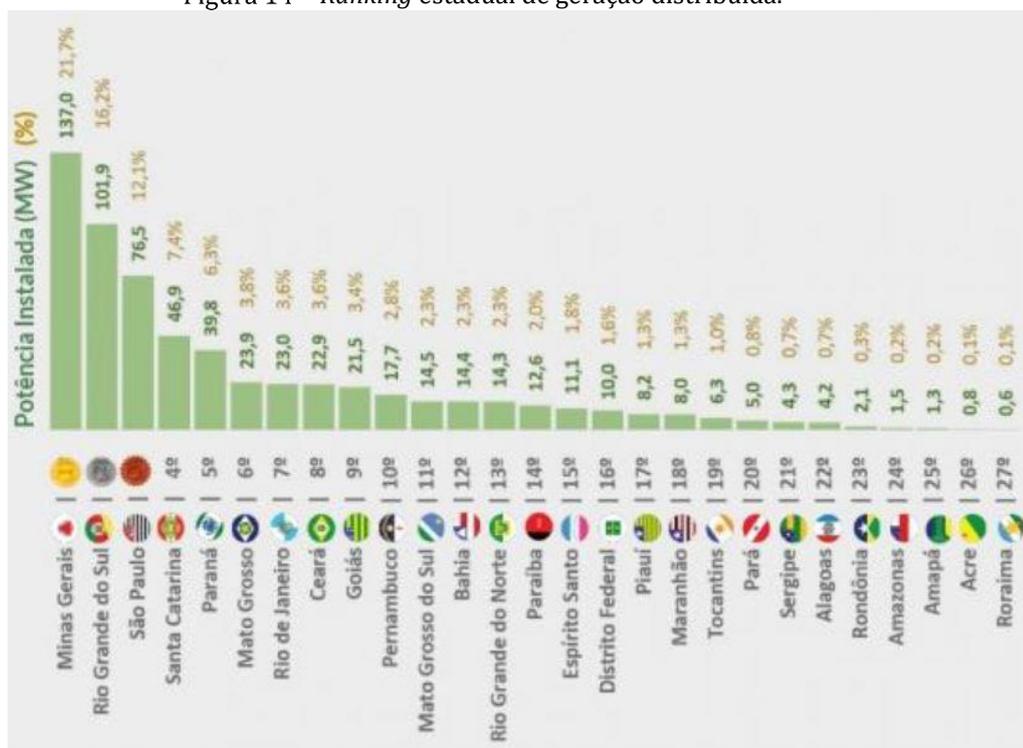
Fonte: (OLIVEIRA JUNIOR; CAMPOS; FELIPE, 2018)

A partir das RN 482/2012, as adesões ao modelo de micro e minigeração distribuída aumentaram de maneira expressiva. Atualmente, 99,6% das conexões de geração

distribuída no Brasil são de fonte solar fotovoltaica, atingindo 630,4 MW de potência instalada (ABSOLAR, 2019).

Nesse contexto, três estados brasileiros merecem destaque, por representarem cerca de 50% do total de potência instalada em GD, que são: Minas Gerais (137 MW), Rio Grande do Sul (101,9 MW) e São Paulo (76,5 MW). O *ranking* estadual de GD pode ser visualizado pela Figura 14.

Figura 14 - *Ranking* estadual de geração distribuída.



Fonte: (ABSOLAR, 2019)

A notoriedade de Minas Gerais, por exemplo, guarda relação com os incentivos adotados pelo referido Estado, no intuito de promover a geração distribuída. O Governo do Estado de Minas Gerais, além de aderir ao CONFAZ nº 16/2015 – convênio que autoriza os estados a concederem isenção de ICMS (Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços) sobre o montante de energia produzida e injetada na rede da concessionária –, consolidou tal medida por meio da Lei nº 22.549/2017 (MINAS GERAIS, 2017).

O contrário ocorre com o Estado do Espírito Santo que, embora também tenha aderido ao CONFAZ nº 16/2015, em dezembro de 2017, ainda mantém a cobrança de ICMS das unidades consumidoras-geradoras. Isso se deve a inexistência de lei e decreto estaduais que regulamentem tal isenção. Dessa forma, os empreendimentos fotovoltaicos do

Espírito Santo continuam em desvantagem, do ponto de vista econômico, uma vez que a cobrança mencionada aumenta o *payback* e a taxa interna de retorno (TIR) do investimento (OLIVEIRA JUNIOR; CAMPOS; FELIPE, 2018). Esses fatores, muitas vezes, contribuem negativamente na decisão do investidor em energia solar.

Atualmente, a cobrança de ICMS sobre a energia produzida e injetada na rede da concessionária, é vista como um grande desafio no cenário de geração distribuída fotovoltaica do Espírito Santo. Com essa conduta, o Estado deixa de incentivar o uso de energias renováveis não convencionais, bem como de atrair a cadeia produtiva da energia fotovoltaica, como instalação e manutenção, o que auxiliaria no desenvolvimento econômico do Estado.

2.3 Os Mapas Solares

Os mapas solares, associados aos Sistemas de Informação Geográfica (SIG), tornaram-se ferramentas de grande importância na tomada de decisão, comunicação e divulgação de informação, tanto para residentes das edificações como para profissionais e órgãos públicos.

No presente trabalho foi realizado um levantamento e análise dos principais mapas solares existentes no mundo com a finalidade de conhecer suas características e metodologias. Com isso, foram identificados dois tipos básicos de mapas solares: os estáticos e os interativos.

Os mapas solares estáticos se apresentam na forma de uma imagem do território analisado e indicam apenas as condições climáticas locais (distribuição da radiação recebida e potencial solar, por exemplo), sem nenhum tipo de diálogo ou interação com o usuário. Já os mapas interativos, também chamados de dinâmicos, além de apresentarem diversos tipos de informações simultaneamente, de acordo com o interesse do usuário, possuem alta resolução e podem expor essas informações de maneira individual, como por edificação.

No caso dos mapas interativos, ao acessar a plataforma *online* onde eles se encontram, é possível selecionar a cobertura da edificação de interesse e obter informações como o potencial solar (kWh/m²), a economia com energia convencional da rede (\$), sugestão de

tipo de sistemas (coletor solar, painel fotovoltaica ou sistema híbrido), tempo de retorno do investimento e indicação de profissionais instaladores na região.

Essas informações colaboram na tomada de decisão pela implantação ou não de um sistema de aproveitamento solar. Além dessa, existem outras várias vantagens, apresentadas pelos mapas solares interativos, justificando o fato de estarem em vigor em vários países, em pleno processo de expansão, alcançando cada vez mais cidades, com o intuito de promover o uso da energia solar no ambiente urbano.

Por outro lado, a diversidade encontrada entre os mapas solares está associada aos variados métodos de elaboração, o que deve ser considerado quando se deseja desenvolver essa ferramenta. Em consequência disso, cada cidade ou região adota um determinado método segundo suas necessidades, informações e recursos disponíveis.

Assim, as metodologias de elaboração de mapas solares, cujas informações encontraram-se disponíveis, são apresentadas a seguir, como forma de obter auxílio na estruturação do método do mapa solar aqui proposto.

2.3.1 *Mapas Solares Internacionais*

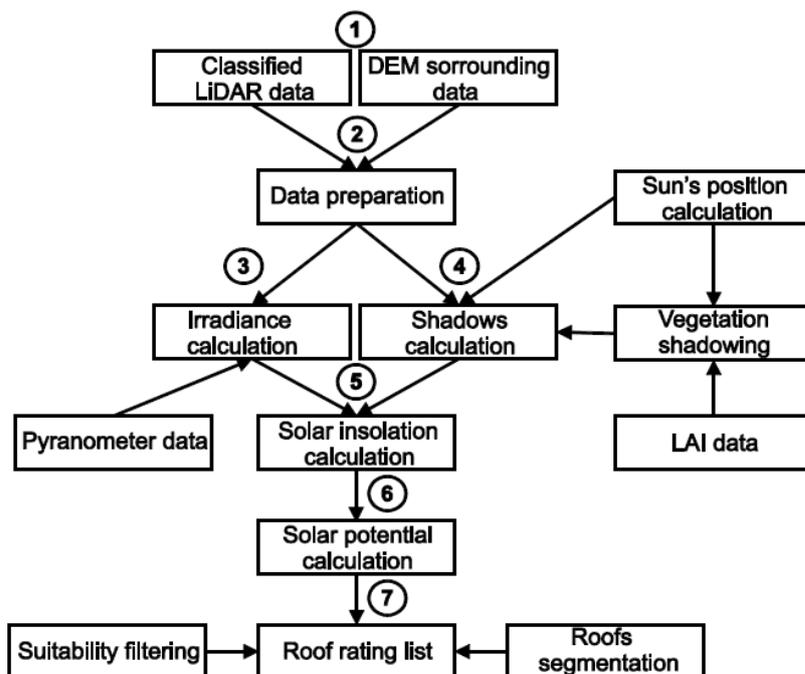
Os países que mais utilizam os mapas solares interativos como ferramenta informativa são os Estados Unidos, Alemanha e Espanha. Embora esses países estejam no *ranking* quanto ao uso da energia solar, não significa que eles sejam os maiores detentores de potencial solar do mundo, mas sim, que possuem grandes incentivos de seus governos para investimentos em tecnologias de aproveitamento solar.

Como mencionado anteriormente, os mapas solares interativos estão em plena expansão e muitos são os métodos existentes de elaboração dessa ferramenta. Neste contexto, Kanters, Wall e Kjellson (2014) consideram que o método mais comum para se desenvolver esse tipo de mapa é o apresentado na Figura 15 e descrito por (LUKAC *et al.*, 2013).

O esquema apresentado da Figura 15 sugere o uso de dados LiDAR, cujo acrônimo provém do inglês, *Light Detection And Ranging*, que consiste em dados 3D coletados por escaneamento a laser da área estudada. Além disso, o método utiliza o modelo de elevação digital (DEM – *Digital Elevation Model*), também conhecido como MDT (Modelo Digital do

Terreno), que também é uma representação 3D do terreno; e o LAI (*Leaf Area Index*), que são dados 3D que descrevem a troca de fluxos de energia e massa, como por exemplo, água e CO₂ (KANTERS; WALL; KJELLSON, 2014).

Figura 15 - Metodologia frequente de elaboração de mapas solares



Fonte: LUKAC *et al*, 2013.

Segundo Lukac e outros (2013), as etapas da metodologia indicada da Figura 15 são:

1 - A entrada é um conjunto classificado de pontos LiDAR que são georreferenciados com o GPS, em português, Sistema de Posicionamento Global. O terreno fora da área de interesse é representado pelo MDE (Modelo de Elevação Digital) com menor resolução do que a área de interesse. Os dados baseados em grid DEM são usados para recuperar as propriedades topográficas das colinas e montanhas próximas;

2 - Os dados LiDAR classificados são organizados em uma estrutura 2D de grid regular. Os vetores normais das superfícies são calculados para cada ponto dentro de cada célula para determinar a inclinação e os ângulos por ponto;

3 - As irradiâncias (direta e difusa) são calculadas, por ponto, utilizando os dados horários coletados de piranômetros, para cada dia do período analisado;

4 - A irradiância solar calculada em função do tempo, por ponto, é subtraída da influência do sombreamento provocado pelo entorno. O sombreamento da vegetação é calculado de forma diferente do sombreamento de objetos sólidos, levando em consideração a transparência dependente do tempo da vegetação. Esse sombreamento variável da vegetação é conseguido estimando o coeficiente de absorção da luz solar com base nos dados estatísticos da vegetação (LAI). A influência da sombra do terreno em torno da área escaneada é derivada do DEM;

5 - A insolação solar diária é calculada como a soma das irradiações solares do nascer ao pôr-do-sol, ou seja, quilowatt-hora por metro quadrado (kWh/m²);

6 - O potencial solar é definido como a insolação solar anual, calculada como a insolação diária média;

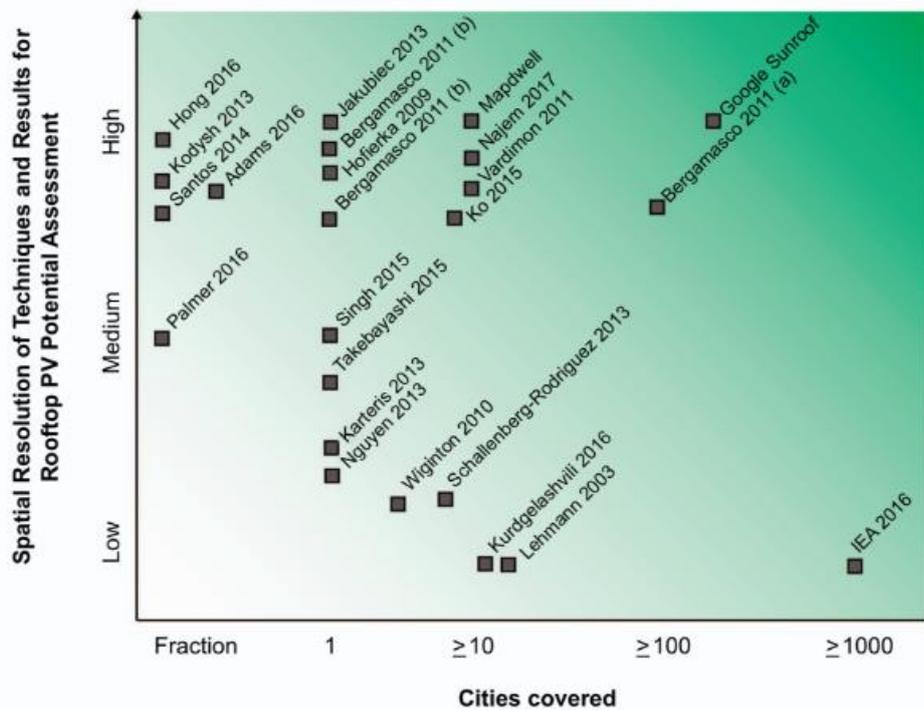
7 - Uma lista de classificação dos potenciais solares das coberturas é gerada, considerando as superfícies úteis, filtrando as inadequadas (por exemplo, patrimônio cultural, edifícios protegidos, telhados altamente inclinados e chaminés).

Inicialmente, esse método foi aplicado na cidade de Maribor, na Eslovênia. Depois, alcançou cidades como Boston, Los Angeles, Madison e Cambridge (BRUMAN; LUKAC; ZALIK, 2014).

Califórnia, Colorado e Nova York também dispõem de mapas solares desenvolvidos pelo método supracitado, disponível gratuitamente na página do Mapdwell, na internet (MAPDWELL, 2013a).

Castellanos, Sunter e Kammen (2017) analisaram 24 publicações referentes à metodologia de mapas solares, avaliando suas características funcionais, interatividade e abrangência. Esse estudo considera que os mapas Mapdwell possuem alto nível de resolução espacial das técnicas e resultados e isso significa que foram utilizados métodos avançados para digitalização do telhado, cálculos de insolação e contabilização de aspectos e sombreamento de edifícios. A Figura 16 mostra o gráfico da resolução espacial das técnicas e resultados *versus* quantidade de cidades cobertas pelos mapas analisados.

Figura 16 - Resolução espacial das técnicas e resultados por quantidade de cidades cobertas



Fonte: CASTELLANOS; SUNTER; KAMMEN (2017).

Os mapas solares Mapdwell possibilitam ao usuário avaliar o potencial solar inserindo o endereço da edificação e clicando na cobertura de interesse. Também é possível desenhar um polígono para calcular o potencial fotovoltaico de uma parte específica do telhado, bem como obter informações a respeito dos custos e economias decorrentes da instalação de um sistema de aproveitamento solar. Além disso, a plataforma indica e divulga o contato de possíveis empresas instaladoras mais próximas (FISH; CALVERT, 2016). A Figura 17 mostra a interface do mapa solar interativo da cidade de Cambridge, disponível na página do Mapdwell.

Quanto aos operadores de interação, os mapas do Mapdwell permitem ao usuário filtrar os resultados visíveis, ampliar a imagem (zoom), importar e exportar dados (FISH; CALVERT, 2016).

Figura 17 - Interface do mapa solar Mapdwell de Cambridg

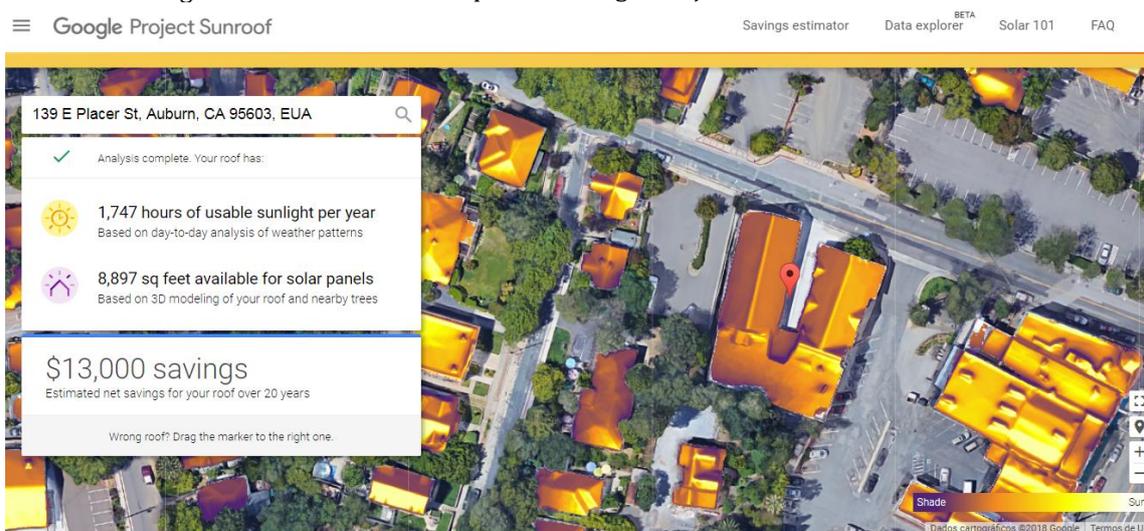


Fonte: MAPDWELL, 2013b.

Castellanos, Sunter e Kammen (2017) também classificam os mapas solares desenvolvidos pela Google – Google Project Sunroof – como de alto nível. Embora existam muitas funcionalidades no Google Project Sunroof, ele também se baseia na metodologia descrita por Lukac *et al.* (2013).

O Google Project Sunroof, que já atende mais de 50 estados norte-americanos (GOOGLE, 2015), possui funcionalidades e operadores de interação semelhantes ao Mapdwell. Sua interface pode ser observada na Figura 18, onde está exposto o mapa solar interativo da Califórnia, disponível na página do Google Project Sunroof.

Figura 18 - Interface do mapa solar Google Project Sunroof da Califórnia



Fonte: GOOGLE, 2015.

No outro extremo do estudo de Castellano, Sunter e Kammen (2017) estão os mapas classificados como de baixo nível, como os descritos no relatório de Perspectivas de Tecnologia de Energia, da IEA (Agência Internacional de Energia). Essa abordagem abrange mais de 1.500 cidades e utiliza principalmente dados estatísticos na elaboração dos mapas solares.

A metodologia adotada na abordagem da IEA é mais simplificada que a descrita anteriormente, e se aplica a análises globais de potencial solar. Assim, para estimar a área adequada do telhado para aproveitamento solar, esse método utiliza apenas duas etapas (IEA, 2016), que são:

- 1 – Derivação de uma relação empírica, ligando a densidade populacional das cidades e a área do telhado *per capita* disponível para aproveitamento solar;
- 2 – Em seguida, são estimadas as densidades populacionais para as cidades, o que permite, com a relação empírica entre a densidade populacional e a área do telhado *per capita*, uma estimativa do potencial total do telhado.

A metodologia descrita por IEA (2016) foi aplicada a todo território da União Europeia. O resultado obtido foi a constatação de aproximadamente 4.600 quilômetros quadrados de área de telhado apropriada para aproveitamento solar (LEHMANN; PETER, 2003).

Outro método considerado significativo para o presente estudo, é o utilizado na elaboração do Mapa Solar Interativo de Concepción, no Chile.

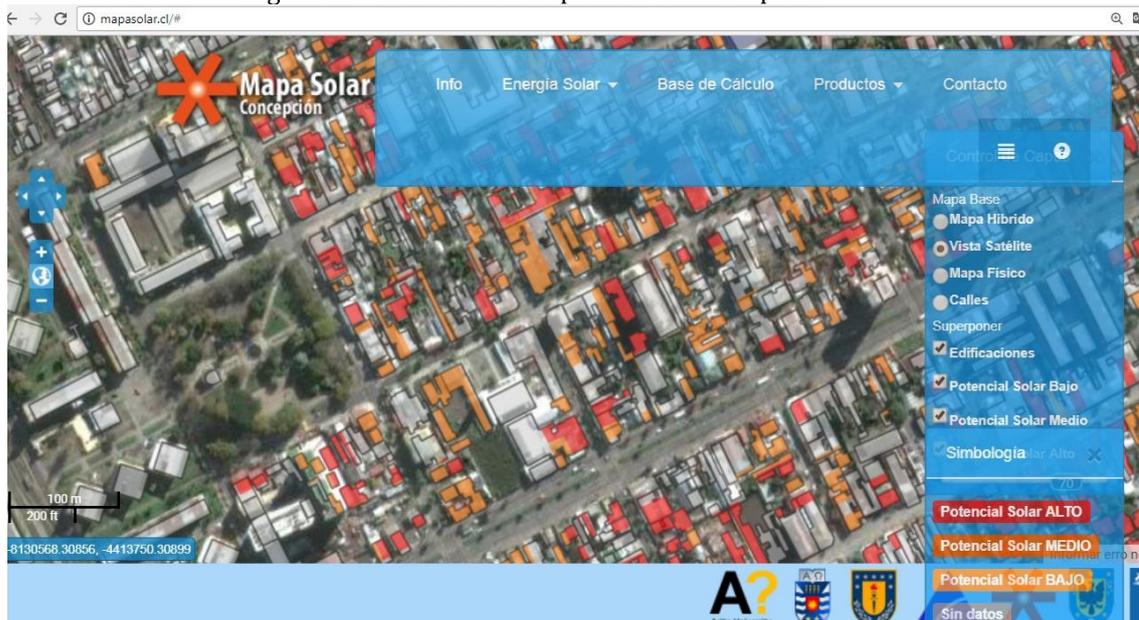
Baeriswyl-Rada, García-Alvarado e Sandoval-Quezada (2016) apresentam uma metodologia para determinação do potencial solar em modelos territoriais urbanos mediante Sistema de Informação Geográfica (SIG), aplicada à cidade de Concepción, no Chile. Para isso, foi necessário contar com o MDT (Modelo Digital de Terreno), que corresponde a um arquivo de imagem com informação territorial geográfica; com arquivos de informação digital sobre edificações e vegetação existentes; e com mapas de radiação solar.

A análise desses arquivos se deu por meio do *software* ArcGIS, que consiste em um SIG (Sistema de Informação Geográfica), capaz criar mapas e realizar análises avançadas a partir de informações constantes em mapas e bancos de dados (ARCGIS, 2016). Com a associação dos arquivos no ArcGIS e utilização da ferramenta *Area Solar Radiation*, é possível conhecer a radiação anual em watts que se recebe em uma hora, por metro quadrado, e assim classificar as áreas estudadas com relação ao nível de recurso da energia solar disponível (BAERISWYL-RADA, GARCÍA-ALVARADO, SANDOVAL-QUEZADA, 2016).

As informações obtidas foram divulgadas, gratuitamente, em uma plataforma na *internet*, possibilitando ao usuário conhecer o potencial de aproveitamento solar da cobertura da edificação de interesse, por meio de uma graduação de cores, onde: vermelho indica alto potencial, laranja significa potencial médio e amarelo, baixo potencial (CON*FIN, 2016).

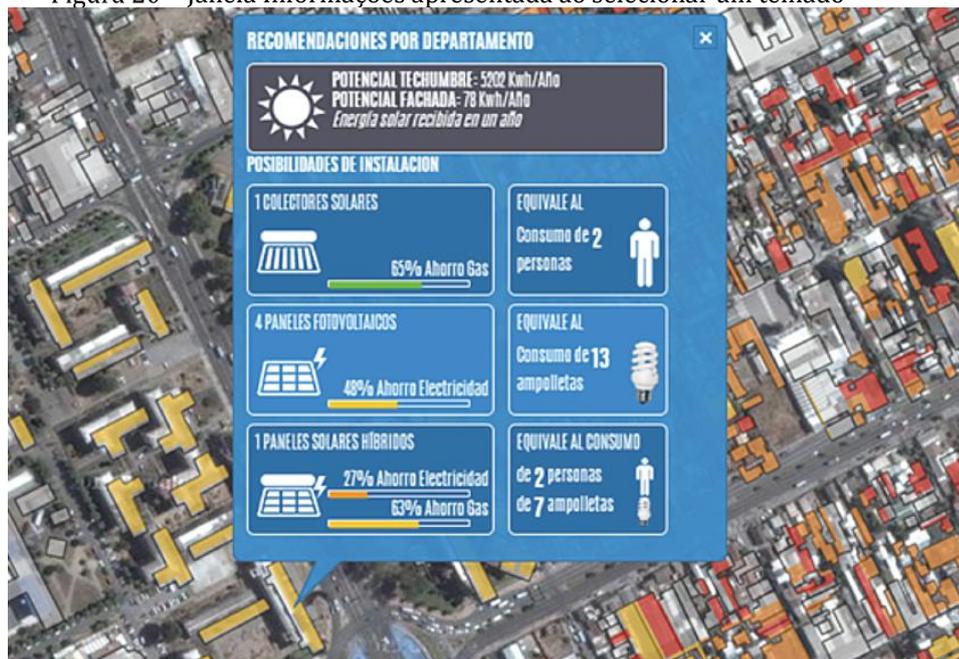
Além disso, acessando a cobertura de interesse, uma caixa de diálogo se abre exibindo informações sobre as possíveis economias com gás GLP e energia elétrica convencional da rede, ao instalar painéis fotovoltaicos, coletores solares ou um sistema híbrido, que abarca ambas as tecnologias (CON*FIN, 2016). As Figuras 19 e 20 apresentam a interface do mapa solar interativo de Concepción.

Figura 19 - Interface do mapa solar de Concepción



Fonte: CON*FIN, 2016.

Figura 20 - Janela Informações apresentada ao selecionar um telhado



Fonte: CON*FIN, 2016.

2.3.2 Mapas Solares Brasileiros

No Brasil atualmente se verifica um grande empenho na elaboração de mapas solares. Embora todo território nacional conte com mapas solares, a grande maioria não possui qualquer interatividade, exceto o mapa solar do Rio de Janeiro.

A Secretaria de Estado de Desenvolvimento Econômico, Energia, Indústria e Serviços do Rio de Janeiro (SEDEIS), em conjunto com o Instituto Pereira Passos (IPP), a EPE e a Cooperação Alemã GIZ (*Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit*), desenvolveram o Mapa Solar do Rio de Janeiro, com a finalidade de expor ao usuário informações a respeito da irradiação solar nas coberturas das edificações da cidade (PCRJ, 2015a).

O Mapa Solar do Rio de Janeiro foi elaborado utilizando instrumentos de geoprocessamento (ArcGis) para calcular a irradiação global incidente nos telhados das edificações, considerando o sombreamento das construções vizinhas e demais obstáculos, como vegetação e relevo. O cálculo foi realizado para duas datas específicas – 22 de dezembro (solstício de verão) e 20 de junho (solstício de inverno) de 2015 –, exatamente quando foram registradas a mais alta e a mais baixa irradiação solar, respectivamente (PCRJ, 2015b).

O dado de entrada principal do algoritmo de confecção do referido mapa é o MDS (Modelo Digital de Superfície). O MDS é um arquivo de imagem *raster*, onde cada *pixel* contém o valor de elevação do local geográfico. Com um MDS é possível obter a altura das edificações e, até mesmo, da vegetação e demais obstáculos para a incidência solar da região (PCRJ, 2015b).

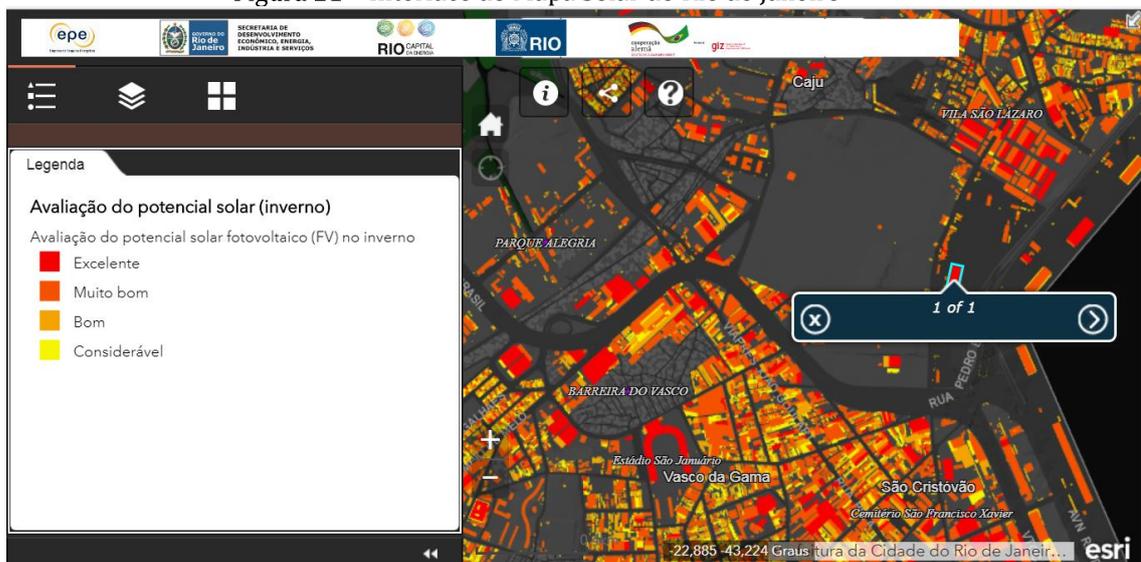
Nesse caso, o MDS foi obtido por meio da reunião de um modelo digital territorial (MDT) e uma base de dados com geometria e altura de cada edificação – ortofotos – disponibilizados pelo IPP (Instituto Pereira Passos)(PCRJ, 2015b).

Os dados requeridos foram processados por ferramentas que simulam a irradiação solar e calculam a insolação sobre a superfície de interesse, com base em métodos do algoritmo do campo de visão hemisférico (*viewshed*). Assim, o cálculo da irradiação direta, difusa e global foi repetido para cada *pixel* do *raster* MDS, produzindo o mapa de irradiação da área de estudo (PCRJ, 2015b).

Outros parâmetros fundamentais para a alimentação do algoritmo são a taxa de irradiação difusa e a transmissividade. A taxa de irradiação difusa varia entre 0,2 (céu claro) e 0,7 (céu coberto); já a transmissividade é a taxa da irradiação solar que de fato atinge a superfície sem ser filtrada pela atmosfera (PCRJ, 2015b).

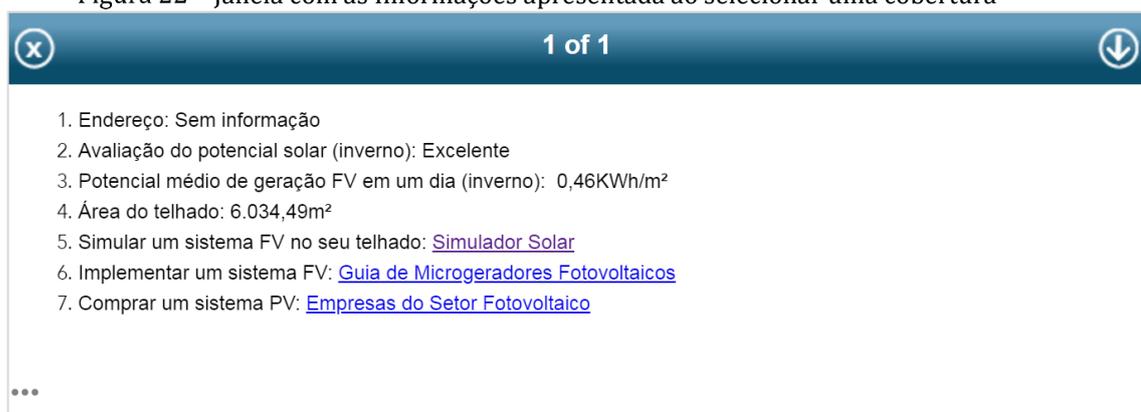
Quanto às funcionalidades, o Mapa Solar do Rio de Janeiro indica o potencial solar individualmente dos telhados da cidade, por meio das cores vermelha (excelente: > 95% do máximo), laranja (muito bom: > 85%), laranja-claro (bom: > 70%) e amarelo (considerável: < 70%). O referido mapa também informa o potencial médio de geração de energia fotovoltaica, em kWh/m², simula um sistema fotovoltaico no telhado e indica empresas instaladoras/comercializadoras desses sistemas. As Figuras 21 e 22 mostram a interface do Mapa Solar do Rio de Janeiro (PCRJ, 2015b).

Figura 21 - Interface do Mapa Solar do Rio de Janeiro



Fonte: PCRJ, 2015b.

Figura 22 - Janela com as Informações apresentada ao selecionar uma cobertura



Fonte: PCRJ, 2015b.

Comparando o único mapa solar interativo brasileiro com os mapas internacionais, percebe-se quanto à metodologia que, embora o Mapa Solar do Rio de Janeiro utilize dados mais acessíveis, como ortofotos ao invés de LiDAR, ele também atende à finalidade

de divulgar informações a respeito do potencial solar nas coberturas, como forma de fomentar a geração de energia distribuída no ambiente urbano.

Quanto à interface, nota-se que os mapas internacionais, como o Project Sunroof da Google, são mais detalhados que o mapa do Rio de Janeiro. O Project Sunroof, por exemplo, considera e exibe a inclinação do telhado. Com isso é possível identificar o melhor lado da cobertura para captação da irradiação solar.

O mesmo pode-se dizer com relação às funcionalidades. Os mapas internacionais de alto nível possuem um número de funcionalidades e operadores de interatividade maior que o Mapa Solar do Rio de Janeiro. Possivelmente, essa desproporção se deve à quantidade de recursos e/ou informações disponíveis para a realização de cada mapa, mas que, da mesma forma, não interfere no cumprimento dos objetivos postos.

2.4 Sistemas de captação solar

Os avanços tecnológicos advindos de pesquisas científicas resultaram em diversos processos, como os sistemas de arrefecimento, geração de energia elétrica e aquecimento solar. Este último, particularmente, obteve significativas melhorias nos últimos vinte anos, seja para fornecimento de eletricidade ou para necessidades residenciais (PEREIRA, 2017).

Outro ponto que tem demonstrado evolução considerável é a geração de energia fotovoltaica, que se apresenta como um dos principais contribuintes para o aumento da utilização da energia solar na matriz energética mundial (PEREIRA, 2017). À vista disso, as seções subsequentes dissertam sobre as tecnologias de aquecimento de água e geração de energia elétrica, a partir do Sol como fonte energética.

2.4.1 Sistemas de Aquecimento Solar (SAS)

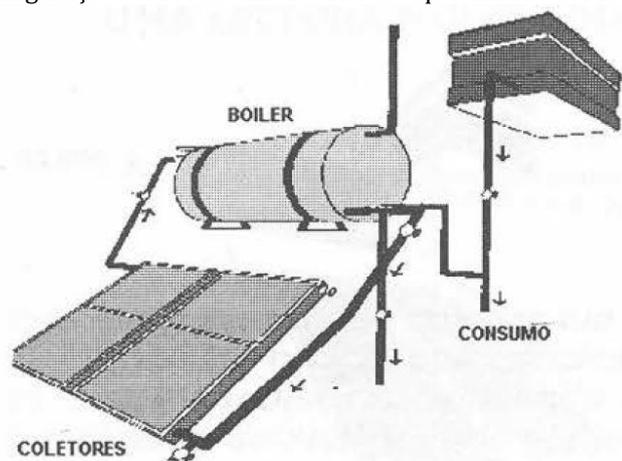
A energia solar como alternativa para substituição da eletricidade ou de sistemas a gás para a calefação de água em chuveiros, tem sido a forma mais utilizada dessa fonte energética no Brasil. Este fato ocorre principalmente devido à facilidade de acesso à essa tecnologia no mercado brasileiro, à simplicidade do processo de transformação da energia solar para a térmica, além de ser viável economicamente.

Outro fator de encorajamento para o uso destes sistemas são os incentivos governamentais, como por exemplo: isenção de impostos, obrigatoriedade de uso em determinadas situações, oferta gratuita de equipamentos através de programas de eficiência energética da ANEEL e adoção em edificações dos programas de moradias de interesse social como o Minha Casa Minha Vida (PEREIRA *et al.*, 2017). Alguns trabalhos, como o de Giglio e Lamberts (2016), que tiveram como objeto de estudo sistemas alocados em conjuntos habitacionais, atestaram, de acordo com seus resultados, a eficiência dessa tecnologia (PEREIRA *et al.*, 2017).

Devido a utilização do chuveiro elétrico ser predominante no Brasil, quando há uma mudança para aquecedores solares, a economia de energia é iminente, o que acarreta em economia financeira, visto que a eletricidade possui valor elevado, além de sua distribuição ser mutável de acordo com a disponibilidade dos recursos hídricos, que são a maior fonte geradora de energia elétrica no país. Com isso, pode-se afirmar que o aquecimento solar é uma ótima alternativa para a calefação de água nas residências unifamiliares, tanto devido à economia do consumo de energia elétrica quanto pela questão financeira (PEREIRA *et al.*, 2017).

O sistema de aquecimento de água por meio da energia solar funciona de acordo com a passagem do calor entre os componentes do conjunto, conforme ilustrado na Figura 23, e é formado basicamente pelos seguintes itens: as placas, que são os coletores solares; e o boiler que funciona como reservatório térmico, além dos tubos e canalizações (QUINTEROS, 2001).

Figura 23 - Configuração básica de um sistema de aquecimento solar de água.



Fonte: Quinteros, 2001.

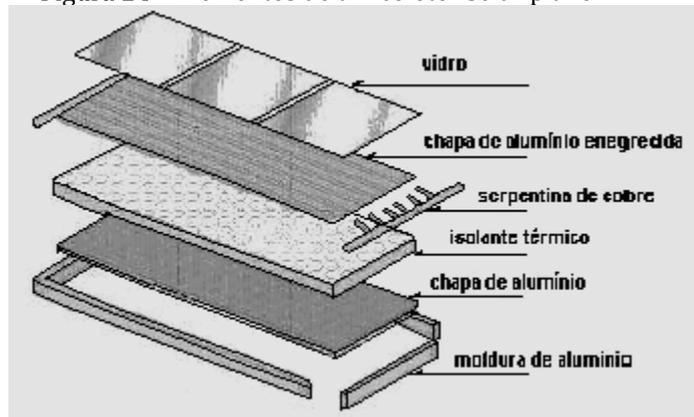
O *boiler* é fabricado em alumínio e possui revestimento interno em aço inoxidável ou em cobre e tem a função de armazenar a água aquecida para que seja consumida posteriormente. Internamente, a água quente se junta à fria ficando a água quente sempre na parte superior do reservatório. Para os dias em que não há radiação solar suficiente para o aquecimento da água, o boiler possui uma resistência elétrica que permite que esse processo ocorra, e que seja acionado ou desligado de acordo com a temperatura registrada através de um termostato. Para o armazenamento da água quente por vários dias, de forma a aproveitar os dias de maior radiação, o equipamento é revestido internamente por poliuretano expandido, que permite o estoque da água quente sem precisar do acionamento da resistência por várias horas. Quanto à localização, o boiler pode ser alocado abaixo da caixa fria, chamado boiler de desnível, ou no mesmo nível da caixa, conhecido como boiler de nível. A escolha vai depender da altura da cumeeira da edificação (QUINTEROS, 2001).

De acordo com Goswamu (2014), o coletor solar é o elemento responsável por captar e converter a energia radiante do Sol em energia térmica. Para tal, existem dois tipos fundamentais: os coletores de concentração e os coletores planos.

O coletor de concentração centraliza a energia do Sol que alcança o refletor parabólico, ou a lente Fresnel, para um absorvedor relativamente pequeno (QUINTEROS, 2001). Ao passo que, o coletor plano, representado pela Figura 24, em foco neste trabalho, se caracteriza pela existência dos seguintes componentes:

- Vidro: tem como principal objetivo ocasionar o “efeito estufa”, processo em que a luz solar incidente no vidro se infiltra em parte para dentro do coletor, e a outra parte é refletida. Nesta reflexão, os raios infravermelhos que compõem a luz, não são capazes de transpor o vidro, o que acarreta no aquecimento que auxiliará na calefação da água que circula pelos tubos de cobre;
- Tubo de cobre: conduz a água durante seu aquecimento pela luz solar. O metal cobre configura-se como um bom condutor, sendo capaz de absorver o calor do coletor e transmitir para a água;
- Chapa de alumínio enegrecida: auxilia o processo de aquecimento do coletor. Devido a sua cor escura, possui maior absorção do calor advindo da luz do sol, sendo capaz de propagá-lo para os tubos de cobre e de modo consequente para a água;
- Poliuretano expandido ou lã de vidro: possuem propriedades isolantes, sendo utilizados no coletor de modo a manter o calor adquirido por meio da radiação solar, impedindo sua evasão para o ambiente.

Figura 24 - Elementos de um coletor solar plano.



Fonte: Quinteros, 2001.

De acordo com Giglio e Lamberts (2016) o uso de SAS em habitações de interesse social tem promovido a inclusão dessa tecnologia e beneficiado mais de 300.000 famílias de baixa renda no Brasil. Nesse caso, é possível afirmar que a economia proporcionada pela aplicação desse sistema pode chegar, em média, a 18,6 kWh por pessoa (GIGLIO; LAMBERTS, 2016). Ainda de acordo com Giglio e Lamberts (2016), a falta de compreensão tecnológica e a dificuldade em realizar a mistura de água fria e quente, apresentam-se como os principais pontos do uso ineficiente do sistema.

2.4.2 *Sistemas Fotovoltaicos (FV)*

Atualmente, os avanços relacionados às tecnologias fotovoltaicas estão reformulando as relações entre os interessados e trazendo novos desafios e oportunidades sociais e técnicas às cidades (FISH; CALVERT, 2016).

Dessa forma, desenvolvedores de tecnologia FV procuram oportunidades de geração, localizadas perto dos centros de consumo. Somado a isso, incentivos governamentais e a queda de custos têm promovido o avanço dos sistemas FV nos centros urbanos. Ademais, proprietários vêm cada vez mais manifestando interesse em se tornar produtores de eletricidade, bem como consumidores, também conhecidos como "prosumidores" ou no original em inglês, "*prosumers*"(FISH; CALVERT, 2016).

Vale ressaltar que ambos os grupos estão interessados principalmente no potencial de produção energética do local, bem como no desempenho econômico da aplicação do sistema FV (FISH; CALVERT, 2016).

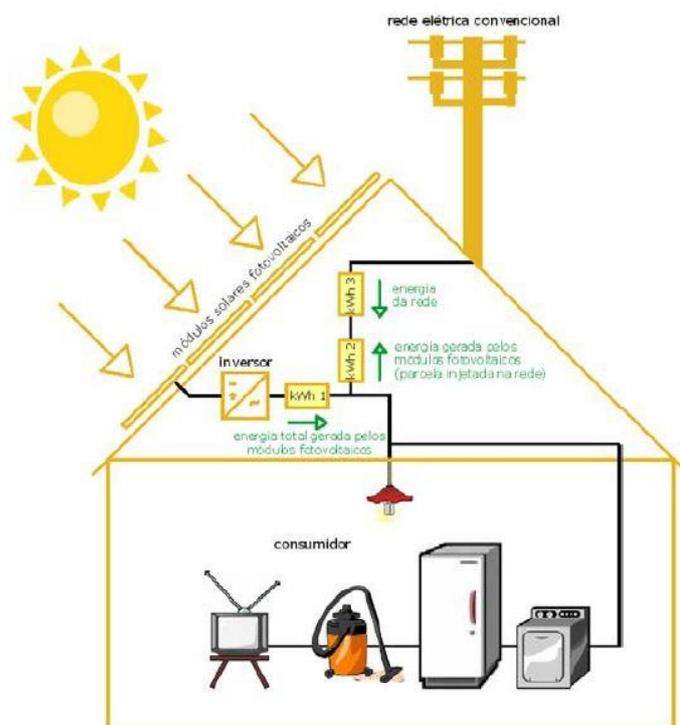
Segundo Pereira e outros (2017), a geração fotovoltaica de energia elétrica tem um grande potencial no Brasil, tanto para usinas de grande porte centralizadas e instaladas em solo, como para a geração fotovoltaica distribuída integrada em telhados e coberturas de edificações.

O modelo de Geração Distribuída, tem sido o mais utilizado no território brasileiro, principalmente nas zonas urbanas. Sua viabilidade é explicada devido às altas tarifas de eletricidade convencionais das distribuidoras de energia, e sua utilização aumenta à medida que essas tarifas sofrem reajustes. Outro fator que a torna viável é a disponibilidade de irradiação anual nos telhados e coberturas das edificações, pois quanto maior este potencial, maior sua aplicação (PEREIRA *et al.*, 2017).

Devido às suas vantagens, como a mínima manutenção exigida, a ausência de peças móveis, de ruído e poluição, e o fato de utilizar uma fonte quase inesgotável de energia, os geradores solares fotovoltaicos que são incorporados aos edifícios e conectam-se à rede elétrica pública, tem ganhado cada vez mais importância e sido cada vez mais utilizados no Brasil e no mundo (PEREIRA *et al.*, 2017). A Figura 25 ilustra os componentes básicos

de um sistema fotovoltaico integrado a uma edificação residencial e interligado à rede elétrica convencional.

Figura 25 - Esquema de um sistema FV integrado a uma residência urbana e interligado à rede elétrica convencional.



Fonte: Rütther, 2004.

Um sistema solar FV associado a uma edificação e conectado à rede elétrica é constituído por vários elementos, tais como: módulos fotovoltaicos, inversor, sistema de fixação ao envoltório da construção, diodos de *bypass*, diodos de bloqueio, fusíveis, disjuntores, cabos elétricos, terminais, proteções contra sobretensões e descargas atmosféricas e caixas de conexão (RÜTHER, 2004).

Os fusíveis são frequentemente utilizados na proteção do cabeamento contra sobrecorrentes e os diodos de bloqueio são empregados para evitar circulação de corrente reversa por um *string*, que é um conjunto de módulos conectados em série (RÜTHER, 2004).

Os diodos de *bypass*, por sua vez, são normalmente aplicados a *strings* com tensão de circuito aberto maior que 30V, a fim de isolar tal *string* e evitar que atue como uma carga, em caso de sombreamento parcial. É importante que os cabos empregados nesses sistemas tenham resistência aos raios ultravioleta e isolamento duplo (RÜTHER, 2004).

O inversor é o dispositivo responsável pela conversão da energia gerada pelos módulos fotovoltaicos, em energia apropriada para uso. Em síntese, o inversor converte corrente contínua em corrente alternada, além de adequar a tensão e a frequência segundo a rede local, e com baixo teor de harmônicos (RÜTHER, 2004).

Já as proteções contra sobretensões e descargas atmosféricas visam isolar o sistema de transientes de tensão indesejáveis. Embora os módulos fotovoltaicos atuais apresentem uma maior transigência a picos de tensão (6kV), alguns itens eletrônicos, como por exemplo o sistema inversor, precisam ser protegidos contra surtos de tensão, proteção esta que geralmente é instalada nas caixas de conexão (RÜTHER, 2004).

O sistema de fixação é a estrutura que conecta os painéis à estrutura da edificação e deve tolerar todos os esforços mecânicos, como os provenientes dos ventos, bem como as contrações/expansões térmicas da estrutura (RÜTHER, 2004).

Quanto aos módulos solares, estes são elementos compostos por células fotovoltaicas formadas por material semicondutor, com a capacidade de converter diretamente a luz solar em eletricidade. Esse fenômeno é chamado de Efeito Fotovoltaico (VILLALVA, M; GAZOLA, 2013).

No que se refere à aplicação, os sistemas fotovoltaicos são apropriados para integrar o envelope da edificação, podendo, assim, desempenhar tanto a função de gerar energia, quanto de revestir a construção. No último caso, os módulos podem funcionar como elemento arquitetônico, compondo a cobertura, as paredes, as fachadas ou, até mesmo, as janelas (RÜTHER, 2004).

A integração de sistemas fotovoltaicos às edificações é conhecida na literatura pelo termo BIPV (do inglês, *Building Integration Photovoltaics*). Os BIPV incorporam os componentes fotovoltaicos diretamente aos elementos construtivos das edificações, como telhas e vidros, proporcionando um efeito *hight-tech* e eco-sustentável onde são instalados (BODON; PELEGRINI; HEEMAN, 2013).

A indústria fotovoltaica tem se dedicado a desenvolver produtos voltados para a utilização na envoltória da edificação (RÜTHER, 2004). Em razão disso, a gama de elementos BIPV disponíveis no mercado está em considerável expansão e vem crescendo

cada vez mais em países de economia desenvolvidas (BODON; PELEGRINI; HEEMAN, 2013).

No Brasil, os elevados custos e a ausência de incentivos ainda inviabilizam a aplicação de tecnologias BIPV. Entretanto, espera-se que o aumento do interesse por edifícios sustentáveis amplie a adoção dessa tecnologia tornando assim o investimento em BIPV mais atraente, ao longo do tempo (BODON; PELEGRINI; HEEMAN, 2013).

Ainda quanto à aplicação de tecnologias FV, um aspecto importante de se observar é o rendimento dos sistemas. A intensidade da radiação solar incidente é um fator que exerce grande influência no rendimento de sistemas FV. Tal fator depende essencialmente da localização geográfica da instalação, das condições climáticas, das condições de contorno, da orientação e inclinação da cobertura, além da temperatura dos painéis, do sombreamento, da resistência dos condutores e da limpeza dos painéis (RÜTHER; SALAMONI, 2011).

Nesse contexto, Santos, Palermo e Rüter (2009) ressaltam que o traçado das vias urbanas define a configuração e o alinhamento dos lotes, de modo a influenciar no posicionamento da edificação dentro dos lotes, e, conseqüentemente, na orientação das coberturas.

De forma semelhante, através de estratégias bioclimáticas aplicadas ao projeto de arquitetura, seria possível adequar as edificações ao posicionamento do terreno, aproveitando, assim, a irradiação solar de forma mais eficiente possível, seja por permitir a maximização da insolação em uma das águas, quanto por possibilitar recebimento de insolação em todas as águas do telhado (SANTOS; PALERMO; RÜTHER, 2009).

Assim, com base nas menções de Rüter e Salamoni (2011) e Santos, Palermo e Rüter (2009), constata-se que a partir de um planejamento urbano apropriado e da prática de uma metodologia projetual que considere as condições do entorno é possível influenciar de maneira positiva no rendimento dos sistemas FV.

3 METODOLOGIA

Este capítulo descreve as principais etapas metodológicas adotadas para o desenvolvimento da pesquisa, indicando as estratégias e as etapas utilizadas para atingir o objetivo inicialmente proposto.

O aporte teórico apresentado no Capítulo 2, além de compor o estado da arte do tema estudado, auxiliou na definição da metodologia adotada. Conforme descrito na Seção 2.3, em especial, em relação às características e métodos de mapas solares interativos existentes, foi possível classifica-los em alto, médio e baixo níveis, possibilitando constatar que os mapas solares de alto nível demandam dados onerosos e de difícil calibração, além de recursos computacionais de grande porte, o que dificulta a utilização dos mesmos procedimentos. Já os mapas de baixo nível, por sua vez, apresentam poucos recursos, não possuem interatividade e se aplicam à análises generalizadas de potencial solar, divergindo do objetivo deste trabalho.

Em contrapartida, dentre os mapas analisados, o de Concepción no Chile, apresentou uma metodologia bem definida, com dados e ferramentas acessíveis. Além disso, o trabalho colaborativo entre o Laboratório de Planejamento e Projetos, da UFES, e a Universidad del Bio-Bio permitiram a ampla troca de informações, fazendo com que o produto final tivesse maiores possibilidades de sucesso.

Sendo assim, após avaliação da aplicabilidade dos métodos estudados, optou-se por utilizar, como base, o método de elaboração do “Mapa Solar de Concepción”, desenvolvido na Universidad del Bío-Bío, Chile. Os trabalhos acadêmicos sobre o referido método apresentaram 5 etapas metodológicas principais, que são: aquisição de dados, elaboração do MDS (Modelo Digital de Superfície); simulação, análise/aplicação de resultados; e divulgação dos resultados. Tais etapas são detalhadas na seção seguinte.

3.1 Descrição do Método Base

Durante revisão bibliográfica realizada, verificou-se que o processo de confecção do Mapa Solar de Concepción envolve três padrões metodológicos distintos, descritos por García-Alvarado e outros (2014), Wegertseder e outros (2016) e Baeriswyl-Rada, García-Alvarado e Sandoval-Quezada (2016).

O primeiro padrão identificado, García-Alvarado e outros (2014) emprega diversos tipos de fontes de informação recolhidas através de aerofotogrametria (topografia, cursos d'água, traçado do sistema viário, entre outros) para gerar a base de dados territorial a ser operada no ArcMap 10, aplicativo do *software* ArcGis, amplamente utilizado para análises geográficas e criação de mapas. Em seguida, o referido método utiliza a base climática de dados IWEK e o *software* de análise de energia dinâmica ECOTECH, da Autodesk, para determinar a insolação recebida nas coberturas de cada edificação da área analisada. Atualmente, a Autodesk, empresa desenvolvedora de *softwares*, descontinuou o ECOTECH e integrou suas funções ao *software* REVIT (AUTODESK, 2017).

No segundo padrão metodológico, descrito por Wegertseder e outros (2016), foi constatado a utilização dos *softwares* Cercasol e URBES para determinar as perdas de radiação por sombreamentos causados pela topografia e edificações vizinhas, respectivamente. Utilizou-se, para esta análise, o arquivo meteorológico TMY (*Typical Meteorological Year* ou Ano Meteorológico Padrão). Por último, a análise dos resultados e a elaboração dos mapas foram realizadas, também, por meio do *software* ArcGIS.

Por fim, o último padrão metodológico identificado, descrito por Baeriswyl-Rada, García-Alvarado e Sandoval-Quezada (2016), apresenta um método para determinação do potencial solar em modelos territoriais urbanos, por meio do Sistema de Informação Geográfica (SIG). Para isso, foi necessário contar com arquivos, como o Modelo Digital de Terreno (MDT), que corresponde a um arquivo de imagem com informação territorial geográfica; com arquivos de informação digital sobre edificações e vegetação existentes; e com mapas de radiação solar. Os arquivos citados foram associados no *software* ArcGis e, em seguida, foi utilizada a ferramenta *Area Solar Radiation*, disponibilizada pelo próprio *software*, para conhecer a irradiação anual (wh/m^2) nas superfícies analisadas.

Frente aos procedimentos metodológicos mencionados, foram constatados alguns impedimentos na aplicação do primeiro e do segundo método, conforme detalhado a seguir.

Com a finalidade de avaliar a primeira metodologia, foi realizado um teste utilizando o *software* REVIT, com os arquivos territoriais da região de estudo, os modelos digitais das habitações unifamiliares e os arquivos climáticos do próprio *software*. Após a simulação

do potencial solar na cobertura das unidades habitacionais selecionadas, constatou-se inconsistência dos resultados e longo tempo de processamento dos dados, o que demonstrou a inviabilidade de validação do método. Maiores detalhes sobre os procedimentos realizados, durante o mencionado teste seguem descritos no APÊNCIDE A.

Quanto ao segundo padrão metodológico, a não disponibilidade dos *softwares* URBES e o Cercasol impediu a aplicação do método. No caso do URBES, seu código foi desenvolvido em Matlab, pela própria Universidad del Bío-Bío. Já o software Cercasol não se encontra mais disponível para aquisição e *download*.

Dessa forma, considerou-se que o terceiro padrão metodológico foi o que apresentou melhores condições de aplicação, uma vez que utiliza *software* e dados acessíveis. Em razão disso, a metodologia descrita por Baeriswyl-Rada, García-Alvarado e Sandoval-Quezada (2016) foi adotada como base, sendo composta pelas seguintes 5 principais etapas:

I. Aquisição de Dados

A primeira etapa metodológica identificada refere-se ao levantamento de informações necessárias para o desenvolvimento do mapa solar de Concepción. Tais dados se apresentam em diferentes formatos, tais como fotografias, mapas e tabelas.

Inicialmente, foram obtidas aerofotografias, dados topográficos e hidrográficos, além de informações de traçado urbano. Esse conjunto de dados foi conseguido por meio das instituições governamentais da região de Bío-Bío e Google Earth.

Em seguida, foram levantadas informações a respeito das edificações residenciais e da população residente de Concepción, a fim de compreender a morfologia construtiva, a densidade habitacional e os níveis socioeconômicos predominantes. Tais dados foram obtidos por meio do Instituto Nacional de Estatística, de Concepción, com referência ao ano de 2012.

Por último, foram adquiridos dados de consumo energéticos das edificações, por meio da Corporação de Desenvolvimento Tecnológico (CDT), com o intuito de compreender as demandas por eletricidade e gás GLP, das habitações estudadas.

II. Elaboração do modelo digital de superfície (MDS)

As informações adquiridas na etapa anterior foram operadas pelo *software* ArcGis, a fim de conceber o MDS, que consiste na representação digital da cidade analisada, incluindo tanto as características do território como dos elementos nele existentes.

Segundo Baeriswyl-Rada, García-Alvarado e Sandoval-Quezada (2016), o processo de elaboração do MDS conta com duas grandes etapas: elaboração do MDT (Modelo Digital Territorial) e elaboração do modelo das edificações. Ambas as etapas foram desenvolvidas no ArcGis, sendo que a primeira conta com informações topográficas e a segunda, com informações de projeção das edificações. Cabe mencionar que, para a confecção do modelo das edificações, foi utilizado o método de extrusão de polígonos.

Ainda nesta etapa, pode ser realizado um estudo a respeito das tipologias habitacionais, a fim de identificar o posicionamento geográfico e as diversas morfologias construtivas existentes, assim como feito por (GARCÍA-ALVARADO *et al.*, 2016). Com isso, também é possível estimar a área útil das coberturas, com o objetivo de acomodar os sistemas de captação solar.

III. Simulações

As simulações visam estimar o potencial energético da radiação total em Wh/m² recebida nas coberturas das habitações. Para tal, foram empregadas ferramentas que permitem mapear e analisar os efeitos do sol sobre uma determinada superfície.

A ferramenta adotada no método base foi a *Area Solar Radiation*, disponível no *software* ArcGis. A partir de tal ferramenta é possível selecionar 4 períodos de análises: ao longo do ano, vários dias do ano, apenas um dia e dias especiais (solstícios ou equinócios), podendo-se também configurar os resultados para intervalos diferentes (uma hora, um dia ou um mês em particular). Em Baeriswyl-Rada, García-Alvarado e Sandoval-Quezada (2016) as análises se deram, principalmente, em torno de um ano completo, revendo meses relevantes para o aproveitamento solar.

Cabe destacar que o período de análise, juntamente com o tamanho do arquivo, são fatores responsáveis pelo aumento do tempo de processamento durante a simulação. Em razão disso, convém reduzir o arquivo (*raster*) recortando-o, a fim de selecionar apenas a

área de estudo. Entretanto, ainda assim é necessário contar com recursos computacionais de alto nível (BAERISWYL-RADA; GARCÍA-ALVARADO; SANDOVAL-QUEZADA, 2016).

IV. Análise e aplicação dos resultados

Os resultados de irradiação obtidos por meio das simulações realizadas na etapa anterior, foram analisados, possibilitando classificar o potencial solar das coberturas como alto, médio e baixo. Assim, foram identificadas as regiões da cidade mais apropriadas para o aproveitamento solar e, conseqüentemente, as influências do entorno no recebimento de radiação ((BAERISWYL-RADA; GARCÍA-ALVARADO; SANDOVAL-QUEZADA, 2016).

Além disso, os mesmos resultados podem apoiar o dimensionamento de sistemas de captação solar, bem como a atratividade econômica desses sistemas. García-Alvarado e outros (2016) realizaram o dimensionamento mencionado, priorizando os sistemas de aquecimento solar de água, de modo que, se houvesse espaço excedente na cobertura, painéis fotovoltaicos poderiam ser adicionados. Assim, os cálculos de dimensionamento foram realizados considerando o potencial solar simulado, a área útil da cobertura e a eficiência dos sistemas. Como resultado, foi obtido a energia fornecida pelo sistema e sua contribuição na demanda energética, para cada unidade residencial.

V. Divulgação dos Resultados

As informações obtidas, sobre o potencial solar das coberturas, sistemas de captação solar empregados e investimento financeiro necessário, foram apresentadas em plataforma eletrônica, gratuita, visando veicular os resultados alcançados, tornando-os acessíveis aos usuários.

A plataforma mencionada é estruturada por um sistema de informação geográfica (ArcGis), com os registros das coberturas, dados associados e cálculos realizados. O sistema adotado para configurar o site foi o OpenLayers, capaz de utilizar informações de um servidor geográfico, no formato WMS.

Assim, as informações foram disponibilizadas na internet, pelo endereço msc.ubiobio.cl, com uma interface gráfica composta por uma apresentação inicial, com informações a respeito das características e limitações dos dados oferecidos; e um mapa, com dois menus, sendo um na parte superior da tela e outro, do lado direito. O menu superior

oferece informações sobre os tipos de sistemas de energia solar e as tabelas de cálculo; já o menu da direita indica as diversas possibilidades de visualizar os valores e a interpretação dos códigos de cores dos polígonos.

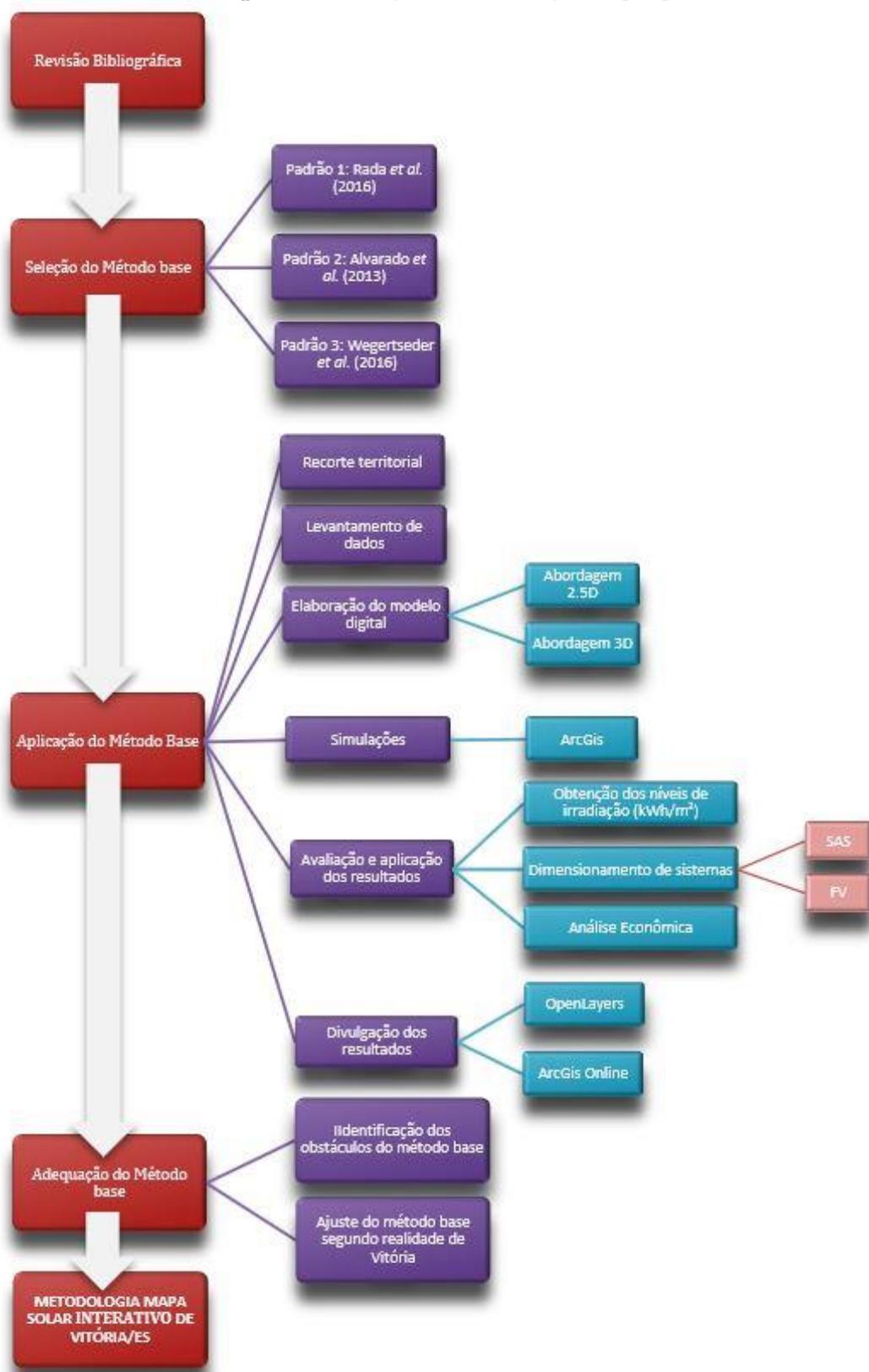
Os polígonos correspondem à projeção de cada cobertura, onde vermelho indica alto potencial; laranja, médio potencial; e amarelo, baixo potencial; ficando o cinza para os edifícios sem dados disponíveis (não residenciais). Quando um polígono é selecionado, um *pop-up* aparece exibindo as informações associadas àquela cobertura. Tais informações incluem: a radiação recebida na área útil da cobertura e paredes (no caso de edificações multifamiliares); quantidade de painéis térmicos, fotovoltaicos e híbridos; e o percentual de economia nas despesas com gás e eletricidade. Além disso, a estimativa de energia produzida, pelos sistemas sugeridos é comparada com o consumo de equipamentos, como lâmpadas e chuveiro.

A referida plataforma *online* está disponível ao público desde 21 de novembro de 2014, somando numerosos acessos, ganhando notoriedade na imprensa e em outros *sites*.

3.2 Procedimentos adotados

Tomando como referência o método de elaboração do Mapa Solar de Concepción, a metodologia adotada para o desenvolvimento do presente trabalho também segue cinco etapas, que serão descritas nas seções subsequentes. A Figura 26 apresenta um esboço da metodologia definida.

Figura 26 - Fluxograma metodológico da pesquisa



Fonte: Elaborada pela autora.

Esta seção versa sobre os principais aspectos acerca da aplicação do método base, considerando as características do recorte territorial, os critérios para elaboração do modelo digital, as técnicas de simulação, a avaliação e o meio de divulgação dos resultados.

3.2.1 *Recorte Territorial*

Nesta etapa metodológica, foi realizado um levantamento das possíveis áreas de estudo, dentro da Região Metropolitana de Vitória/ES, a fim de selecionar um local que favorecesse a aplicação do método, bem como permitisse a análise do comportamento das ferramentas de simulação utilizadas.

Nesse sentido, foi identificada uma região, predominantemente residencial, localizada na cidade de Vila Velha/ES, em concordância com os critérios supracitados. O Residencial Jabaeté, pertencente ao Bairro Jabaeté, inserido em área denominada Zona Especial de Interesse Social – ZEIS, composta de porções de território municipal e habitada por população de baixa renda, é destinada principalmente à regularização fundiária, à urbanização e à construção de habitação de interesse social (HIS).

A área mencionada foi loteada pelos programas Minha Casa, Minha Vida (Governo Federal) e Minha Casa (Governo Estadual), e se caracteriza, majoritariamente, por habitações unifamiliares, embora também existam unidades multifamiliares, ambas projetadas para atender famílias sem residência própria.

No que se refere às habitações unifamiliares, foram identificadas 1.126 unidades, caracterizadas pela existência de pavimento único com 39,2 m² de área construída e compartimentação para 5 ambientes: 2 quartos, banheiro, sala, cozinha e área de serviço externa. Tais edificações foram posicionadas no centro do lote, com área entre 135m² a 271m², do sentido transversal, possibilitando futuras ampliações feitas no sentido longitudinal (PITANGA, 2016).

Quanto às coberturas, as habitações unifamiliares se caracterizam pela existência de duas águas, de telha cerâmica, com inclinação de 30% e, aproximadamente, 55,76 m² de área de cobertura. Quanto à orientação das águas, foram identificadas 488 unidades voltadas

para Nordeste-Sudoeste (casa 1) e 638 unidades orientadas para Noroeste-Sudeste (casa 2).

Entretanto, cabe ressaltar que o recorte territorial selecionado possui uma quantidade maior de habitações unifamiliares, mas que não foram consideradas no presente trabalho, por se tratarem de construções de padrão irregular, que além de estarem fora do que foi definido pelos programas habitacionais supracitados, ainda criariam uma complexidade inadequada ao estudo, visto que o objetivo da pesquisa é a proposição de um método e não a avaliação do potencial do lugar.

Da mesma forma, no que se refere aos edifícios multifamiliares, observou-se a presença de 2 tipologias. Das 92 edificações multifamiliares existentes, 38 são destinadas às pessoas com deficiência (edifício 2) e o restante, 54, para pessoas sem deficiência (edifício 1).

Verificou-se, também, que ambas as habitações multifamiliares possuem aproximadamente 15 m de altura e 4 pavimentos, onde cada pavimento conta com 4 apartamentos, igualmente compartimentados em 5 ambientes (dois quartos, banheiro, sala e cozinha integrada com área de serviço). Quanto à área construída, as edificações PCD possuem 802 m², enquanto as demais somam 784 m².

Quanto às coberturas, ambos os edifícios possuem telhado em fibra de cimento e orientação da cumeeira Noroeste-Sudeste; onde o PCD dispõe de um conjunto de 7 águas, somando aproximadamente 254 m² de área de cobertura. Já o edifício sem PCD possui 5 águas, que totalizam 234 m² de área de cobertura.

As informações, foram obtidas por meio de documentos disponibilizados pela SEDURD (Secretaria de Estado de Saneamento, Habitação e Desenvolvimento Urbano) e pela GIHAB (Gerência Executiva de Habitação, da CAIXA), e podem ser melhor compreendidas por meio das Figuras 34, 35 e 36. As Figuras 27 e 28 mostram parte da região adotada e as habitações existentes.

Figura 27 - Vista do Residencial Jabaeté, Vila Velha/ES – Habitações unifamiliares.



Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 28 - Vista do Residencial Jabaeté, Vila Velha/ES – Habitações multifamiliares.



Fonte: Elaborada pela autora.

Quanto à topografia, a região caracteriza-se por relevo plano, com pouca variação de altitude, que na área residencial varia entre 0 e 9 metros acima do nível do mar. Ademais, quanto à cobertura vegetal, o bairro se encontra bastante descaracterizado por atividades antrópicas, onde grande parte da vegetação foi suprimida (PITANGA, 2016). O mapa da Figura 29 apresenta a região analisada, destacada em azul.

Figura 29 - Recorte territorial do Residencial Jabaeté, Vila Velha/ES.



Fonte: Elaborada pela autora a partir de: IJSN (2011), GEOBASES (2010), IDAF (2010), EMBRAPA (2013).

Frente às características apresentadas, a região exibida na Figura 29 foi selecionada como estudo de caso por apresentar, além de edificações padronizadas, pouca influência de relevo e vegetação, o que facilita a aplicação da metodologia escolhida e colabora para o desenvolvimento de soluções energéticas em habitações de interesse social, permitindo a democratização do aproveitamento solar e das técnicas utilizadas.

O Loteamento Residencial Jabaeté surgiu de uma propriedade rural de 747.785,425 m², situada às margens da Rodovia ES, em uma região denominada Boca do Mato, distrito de Barra do Jucu, Vila Vela/ES.

Em 1992, o Decreto Estadual nº 5.152-E declarou o referido loteamento de utilidade pública, para fins de desapropriação. A partir de então, a área teve como destinação a implantação de lotes urbanizados objetivando o assentamento de pessoas de baixa renda, cadastradas na Comissão do Movimento de Moradia de Vila Velha - ES.

Atualmente, a mencionada região é ocupada por população de baixa renda, cuja maioria não possui outro imóvel, estando assim apta a receber os lotes por meio de doação.

O diagnóstico urbanístico realizado por Pitanga (2016) apontou as características do Residencial Jabaeté quanto aos equipamentos públicos urbanos e aos equipamentos comunitários.

Assim, no que se refere ao sistema viário, o diagnóstico mencionado constatou que o residencial em análise apresenta traçado urbano ortogonal, composto por uma malha reticulada, com avenidas bem definidas e pavimentação em asfalto betuminoso. O loteamento também conta com sistema de abastecimento e distribuição de água, implantado pela CESAN (Companhia Espírito Santense de Saneamento) que também é responsável pelo sistema de esgotamento sanitário, capaz de atender todas as unidades habitacionais.

Quanto ao acesso à energia elétrica, verificou-se que todos os domicílios estão conectados à rede de distribuição da EDP ESCELSA e todas as avenidas contam com sistema de iluminação pública. Além disso, foram identificadas seis áreas públicas destinadas ao esporte e ao lazer, bem como quatro centros educativos, do infantil ao profissionalizante (PITANGA, 2016).

3.2.2 *Elaboração do Modelo Digital*

A transferência de informações do mundo real para o mundo digital ocorre por meio da utilização de modelos que, por sua vez, devem seguir padrões conceituais relacionados à forma como o indivíduo concebe o espaço analisado (FITZ, 2008).

Segundo Machete (2016), existem duas formas de se obter o modelo digital da superfície de uma cidade: i) através da aquisição de uma nuvem de pontos que possibilitam a reconstrução da geometria dos elementos, como dados LiDAR (*Light Detection and Ranging*); ii) através de técnicas de modelagem procedimental e paramétrica, onde os elementos são modelados a partir dos valores de seus atributos.

À vista disso, por não contar com recursos para aquisição de dados LiDAR, o modelo digital da superfície de estudo foi desenvolvido a partir da segunda técnica mencionada por Machete (2016).

Assim, a elaboração do modelo digital se deu, inicialmente, pelo levantamento de dados dos elementos presentes no recorte territorial, como edificações, traçado urbano,

vegetação e relevo. Em seguida, foram utilizadas ferramentas e técnicas apropriadas, mencionadas principalmente no método base, a fim de obter uma representação digital completa do contexto urbano em questão.

Cabe ressaltar que o processo de concepção do modelo digital contou com duas principais etapas, sendo uma de elaboração do Modelo Digital Territorial (MDT) e outra de elaboração do Modelo de Digital de Superfície (MDS), desenvolvidas no ArcMap e no ArcScene, respectivamente, ambos do *software* ArcGis. Nas seções subsequentes seguem descritas as técnicas utilizadas durante o processo de modelamento da região estudada.

3.2.2.1 Elaboração do Modelo Digital Territorial (MDT)

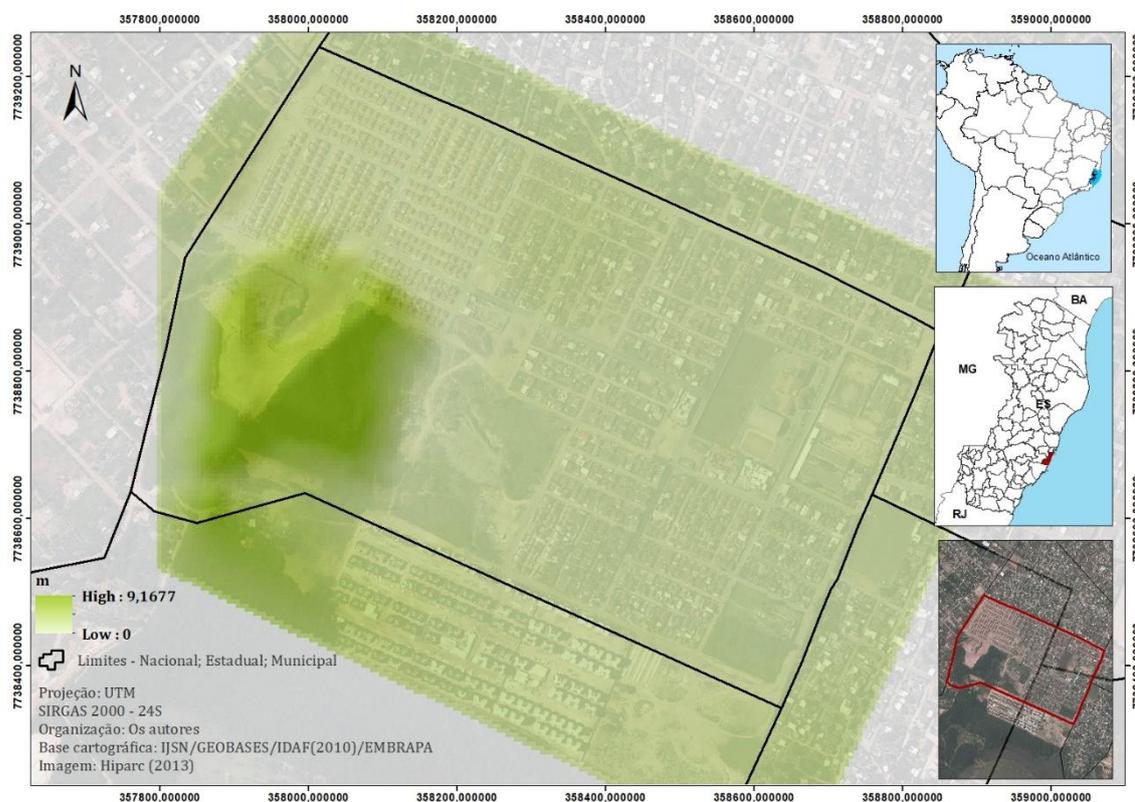
O Modelo Digital Territorial (MDT) consiste em uma representação da superfície da terra nua, sem contribuição da vegetação ou de estruturas construídas pelo homem (FITZ, 2008).

Para gerar o MDT da região de estudo foi necessário contar com imagens de satélite do projeto SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*), adquiridas via Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), referente ao ano de 2010, disponíveis no endereço eletrônico <http://www.relevobr.cnpm.embrapa.br/download/>. Adicionalmente, foram utilizadas curvas de nível da referida região, disponibilizadas pela SEDURB.

Cabe ressaltar que o arquivo SRTM adotado para o presente estudo, foi o MNT: SE-24-Y-D, que possui resolução espacial de 90 metros, formato GEOTIFF (16 bits), unidades de altitude em metros e sistema de coordenada geográfica Datum WGS 84, que é compatível com o sistema SIRGAS.

Ambos os arquivos foram tratados no ArcMap 10.2, onde foi criada uma base de dados topográfica, em malha triangular, salva na extensão .tin (*Triangulation Irregular Network*). O mapa de relevo apresentado pela Figura 30 mostra o MDT criado a partir do procedimento descrito.

Figura 30 – Modelo Digital Territorial do Residencial Jabaeté.



Fonte: Elaborado pela autora a partir de: IJSN (2011), GEOBASES (2010), IDAF (2010), EMBRAPA (2013).

Além dos arquivos supracitados, a Figura 30 exibe uma ortofoto de autoria do Hiparc Geotecnologias, empresa de projetos cartográficos, registrada em 2013, por câmera instalada em aeronave. A ortofoto mencionada possui resolução de 25 cm e foi fornecida pelo LCGGEO (Laboratório de Cartografia Geográfica e Geotecnologias) do Departamento de Geografia (UFES).

Quanto às curvas de nível, o estudo topográfico foi realizado pela Lugare Engenharia Ltda., em 2010, e disponibilizado pela SEDURB (Secretaria de Estado de Saneamento, Habitação e Desenvolvimento Urbano) do Estado do Espírito Santo, sendo o local descrito como de relevo majoritariamente plano com pequenas porções acidentadas.

3.2.2.2 Elaboração do Modelo Digital de Superfície (MDS)

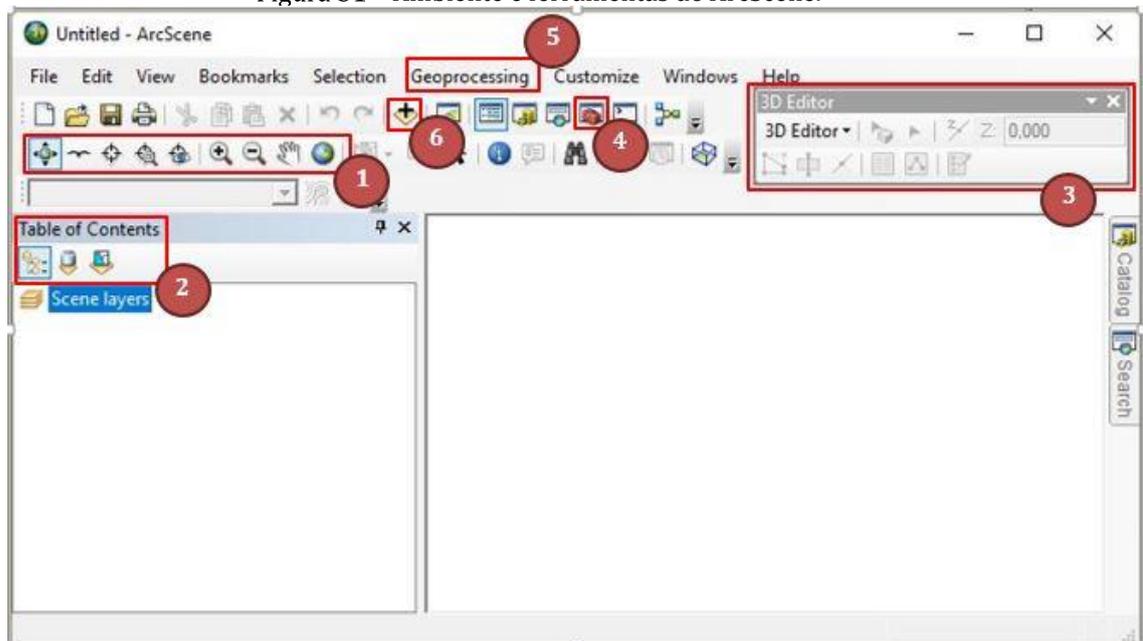
De maneira geral, o Modelo Digital de Superfície consiste na representação da superfície da Terra incluindo coberturas naturais e construídas, ou seja, diferente do MDT, o MDS é capaz de detalhar não apenas as características do solo, mas também dos elementos existentes acima do solo.

Frequentemente, o MDS é obtido por meio de um rastreamento a *laser* capaz de criar um conjunto de pontos com diversos valores de elevação, referentes aos elementos existentes no território. Entretanto, essa técnica pode ser onerosa e exigir muito recurso computacional. Em razão disso, no presente trabalho, os objetos existentes sobre o solo foram representados por meio de técnicas de modelamento, detalhadas a seguir, utilizando *softwares* apropriados.

Durante a concepção do modelo digital, percebeu-se a necessidade de distinguir os processos de modelamento, a fim de evidenciar a etapa de confecção dos modelos das edificações, uma vez que, para essa abordagem, as edificações são objeto principal de análise da captação solar, ou seja, é na edificação que se deseja conhecer o recurso solar disponível para aproveitamento. Portanto, é necessário que haja uma etapa específica para o desenvolvimento do modelo digital das edificações.

Assim sendo, nesta etapa metodológica foi empregado o ArcScene 10.2.2 que, por sua vez, consiste em um aplicativo do *software* ArcGis especializado em análises 3D. A Figura 31 mostra o ambiente e as ferramentas do referido aplicativo, onde, em destaque, se encontram os recursos mais utilizados para o desenvolvimento do presente trabalho.

Figura 31 - Ambiente e ferramentas do ArcScene.



Fonte: Imagem da tela do ArcScene modificado pela autora.

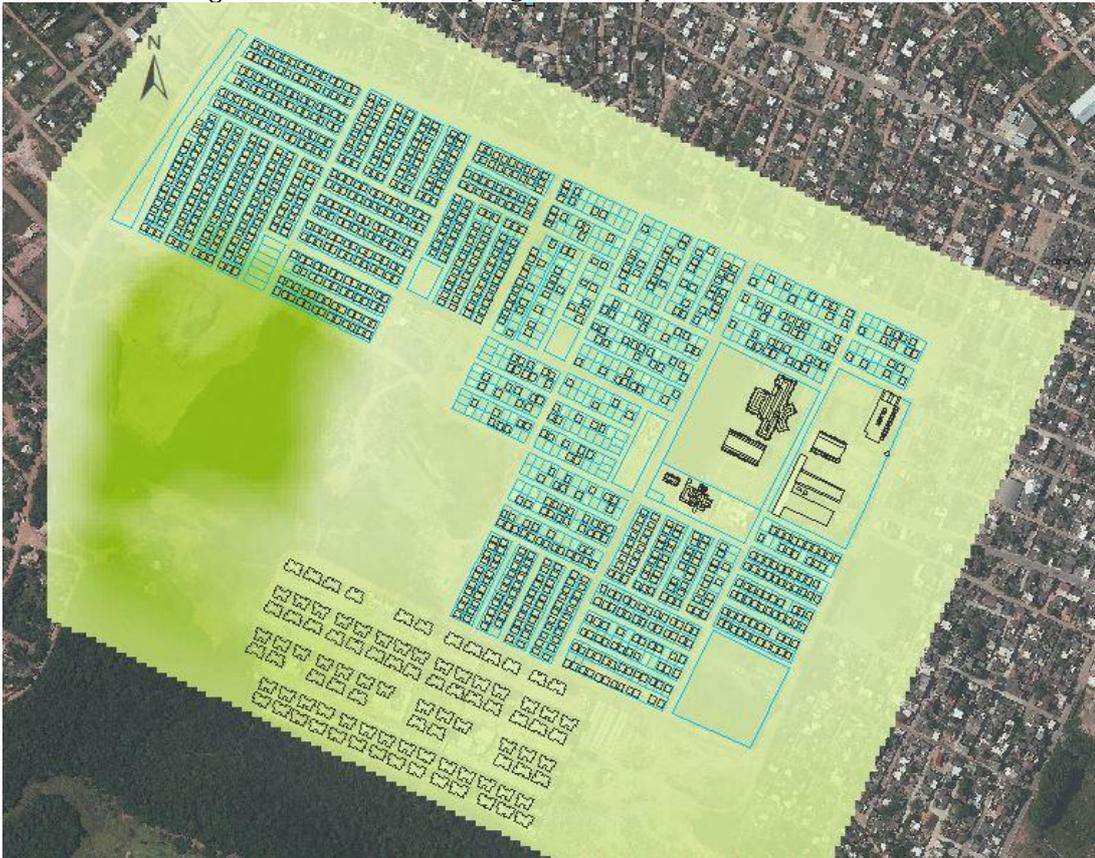
Dessa forma, observa-se, por meio da Figura 31, que o destaque de número 1 indica as ferramentas de navegação usadas para manipular as posições do projeto e proporcionar

interação com a visualização 3D. No destaque de número 2 encontra-se a *Table of Contents* onde se localiza a lista de *layers*, utilizados pelo usuário, ordenada conforme sua necessidade. O destaque 3 indica a barra de ferramentas de edição 3D *Editor*, e o destaque 4 aponta a localização da caixa de ferramentas (*ArcTool box*). No destaque de número 5, a opção *Geoprocessing*, que fornece acesso à ferramentas de funções analíticas e, por fim, o destaque 6 mostra a ferramenta utilizada para adicionar *layers* ao projeto.

Para elaboração do MDS, inicialmente, foi aplicada a técnica descrita no método base, que consiste na extrusão dos polígonos das edificações (BAERISWYL-RADA; GARCÍA-ALVARADO; SANDOVAL-QUEZADA, 2016). Esse método é baseado na abordagem de modelo 2,5D, onde para cada posição planimétrica (x, y) existe um valor único de altura, ou seja, este método mantém as informações de forma e ignora o detalhes de arquitetura, como janela, porta, inclinação de cobertura, etc. (MACHETE, 2016).

Assim, *layers* de traçado urbano e de projeção das edificações, ambos representados na forma de polígonos, foram associados ao MDT, criado na seção anterior. A Figura 32 mostra as camadas de polígonos incorporadas ao MDT.

Figura 32 - Camadas de polígonos incorporadas ao MDT.



Fonte: Elaborado pela autora a partir de: IJSN (2011), GEOBASES (2010), IDAF (2010), EMBRAPA (2013).

Em seguida, foi utilizada a função *Extrusion*, localizada nas propriedades dos *layers* de polígonos, a fim de atribuir altura aos mesmos, criando a representação volumétrica das edificações. A Figura 33 mostra a representação das edificações realizada por meio de extrusão, onde é possível observar as habitações multifamiliares, em primeiro plano, seguidas das habitações unifamiliares, em segundo plano, e por último, as edificações não residenciais.

Cabe ressaltar que foram utilizadas duas técnicas de extrusão, sendo uma para as edificações residenciais e outra para as não residenciais. Na primeira, a elevação foi aplicada apenas inserindo o valor da altura no campo *Extrusion Value or Expression*; já na segunda técnica, a altura foi atribuída selecionando coluna com informações de altura do *layer*, também no campo *Extrusion Value or Expression*.

Embora a abordagem de modelo 2,5D apresente pouca complexidade de execução, os modelos criados por essa técnica apresentam baixo nível de detalhamento, tornando o modelo mais distante da realidade.

Figura 33 - Modelo das edificações realizado por extrusão de polígonos.

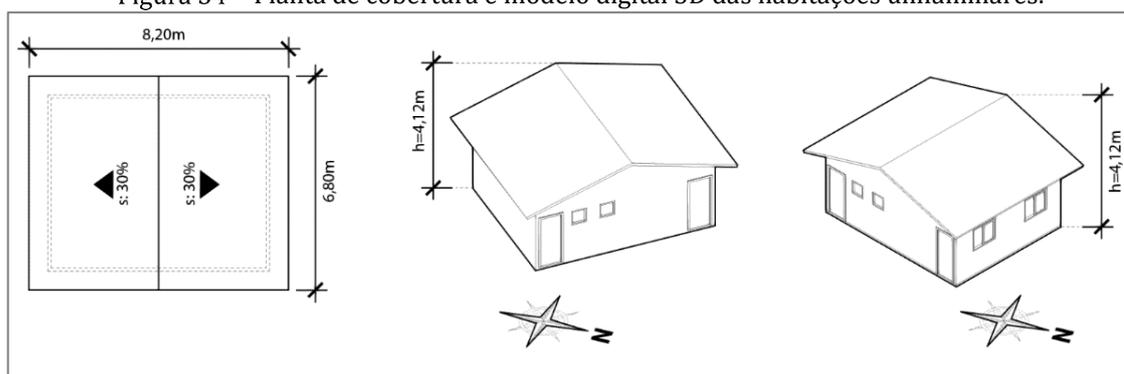


Fonte: Elaborado pela autora.

Em razão da perda de informações, consideradas importantes para o estudo do potencial solar, optou-se por utilizar a abordagem 3D de modelamento. Nessa abordagem, cada par (x, y) pode corresponder a diversos valores de altura, contribuindo, assim, para a preservação dos detalhes das edificações.

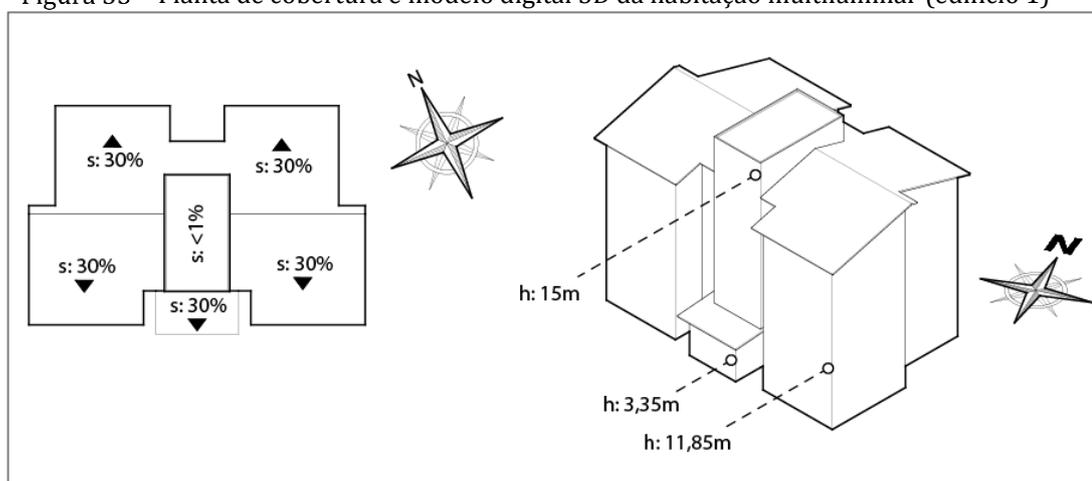
Dessa forma, na segunda técnica de modelamento, foram utilizados o *software* SketchUp e as informações construtivas das edificações, a fim de obter a representação 3D das mesmas. Os arquivos obtidos no SketchUp foram salvos na extensão COLLADA, com intuito de compatibilizá-los com o ambiente de simulação, ArcScene. As Figuras 34, 35 e 36 - Planta de cobertura e modelo digital 3D das habitações unifamiliares. mostram os modelos habitacionais em 3D, criados em SketchUp, e suas respectivas plantas de cobertura.

Figura 34 - Planta de cobertura e modelo digital 3D das habitações unifamiliares.



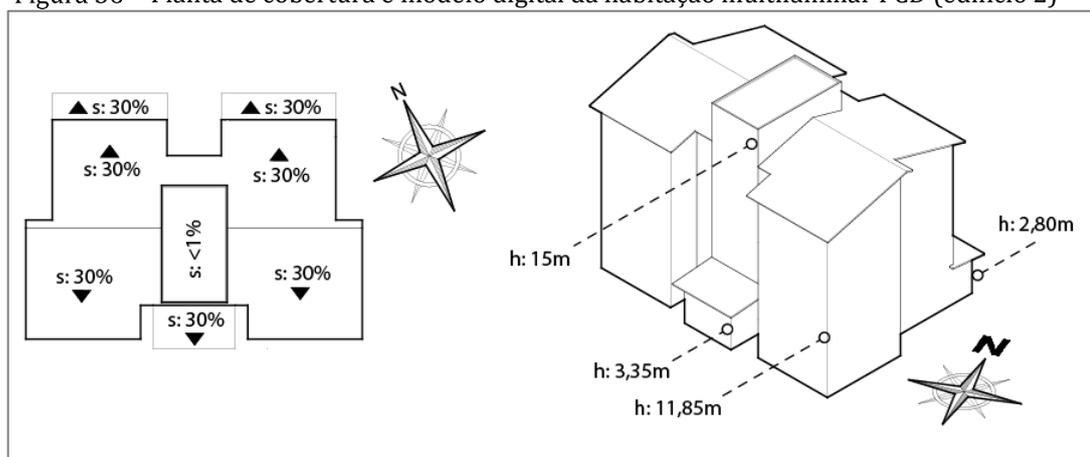
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 35 - Planta de cobertura e modelo digital 3D da habitação multifamiliar (edifício 1)



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 36 - Planta de cobertura e modelo digital da habitação multifamiliar PCD (edifício 2)



Fonte: Elaborado pela autora.

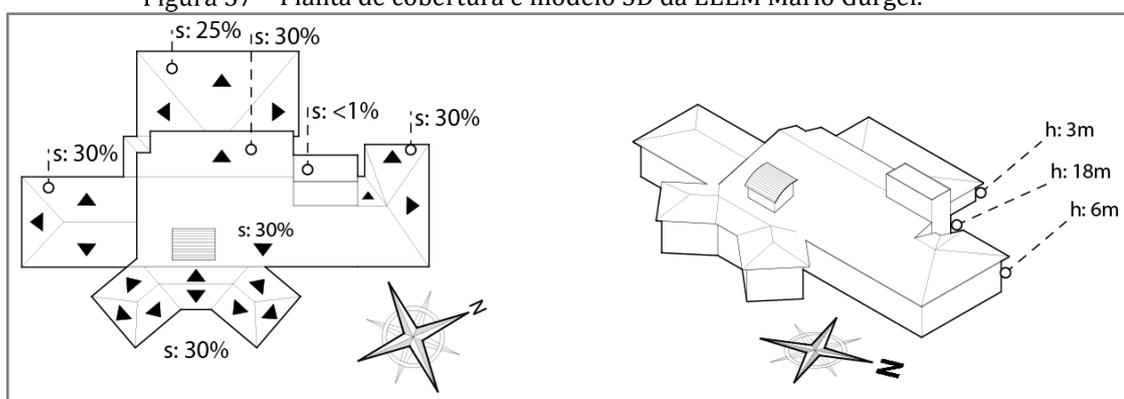
Embora o foco da presente pesquisa sejam as unidades habitacionais, o recorte territorial adotado também engloba edificações não residenciais. Nesse sentido, a fim de diversificar o modelo digital e aproximá-lo da pluralidade de um território urbano, optou-se por

adicionar as edificações não residenciais ao modelo final. Tal medida permitiu a avaliação do comportamento das ferramentas de simulação em situações mais complexas, já que essas edificações contam com coberturas heterogêneas, alturas variadas e possibilidade de sombreamento.

Importa mencionar que todas as edificações adotadas foram selecionadas com a finalidade de obter uma complexidade adequada para a realização do presente trabalho, considerando o tempo e o recurso disponíveis.

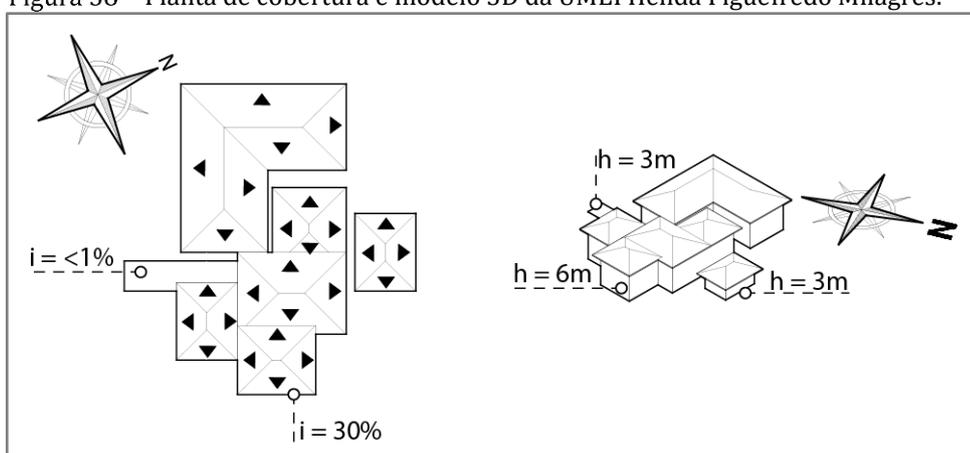
As edificações não residenciais adotadas totalizam quatro unidades de ensino, que vão do infantil ao médio, um edifício destinado ao centro comunitário do bairro Jabaeté, além de duas quadras poliesportivas. As Figuras 37, 38, 39, 40, 41 e 42 mostram as plantas de cobertura e as representações digitais 3D da EEEM Mário Gurgel, UMEI Helida Figueiredo Milagres, UMEI Normília Cunha dos Santos, UMEF Prof. Paulo César Vinha (CAIC), Centro Comunitário Jabaeté e quadras poliesportivas, respectivamente.

Figura 37 - Planta de cobertura e modelo 3D da EEEM Mário Gurgel.



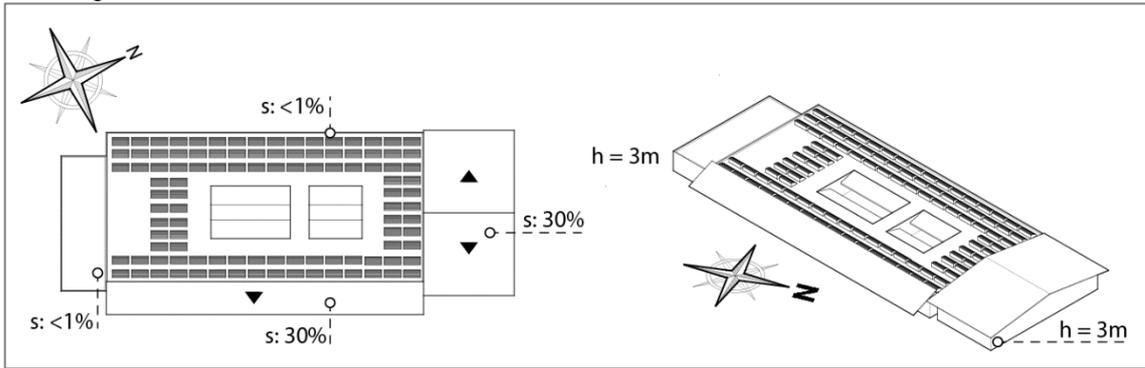
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 38 - Planta de cobertura e modelo 3D da UMEI Helida Figueiredo Milagres.



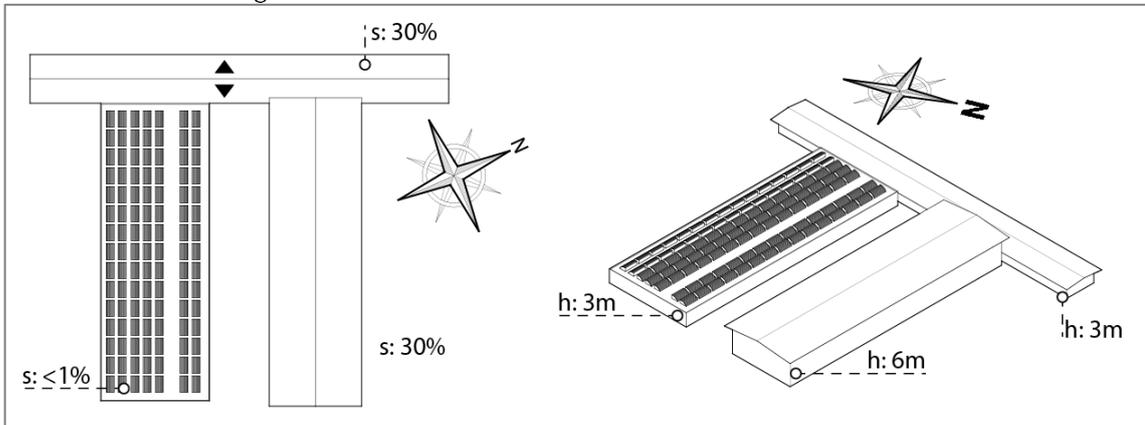
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 39 - Planta de cobertura e modelo 3D da UMEI Normília Cunha dos Santos.



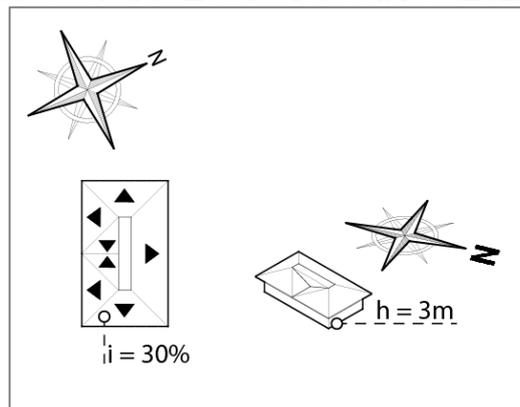
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 40 - Planta de cobertura e modelo 3D do CAIC



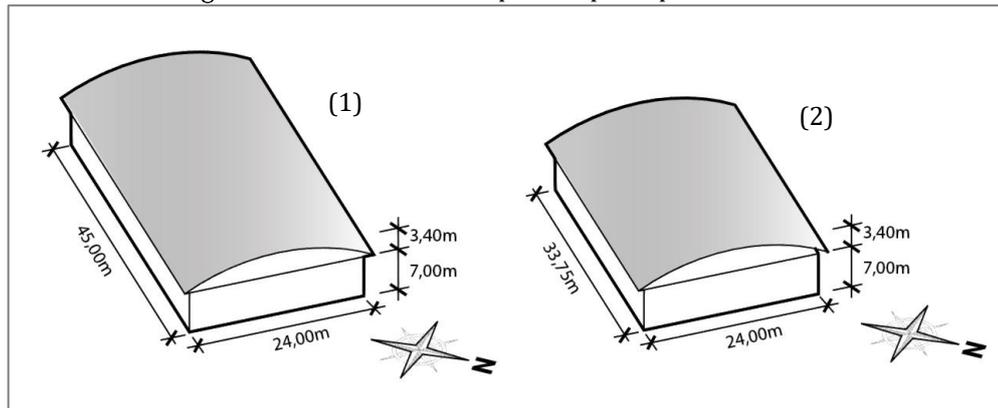
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 41 - Planta de cobertura e modelo 3D do Centro Comunitário Jabaeté



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 42 - Modelo 3D das quadras poliesportivas.



Fonte: Elaborado pela autora.

Os dados necessários para a confecção dos modelos das edificações não residenciais foram obtidos por meio de ferramentas disponíveis no Google Earth, já que a solicitação de informação enviada ao órgão responsável não foi atendida. Só assim foi possível identificar as características necessárias para o processo de simulação, tais como dimensão, posição geográfica e elementos arquitetônicos adotados, nas referidas edificações.

Depois de serem desenvolvidos em SketchUp, os modelos foram importados para o ArcScene, por meio da ferramenta *Import 3D file*, situada no *ArcTool Box* do referido *software*. Em seguida, os modelos foram georreferenciados, a fim de serem posicionados no MDT, segundo as coordenadas geográficas reais de cada edificação.

Cabe salientar que os modelos 3D, importados do SketchUp, assumem no ArcScene, o formato (*Geometry Type*) *Multipatch*, que é um objeto SIG que armazena informações, tais como texturas, cores e geometria, capazes de representar o contorno de um modelo 3D (ESRI, 2018a).

Posteriormente, para representar todos os elementos existentes no local de estudo, foi necessário reproduzir as edificações semelhantes por meio dos recursos *copy* e *paste*, proporcionado pela ferramenta *3D Editor*. A Figura 43 mostra o MDS desenvolvido em 3D, no ArcScene.

Figura 43 - MDS em 3D



Fonte: Elaborado pela autora.

A partir da modelagem do conjunto, os modelos de todas as edificações foram unidos em *layer* único por meio da ferramenta *Merge*, localizada na aba *Geoprocessing*, da barra de ferramentas superior, como mostrado na Figura 31.

O produto desse procedimento, também em *multipatch*, foi convertido em *raster* a fim de, finalmente, compatibilizar o modelo digital com a ferramenta de simulação. Um *raster* ou modelo matricial, consiste em uma estrutura composta por células (ou *pixels*) que contêm um valor que representa uma informação específica, de um determinado objeto (ESRI, 2018b).

O processo de rasterização de um *multipatch* exige o uso da ferramenta *Multipatch to Raster* (*conversion tools >> to raster >> multipatch to raster*). Além disso, também é necessário determinar o tamanho das células *raster* que serão criadas, nesse caso configuradas em 1x1 m, conforme resolução utilizada no Mapa Solar do Rio do Janeiro (LANGE, 2015).

Vale lembrar que todos os *layers* inseridos no ArcScene (polígonos, *multipatches* ou rasters) foram configurados no mesmo sistema de coordenadas, SIRGAS_2000_UTM_Zone_24S.

3.2.3 Simulações

As simulações visaram estimar o potencial energético da radiação total, em Wh/m^2 , recebida nas coberturas das edificações analisadas, representadas pelo modelo digital desenvolvido na Seção 3.2.2. Para tal, empregou-se a ferramenta *Area Solar Radiation*, presente no *ArcTool Box*, do ArcScene.

A ferramenta *Area Solar Radiation* permite mapear e analisar os efeitos do movimento do Sol sobre uma determinada superfície, por períodos específicos. Essa ferramenta considera os efeitos atmosféricos, a latitude, a elevação do terreno, a declividade da superfície, a direção, os efeitos de sombreamento e os deslocamentos diários e sazonais do Sol (ESRI, 2018c).

Como mencionado em capítulos anteriores, a radiação solar global possui três componentes, a direta, a difusa e a refletida. Geralmente, a radiação direta é a maior delas, sendo seguida pela componente difusa. A porção de radiação refletida constitui uma parcela muito pequena do total, exceto em superfícies altamente refletivas, como cobertura de neve. Em razão disso, a ferramenta *Area Solar Radiation* não inclui a componente de radiação refletida no cálculo da radiação total (ESRI, 2018d). O processo de mensuração da radiação solar total recebida por uma superfície a partir da referida ferramenta, envolve quatro passos:

- i. O cálculo de uma visão hemisférica ascendente, com base na topografia;
- ii. Sobreposição da vista hemisférica com um mapa de posição, para estimar a radiação direta;
- iii. Sobreposição da vista hemisférica com um mapa de céu, para estimar a radiação difusa;
- iv. Repetir o processo para cada local de interesse, a fim de produzir um mapa de insolação.

A vista hemisférica ascendente é semelhante à vista de um planetário, capaz de proporcionar a visão das porções de céu disponível e obstruída. A quantidade de céu disponível (visível) desempenha um papel importante no recebimento de insolação. Por isso, para mensurar a radiação solar que atinge uma determinada superfície, a referida ferramenta considera as influências da topografia e de edifícios vizinhos por meio da

geração de uma visão hemisférica ascendente para cada célula *raster* do modelo digital da cidade (ESRI, 2018d).

Na ferramenta *Area Solar Radiation*, a vista hemisférica ascendente se configura como uma representação *raster*, onde para cada setor é atribuído um valor indicando se naquela direção o céu está disponível ou obstruído. A Figura 44 mostra um exemplo de uma fotografia de vista hemisférica, utilizando uma lente olho de peixe.

Figura 44 - Vista hemisférica.



Fonte: ESRI, 2018d

Em conjunto com a vista hemisférica é utilizado um mapa de posição solar (ou carta solar) e um mapa de céu, a fim de obter a posição do sol e informações de direção do céu respectivamente, ambos de representação *raster*.

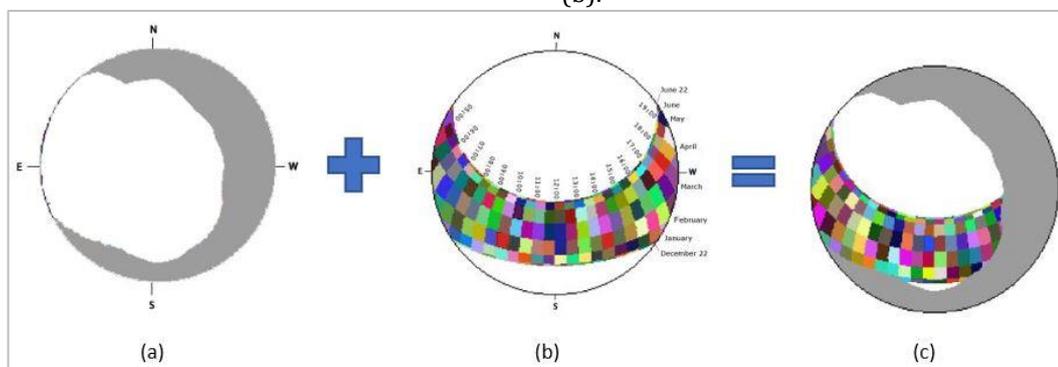
O mapa de posição solar consiste em um mapa de trajetória aparente do Sol, variando entre as horas do dia e os dias do ano, composto por vários setores distintos, definidos pela trajetória solar, durante intervalos específicos. Nesse caso, a trajetória solar é calculada com base na latitude do local de estudo e na configuração de tempo. Assim, para cada setor do mapa é atribuído um valor único específico, juntamente com os ângulos zênite e azimute.

O mapa de céu, por sua vez, é definido como uma vista hemisférica do céu também dividido em múltiplos setores onde, da mesma forma, cada setor recebe um valor identificador único, juntamente com os ângulos zênite e azimute.

Em seguida, as radiações direta e difusa são calculadas a partir da sobreposição da vista hemisférica com os mapas de posição solar e de céu, respectivamente (ESRI, 2018d). As

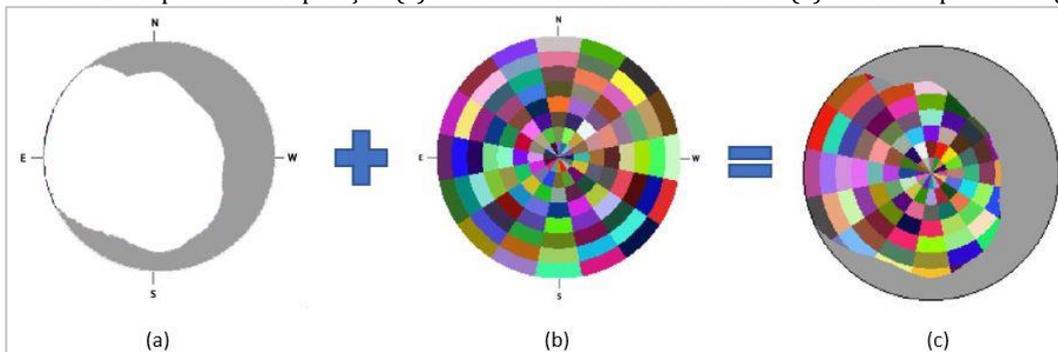
Figuras 45 e 46 mostram os exemplos do processo de sobreposição usando os mapas de posição solar e de céu.

Figura 45 - Exemplo de sobreposição (c) da vista hemisférica resultante (a) com o mapa de posição solar (b).



Fonte: ESRI, 2018d. Modificado pela autora.

Figura 46 - Exemplo de sobreposição (c) da vista hemisférica resultante (a) com o mapa de céu (b).



Fonte: ESRI, 2018d. Modificado pela autora.

Para empregar a ferramenta *Area Solar Radiation*, foi necessário configurar os parâmetros de simulação conforme realidade da área de estudo e período de analisado. Cabe ressaltar que ambos os MDE desenvolvidos na Seção 3.2.2.2 foram simulados pela mesma ferramenta, com intuito de obter recursos de comparação entre eles.

Assim, foram analisadas as radiações de três períodos distintos do ano de 2018: solstício de inverno (21 de junho), solstício de verão (21 de dezembro) e ao longo de todo o ano (365 dias). A Tabela 1 mostra os parâmetros utilizados para cada período mencionado.

Observa-se que o MDE 2,5D foi simulado apenas para o solstício de inverno, por apresentar resultados inadequados às edificações analisadas, sendo assim suficiente para descartar o modelo. A Seção 3.2.4 destaca os entraves apresentados pelo MDE 2,5D.

Tabela 1 - Parâmetros utilizados em simulações.

Parâmetros	MDE - 2.5D	MDE - 3D		
	Solst. Inverno	Solst. Inverno	Solst. Verão	Anual
Input raster	rst_edfc_3	rst_edfc_3	rst_edfc_3	rst_edfc_3
Output	sol_met1_inv	sol_inv9	sol_verao8	sol_m_anual7_2
Latitude	-20,442399	-20,442399	-20,442399	-20,442399
Sky size	1000	1000	1000	1000
Time configuration	Within a day: 21.06.2018 (start = 0h / end: 24h)	Within a day: 21.06.2018 (start = 0h / end: 24h)	Within a day: 21.12.2018 (start = 0h / end: 24h)	Multiple days: 2018 (start: 1 / end: 365)
Day interval	-	-	-	14
Hour interval	1	1	1	1
Factor Z	1	1	1	1
Slope	from_DEM	from_DEM	from_DEM	from_DEM
Calculation directions	32	32	32	32
Zenith divisions	8	8	8	8
Azimuth divisions	8	8	8	8
Diffuse model	uniform_sky	uniform_sky	uniform_sky	uniform_sky
Diffuse proportion	0,3	0,3	0,4	0,4
Transmittivity	0,6	0,6	0,5	0,55
Environment Settings				
Processing extent	MERGE_MET1_OK (polygon)	MERGE_edfc_3 (multip)	MERGE_edfc_3 (multip)	Footprint_edfc3
Mask	Footprint_edfc9	Footprint_edfc9	Footprint_edfc8	Footprint_edfc3

Fonte: elaborada pela autora

Com base na coluna de parâmetros da Tabela 1, tem-se inicialmente, o campo *Input raster* onde foi inserido o *layer* referente às edificações, da superfície onde a radiação será analisada. O campo *Output* representa a radiação total de saída, calculada para local da superfície analisada. No terceiro campo, foi inserido a latitude da área de estudo.

Ainda na Tabela 1, o quarto campo, *Sky size*, define o tamanho de céu (ou resolução) da vista hemisférica, configurado em 1.000 para todas as simulações. Apesar do valor *default* desse parâmetro ser 200, os testes de simulação realizados constataram pouca variação nos resultados, uma vez que a faixa de valores vai de 200 a 10.000.

O parâmetro *Time Configuration* define o período de análise, utilizado para os cálculos de radiação, onde foi selecionada a opção *Within a day* para as simulações de solstícios, a fim de executar cálculos para um período especificado, em um único dia. Para a simulação

realizada ao longo de 2018 foi selecionada a opção *Multiple days*, a fim de executar cálculos para um período específico, em vários dias do referido ano. Assim, o parâmetro *Day interval* aplica-se apenas para o último caso de simulação, assumindo o valor *default* de 14 dias.

O parâmetro *Hour interval*, utilizado para calcular os setores de céu no mapa de posição solar, foi definido em 1 h para todos os casos, já que o valor *default* (0,5 h) aumenta o tempo de simulação consideravelmente. Da mesma forma, o *Factor Z*, que representa um coeficiente de ajuste da coordenada Z, foi fixado em 1, também para todos os casos, uma vez que nenhuma medida em Z necessitou de conversão de unidade, por estarem todas em metros.

O parâmetro *Slope* determina quais valores de inclinação serão usadas para a análise: nenhuma inclinação (FLAT_SURFACE) ou inclinações da superfície raster de entrada (FROM_DEM). A opção selecionada, em todos os casos, foi FROM_DEM.

Em seguida, o parâmetro *Calculation directions*, responsável por indicar o número de direções de azimute, usadas ao calcular a vista hemisférica, foi configurado em 32, por ser o valor *default*. O parâmetro *Zenith divisions*, que é encarregado de definir o número de divisões usadas para criar setores do céu, no mapa do céu, foi mantido em 8 (*default*), também para todos os casos, assim como o *Azimuth divisions*.

Posteriormente, o parâmetro *Diffuse model*, que determina qual o modelo de radiação difusa será usado, foi configurado em *uniform_sky*, onde a radiação difusa de entrada é a mesma em todas as direções do céu, levando em conta as características do céu em questão.

Os próximos dois parâmetros, *Diffuse proportion* e *Transmittivity*, foram configurados em conjunto, segundo as condições do céu no período de análise. Assim, o *Diffuse proportion* define qual a proporção da radiação normal global é difusa, enquanto *Transmittivity* representa a fração de radiação que perpassa a atmosfera, ambos variam de 0 a 1 (ESRI, 2016). Para fins de simulação, esses parâmetros foram configurados conforme valores utilizados em simulações do Mapa Solar do Rio, apresentados por Lange (2015), que diferem dos valores adotados no método base, porém que se aproximam mais das condições de céu da região de estudo.

Dessa forma, fundamentado em Lange (2015), para o solstício de inverno utilizou-se 0,3 e 0,6, para *Diffuse proportion* e *Transmittivity*, respectivamente. De igual modo, para as análises do solstício de verão utilizou-se 0,4 e 0,5, para *Diffuse proportion* e *Transmittivity*, respectivamente.

Para as análises envolvendo todo o ano de 2018, foram utilizados 0,4 e 0,55, para *Diffuse proportion* e *Transmittivity*, respectivamente. Cabe ressaltar que nesse caso, os valores empregados são fruto de uma sequência de testes, onde foi selecionada a combinação de valores cujo resultado, em irradiação, apresentou-se entre os resultados de solstício de inverno e verão.

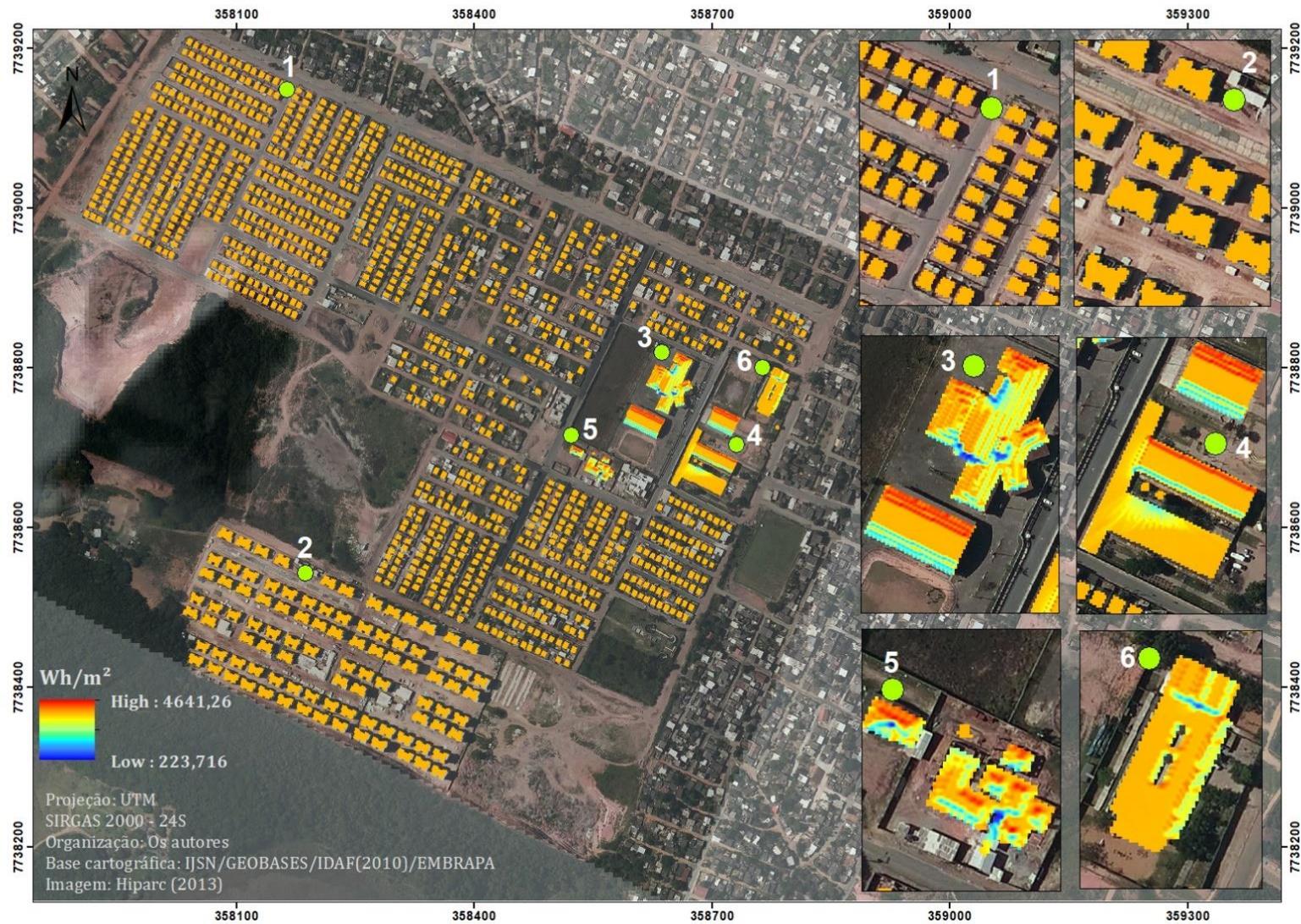
Por fim, na opção *environment*, foram configurados os parâmetros *Extent*, dentro de *Processing Extent*, e *Mask*, dentro de *Raster Analysis*, com intuito de indicar o *layer* das edificações e a área das edificações que se deseja analisar, respectivamente.

Definidos os períodos de análise e configurados os parâmetros da ferramenta *Area Solar Radiation*, foram realizadas simulações cujos resultados estão apresentados na Seção 3.2.4.

3.2.4 Resultados obtidos nas simulações

Os resultados fornecidos pela ferramenta *Area Solar Radiation* se configuram como arquivos *rasters*, onde os níveis de radiação são apresentados em uma escala de cores, sendo a cor mais quente para o maior nível de radiação, ao passo que a cor mais fria indica o menor nível de radiação. Assim, foram realizadas simulações para os dois tipos de MDE desenvolvidos, o modelo 2,5D e o modelo 3D. O mapa apresentado pela Figura 47 apresenta a espacialização da radiação no modelo 2,5D, expressa em escala de cores, durante o solstício de inverno de 2018.

Figura 47 – Mapa da radiação solar nas coberturas das edificações do Residencial Jabaeté para o solstício de inverno, modelo 2,5D.



Fonte: Elaborado pela autora a partir de: IJSN (2011), GEBASES (2010), IDAF (2010), EMBRAPA (2013).

Embora a técnica de modelamento 2,5D tenha sido aplicada na metodologia base, observou-se, a partir dos resultados apresentados pela Figura 47, que para as edificações da região de estudo, esta não representa a melhor técnica de modelamento. Tal afirmação se fundamenta na uniformidade do nível de radiação encontrada nas edificações, ou seja, a distribuição da radiação nas coberturas residenciais é a mesma apesar de possuírem características distintas. Isso se deve ao baixo nível de detalhamento do modelo, uma vez que a técnica de modelamento 2,5D despreza informações de inclinação, consideradas significativas para a análise do potencial solar.

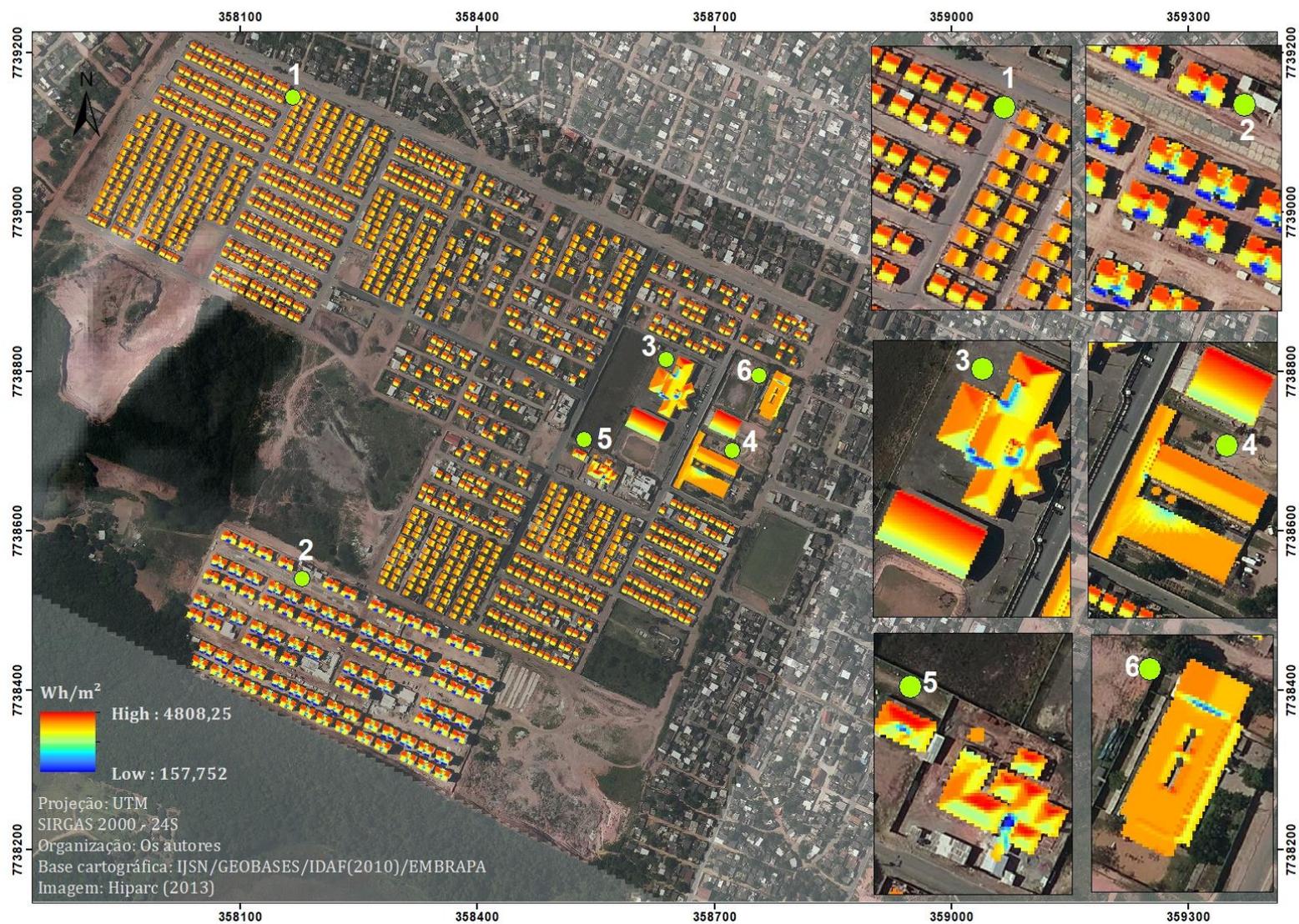
Quanto às edificações não residenciais, observa-se também na Figura 47, uma distribuição menos uniforme da radiação, quando comparado com as unidades residenciais. Esse fato se deve à técnica de extrusão usada nos modelos dessas edificações, que permite a atribuição de mais valores de altura (em z), resultando em um nível de detalhamento maior, conseqüentemente em resultados mais precisos.

Em razão dos percalços encontrados no modelo 2,5D, não foram realizadas simulações para os demais períodos, já que os resultados obtidos para o solstício de inverno foram suficientes para descartar a técnica, para essa aplicação.

Sendo assim, a segunda etapa de simulações foi dedicada aos modelos 3D de edificações. Os mapas apresentados pelas Figuras 48, 49 e 50, demonstram a espacialização da radiação, expressa em escala de cores, durante os períodos de solstício de inverno, solstício de verão e ao longo do ano de 2018 respectivamente.

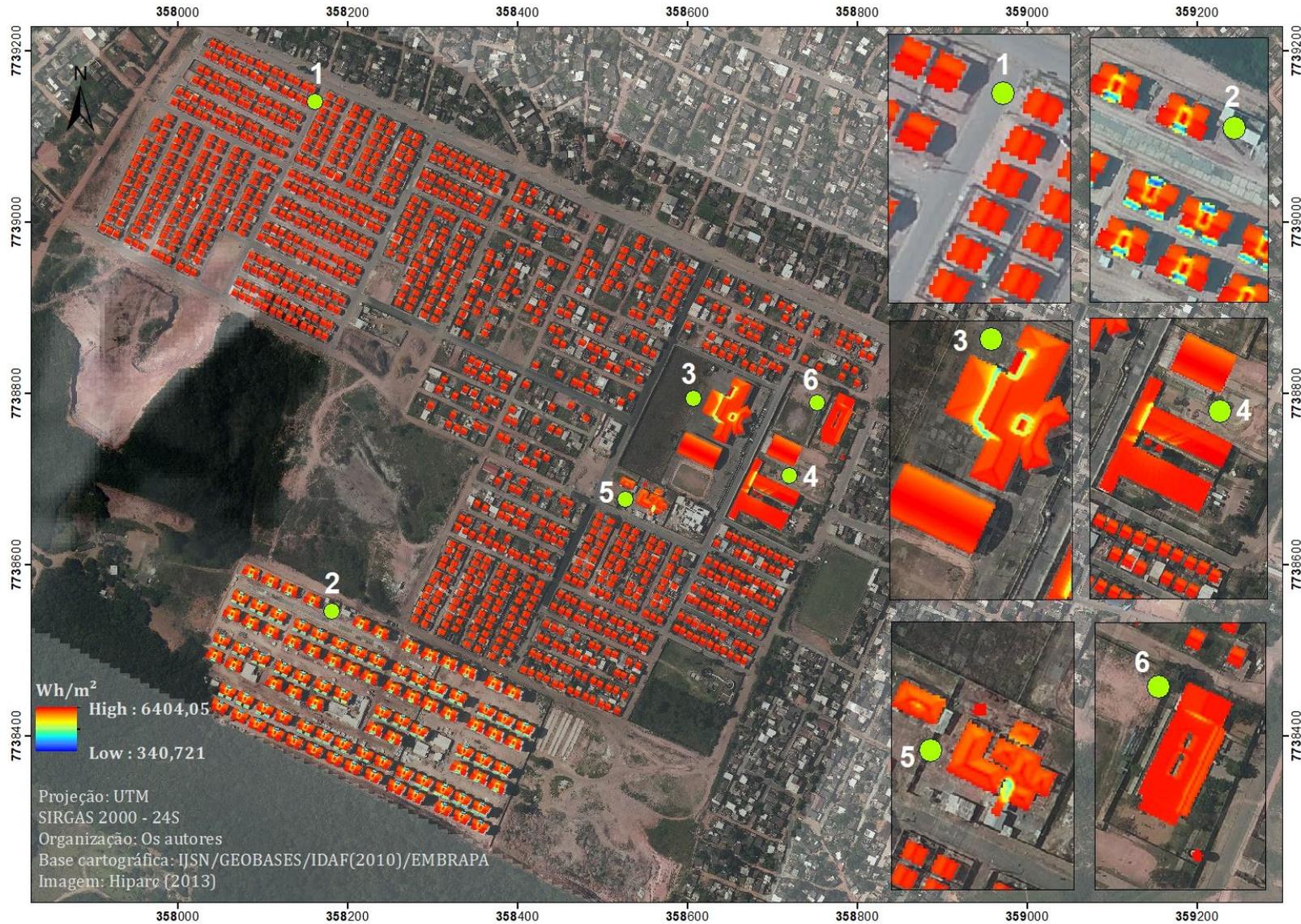
Analisando os mapas das Figuras 48, 49 e 50, observou-se que, em todos os casos, a distribuição da radiação se apresenta de forma heterogênea, já que nesses casos os modelos empregados (3D) consideram as diferentes características das coberturas. Além disso, nos três casos é possível identificar as regiões das coberturas que recebem mais radiação e que, conseqüentemente, são as mais apropriadas para instalação de sistemas de captação solar.

Figura 48 - Mapa da radiação solar nas coberturas das edificações do Residencial Jabaeté para o solstício de inverno, modelo 3D.



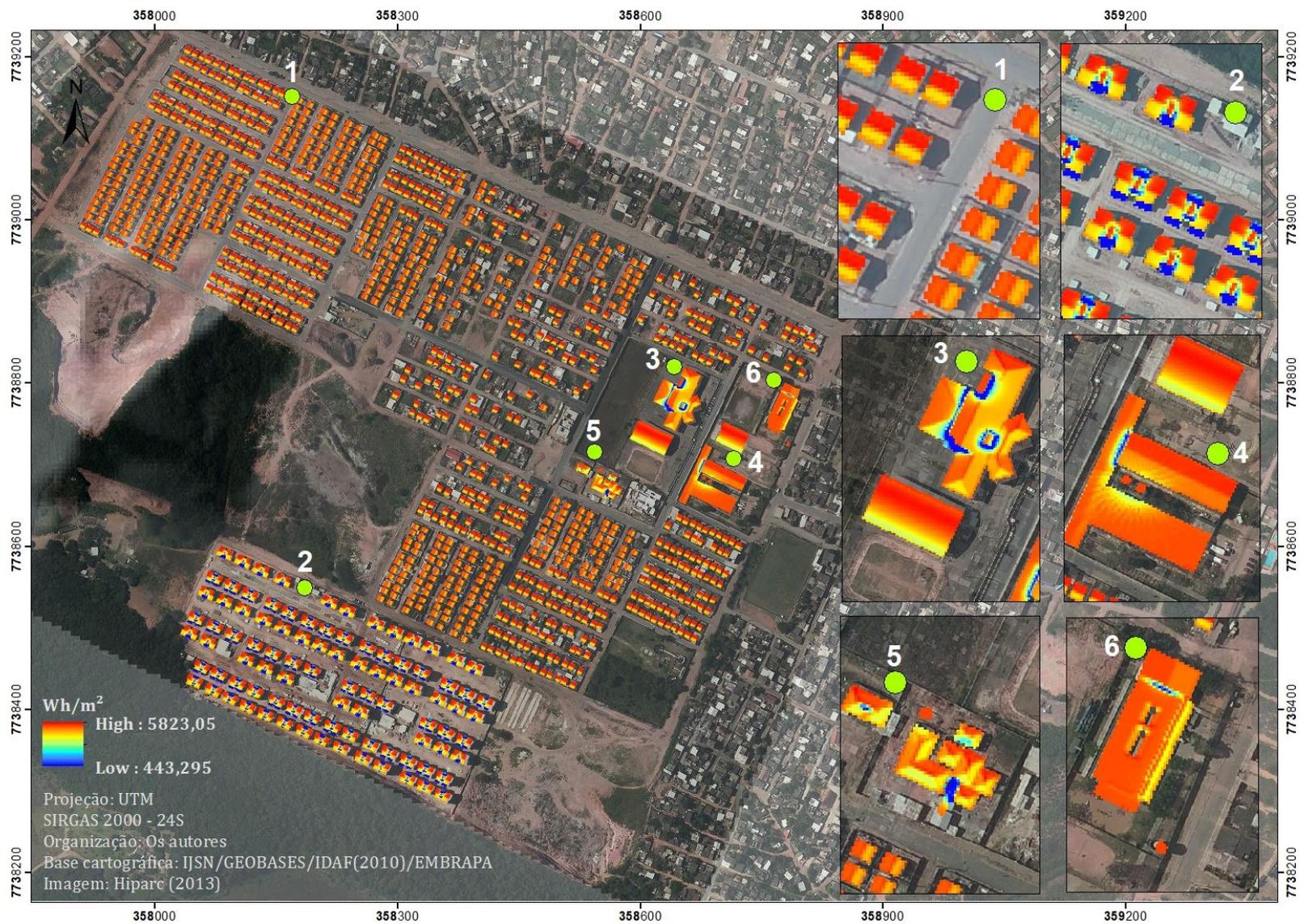
Fonte: Elaborado pela autora a partir de: IJSN (2011), GEBASES (2010), IDAF (2010), EMBRAPA (2013).

Figura 49 - Mapa da radiação solar nas coberturas das edificações do Residencial Jabaeté para o solstício de verão, modelo 3D.



Fonte: Elaborado pela autora a partir de: IJSN (2011), GEOBASES (2010), IDAF (2010), EMBRAPA (2013).

Figura 50 - Mapa da radiação solar nas coberturas das edificações do Residencial Jabaeté para a média anual (2018), modelo 3D.



Fonte: Elaborado pela autora a partir de: IJSN (2011), GEOBASES (2010), IDAF (2010), EMBRAPA (2013).

Dando sequência a avaliação dos resultados de simulação, os dados apresentados nas Tabelas 2, 3, e 4 apresentam as intensidades de irradiação (Wh/m^2) encontradas durante os solstícios de inverno e de verão e ao longo do ano de 2018, respectivamente.

Assim, quanto às edificações residenciais, observa-se pela Tabela 2, que para o solstício de inverno, a casa tipo 2 recebe maior insolação na à Nordeste ($4.264,86 \text{ Wh/m}^2$), enquanto a casa tipo 1 recebe a maior insolação na água à Noroeste (3.910 Wh/m^2).

Do mesmo modo, constatou-se que o edifício tipo 1 apresentou a maior irradiação ($4807,31 \text{ Wh/m}^2$) registrada no período, na porção Nordeste da cobertura. Isso se deve ao posicionamento privilegiado dessa parte da cobertura, pois além do posicionamento e da orientação favoráveis, sofre pouca influência de sombreamento. O contrário ocorre com a cobertura das portarias dos edifícios, que são fortemente influenciadas por sombreamento, apresentando assim as menores intensidades de irradiação, sendo $273,24 \text{ Wh/m}^2$ para o edifício 1, e $201,07 \text{ Wh/m}^2$ para o edifício tipo 2.

Quanto às edificações não residenciais, durante o solstício de inverno, destacam-se, com as maiores irradiações médias, as coberturas do CAIC (6 m), com $3.602,99 \text{ Wh/m}^2$, a quadra poliesportiva 2, com $3.544,24 \text{ Wh/m}^2$, e quadra poliesportiva 1, $3.541,19 \text{ Wh/m}^2$.

Vale lembrar que, originalmente, as coberturas do CAIC (3 m) e da UMEI Prof.^a Normília Cunha dos Santos possuem claraboias. Tais elementos arquitetônicos tornam as coberturas das referidas edificações inúteis para o uso de sistemas de captação solar. Por esse motivo, optou-se pela retirada desses elementos, a fim de avaliar o potencial solar dessas coberturas, em uma situação hipotética.

Tabela 2 - Resultados de simulação: solstício de inverno.

	SOLSTÍCIO DE INVERNO		
	Irradiação mín. (Wh/m ²)	Irradiação máx. (Wh/m ²)	Irradiação med. (Wh/m ²)
Casa 1	3.135	3.910	3.561
Casa 2	2.751,55	4.264,86	3.557,29
Edifício 1	273,24	4.807,31	3.174,07
Edifício 2	201,07	4.486,47	2.931, 81
EEEM Mário G.	372,09	4.770,64	3.298,23
UMEI Helida F.	250,20	4.425,19	3.329,46
CAIC (3m)	1.762,69	4.600,42	3.473,36
CAIC (6m)	2.227,52	4.611,47	3.602,99
C. Comunitário	662,76	4.416,52	3.447,26
Q. Esportiva 1	2.156,31	4.491,93	3.541,19
Q. Esportiva 2	2.149,71	4.506,77	3.544,24
UMEI. P. Normília	752,68	4.227,89	3.516,99

Fonte: Elaborada pela autora.

Durante o solstício de verão, quanto às edificações residenciais, observou-se por meio da Tabela 3, que a casa tipo 2 apresentou maior irradiação na porção da cobertura à Sudoeste (6.395,34 kWh/m²), enquanto a casa tipo 1 apresentou maior irradiação na cobertura à Sudeste (6.390,93 kWh/m²).

Já para o edifício 1, constatou-se a maior irradiação das edificações residenciais (6.396,14 Wh/m²) na fração Sudoeste da cobertura. Assim como no solstício de inverno, a irradiação que atinge a cobertura das portarias também é prejudicada pela presença de sombreamento, apresentando assim, os menores valores de irradiação, sendo 1.138,99 Wh/m², para o Edifício 1, e 862,25 Wh/m², para o Edifício 2.

Quanto às edificações não residenciais, destacam-se, com as maiores irradiações médias as coberturas da UMEI Prof.^a Normília Cunha dos Santo, com 6.255,50 Wh/m², do CAIC (3 m), com 6.213,72 Wh/m², e do CAIC (6 m), com 6.176,46 Wh/m².

Tabela 3 - Resultados de simulação: solstício de verão.

	SOLSTÍCIO DE VERÃO		
	Irradiação mín. (Wh/m ²)	Irradiação máx. (Wh/m ²)	Irradiação média (Wh/m ²)
Casa 1	6.030,63	6.390,93	6.227,47
Casa 2	5.949,25	6.395,34	6.234,31
Edifício 1	1.138,99	6.396,14	5.724,66
Edifício 2	862,25	6.385,37	5.229,88
EEEM Mário G.	1.422,66	6.400,04	5.830,36
UMEI Helida F.	1.724,85	6.406,98	5.929,27
CAIC (3m)	3.215,63	6.378,98	6.213,72
CAIC (6 m)	3.280,61	6.397,38	6.176,46
C. Comunitário	4.531,93	6.355,84	5.948,81
Q. Esportiva 1	5.447,99	6.403,98	6.161,17
Q. Esportiva 2	5.485,94	6.401,98	6.163,01
UMEI. P. Normília	4.783,42	6.390,048	6.255,50

Fonte: Elaborada pela autora.

Quanto à média anual, por meio da Tabela 4, observou-se que a casa tipo 2 recebe maior irradiação máxima na porção de cobertura à Nordeste (5.807,30 Wh/m²), enquanto a casa 1 recebe a maior irradiação máxima na voltada para Noroeste (5.733,91Wh/m²).

Do mesmo modo, constatou-se que o edifício 1 e 2 apresentaram valores semelhantes de irradiação máxima, aproximadamente 5.806 Wh/m², na fração Nordeste da cobertura. As irradiações mínimas também se referem as coberturas das portarias, sendo 1.588,80 Wh/m² para o edifício 1, e 691,62 Wh/m² para o edifício 2.

Quanto às edificações não residenciais, destacam-se com as maiores irradiações médias, as coberturas do CAIC (6 m), com 5.570,12 Wh/m², da UMEI Prof.^a Normília Cunha dos Santo, com 5.551,32 Wh/m², e da quadra poliesportiva 2, com 5.542,46 Wh/m².

Tabela 4 - Resultados de simulação: Média anual (2018).

	MÉDIA ANUAL		
	Irradiação mín. (Wh/m ² /dia)	Irradiação máx. (Wh/m ² /dia)	Irradiação média (Wh/m ² /dia)
Casa 1	5.307,67	5.733,91	5.552,73
Casa 2	5.170,47	5.807,30	5.562,10
Edifício 1	1.588,80	5.806,05	5.117,76
Edifício 2	691,62	5.806,39	4.567,17
EEEM Mário G.	1.299,75	5.824,79	5.181,46
UMEI Helida F.	990,78	5.814,76	5.276,56
CAIC (3m)	3.358,27	5.720,28	5.527,50
CAIC (6m)	3.465,46	5.765,69	5.570,12
C. Comunitário	2.986,95	5.815,55	5.319,47
Q. Esportiva 1	4.667,17	5.814,53	5.507,30
Q. Esportiva 2	4.788,41	5.812,03	5.542,46
UMEI. P. Normília	3.198,38	5.816,12	5.551,32

Fonte: Elaborada pela autora.

Convém mencionar que o CRESESB (Centro de Referência para as Energias Solar e Eólica Sérgio de S. Brito) realiza estimativas de irradiação solar diária média mensal, em diversos pontos do território brasileiro, com o propósito de apoiar o dimensionamento de sistemas fotovoltaicos. A Tabela 5 mostra os valores de irradiação, calculados pelo CRESESB, em um ponto próximo da região de estudo (CRESESB, 2018).

Tabela 5 - Irradiação solar no plano horizontal - Vila Velha/ES.

Ângulo	Irradiação solar diária média mensal (kWh/m²/dia)												
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Média
Plano Horinz. (0° N)	6,26	6,60	5,45	4,65	3,96	3,66	3,73	4,51	4,96	5,13	5,20	6,04	5,01

Fonte: Elaborado pela autora a partir de CRESESB (2018).

Comparando os valores de irradiação solar (plano horizontal) apresentados pela Tabela 5, com os valores de irradiação média das Tabelas 2, 3 e 4, é possível afirmar que os resultados obtidos por meio das simulações correspondem ao esperado, uma vez que estes se aproximam dos valores de referência estimados pelo CRESESB.

3.2.5 Aplicação dos Resultados

Os resultados obtidos a partir das simulações foram utilizados para o dimensionamento de sistemas de aproveitamento solar, tanto o de aquecimento de água (SAS), como o fotovoltaico (FV). O método adotado para cada dimensionamento será descrito a seguir.

Convém destacar que, como prevê-se que os sistemas dimensionados serão instalados nas coberturas das edificações residenciais, é importante posicioná-los nas regiões de maior potencial. Assim, com auxílio dos mapas apresentados pelas Figuras 48, 49 e 50 foi possível identificar tais regiões e calcular as áreas mais apropriadas para acomodação dos sistemas. A Tabela 6 mostra os valores encontrados.

Tabela 6 – Área da cobertura das edificações residenciais com maior potencial solar.

	Área de maior potencial da cobertura (m ²)
Casa 1	27,88
Casa 2	27,88
Edifício PCD	102,04
Edifício	102,76

Fonte: Elaborada pela autora.

3.2.5.1 Dimensionamento de Sistemas de Aquecimento de Água

O dimensionamento do SAS seguiu as quatro etapas propostas pela NBR 15569, de 2008, detalhadas abaixo.

1ª Etapa: Determinação do volume de consumo ($V_{consumo}$) de água quente para atendimento dos pontos de utilização, considerando a vazão da peça de utilização (Q_{pu}), o tempo (T_u) e a frequência de uso (ABNT, 2008). $V_{consumo}$, obtido por meio da Equação 1.

$$V_{consumo} = \Sigma(Q_{pu} \times T_u \times \text{frequência de uso}); \quad (1)$$

Onde:

$V_{consumo}$ é o volume total de água quente consumido diariamente, em l;

Q_{pu} é a vazão da peça de utilização, em m³/s;

T_u é o tempo médio de uso diário da peça de utilização, em s;

frequência de uso é o número total de utilizações da peça por dia.

No presente cenário, foi definido que apenas a ducha do banheiro será atendida com água quente. O valor de vazão para duchas de banho (Q_{pu}) foi adotado de acordo com o recomendado pelo Anexo C da NBR 15569, estando entre 3,0 e 15,0 L/min. Para fins de cálculo, foi selecionada uma ducha com vazão de 4,0 L/min. Da mesma forma, o referido anexo indica o tempo médio de uso da ducha (T_u) como sendo 10 min/pessoa. Considerando que as habitações em questão possuem, em média, 4 pessoas e que cada pessoa toma 2 banhos por dia, a frequência de uso é igual a 8. Assim, substituindo esses valores na Equação 1, $V_{consumo}$ é dado como:

$$V_{consumo} = (4 \times 10 \times 8)$$

$$V_{consumo} = 320 \text{ L/dia}$$

2ª Etapa: Cálculo do volume do sistema de armazenamento, dado pela Equação 2.

$$V_{armaz.} = \frac{V_{consumo} \times (T_{consumo} - T_{ambiente})}{(T_{armaz} - T_{ambiente})} \quad (2)$$

Onde:

$V_{consumo}$ é o volume de consumo diário, em l;

V_{armaz} é o volume do sistema de armazenamento do SAS, em l;

$T_{consumo}$ é a temperatura de consumo de utilização, em °C;

T_{armaz} é a temperatura de armazenamento da água, em °C;

$T_{ambiente}$ é a temperatura ambiente média anual do local de instalação, em °C.

Para mensurar V_{armaz} foi considerado $T_{consumo}$ e T_{armaz} iguais a 40 °C, e $T_{ambiente}$ igual a 26 °C. Esses valores também estão indicados pela NBR 15569. Assim, substituindo esses valores na Equação 2, V_{armaz} é dado como:

$$V_{armaz.} = \frac{320 \times (40 - 26)}{(40 - 26)}$$

$$V_{armaz.} = 320 \text{ L/dia}$$

3ª Etapa: Cálculo da demanda de energia útil.

A energia útil pode ser calculada pela Equação 3.

$$E_{\text{útil}} = \frac{V_{armaz} \times \rho \times Cp \times (T_{armaz} - T_{ambiente})}{3600} \quad (3)$$

Onde:

$E_{\text{útil}}$ é a energia útil, em kWh/dia;

V_{armaz} é o volume do sistema de armazenamento do SAS, em l;

ρ é a massa específica da água igual a 1000, em kJ/kg;

Cp é o calor específico da água igual a 4,18, em kJ/kg;

T_{armaz} é a temperatura de armazenamento da água, em °C;

$T_{ambiente}$ é a temperatura ambiente média anual do local de instalação, em °C.

Substituindo os valores indicados em norma e o obtido pela Equação 2, tem-se:

$$E_{\text{útil}} = \frac{320 \times 1000 \times 4,18 \times (40 - 26)}{3600};$$

$$E_{\text{útil}} = 5,20 \text{ kWh/dia}$$

4ª Etapa: Cálculo da área coletora, a partir da Equação 4.

$$A_{coletora} = \frac{(E_{\text{útil}} + E_{perdas}) \times FC_{instal} \times 4,901}{PMDEE \times I_G} \quad (4)$$

Onde:

$A_{coletora}$ é a área coletora, em m²;

I_G é o valor da irradiação global, simulada, para o local de instalação, em kWh/m²/dia;

E_{perdas} é o somatório das perdas térmicas dos circuitos primário e secundário, expressa em kWh/dia, calculada pela soma das perdas ou pela Equação 5:

$$E_{perdas} = 0,15 \times E_{\acute{u}til} \quad (5)$$

Substituindo o valor encontrado pela Equação 4 na Equação 5, obtêm-se:

$$E_{perdas} = 0,15 \times 5,20 = 0,78 \text{ kWh/dia};$$

PMDEE é a produção média diária de energia específica do coletor solar, expressa em kWh/m², calculada através da Equação 6:

$$PMDEE = 4,901 \times (Fr\tau\alpha - 0,0249 \times Fr_{UL}) \quad (6)$$

Onde:

$Fr\tau\alpha$ é o coeficiente de ganho do coletor solar (adimensional);

Fr_{UL} é o coeficiente de perdas do coletor solar (adimensional).

Utilizando valores médios para $Fr\tau\alpha$ e Fr_{UL} , indicados na NBR 15569, como sendo 0,6967 e 5,6508, respectivamente, obtêm-se:

$$PMDEE = 4,901 \times (0,6967 - 0,0249 \times 5,6508);$$

$$PMDEE = 2,72 \text{ kWh/m}^2.$$

$F_{C_{instal}}$ é o fator de correção para a inclinação e orientação do coletor solar dado pela Equação 7:

$$F_{C_{instal}} = \frac{1}{1 - [1,2 \times 10^{-4} \times (\beta - \beta_{\acute{o}timo})^2 + 3,5 \times 10^{-5} \times \gamma^2]} \quad (7)$$

Onde:

β é a inclinação do coletor em relação ao plano horizontal, em graus (°);

$\beta_{\text{ótimo}}$ é a inclinação ótima do coletor para o local de instalação, em graus (°);

γ é o ângulo orientação dos coletores solares em relação ao Norte geográfico, em graus (°).

Como todas as águas onde serão instalados os sistemas possuem a mesma inclinação de 30%, utilizou-se β igual a 17°. Para $\beta_{\text{ótimo}}$ utilizou-se a latitude local, igual a -20,3631. Quanto a γ , considerou-se, como referência, o ponto de irradiação máxima das coberturas, sendo iguais a 26°, 64° e 24°, para γ_{casa1} , γ_{casa2} e $\gamma_{\text{prédios}}$. Substituindo esses valores na Equação 7, tem-se:

$$F_{C_{\text{instal,casa1}}} = \frac{1}{1 - [1,2 \times 10^{-4} \times (17^\circ - 20,36)^2 + 3,5 \times 10^{-5} \times 26^2]}$$

$$F_{C_{\text{instal,casa1}}} = 1,026$$

Por fim, para mensurar a A_{coletora} foi necessário substituir os valores encontrados a partir das Equações 3, 6 e 7, além das amplitudes máximas de irradiação global (I_G) encontradas no solstício de inverno, disponíveis nas Tabelas 2 e 3.

Importa dizer que o dimensionamento de sistemas de captação solar baseados na irradiação média anual pode não operar como desejado, uma vez que nos meses de inverno, por exemplo, o recurso solar tende a ser menor que a média anual, tornando o sistema superdimensionado. Por esse motivo, deve ser considerado, para efeitos de cálculo, a amplitude de irradiação obtida no solstício de inverno, no caso, 21 de junho de 2018. Dessa forma, se o sistema for dimensionado para atender a demanda na pior condição de recurso solar, ele provavelmente atenderá durante todo o ano.

Assim, substituindo os valores mencionados na Equação 4, tem-se:

$$A_{\text{coletora,casa1}} = \frac{(5,20 + 0,78) \times 1,026 \times 4,901}{2,72 \times 3,91} = 2,82 \text{ m}^2$$

Por meio dos cálculos realizados, constatou-se que a casa tipo 1 deverá ter reservatório térmico com capacidade mínima de 320 litros e coletores solares ocupando área mínima de 2,82 m². No que se refere ao SAS das edificações

multifamiliares, optou-se por utilizar sistema único e centralizado que atenda todas as unidades habitacionais. O mesmo procedimento de cálculo foi feito para as demais edificações residenciais, e os resultados seguem apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 - Dimensionamento de SAS para edificações residenciais.

	Casa 1	Casa 2	Edifício 1	Edifício 2
Capacidade mín. reservatório (L)	320	320	5.120	5.120
Área coletora mín. (m²)	2,82	2,95	36,58	36,58

Fonte: Elaborada pela autora.

Em seguida, foi feita uma busca de sistemas de aquecimento de água comerciais, com dimensões próximas das calculada anteriormente. A Tabela 8 mostra as características básicas e o custo dos sistemas encontrados no mercado.

Tabela 8 – Características dos elementos dos Sistemas de Aquecimento de Água.

	Casa 1	Casa2	Edifício	Edifício PCD
Fornecedor	Goldner Solar	Goldner Solar	SOLAGUA	SOLAGUA
Fabricante	SOLAGUA	SOLAGUA	SOLAGUA	SOLAGUA
Capacidade do reservatório (l)	400	400	5.000	5.000
Área do coletor (m²)	2	2	2	2
Quantidade de coletores	2	2	25	25
Custo do sistema (R\$)	4.450,00	4.450,00	43.905,60	43.905,60

Fonte: Elaborada pela autora.

Os custos apresentados na Tabela 8 se referem à forma de apagamento à vista, incluindo todos elementos do sistema, bem como a instalação e o frete.

3.2.5.2 Dimensionamento de Sistemas Fotovoltaicos (FV)

O dimensionamento dos sistemas FV foram realizados conforme método descrito por Villalva e Gazoli (2012), cujas quatro etapas são detalhas a seguir.

1ª Etapa: Cálculo da Energia que se deseja produzir com o sistema FV

A energia que se deseja produzir pelo sistema fotovoltaico pode ser determinada a partir do consumo médio mensal de eletricidade, obtido por meio do histórico anual de consumo, registrado na fatura emitida pela concessionária de energia.

Como não foi possível acessar as faturas de energia das habitações em análise, utilizou-se o valor de consumo médio igual a 182 kWh/mês, calculado pela EPE (Empresa de Pesquisa Energética), para residências com no máximo 4 pessoas, localizada na região Sudeste (EPE, 2015).

Considerando o crescimento do consumo energético atestado pela PDE 2026 (Plano Decenal de Expansão de Energia 2026), o consumo referente ao chuveiro elétrico, em média 20% (EPE, 2017), suprido pelo SAS dimensionado na Seção 3.2.5.1, não foi descontado do consumo médio adotado (182 kWh/mês) durante o dimensionamento dos sistemas FV.

Dessa forma, embora tenha sido adotado um valor médio de energia consumida, este não deverá ser a energia produzida pelo sistema, uma que vez que é necessário, antes, considerar o consumo mínimo mensalmente cobrado pela concessionária. O consumo mínimo é o valor, em kWh, vinculado ao custo de disponibilidade do sistema de distribuição, estabelecido pela concessionária de energia, que o cliente pagará compulsoriamente, conforme seu tipo de ligação (monofásico, bifásico ou trifásico).

Neste caso, a EDP, empresa responsável pela distribuição de energia da região estudada, define 30 kWh/mês como consumo mínimo em instalações monofásicas, como as unidades habitacionais em questão. Destaca-se que o valor mínimo mencionado se refere apenas às unidades consumidoras monofásicas pertencentes ao Grupo B (tensão inferior a 2,3 kV).

Dessa forma, para obter a energia de geração ($E_{geração}$) deve-se descontar o consumo mínimo do valor médio de consumo (V_m), conforme Equação 8.

$$E_{geração} = V_m - 30 \left[\frac{kWh}{mês} \right] \quad (8)$$

$$E_{geração} = 182 - 30 = 152 \left[\frac{kWh}{mês} \right]$$

$$E_{geração} = 152 \div 30 = 5,07 \left[\frac{kWh}{dia} \right]$$

2ª Etapa: Energia produzida pelo módulo fotovoltaico

Para calcular a energia produzida por um módulo fotovoltaico é necessário conhecer a irradiação solar média anual, disponível no local de instalação. Essa informação é comumente obtida por meio de mapas solarimétricos, entretanto essas fontes

apresentam o recurso solar de forma genérica, sem considerar detalhadamente os efeitos causados pelos elementos presentes no contexto urbano.

Sendo assim, para obter resultados mais precisos, foram utilizados os mesmos valores de irradiação usados no dimensionamento dos SAS, também disponíveis nas Tabelas 2 e 3.

Uma vez conhecida a irradiação solar de projeto, deve-se levantar as características técnicas do módulo empregado. Para tal, foi feita uma pesquisa de módulos fotovoltaicos comerciais, destinados a aplicação residencial. A Tabela 9 apresenta as características dos módulos encontrados.

Tabela 9 – Características dos Módulos Fotovoltaicos para aplicação residencial.

Fornecedor	Goldner Solar	Ciclux	Ciclux
Fabricante	Yingli Solar	BYD 330PHK	Canadian 325P
Potência (W)	330	330	325
Eficiência (%)	17,0	16,70	16,72
Dimensão (m)	1,96 x 0,99	1,962 x 0,992	1,954 x 0,982

Fonte: Elaborada pela autora.

Como se pode observar, as características presentes na Tabela 9 demonstraram considerável semelhança e, portanto, não foram utilizadas como critério de seleção dos módulos FV. Para tal, foi considerado o custo dos sistemas apresentados pelos fabricantes, mais bem detalhado na seção seguinte.

Segundo orçamentos emitidos pelos fornecedores em questão, foram selecionados os módulos distribuídos pela Ciclux por apresentarem menor custo de investimento. Dessa forma, segundo orçamento da Ciclux, os módulos BYD 330PHK foram destinados às casas, enquanto os módulos Canadian 325P foram atribuídos aos edifícios.

A partir das informações apresentadas na Tabela 8, a energia produzida pelo módulo BYD 330PHK (E_m) foi estimada, por meio da Equação 9.

$$E_m = E_s \times A_m \times \eta_m \quad (9)$$

Onde:

E_m é a energia produzida pelo módulo diariamente, expressa em Wh/dia;

E_s é a irradiação solar, expressa em Wh/m²/dia;

A_m é a área de superfície do módulo, expressa em m²;

η_m é a eficiência do módulo.

Substituindo os valores levantados anteriormente, na Equação 9, tem-se:

$$E_{m,casa1} = 5.733,91 \times 1,95 \times 0,167 = 1,87 \text{ kWh/dia}$$

O mesmo procedimento foi feito para as demais edificações residenciais, e os resultados estão apresentados na Tabela 10.

3ª Etapa: Cálculo da quantidade de módulos fotovoltaicos

Uma vez calculada a energia total de geração desejada ($E_{geração}$) e a energia produzida pelo módulo (E_m), para calcular a quantidade de módulos (N_m) necessários ao atendimento da demanda residencial em questão, basta substituir ambos os valores na Equação 10.

$$N_m = \frac{E_{geração}}{E_m} \quad (10)$$

$$N_{m,casa1} = \frac{5,07}{1,27} = 4 \text{ módulos.}$$

O mesmo procedimento foi feito para as demais edificações, e os resultados seguem apresentados na Tabela 9.

4ª Etapa: Dimensionamento dos inversores

Para selecionar um inversor compatível com os módulos dimensionados deve-se levar em conta os seguintes critérios:

- A tensão de circuito aberto do *string*, que não pode ultrapassar a tensão máxima permitida na entrada do inversor. O atendimento desse critério é fundamental para a operação do sistema, pois uma sobretensão na entrada do inversor pode danificar o equipamento irreversivelmente;

- A potência do inversor selecionado deve ser igual ou superior à potência de pico do conjunto de módulos. No entanto, conectar um conjunto de módulos cuja potência de pico é maior que a potência do inversor, não danificará o equipamento, mas impedirá o aproveitamento da potência máxima do conjunto de módulos.

A Tabela 10 relaciona os resultados obtidos durante o dimensionamento realizado com suas respectivas edificações residenciais.

Tabela 10 - Dimensionamento de sistemas FV para edificações residenciais.

	E_m (kWh/dia)	N_m	Área ocupada por módulos (m ²)
Casa 1	1,87	4	7,79
Casa 2	1,89	4	7,79
Edifício 1	1,86	56	107,52
Edifício 2	1,87	56	107,52

Fonte: Elaborada pela autora.

Observa-se, pela Tabela 10, que a área de cobertura das edificações multifamiliares, ocupada pelos módulos, extrapola aquela indicada como de maior potencial solar, apresentada na Tabela 6, como sendo aproximadamente 102 m². Ainda assim, cabe distribuir os módulos de acordo com o mapa da Figura 48, dando prioridade para as áreas de cor mais quente.

Em seguida, foi feita uma busca de sistemas FV comerciais, com dimensões próximas das calculada anteriormente. A Tabela 11 mostra as características básicas e o custo dos sistemas, empregando os módulos BYD 330PHK e Canadian 325P, ambos fornecidos pela mesma empresa, Ciclux Energia Solar.

O custo exibido pela Tabela 11 se refere à forma de apagamento à vista, incluindo todos elementos do sistema FV, bem como a instalação e o frete.

Tabela 11 – Características dos elementos dos sistemas fotovoltaicos.

		Casa 1	Casa 2	Edifício	Edifício PCD
Módulo	Modelo	BYD 330PHK	BYD 330PHK	Canadian 325P	Canadian 325W
	Potência máx. (Wp)	330	330	325	325
	Tensão máx. potência (V)	37,83	37,83	37,0	37,0
	Nº de módulos	4	4	56	56
	Eficiência (%)	16,70	16,70	16,72	16,72
	Energia gerada por módulo (kWh/dia)	1,2733	1,3889	1,5433	1,4403
	Área ocupada (m ²)	7,8	7,8	107,52	107,52
Inversor	Modelo	aPsystems YC500	aPsystems YC500	Fronius, Primo 8.2-1	Fronius, Primo 8.2-1
	Potência máx. (Wp)	500	500	1200	1200
	Tensão de entrada (V)	55	55	420	420
	Eficiência (%)	95,5	95,5	97,0	97,0
	Custo total (R\$)	10.207,00	10.207,00	99.444,00	99.444,00

Fonte: Elaborada pela autora.

Destaca-se que os sistemas fornecidos pela Goldner Solar não foram analisados por apresentarem custo de investimento maior que os da Ciclux Energia Solar. Nesse caso, os sistemas sugeridos para as casas e edifícios custariam R\$ 10.500,00 e 113.100,00, respectivamente.

3.2.5.3 Análise da Viabilidade Econômica

Nesta seção, os sistemas de captação solar são analisados do ponto de vista econômico, adotando a metodologia do Valor Presente Líquido (VPL).

Segundo a metodologia do Valor Presente Líquido (VPL), quando este é menor que zero, o investimento é economicamente inviável, pois o valor presente das saídas de caixa é maior que o valor presente das entradas de caixa.

Por outro lado, se o VPL for igual a zero, significa que o valor presente das saídas de caixa é igual ao valor presente das entradas. Em tal caso, o investimento será quitado durante a vida útil do projeto, porém não haverá nenhum retorno financeiro para o investidor.

De forma análoga, quando o VPL é maior que zero, denota-se que o valor das saídas de caixa é menor que o valor das entradas de caixa. Nesse caso, além de liquidar o valor do investimento, haverá retorno financeiro para o investidor e, por essa, razão

pode-se concluir que o projeto é economicamente factível (CASSAROTO FILHO; KOPITTKKE, 2000).

O consumidor em questão é classificado como residencial, enquadrando-se no subgrupo B1 e na modalidade tarifária Convencional. Considerando o acréscimo decorrente da bandeira vermelha na tarifa de energia, a Tabela 12 apresenta os valores de tarifação vigentes a partir de agosto de 2018.

Tabela 12 - Custos da Modalidade Convencional, subgrupo B1.

Tarifa de Energia (TE) + bandeira vermelha 2	R\$ 0,35331/kWh
Tarifa de Uso do Sistema (TUSD)	R\$ 0,25897/kWh
ICMS	25%
PIS + COFINS	5%

Fonte: EDP, 2018.

No cálculo de custo anual de energia, foi considerado o valor referente ao consumo, estimado em 2.184 kWh/ano, definido pela EPE, e as tarifas de energia (TE) e de uso do sistema de distribuição (TUSD), como mostrado na Equação 11.

$$Custo_{sem\ impostos} = Energia_{consumida} * (TE + TUSD) \quad (11)$$

$$Custo_{sem\ impostos} = 2.184 * (0,35331 + 0,25897) = R\$ 1.337,22$$

Porém, o valor faturado pela distribuidora inclui os valores de impostos (ICMS, COFINS e PIS), assim como calculado na Equação 12 (PROCEL, 2011).

$$Custo_{com\ impostos} = \frac{Custo_{sem\ impostos}}{1 - (PIS + COFINS + ICMS)} \quad (12)$$

Dessa forma, o custo médio anual com consumo de energia elétrica de uma unidade residencial será:

$$Custo_{com\ impostos} = \frac{1.337,22}{1 - (0,3)} = R\$ 1.910,31$$

Quanto aos sistemas fotovoltaicos selecionados, o cálculo da energia produzida anualmente foi realizado utilizando a Equação 9, e os resultados encontram-se na Tabela 13. Para o desenvolvimento de tais cálculos foi considerada a média das

máximas irradiações estimadas, ao longo de 2018, destacada na Tabela 4. Essa consideração se deve a implantação dos sistemas nas porções de maior potencial solar, sempre que possível, das coberturas analisadas.

Tabela 13 - Estimativa de energia gerada pelos sistemas FV

	Casa 1	Casa 2	Edifício	Edifício PCD
	Sistema 1		Sistema 2	
Sistema Sugerido	BYD 330PHK + aPsystems YC500		Canadian 325P + Fronius, Primo 8.2- 1	
Geração (kWh/ano)	2.712	2.761,07	38.024,97	38.348,34

Fonte: Elaborada pela autora.

Conhecidos os valores estimados de energia elétrica produzida por edificação (kWh/ano), convém posteriormente analisar o montante em reais (R\$/ano), economizado com energia.

Assim, a partir dos resultados apresentados pela Tabela 13 é possível afirmar que todas as edificações analisadas são capazes de suprir integralmente suas demandas energéticas. Isso porque os sistemas FV sugeridos geram mais que 2.184 kWh/ano, para as casas, e mais que 34.944 kWh/ano, para os edifícios, implicando, assim, em uma economia de 100% com energia elétrica, em todas as edificações. Vale lembrar que apesar da economia constatada, a fatura de energia não será nula, uma vez que despesas com impostos e consumo mínimo continuarão existindo. Além de suprir as demandas energéticas, os sistemas FV em questão produzem um excedente, que deverá ser encaminhado para a rede convencional de energia, gerando créditos com a concessionária, que, quando necessário, poderão ser abatidos nos meses de baixa geração.

Por fim, cabe avaliar a atratividade econômica de se investir nos sistemas FV sugeridos (Tabela 13). Para tal, a Tabela 14 apresenta os custos de tais sistemas, informados por fornecedores locais, incluindo os valores dos módulos, inversores, estrutura de fixação, cabos, frete e instalação.

Tabela 14 - Custos dos Sistemas FV analisados

	Edificações	Módulos		Inversor	Custo do sistema instalado (R\$)
		Modelo	Quantidade		
Sistema 1	Casas	Modelo	Quantidade	aPsystems	10.207,00
		BYD 330PHK	4	YC500	
Sistema 2	Edifícios	Modelo	Quantidade	Fronius,	99.444,00
		Canadian 325P	56	Primo 8.2-1	

Fonte: Elaborada pela autora.

Tendo em vista os custos apresentados pela Tabela 14, é possível calcular os valores de retorno ($V_{retorno}$) de cada investimento, por meio da Equação 13, em um tempo definido n, considerando um recebimento anual sucessivo A e uma taxa mínima de atratividade i (CASSAROTO FILHO; KOPITTKKE, 2000).

$$V_{retorno} = A * \left\{ \frac{1 - \left[\frac{1}{(1+i)^n} \right]}{i} \right\} \quad (13)$$

Para tal cálculo, definiu-se o tempo n como sendo a vida útil dos equipamentos, estimado em 25 anos pelo fabricante. A taxa mínima de atratividade utilizada foi a SELIC, calculada em 6,50% a.a (BANCO CENTRAL DO BRASIL, 2019); e o recebimento sucessivo é o equivalente ao valor anual economizado pelos sistemas.

$$V_{retorno (sistema 1)} = 1.910,31 \left\{ \frac{1 - \left[\frac{1}{(1 + 0,065)^{25}} \right]}{0,065} \right\} = R\$ 23.302,73$$

$$V_{retorno (sistema 2)} = (1.910,31 \times 16) \left\{ \frac{1 - \left[\frac{1}{(1 + 0,065)^{25}} \right]}{0,065} \right\} = R\$ 372.827,61$$

O valor presente de cada investimento foi calculado utilizando a Equação 14.

$$Valor Presente = V_{retorno} - Investimento Inicial \quad (14)$$

Assim,

$$\text{Valor Presente}_{\text{sistema 1}} = 23.302,84 - 10.207,00 = 13.095,84$$

$$\text{Valor Presente}_{\text{sistema 2}} = 372.827,61 - 99.444,00 = 273.383,61$$

Com base nos valores de VPL calculados, constata-se que investir nos sistemas FV sugeridos é viável economicamente ($VPL > 0$), além disso o *payback* estimado é de, 5,5 e 6,5 anos, para os sistemas 1 e 2, respectivamente.

O mesmo foi feito para os SAS, considerando que os sistemas dimensionados serão capazes de suprir totalmente a demanda de água quente das unidades residenciais, como uma taxa Selic de 6,5% e uma vida útil de 25 anos. Dessa forma, a economia seria de aproximadamente 20% (EPE, 2017) com energia elétrica, a partir do uso de tais sistemas.

À vista disso, constatou-se que os sistemas de aquecimento sugeridos também são viáveis economicamente, por apresentarem VPL positivo, e *payback* de 11,6 e 7,2 anos, para os sistemas das casas e dos edifícios, respectivamente.

Convém mencionar que os cálculos de atratividade realizados desconsideram as variações das tarifas de energia, a perda de eficiência dos sistemas ao longo do tempo, e a variação da taxa de atratividade (Selic).

3.2.6 *Divulgação dos resultados*

Os resultados obtidos por meio dos procedimentos descritos nas seções anteriores foram divulgados em uma plataforma *online* gratuita, que permite ao usuário obter informações necessárias para decidir sobre a instalação de um sistema de captação solar.

O método aderido para publicação dos referidos resultados divergiu do método base, uma vez que este utiliza o sistema OpenLayers, que exige amplo conhecimento em programação JAVA. Por essa razão, foi utilizado um método semelhante ao aplicado na divulgação do Mapa Solar do Rio de Janeiro.

Tal método emprega a Plataforma ArcGis Online que consiste em uma ferramenta de exibição interativa de informações geográficas. Essa ferramenta pode conter elementos, tais como mapa base, *layers*, legendas e mecanismos de navegação. Além

disso, os mapas criados por essa ferramenta podem ser compartilhados por meio de *links*, incorporados em *sites* ou usados para criar aplicativos (ESRI, 2016).

O processo de desenvolvimento de mapas, por meio do ArcGis Online, envolve 5 etapas básicas: escolha de um mapa base, inserção de *layers*, configuração de estilos, configuração de *pop-ups* e criação do *link* de divulgação.

Dessa forma, o Mapa Solar Interativo do Residencial Jabaeté foi elaborado a fim de avaliar o método selecionado. Para tal, foi necessário, inicialmente, criar uma conta pública no site da ESRI (www.arcgis.com) e acessar o *link* “Criar Mapa”. Depois, foi selecionado o Mapa Base como “Imagem”, no menu superior à esquerda. Em seguida, utilizando a ferramenta de navegação *zoom*, a região de recorte foi localizada, o Residencial Jabaeté, e o *layer* de irradiação foi adicionado, por meio ferramenta “Adicionar Camada do Arquivo”, também localizada no menu superior à esquerda.

Além disso, foi necessário criar uma legenda com os níveis de irradiação presentes no *layer*. Vale lembrar que o mapa em questão foi desenvolvido a partir dos dados de irradiação do solstício de inverno, com valores entre 157,75 Wh/m² e 4808,25 Wh/m². A partir de tais dados, foram configurados 3 níveis de irradiação – alto, médio e baixo –, representados pelas cores vermelha, amarela e laranja, respectivamente. A Tabela 15 mostra como foram estabelecidos os níveis de irradiação mencionados.

Tabela 15 - Definição dos níveis de irradiação do Mapa Solar Interativo do Residencial Jabaeté.

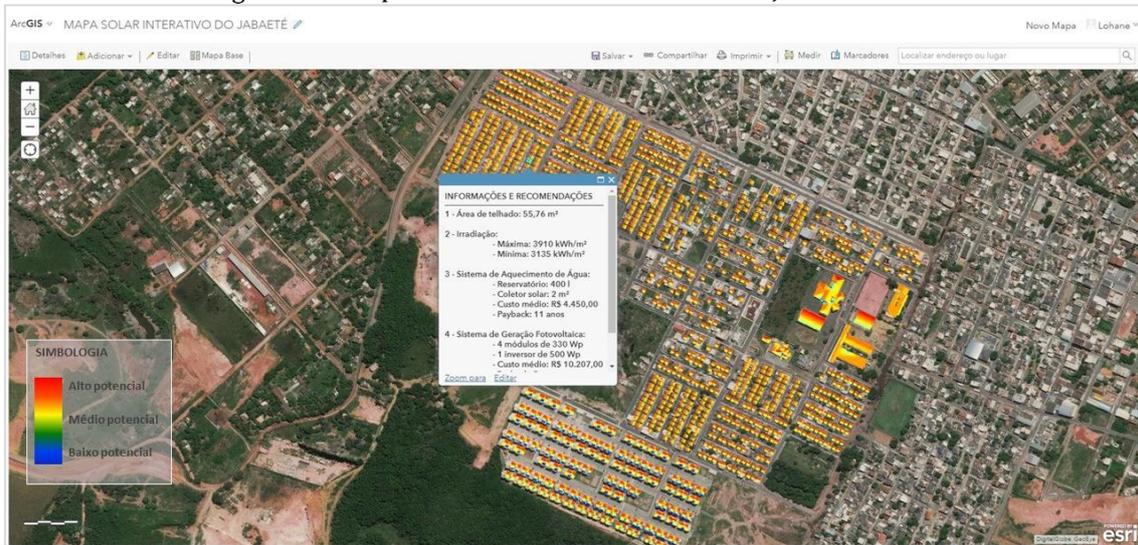
Irradiação (I)	Nível	Representação
$(0,9 \times 4808,25) < I < 4808,25$	Alto	Vermelho
$2325,25 \leq I \leq 4327,4$	Médio	Laranja
$I < 2325,25$	Baixo	Amarelo

Fonte: Elaborada pela autora.

Em seguida, foram criados *pop-ups*, para todas as coberturas presentes no recorte, a fim de divulgar informações, tais como a área da cobertura, a irradiação disponível, a configuração de sistemas de captação solar e o *payback* do investimento.

O mapa em questão, ainda em processo de aprimoramento, pode ser acessado por meio do endereço <https://arcg.is/1qOr4C>. A Figura 51 apresenta a interface gráfica, onde é possível observar a distribuição da radiação nas coberturas, bem como a legenda e o *pop-up* com informações de uma casa específica.

Figura 51 - Mapa Solar Interativo do Residencial Jabaeté

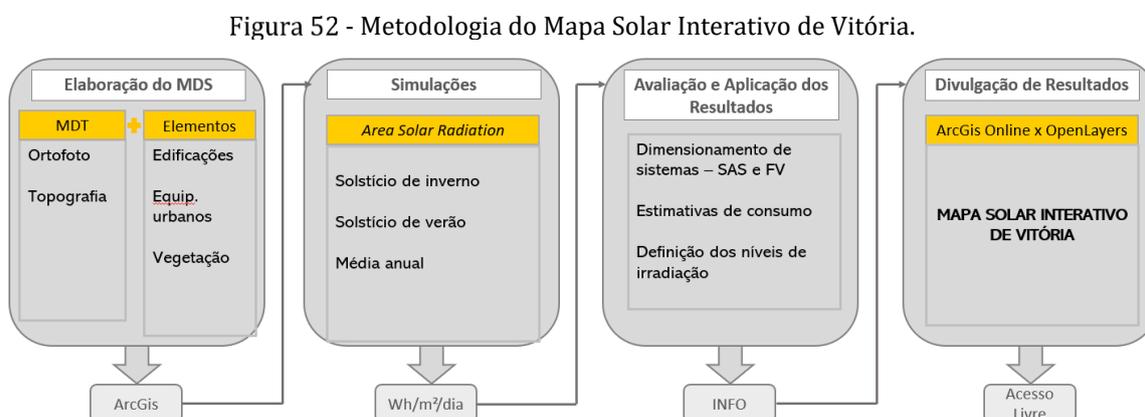


Fonte: Elaborada pela autora.

4 RESULTADOS

Em razão das características urbanas, do nível de consumo energético e do potencial solar relevante, detalhados na Seção 2.1, entende-se que a cidade de Vitória/ES atende a critérios que justificam o emprego de ferramentas como o mapa solar interativo.

Dessa forma, a partir dos procedimentos realizados no Capítulo 3, foram obtidos resultados que auxiliaram na definição da metodologia de elaboração do Mapa Solar Interativo de Vitória, objeto deste estudo. Assim sendo, este capítulo versa sobre as principais etapas metodológicas recomendadas para a concepção do referido mapa. A Figura 52 apresenta um fluxograma da metodologia proposta.



Fonte: Elaborada pela autora.

4.1 Elaboração do Modelo Digital de Superfície (MDS)

O MDS pode ser obtido por meio de duas técnicas distintas: rastreamento a laser (dados LiDAR), como realizado em mapas de alto nível; ou por modelamento da superfície, como realizado nos mapas de Concepción (Chile) e Rio de Janeiro.

Os dados de rastreamento a laser, embora onerosos, são capazes de representar em ricos detalhes, toda a morfologia urbana de uma cidade. Esses dados podem ser adquiridos em empresas especializadas em aerolevantamentos, como a Hipac Geotecnologias, de Vitória.

Por outro lado, o segundo método mencionado conta com duas etapas: elaboração do MDT e modelamento dos elementos presentes no território. A primeira etapa requer dados de topografia, ortofoto e imagens de satélite, que devem ser

associados no ArcGis. Já a segunda etapa necessita de informações construtivas das edificações, dados de vegetação, elementos sombreadores e equipamentos urbanos, a fim de desenvolver o modelo de cada elemento em *software* apropriado, ArcGis ou outros.

Quanto ao processo de modelamento das edificações, convém mencionar que a cidade de Vitória possui tipologias variadas de construções, mais complexas do que foi proposto na Seção 3.2.2. Portanto, considera-se inviável a utilização da abordagem 3D, como aplicado na Seção 3.2.2.2, edificação por edificação, devido ao longo tempo de trabalho que tal processo demandaria.

Outra opção, considerada mais viável, é a utilização do método da extrusão (abordagem 2,5D), também utilizado nos mapas de Concepción e Rio de Janeiro. Para auxiliar a aplicação desse método na cidade de Vitória é necessário, antes, realizar um trabalho de categorização das edificações, identificando todos os tipos de construção e suas localidades, assim como descrito por García-Alvarado *et al.* (2016).

Cabe ressaltar que quanto maior o nível de detalhes do modelo, maior o tempo de simulação e recurso computacional demandados. Em contrapartida, maior será o rigor dos resultados.

4.2 Simulações

Com a finalidade de obter informações sobre o recurso solar disponível para captação, nas coberturas da cidade de Vitória/ES, recomenda-se que sejam realizadas simulações em *softwares* especializados em estudos solares e desenvolvimento de mapas, como ArcGis. As simulações devem ser realizadas em consonância com as particularidades do local de análise, e para isso, deve-se ter atenção para que os parâmetros sejam calibrados corretamente.

Nesse sentido, destaca-se a configuração dos parâmetros *Diffuse proportion* e *Transmittivity*, por serem fundamentais na precisão dos resultados. Dessa maneira, é importante adotar métodos de calibração que traduzam, da forma mais fiel possível, as condições do céu, do período em questão.

À vista disso, recomenda-se o uso da metodologia adotada por Lange (2015), desenvolvida por Dyer (2014), onde valores de *Diffuse proportion* e *Transmittivity* são combinados e testados até que a irradiação global horizontal resultante se aproxime da irradiação global horizontal medida. Dados de irradiação medida podem ser obtidos nas estações meteorológicas existentes em Vitória.

Quanto à definição do período de análise, as simulações também podem ser realizadas para os solstícios de inverno e de verão, bem como para um ano completo. Deve-se lembrar que, quanto maior o período analisado, maior será o tempo de simulação e recurso computacional demandados.

4.3 Avaliação e Aplicação dos Resultados

Os resultados obtidos durante a etapa de simulação, apresentados em intensidade de irradiação ($\text{Wh/m}^2/\text{dia}$), devem ser avaliados e, em seguida, utilizados para estimar as viabilidades, técnica e econômica, do emprego de sistemas de aproveitamento solar, conforme realizado na Seção 3.2.5.

Entretanto, para o dimensionamento dos sistemas mencionados é necessário conhecer a demanda energética das edificações estudadas. García-Alvarado e outros (2016) realizaram uma estimativa de consumo, nos edifícios residenciais de Concepción, considerando o número de habitantes do domicílio e sua extensão. O número de habitantes é estimado com base na área de piso da edificação, de acordo com estatísticas coletadas. Dessa forma, os níveis de consumo (kWh) são então calculados por pessoa e por unidade de área de piso. Em seguida, para obter o uso total de energia por domicílio, os níveis de consumo da unidade são multiplicados pelo número de habitantes ou pela área útil da edificação.

Posteriormente, o potencial solar residencial é determinado por tipologia de habitação, a partir do produto entre a radiação incidente (por unidade de área) e a área útil da cobertura (GARCÍA-ALVARADO *et al.*, 2016). Estimar a área útil da cobertura é de suma importância, uma vez que parte dessa área é comumente destinada à atividades específicas, como áreas técnicas e áreas de lazer, o que impossibilita a implantação de sistemas de captação solar (LANGE, 2015).

Isto posto, convém definir um código de cores correspondentes ao nível de radiação recebida visando uma rápida interpretação dos resultados. Assim, coberturas com alto nível de radiação incidente poderão ser representadas em vermelho, ficando as cores laranja e amarela para os níveis médio e baixo, respectivamente. Essa classificação pode ser definida como descrito em García-Alvarado e outros (2016), onde se considera como alto nível as superfícies que recebem até 90% da irradiação que atingiria o solo nu. Da mesma forma, considera-se como médio nível aquelas coberturas que recebem, no mínimo, 80% da irradiação de solo nu, ao passo que, superfícies com menos de 80% dessa irradiação são consideradas como baixo nível.

4.4 Divulgação dos resultados

Para concluir o objetivo deste trabalho, é importante que todos os resultados obtidos sejam disseminados publicamente. Isso pode ser feito por meio da criação de uma plataforma *online* gratuita, onde os dados devem estar facilmente ao alcance dos usuários.

Existem diversos métodos de desenvolvimento da referida plataforma. A metodologia de referência adota o sistema OpenLayers, que se caracteriza por uma biblioteca JavaScript de código aberto, gratuita, repleta de recursos de alto desempenho, para múltiplas necessidades de mapeamento. Além disso, o OpenLayers favorece a publicação de mapas dinâmicos em qualquer página da *web*, e é capaz de apresentar blocos de mapas, dados vetoriais e marcadores em qualquer fonte (OPENLAYERS, 2012).

Em contrapartida, como mencionado anteriormente, o Mapa Solar do Rio de Janeiro foi configurado a partir do ArcGis Online que, por sua vez, consiste em uma plataforma de criação e exibição interativa de mapas e informações geográficas. Tal plataforma não exige conhecimento avançado em linguagens de programação e conta com ferramentas de operação simples. Para iniciar os trabalhos com o ArcGis Online é necessário criar uma conta, que pode ser pública ou organizacional.

A conta pública do ArcGis é gratuita e projetada para uso pessoal, não-comercial. Esse tipo de conta permite ao usuário criar e compartilhar conteúdos, com limite de

uso. Nesse caso, não é permitida a realização de trabalhos colaborativos, nem é possível gerenciar dados ou fazer análises aprofundadas.

Tal limitação não ocorre com a conta organizacional, exclusiva para membros de organização do ArcGis. Com essa conta é possível realizar trabalhos colaborativos, compartilhando dados com outros membros da mesma organização. Além disso, é permitido o acesso a alguns conteúdos restritos. Entretanto, essa categoria não é gratuita e requer pagamento conforme privilégios atribuídos à conta.

Sendo assim, a seleção da ferramenta mais apropriada para a divulgação do Mapa Solar Interativo de Vitória fica a critério do tipo de configuração da plataforma (JavaScript ou ferramenta interativas), bem como do recurso financeiro disponível nesta etapa do projeto.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em virtude da baixa produção de energia elétrica do Estado do Espírito Santo, a diversificação da matriz energética e a aproximação das unidades geradoras aos centros de consumo, são vistas como opções de solução para esta questão. Nesse contexto, a geração de energia renovável não-convencional, como a solar fotovoltaica, vem ganhando cada vez mais espaço no cenário urbano estadual, apesar da existência de contrariedades nas políticas públicas vigentes, como a manutenção da cobrança de ICMS mesmo após a adesão ao CONFAZ nº 16/2015.

Assim, entende-se que uma maneira de fomentar o emprego da energia solar é por meio da democratização da informação acerca das potencialidades da fonte, bem como das tecnologias atualmente aplicáveis. Tais informações podem ser disseminadas por meio de mapas solares interativos, com acesso público e manuseio intuitivo.

Em razão disso, objetivou-se com essa pesquisa, avaliar as condições de aplicação da metodologia de elaboração do mapa solar interativo, na cidade de Vitória/ES. Para tal, foi necessário realizar levantamento e análise dos métodos de confecção dos referidos mapas, para, posteriormente, selecionar o que mais se enquadra na realidade da cidade em questão.

Sendo assim, foi selecionado, como método de referência, a metodologia do Mapa Solar de Concepción, Chile. A aplicação deste método se deu em ambiente SIG, especificamente, no ArcGis, e contou com 5 etapas principais: recorte territorial, elaboração do modelo digital superficial (MDS), simulações, avaliação/aplicação dos resultados e divulgação dos resultados.

Durante a aplicação do método de referência, foram constatadas suas potencialidades e adversidades. Dessa forma, no que se refere a confecção do MDS, destaca-se a etapa de modelamento das edificações, pela dificuldade de importação e georreferenciamento de arquivos desenvolvidos extra ArcGis (REVIT ou Scketchup). Isso se deve ao longo tempo de processamento, causado pelo nível de detalhes dos modelos.

No que diz respeito a etapa de simulação, percebeu-se que rasterizar o *layer* das edificações, antes em *multipatch*, faz com que se percam as informações de fachada. Logo, em situações que se deseja realizar análises em fachadas, essa questão deve ser considerada.

Vale ressaltar que a operação do *software* adotado (ArcGis) não é simples, tampouco intuitiva. Portanto, para desenvolver o mapa solar aqui proposto é necessário, também, deter um conhecimento significativo em Sistemas de Informação Geográfica.

Quanto aos resultados, obtidos mediante simulações, observou-se que os modelos desenvolvidos pela abordagem 2,5D não apresentaram resultados satisfatórios no estudo de caso realizado, devido ao resultado de uniformidade do nível de radiação nas coberturas. Isso se deve ao baixo nível de detalhamento da referida técnica, uma vez que a abordagem 2,5D despreza informações de inclinação, consideradas significativas para a análise do potencial solar.

Dessa forma, considera-se que os modelos desenvolvidos pela abordagem 3D apresentaram os melhores resultados, devido ao nível de detalhamento das coberturas. Tal procedimento permitiu a identificação das zonas mais propícias para a implantação de sistemas de aproveitamento solar. Cabe salientar que, quanto mais detalhado o modelo, ou seja, quanto mais próximo do real, mais precisos serão os resultados e, conseqüentemente, maior o recurso computacional demandado.

Com relação às edificações unifamiliares do estudo de caso, constatou-se que as porções de telhado a Nordeste e a Noroeste, das casas tipo 2 e 1 respectivamente, são mais apropriadas para a captação solar, devido ao maior recebimento de radiação. De forma análoga, as edificações multifamiliares apresentaram maior potencial de captação solar nas porções à Nordeste.

Além disso, é possível identificar as regiões de menor recurso solar, geralmente influenciadas pela presença de sombreamento, causado pelo contorno, e pela orientação da edificação. Nesse sentido, destacam-se porções das coberturas dos edifícios, portaria e extensão PCD, bem como porções da escola CAIC. No último caso, o sombreamento se deve às duas torres de reservatório d'água que, no inverno,

sombreiam a cobertura à Sudoeste e, no verão, sombreiam a cobertura à Nordeste, assim como mostrado pelas Figuras 48 e 49.

Os resultados obtidos por meio das simulações apoiaram o dimensionamento de sistemas de captação solar. Dessa maneira, com base nas análises realizadas após o desenvolvimento das seções de dimensionamento, é possível afirmar que os sistemas propostos são viáveis economicamente.

Ainda com base nos resultados de simulação, constatou-se que o Residencial Jabaeté seria autossuficiente em energia, se os sistemas sugeridos fossem empregados às habitações analisadas. Nesse caso, além de suprir a demanda energética anual residencial, os sistemas FV também proporcionariam fluxo de energia bidirecional, em meses de maior insolação e, conseqüentemente, promoveriam geração distribuída.

Para divulgar os dados obtidos, durante todo o estudo de caso, foi elaborado um mapa interativo, disponível gratuitamente na *web*. Para configurar o mapa mencionado, foi necessária a utilização da plataforma ArcGis Online. Tal mapa conta com a distribuição da radiação, na cobertura das edificações, onde é possível identificar as regiões de maior e menor potencial solar, por meio do código de cores apresentado na legenda. Além disso, cada cobertura contém um *pop-up* com informações sobre a área da cobertura, a amplitude da irradiação disponível, a configuração dos sistemas de captação solar sugeridos e o *payback* do investimento.

Tendo em vista os aspectos analisados durante o desenvolvimento da presente pesquisa, foi possível propor uma metodologia para a elaboração do Mapa Solar Interativo de Vitória. Tal metodologia, embora baseada no método do Mapa Solar de Concepción, também contém aspectos do método do Mapa Solar do Rio de Janeiro, como a configuração de alguns parâmetros de simulação (*Diffuse proportion* e *Transmittivity*) e o modo de divulgação dos resultados (ArcGis Online). Esses aspectos manifestam o expressivo teor de inovação do produto deste trabalho e contribuem para a promoção da geração distribuída na cidade de Vitória.

Ademais, as informações disponibilizadas pelo Mapa Solar do Residencial Jabaeté podem servir de apoio para diversos trabalhos futuros. Dessa forma, considera-se

oportuna, por exemplo, a análise da criação de cooperativas ou consórcios, entre os moradores interessados em instalar um gerador fotovoltaico, assim como permite a normativa da ANEEL, nº 687. Da mesma maneira, pode ser pertinente estudar a possibilidade de implantação de uma usina solar nas coberturas das edificações em questão.

Por fim, outra análise interessante pode ser a relacionada ao estudo de um modelo de assentamento verticalizado na eventual expansão do Residencial Jabaeté, em função da produção de energia fotovoltaica, ou seja, nesse caso cabe avaliar quantos pavimentos poderiam ser abastecidos energeticamente pelo potencial solar disponível nas coberturas, sem prejudicar a captação solar do entorno. Tal estudo pode ser desenvolvido, ainda, em outros locais de expansão da RMGV, visando nortear os processos de planejamento urbano da região.

6 REFERÊNCIAS

ABNT. **NBR 15569: Sistema de Aquecimento Solar de Água em Circuito Direto - Projeto e Instalação**. Rio de Janeiro, 2008.

ABSOLAR. **Energia Solar Fotovoltaica no Brasil: Infográfico, nº 5**. 2019. Disponível em: <http://www.absolar.org.br/infografico-absolar-.html>. Acesso em: 13 jan. 2019.

ACSELRAD, H. **A Duração das Cidades, Sustentabilidade e risco nas políticas urbanas**. 2ª ed. Rio de Janeiro: Lamparina, 2009.

GARCÍA-ALVARADO, R.; BAERISWYL-RADA, S.; TREBILCOCK, M.; WEGERTSEDER, P. **Mapa energético-solar de Concepción: cartografía urbana del consumo energético y captación solar en edificaciones residenciales de Concepción, Chile**. Revista de Geografía Norte Grande nº59, 2014.

GARCÍA -ALVARADO, R.; TRONCOSO, L.; CAMPOS, P. **Residential Solar Energy Potential for Public Dissemination: A Case Study in Concepción, Chile**. Journal of Green Building, v. 11, n. 1, p. 118–133, 13 maio 2016.

ANEEL. **Nota Técnica nº 0043/2010-SRD/ANEEL**. Disponível em: [http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/consulta_publica/documentos/Nota Técnica_0043_GD_SRD.pdf](http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/consulta_publica/documentos/Nota_Tecnica_0043_GD_SRD.pdf). Acesso em: 10 dez. 2018.

ARCGIS. **Principal**. Disponível em: <http://www.img.com.br/arcgis>. Acesso em: 6 fev. 2018.

ARSPE. **Balanco Energético do Espírito Santo 2018, ano-base 2017**. 2018. Disponível em: <https://arsp.es.gov.br/boletins-e-balancos-energeticos>. Acesso em: 10 de nov. 2018.

AUTODESK. **AUTODESK Knowledge Network**. Disponível em: <https://knowledge.autodesk.com>. Acesso em: 1 ago. 2017.

BANCO CENTRAL DO BRASIL. **Histórico das taxas de juros fixadas pelo Copom e evolução da taxa Selic**. Disponível em: <https://www.bcb.gov.br/controleinflacao/historicotaxasjuros>. Acesso em: 5 mar. 2019.

BODON, J. H.; PELEGRINI, A. V.; HEEMANN, A. **Sistemas Fotovoltaicos Integrados em Edificações: Tecnologias e oportunidades com foco no mercado brasileiro**. 8º Congresso Internacional de Bioenergia. Anais... São Paulo: 2013.

BRUMAN, M.; LUKAC, N.; ZALIK, B. **The Second International Conference on Building and Exploring Web Based Environments, April 20-24, 2014, Chamonix, France.** The Second International Conference on Building and Exploring Web Based Environments. **Anais...**Maribor: Research Gate, 2014

CASSAROTO FILHO, N.; KOPITTKKE, B. H. **Análise de Investimentos.** 9^a ed. São Paulo: Atlas, 2000.

CASTELLANOS, S.; SUNTER, D. A.; KAMMEN, D. M. **Rooftop solar photovoltaic potential in cities: How scalable are assessment approaches?** Environmental Research Letters, 2017.

CON*FIN. **Proyecto Conicyt-AKA ERNC-007: Evaluación del Potencial Solar en Areas Urbanas.** Disponível em: <http://ubiobio.cl/confin/#>. Acesso em: 15 fev. 2018.

CONFAZ. Conselho Nacional de Políticas Fazendárias. **Convênio ICMS 16, de 22 de abril de 2015.** Ministério da Fazenda, 2015. Disponível em: https://www.confaz.fazenda.gov.br/legislacao/convenios/2015/CV016_15. Acesso em: 10 mar. 2018.

CRESESB. **Potencial Solar SunData v 3.0.** 2018. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br>. Acesso em: 10 mar. 2019.

DYER, J. **Parameterizing Diffuse Proportion & Transmittivity Values Using TMY3 Data Creating Radiation Grids.** Ohio: 2014. Disponível em: [https://people.ohio.edu/dyer/WB/Parameterizing Diffuse Proportion & Transmittivity Values Using TMY3 AND Creating Radiation Grids.pdf](https://people.ohio.edu/dyer/WB/Parameterizing%20Diffuse%20Proportion%20&%20Transmittivity%20Values%20Using%20TMY3%20AND%20Creating%20Radiation%20Grids.pdf). Acesso em: 15 mar. 2019.

EMBRAPA, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Imagens SRTM.** 2013 Disponível em: <http://www.embrapa.br>. Acesso em: 01 ago 2018.

EDP. **Resolução Homologatória Nº 2432: Tarifas de Energia 07 de Agosto de 2018.** 2018. Disponível em: http://www.edp.com.br/CentralDocumentos/tabela_de_tarifas_bt_mt_precos_abetos_07082018.pdf . Acesso em: 04 fev. 2019.

EPE. **Resenha mensal do consumo de energia elétrica. Ano VIII. Nº 93.** Rio de Janeiro: 2015. Disponível em: <http://epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-153/topico-156/Resenha%20Mensual%20do%20Mercado%20de%20Energia%20El%C3%A9trica%20-%20Maio%202015.pdf>. Acesso em: 05 jan. 2019.

EPE. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2026**. Brasília: 2017. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/documents/10584/0/PDE2026.pdf/474c63d5-a6ae-451c-8155-ce2938fbf896>>. Acesso em: 10 set. 2018.

EPE. **Balço Energético Nacional 2018: Ano base 2017**. Rio de Janeiro. 2017. Disponível em: <http://epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-303/topico-419/BEN2018_Int.pdf>. Acesso em: 10 mai. 2018.

ESRI. **What is an ArcGIS Web map?** Disponível em: <http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/map/web-maps-and-services/what-are-web-maps-.htm>. Acesso em: 11 set. 2018.

ESRI. **ArcGis Desktop: Multipatches.** Disponível em: <http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/latest/extensions/3d-analyst/multipatches.htm>. Acesso em: 10 dez. 2018a.

ESRI. **ArcGis Desktop: What is raster data?** Disponível em: <http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/manage-data/raster-and-images/what-is-raster-data.htm>. Acesso em: 10 dez. 2018b.

ESRI. **ArcGis Pro: Understanding solar radiation analysis.** Disponível em: <http://pro.arcgis.com/en/pro-app/tool-reference/spatial-analyst/understanding-solar-radiation-analysis.htm>. Acesso em: 14 dez. 2018c.

ESRI. **ArcGis Pro: Modeling solar radiation.** Disponível em: <http://pro.arcgis.com/en/pro-app/tool-reference/spatial-analyst/modeling-solar-radiation.htm>. Acesso em: 20 jan. 2019d.

FISH, C. S.; CALVERT, K. **Analysis of interactive solar energy web maps for urban energy sustainability**. Cartographic Perspectives, p. 5–22, 2016. DOI 10.14714/CP85.1372.

FITZ, P. R. **Geoprocessamento sem complicação**. 1ª ed. Rio Grande do Sul: Oficina de Textos, 2008.

GIGLIO, T.; LAMBERTS, R. **Savings related to solar water heating system: A case study of low-income families in Brazil**. Energy and Buildings. Elsevier, 2016. ISBN 03787788. DOI 10.1016/j.enbuild.2016.08.076.

GOOGLE. **Google Project Sunroof.** Disponível em: <https://www.google.com/get/sunroof>. Acesso em: 10 fev. 2018.

GOSWAMU, D. Y. **Principles of Solar Engineering.** 3ª ed. New York: CRC Press, 2014.

IEA, International Energy Agency. **Energy Technology Perspective. Annex H-Rooftop Solar PV Potential in Cities.** 2016. Disponível em: <https://www.iea.org/etp/etp2016/annexes/>. Acesso em: 07 jan. 2018.

IJSN, Instituto Jones dos Santos Neves. **Mapeamento Geomorfológico do Espírito Santo.** Vitória, 2011.

KANTERS, J.; WALL, M.; KJELLSON, E. **The Solar Map as a Knowledge Base for Solar Energy Use.** Energy Procedia, Ed. International Conference on Solar Heating and Cooling for Buildings and Industry. **Anais...Elsevier**, 2014.

LANGE, W. J. **Refinamento do mapeamento da área potencial de telhados de edificações residenciais no Brasil Projeto: Energias Renováveis e Eficiência Energética em Cidades (4ES).** Terra Gis: Consultoria e Geoprocessamento. Rio de Janeiro. 2015. Disponível em: www.giz.de/brasil.

LEHMANN, H.; PETER, S. **Assessment of roof & façade potentials for solar use in Europe.** Institute for sustainable Solutions and Innovations. Aachen, 2003.

LIMA, A. C.; DELPUPO, A. M.; SILVA, B. F. P.; SACRAMENTO, B. F.; MADUREIRA, C. C.; ALVARENGA, H. M.; RAMOS, H. E. A.; SILVA, J. G. F.; SCARPATTI, M. P.; ALMEIDA, P. V. D. **A energia solar no Espírito Santo: Tecnologias, Aplicações e Oportunidades.** ASPE. Vitória, 2013.

LUKAC, N.; ZLAUS, D.; SEME, S.; ZALIK, B.; STUMBERGER, G. **Rating of roofs' surfaces regarding their solar potential and suitability for PV systems, based on LiDAR data.** Applied Energy, v. 102, p. 803–812, 2013.

MACHETE, R. F. **Utilização de Modelos SIG-3D na Determinação da Radiação Solar Incidente nos Edifícios Arquitectura.** 2016. Dissertação (Mestrado em Arquitectura) - Universidade Técnica de Lisboa. Lisboa, 2016.

MAPDWELL. **MAPDWELL Company.** Disponível em: <https://www.mapdwell.com/en/solar/company>. Acesso em: 19 fev. 2018a.

MAPDWELL. **Solar System, Cambridge.** Disponível em: <https://www.mapdwell.com/en/solar/cambridge>. Acesso em: 19 fev. 2018b.

MARTINS, T. A. de L.; ADOLPHE, L.; BASTOS, L. E. G.; MARTINS, M. A. de L. **Sensitivity analysis of urban morphology factors regarding solar energy potential of buildings in a Brazilian tropical context.** Solar Energy, p. 11–24, jul. 2016.

MINAS GERAIS. **Lei nº 22.549, de 30 de Junho de 2017 Plano de Regularização de Créditos Tributários.** Secretaria de Estado da Fazenda, 2017. Disponível em: http://www.fazenda.mg.gov.br/empresas/legislacao_tributaria/leis/2017/122549_2017.htm. Acesso em: 1 mar. 2019

OLIVEIRA JUNIOR, L. G.; CAMPOS, A. F.; FELIPE, E. S. **Um panorama da micro e minigeração fotovoltaica no Estado do Espírito Santo.** Sustentabilidade Urbana. 14^a Jornada Urbanere e 2^a Jornada Cires. **Anais...** Vitória: 2018

OPENLAYERS. **OpenLayers: Uma biblioteca repleta de recursos e de alto desempenho para todas as suas necessidades de mapeamento.** Disponível em: <https://openlayers.org/>. Acesso em: 10 fev. 2019.

PCRJ, Prefeitura da Cidade do Rio de Janeiro. **Mapa Solar da Cidade do Rio de Janeiro.** Disponível em: <http://pcrj.maps.arcgis.com/apps/webappviewer/index.html?id=029ccb875ca24c209a8572e70a4b6b19>. Acesso em: 15 fev. 2018a.

PCRJ, Prefeitura da Cidade do Rio de Janeiro . **O Modelo matemático utilizado para cálculo da irradiação no Mapa Solar do Rio de Janeiro.** Disponível em: <http://pcrj.maps.arcgis.com/apps/webappviewer/index.html?id=029ccb875ca24c209a8572e70a4b6b19>>. Acesso em: 15 fev. 2018b.

PEREIRA, E. B.; MARTINS, F. R.; GONÇALVES, A. R.; COSTA, R. S.; LIMA, F. J. L.; RÜTHER, R.; ABREU, S. L.; TIEPOLO, G. M.; PEREIRA, S. V.; SOUZA, J. G. **Atlas Brasileiro de Energia Solar, 2ª Ed.** ANEEL. São José dos Campo, 2017.

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos.** 2014. Disponível em: http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Manual_de_Engenharia_FV_2014.pdf. Acesso em: 8 mar. 2017.

PITANGA, B. M. G. **Memorial Descritivo: Processo De Regularização Fundiária de Interesse Social Loteamento Jabaeté-Vila Velha.** SEDURB. Vila Velha, 2016.

PMV, Prefeitura Municipal de Vitória. **Uso Residencial em Vitória**. 2019. Disponível em: www.vitoria.es.gov.br. Acesso em: 8 abr. 2019.

PROCEL. **Manual de Tarifação da Energia Elétrica**. 2011. Disponível em: http://www.mme.gov.br/documents/10584/1985241/Manual%20de%20Tarif%20En%20El%20-%20Procel_EPP%20-%20Agosto-2011.pdf. Acesso em: 10 fev. 2018.

QUINTEROS, A. R. **Aquecimento de água por energia solar**. Sinergia, p. 19–24. São Paulo, 2001. ISSN 2177-451X.

BAERISWYL-RADA, S.; GARCÍA-ALVARADO, R.; SANDOVAL-QUEZADA, N.. **Potencial solar en el crecimiento urbano**. Rede Urbanere, Comunidades Urbanas Energeticamente Eficientes. **Anais...** Vitória: Edufes, 2016

RÜTHER, R. **Edifícios Solares Fotovoltaicos**. 1ª ed. Florianópolis : UFSC / LABSOLAR, 2004.

RÜTHER, R.; SALAMONI, I. **O potencial dos setores urbanos brasileiros para geração de energia solar fotovoltaica de forma integrada às edificações**. Mudanças climáticas e impactos nas cidades. **Anais...** Belo Horizonte: Fórum Patrimônio, 2011.

SANTOS, P. I.; PALERMO, C.; RÜTHER, R. **Redução da conta de energia nas habitações de interesse social a partir da utilização de energia solar térmica e fotovoltaica**. X Encontro Nacional e VI Encontro Latino Americano de Conforto no Ambiente Construído. **Anais...** Natal, 2009.

SARRALDE, J. J.; QUINN, D. J.; WIESMANN, D.; STEEMERS, K.. **Solar energy and urban morphology: Scenarios for increasing the renewable energy potential of neighbourhoods in London**. Renewable Energy, v. 73, p. 10–17, 1 jan. 2015.

VILLALVA, M, G.; GAZOLA, J. R. **Energia solar fotovoltaica: Conceitos e Aplicações**. 1ª ed. São Paulo: Érica Ltda, 2013.

WEGERTSEDER, P.; LUND, P.; MIKKOLA, J.; GARCÍA-ALVARADO, R... **Combining solar resource mapping and energy system integration methods for realistic valuation of urban solar energy potential**. Solar Energy, v. 135, p. 325–336, 1 out. 2016.

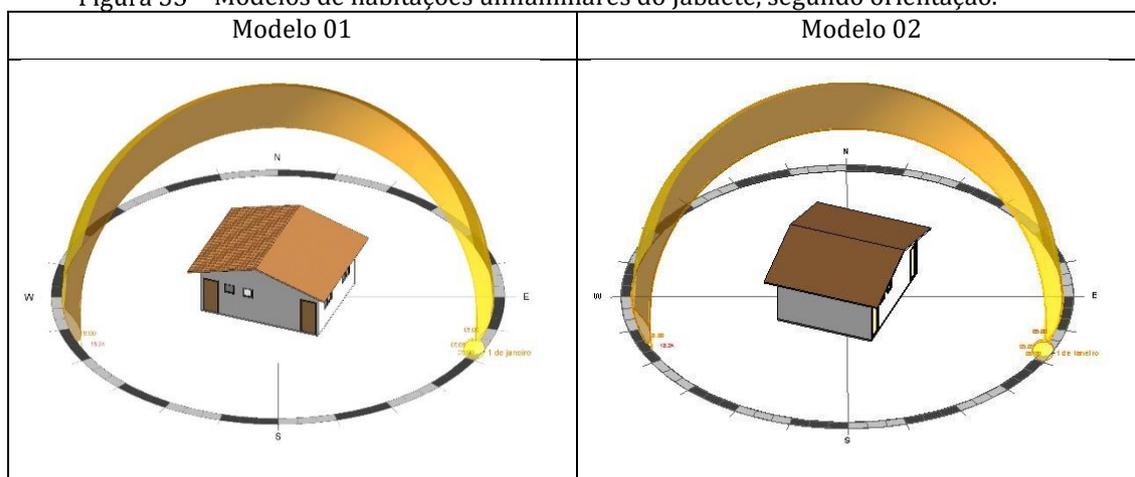
APÊNDICE A

Modelo de habitação

Os modelos de edificação analisados referem-se, exclusivamente, às habitações unifamiliares de um pavimento, com área construída de 39,20m², sendo suas dimensões de 5,60m (frente) x 7,00m (lateral).

Das habitações unifamiliares existentes, foram identificados dois modelos, onde: o modelo 01 possui fachada frontal orientada a Sudoeste ou Nordeste, enquanto o modelo 02 possui fachada frontal orientada a Sudeste ou Noroeste. A Figura 53 mostra o modelo das habitações mencionadas, desenvolvido no *software* Revit.

Figura 53 - Modelos de habitações unifamiliares do Jabaeté, segundo orientação.



Fonte: Elaborada pela autora.

Tipologias selecionadas para análise

Foram selecionadas quatro tipologias de quadras, definidas quanto à quantidade e à orientação de unidades residenciais, para realização de simulações e análises. Assim, foi estabelecido como parâmetro fixo que as quadras contivessem um mesmo número de lotes (19 lotes), para que o potencial de energia solar identificado por quadra pudesse ser comparado de forma equivalente entre as tipologias selecionadas.

A Tipologia 1 corresponde à Quadra A, apresentando um modelo de lote retangular, com afastamento frontal de 3,00m, em que a edificação foi locada centralizada no lote no sentido transversal. As dezenove unidades possuem dimensões de 10,00m

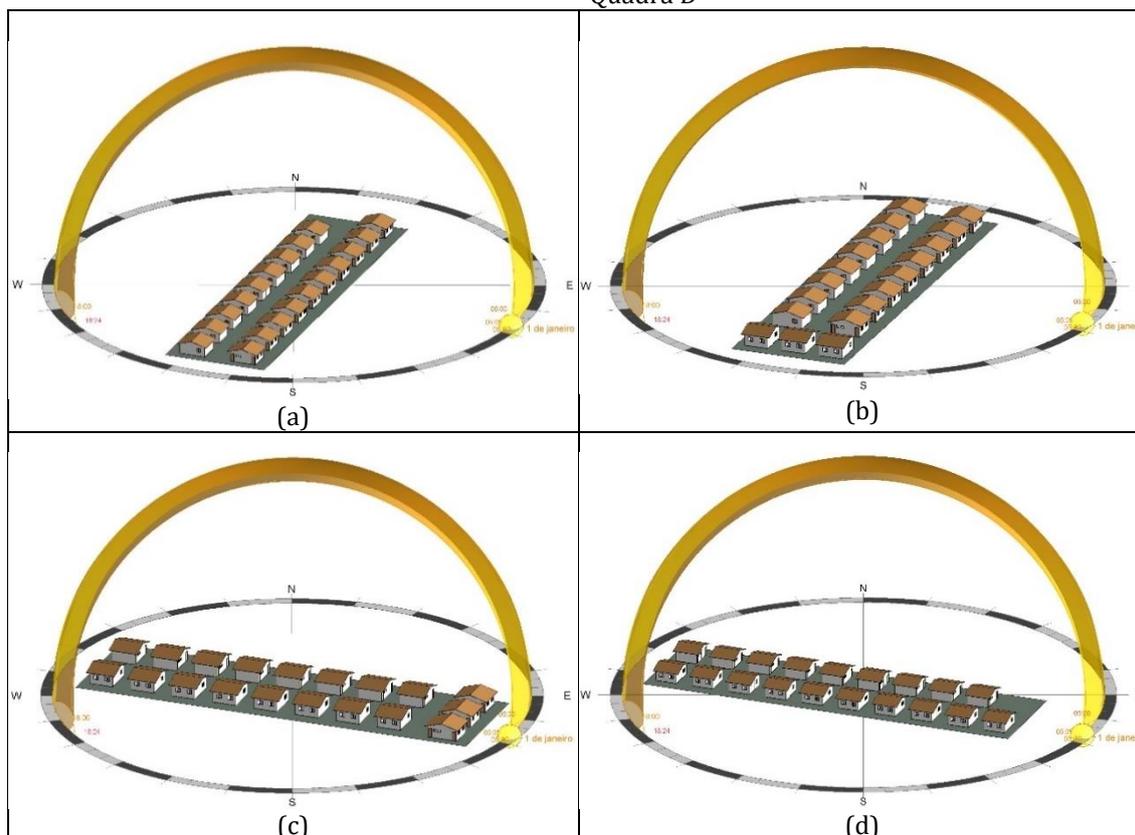
(frente/fundos) x 13,50m (laterais) e orientação de acordo com o modelo de habitação 01.

A Tipologia 2 corresponde à Quadra B, apresentando dois modelos de lotes retangulares, ambos com afastamento frontal de 3,00m, em que a edificação foi locada centralizada no lote no sentido transversal. São três unidades do primeiro lote, com dimensões de 9,00m (frente/fundos) x 15,00m (laterais) e orientação de acordo com o modelo de habitação 02; e dezesseis unidades do segundo lote, com dimensões de 10,00m (frente/fundos) x 13,50m (laterais) e orientação de acordo com o modelo de habitação 01; totalizando dezenove lotes.

A Tipologia 3 corresponde à Quadra C, apresentando dois modelos de lotes retangulares, ambos com afastamento frontal de 3,00m e laterais de 1,5m. São três unidades do primeiro lote, com dimensões de 9,00m (frente/fundos) x 15,00m (laterais) e orientação de acordo com o modelo de habitação 01; e dezesseis unidades do segundo lote, com dimensões de 10,00m (frente/fundos) x 13,50m (laterais) e orientação de acordo com o modelo de habitação 02; totalizando dezenove lotes.

A Tipologia 4 corresponde à Quadra D, apresentando um modelo de lote retangular, com afastamento frontal de 3,00m, em que a edificação foi locada centralizada no lote no sentido transversal. As dezenove unidades possuem dimensões 10,00m (frente/fundos) x 13,50m (laterais) e orientação de acordo com o modelo de habitação 02. A Figura 54 apresenta as quadro tipologias selecionadas.

Figura 54 - Figura 1 Tipologias selecionadas para análise no Residencial Jabaeté: (a) Tipologia 1 – Quadra A; (b) Tipologia 2 – Quadra B; (c) Tipologia 3 – Quadra C; (d) Tipologia 4 – Quadra D



Fonte: Elaborada pela autora.

Simulação dos modelos habitacionais

Os modelos de habitação foram simulados no software REVIT através da ferramenta “Analisar Energia”, para obtenção do potencial de aproveitamento solar nas coberturas das edificações analisadas, informação alcançada através dos dados de energia gerada pelo sistema fotovoltaico. O período de simulação foi configurado para um ano completo, de 01 de janeiro de 2016 a 01 de janeiro de 2017, com intervalo de análise de hora em hora (das 5h00 às 18h00), para todos os dias do ano. Foram utilizados dados climáticos já integrados ao REVIT, advindos da estação meteorológica mais próxima da localização inserida no *software*.

Resultados

Após as simulações realizadas, por meio do Revit, pode-se observar que o modelo 01 apresentou melhor desempenho quanto à geração de energia fotovoltaica, ou seja, sua orientação com relação ao sol possibilitou maior aproveitamento da

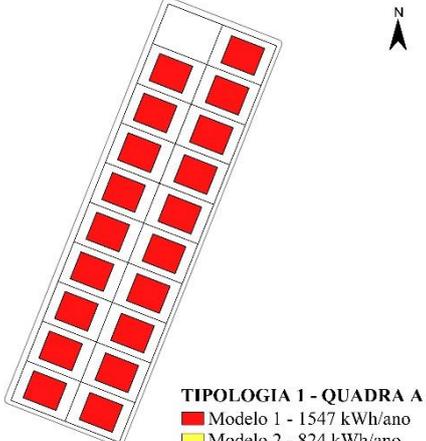
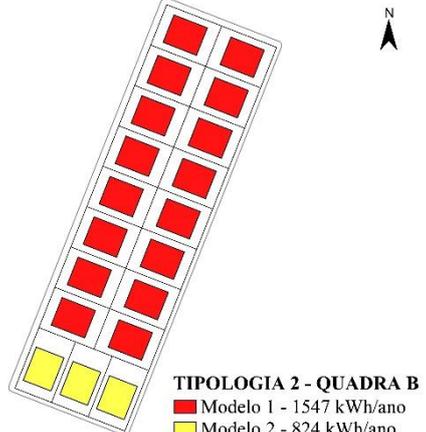
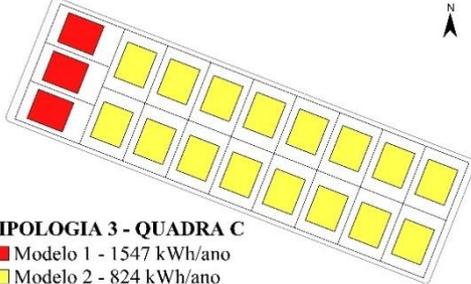
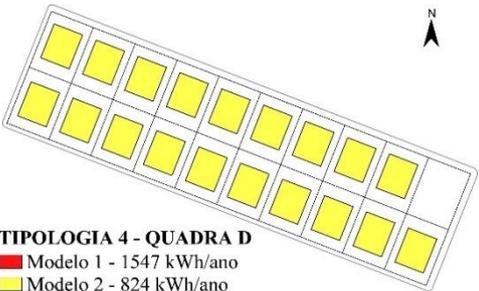
energia solar quando comparada com a orientação do modelo 02. Este dado pode ser verificado na Tabela 16, onde se encontram os valores de energia gerada por cada modelo adotado nas simulações, considerando sistemas fotovoltaicos de baixa, média e alta eficiência (5%, 10% e 15% de perdas, respectivamente), ao longo de um ano.

Tabela 16 - Energia gerada por sistemas fotovoltaicos nos modelos simulados

Sistema de painel fotovoltaico (pv)	Modelo 01	Modelo 02
Baixa eficiência	773 kWh/ano	412 kWh/ano
Média eficiência	1547 kWh/ano	824 kWh/ano
Alta eficiência	2320 kWh/ano	1236 kWh/ano

Diante dos resultados apresentados na Tabela 16, constata-se que, como o modelo 01 apresentou os melhores resultados, quadras com maior número de unidades habitacionais equivalentes a esse modelo apresentaram, conseqüentemente, maior potencial de aproveitamento da radiação solar. Na Tabela 17, foi comparada a energia gerada pelas quatro tipologias de quadra encontradas no loteamento, considerando o mesmo número de unidades habitacionais (19 unidades) com sistema fotovoltaico de média eficiência.

Tabela 175 - Tipologias selecionadas para análise no Residencial Jabaeté: (a) Tipologia 1 – Quadra A; (b) Tipologia 2 – Quadra B; (c) Tipologia 3 – Quadra C; (d) Tipologia 4 – Quadra D.

Tipologia	Energia gerada pelo sistema FV – Média eficiência	
<p>Tipologia 1</p>		<p>29.393 kWh/ano</p>
<p>Tipologia 2</p>		<p>27.224 kWh/ano</p>
<p>Tipologia 3</p>		<p>17.825 kWh/ano</p>
<p>Tipologia 4</p>		<p>15.656 kWh/ano</p>

Fonte: Elaborada pela autora.

Quanto ao potencial de aproveitamento da radiação solar, observa-se, pela Tabela 17, que a Tipologia 1 apresenta o melhor resultado devido à presença totalitária de habitações do modelo 1 enquanto a Tipologia 4 apresenta o pior resultado por conter apenas habitações do modelo 2. Já as outras duas tipologias se classificam de acordo com a presença majoritária, ou não, de habitações do modelo 1.

Vale salientar que, dentro das tipologias existentes, podem ocorrer variações no número de unidades habitacionais, o que fará variar a energia gerada pelo sistema fotovoltaico. Ou seja, o loteamento possui quadras com a mesma configuração e orientação das tipologias identificadas, podendo apresentar uma quantidade maior ou a igual de unidades habitacionais às analisadas. Quanto maior a densidade habitacional – considerando o modelo de edificações unifamiliares – maior o potencial de aproveitamento solar da quadra.

Essa análise é relevante devido à possibilidade de formação de cooperativas entre os integrantes das quadras a fim de utilizarem os créditos derivados da energia produzida como meio de redução do valor da fatura de energia dos cooperados. Essa alternativa foi estabelecida pela ANEEL em 2015, e encontra-se no Módulo 3 do PRODIST (PRODIST, 2015). Dessa forma, este estudo pode facilitar a identificação da unidade habitacional, cuja cobertura possui o maior potencial de aproveitamento solar, para a instalação do sistema fotovoltaico definido pela cooperativa, implicando, assim, em viabilidade técnica da instalação. Isto é, ao invés de implantar os sistemas fotovoltaicos em todas as habitações da quadra, uma alternativa mais eficiente seria instalá-los apenas nas habitações de maior potencial e dividir o bônus de energia entre os cooperados.

De maneira complementar às análises anteriores, elaborou-se um mapa informativo dos potenciais solares das coberturas estudadas, no *software* ArcGIS, apresentado na Figura 55. Com esse mapa, é possível realizar uma análise macro do residencial e, assim, identificar facilmente as quadras cujas unidades habitacionais possuem maior aproveitamento solar. A indicação do nível do potencial é feita por meio das cores amarela e vermelha, onde amarela indica baixo potencial e vermelha indica alto potencial.

Figura 55 - Mapa do Potencial Solar do Residencial Jabaeté.



Fonte: Elaborado pela autora

Os resultados da Figura 55 podem ser comparados com os resultados obtidos por meio de simulações via ArcGis, também para um período de um ano, apresentados pela Figura 50. A partir dessa análise constatou-se que o modelo residencial unifamiliar de maior potencial varia de acordo com o método utilizado. Dessa forma, o método que utiliza o *software* Revit aponta o modelo 01 como sendo de maior potencial, ao passo que o método que adota o ArcGis indica o modelo 02. Tal disparidade pode estar relacionada com a configuração dos resultados em cada método.

No caso do Revit, os resultados estão relacionados com a área total da cobertura, ou seja, o *software* calcula a energia que a cobertura produziria (kWh) se um sistema FV fosse aplicado em toda a área útil, sem ignorar as porções de menor potencial. Assim, por receber maior recurso solar devido à orientação de ambas as águas, o modelo 01 foi indicado como detentor de maior potencial.

Já o ArcGis calcula o potencial solar (Wh/m^2) por célula *raster* (1x1 m), a fim de identificar as porções mais apropriadas para a instalação de sistemas de captação solar. Nesse caso, o método destaca a água à Nordeste do telhado do modelo 02. Esse método fornece dados mais precisos, úteis para o dimensionamento de sistemas fotovoltaicos e de aquecimento solar.