

UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
ESCOLA DE ENGENHARIA
MESTRADO PROFISSIONAL EM MONTAGEM INDUSTRIAL

LESSANDRO TEIXEIRA RODRIGUES

**ESTUDO DE VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA PARA A IMPLANTAÇÃO
DE UMA USINA DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA COM A UTILIZAÇÃO
DE MOTORES STIRLING E COLETORES SOLARES**

Niterói, RJ
2019

LESSANDRO TEIXEIRA RODRIGUES

**ESTUDO DE VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA PARA A IMPLANTAÇÃO
DE UMA USINA DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA COM A UTILIZAÇÃO
DE MOTORES STIRLING E COLETORES SOLARES**

Dissertação apresentada ao Mestrado Profissional em Montagem Industrial da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Montagem Industrial. Área de Concentração: Montagem Industrial.

Orientador:

Prof. Dr. Bruno Campos Pedroza

Coorientadora:

Prof^a. Dr^a. Elaine Aparecida Araújo

Niterói, RJ
2019

Ficha catalográfica automática - SDC/BEE
Gerada com informações fornecidas pelo autor

R696e Rodrigues, Lessandro Teixeira
Estudo de viabilidade técnica e econômica para a
implantação de uma usina de geração de energia elétrica
com a utilização de motores Stirling e coletores solares /
Lessandro Teixeira Rodrigues ; Bruno Pedroza, orientador ;
Elaine Araújo, coorientadora. Niterói, 2019.
180 f. : il.

Dissertação (mestrado profissional)-Universidade Federal
Fluminense, Niterói, 2019.

DOI: <http://dx.doi.org/10.22409/PMI.2019.mp.97258075020>

1. Energia solar. 2. Usina termossolar. 3. Produção
intelectual. I. Pedroza, Bruno, orientador. II. Araújo,
Elaine, coorientadora. III. Universidade Federal Fluminense.
Escola de Engenharia. IV. Título.

CDD -

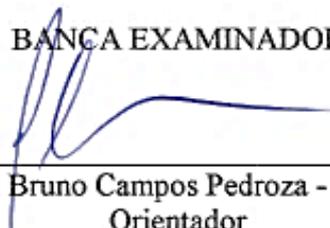
Lessandro Teixeira Rodrigues

ESTUDO DE VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA PARA A IMPLANTAÇÃO DE
UMA USINA DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA COM A UTILIZAÇÃO DE
MOTORES STIRLING E COLETORES SOLARES

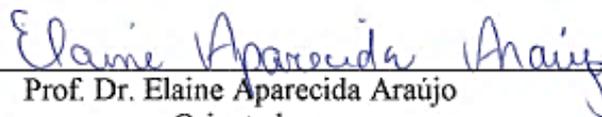
Dissertação apresentada ao Mestrado Profissional em
Montagem Industrial da Universidade Federal
Fluminense, como requisito parcial para obtenção do
Grau de Mestre. Área de Concentração Montagem
Industrial.

Aprovada em 9 de janeiro de 2019.

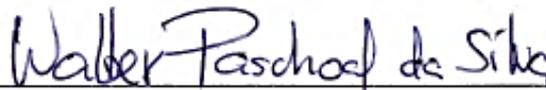
BANCA EXAMINADORA



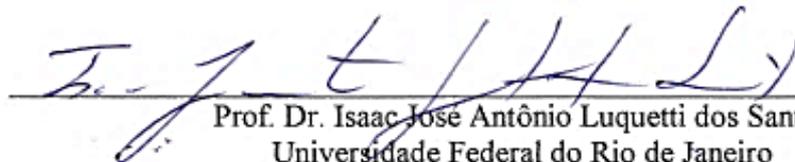
Prof. Dr. Bruno Campos Pedroza - Presidente
Orientador
Universidade Federal Fluminense



Prof. Dr. Elaine Aparecida Araújo
Orientador
Universidade Federal Fluminense



Prof. Dr. Walber Paschoal da Silva
Universidade Federal Fluminense



Prof. Dr. Isaac José Antônio Luquetti dos Santos
Universidade Federal do Rio de Janeiro

Niterói, RJ
2019

AGRADECIMENTOS

Este trabalho encerra mais um ciclo da minha formação na área de engenharia e, como sempre, uma dissertação nunca é desenvolvida sem o suporte de muitas pessoas de forma direta ou indireta. Assim, provavelmente eu não vou lembrar de todos que colaboraram, mas agradeço a todas as pessoas que, de alguma forma, me ajudaram a concluir esta etapa.

Em primeiro lugar, quero agradecer aos meus orientadores, o professor Bruno e a professora Elaine, que colaboraram muito para a construção desta dissertação. E agradeço também ao professor Walber pelos comentários sempre pertinentes para o aperfeiçoamento deste trabalho.

Agradeço aos meus colegas de trabalho, pois durante esses onze anos de trabalho pude aprender muito. À Petrobras, que sempre me proporcionou um suporte intelectual com capacitação e acesso a uma imensa base de conhecimento.

Ao meu irmão Leandro, com quem trabalhei muitos anos no início da minha formação profissional, sempre me passando todo o seu conhecimento e experiência.

À Simone, minha esposa e o amor da minha vida. Agradeço eternamente pelo apoio em todas as minhas decisões e por ser uma companheira maravilhosa, me tornando uma pessoa muito mais feliz.

À Júlia, minha filha, que tornou a minha vida mais completa e que me traz muitas alegrias diariamente.

Aos meus pais Elisabete e Mário, pessoas extraordinárias, íntegras e de princípios que sempre me apoiaram e que transmitiram esses valores com muito amor e carinho.

RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo da viabilidade técnica e econômica para a implantação de uma usina solar de geração de energia elétrica no Brasil, utilizando sistemas com motores Stirling e concentradores solares do tipo disco parabólico, também chamados de conjunto motor Stirling-coletor solar. A demanda por energia elétrica no mundo vem crescendo anualmente e há uma grande chance de duplicar nos próximos 40 anos, surgindo um déficit de fornecimento. As fontes de energias renováveis e limpas podem suprir as carências que não forem preenchidas pelas matrizes energéticas convencionais. A partir da energia solar, existem basicamente duas técnicas de geração de eletricidade: a conversão fotovoltaica e a concentração térmica. O sistema de geração de energia elétrica estudado nesta dissertação é formado pelo concentrador solar do tipo disco parabólico e um receptor, onde está localizado o motor Stirling e o gerador de energia. O conjunto motor Stirling-coletor solar é o que apresenta a maior eficiência na conversão de calor em energia elétrica entre as tecnologias de concentração térmica. A avaliação de viabilidade técnica e econômica iniciou com um estudo de localização, envolvendo diversos critérios para selecionar o local mais indicado para a implantação da usina solar. Os pesos desses critérios foram definidos com a aplicação do método AHP, o *Analytic Hierarchy Process*, sendo criada uma comparação par a par, segundo a importância de cada variável para o processo de tomada de decisão. Após a determinação dos pesos de cada critério, foi implementado o estudo de localização com o auxílio de uma ferramenta SIG em três cidades de diferentes regiões do Brasil. Assim, com dados georreferenciados, foi possível identificar uma área propícia para a construção de uma usina de geração de energia elétrica no Brasil com a tecnologia estudada nesta dissertação. Depois, foi realizada uma análise financeira em que primeiramente foram levantados os custos de construção, manutenção e operação para uma usina solar com capacidade máxima de geração de energia elétrica de 100MW. A etapa seguinte foi composta pela avaliação econômica na qual foi prevista uma receita a partir da energia elétrica produzida e foi elaborado um fluxo de caixa. Finalizando, foram calculados os índices financeiros, possibilitando analisar a viabilidade do empreendimento. O município de Bom Jesus da Lapa se destacou na comparação com as demais cidades avaliadas neste trabalho.

Palavras-chave: Usina solar, motor Stirling, conjunto motor Stirling-coletor solar, estudo de localização, análise financeira.

ABSTRACT

This work presents a technical and economic feasibility study for the implantation of a solar power plant in Brazil using systems with Stirling engines and parabolic dish concentrators, also known as Dish-Stirling systems. The demand for electrical energy in the world is growing annually, and there is a great chance it will double over the next 40 years, causing a supply deficit scenario. Renewable and clean energy sources can fill gaps that are not met by conventional energy matrices. Using solar energy, there are basically two electricity generation techniques: photovoltaic conversion and thermal concentration. The electric power generation system studied in this dissertation is formed by the parabolic dish concentrator and a receiver, where the Stirling engine and the power generator are located. Compared with other thermal concentration technologies, the Dish-Stirling system presents the greatest efficiency in the conversion of heat to electrical energy. The technical and economic feasibility analysis started with a localization study, involving several criteria to select the most suitable place for the implantation of the solar power plant. The weights of these criteria were defined with the application of the AHP method, the Analytic Hierarchy Process, creating a pairwise comparison, according to the importance of each variable for the decision-making process. After determining the weights of each criterion, the localization study was implemented using a GIS tool in three cities of different regions of Brazil. Thus, with georeferenced data, it was possible to identify a suitable area for the construction of an electric power generation plant in Brazil with the technology studied in this dissertation. Then, a financial analysis was carried out, in which were determined the construction, maintenance and operation costs for a solar power plant with a maximum generation capacity of 100 MW. The next stage was composed by the economic evaluation predicting revenue from the electrical energy produced, and a cash flow was elaborated. Finally, the financial indexes were calculated, making it possible to analyze the viability of the project. The municipality of Bom Jesus da Lapa stood out in comparison with the other cities evaluated in this work.

Keywords: Solar power plant, Stirling engine, Dish-Stirling system, localization study, financial analysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema de uma máquina Stirling ideal isotérmica	23
Figura 2 – Diagramas PV e TS do ciclo termodinâmico de um motor Stirling ideal	24
Figura 3 – Representação do ciclo termodinâmico de um motor Stirling ideal	25
Figura 4 – Configuração do motor Stirling tipo Alfa	28
Figura 5 – Configuração do motor Stirling tipo Beta	29
Figura 6 – Configuração do motor Stirling tipo Gama	30
Figura 7 – Máquina de conversão de energia solar para a geração de vapor	34
Figura 8 – Geração de energia com concentrador solar do tipo disco parabólico	35
Figura 9 – Concentrador solar do tipo disco parabólico com vários refletores	36
Figura 10 – Geração de energia com concentrador solar do tipo Fresnel linear	37
Figura 11 – Geração de energia com concentrador solar do tipo cilindro parabólico	39
Figura 12 – Geração de energia com torre solar e heliostatos	40
Figura 13 – Sistema de suportes com quatro espelhos refletores instalados	40
Figura 14 – O histórico de desenvolvimento dos sistemas Dish-Stirling	43
Figura 15 – O sistema Vanguard da Advanco	45
Figura 16 – Os equipamentos instalados pela SBP em Riade, Arábia Saudita	46
Figura 17 – A primeira geração dos equipamentos desenvolvidos pela SES	47
Figura 18 – O SunCatcher desenvolvido pela SES	48
Figura 19 – O equipamento da CPG instalado no Arizona, Estados Unidos	49
Figura 20 – O Big Dish, modelo SG4, construído em Canberra, Austrália	50
Figura 21 – O EUROdish instalado na Plataforma Solar de Almería	51
Figura 22 – O PowerDish III da Infinia Corporation	53
Figura 23 – O SunBox da Cleanergy em Dubai	54
Figura 24 – A segunda geração do equipamento da Ripasso Energy instalado na África do Sul	55
Figura 25 – Maricopa Solar Plant, no estado do Arizona, Estados Unidos	56
Figura 26 – Os equipamentos do projeto DISTAL II	58
Figura 27 – Os equipamentos do projeto EUROdish	59
Figura 28 – As plantas da GH Dairy e da Frito Lay	60
Figura 29 – A planta Tooele Army Depot	61
Figura 30 – A planta da Cleanergy na China	62
Figura 31 – Os equipamentos da Ripasso Energy instalados em Upington, África do Sul	63
Figura 32 – Capacidade operacional das tecnologias CSP por país até dezembro de 2016	65
Figura 33 – Tipos de estruturas em ferramentas SIG	75
Figura 34 – Tela da ferramenta QGIS	76
Figura 35 – Funções de associação para as classes para estaturas “baixa”, “média” e “alta”	77
Figura 36 – A “pirâmide de modelagem”	83
Figura 37 – O System Advisor Model (SAM)	84
Figura 38 – Fluxograma simplificado do estudo de localização baseado na ferramenta SIG	91
Figura 39 – Os critérios e subcritérios para o estudo de localização	98
Figura 40 – Macroprocesso da segunda parte do estudo de localização	109
Figura 41 – Fluxo de trabalho da análise financeira	114
Figura 42 – Mapa de distribuição de população na Região Sul do Brasil	116
Figura 43 – Mapa de incidência solar e o município de Uruguaiana (RS)	117
Figura 44 – Mapa de distribuição de população na Região Sudeste do Brasil	118
Figura 45 – Mapa de incidência solar e o município de Montes Claros (MG)	119
Figura 46 – Mapa de distribuição de população na Região Nordeste do Brasil	121
Figura 47 – Mapa de incidência solar e o município de Bom Jesus da Lapa (BA)	122
Figura 48 – A proximidade de linhas de transmissão em Uruguaiana (RS)	124
Figura 49 – A proximidade de linhas de transmissão em Montes Claros (MG)	125
Figura 50 – A proximidade de linhas de transmissão em Bom Jesus da Lapa (BA)	126
Figura 51 – A proximidade de principais rodovias em Uruguaiana (RS)	127
Figura 52 – A proximidade de principais rodovias em Montes Claros (MG)	128
Figura 53 – A proximidade de principais rodovias em Bom Jesus da Lapa (BA)	129
Figura 54 – A proximidade de áreas urbanas em Uruguaiana (RS)	131
Figura 55 – A proximidade de áreas urbanas em Montes Claros (MG)	132
Figura 56 – A proximidade de áreas urbanas em Bom Jesus da Lapa (BA)	133

<i>Figura 57 – A Irradiância Direta Normal (DNI) em Uruguaiana (RS)</i>	134
<i>Figura 58 – A Irradiância Direta Normal (DNI) em Montes Claros (MG)</i>	135
<i>Figura 59 – A Irradiância Direta Normal (DNI) em Bom Jesus da Lapa (BA)</i>	136
<i>Figura 60 – A declividade do terreno em Uruguaiana (RS)</i>	137
<i>Figura 61 – A declividade do terreno em Montes Claros (MG)</i>	138
<i>Figura 62 – A declividade do terreno em Bom Jesus da Lapa (BA)</i>	139
<i>Figura 63 – O aspecto do terreno em Uruguaiana (RS)</i>	140
<i>Figura 64 – O aspecto do terreno em Montes Claros (MG)</i>	141
<i>Figura 65 – O aspecto do terreno em Bom Jesus da Lapa (BA)</i>	142
<i>Figura 66 – Zonas de exclusão em Uruguaiana (RS)</i>	144
<i>Figura 67 – Zonas de exclusão em Montes Claros (MG)</i>	145
<i>Figura 68 – Zonas de exclusão em Bom Jesus da Lapa (BA)</i>	146
<i>Figura 69 – Área mais indicada em Uruguaiana (RS)</i>	148
<i>Figura 70 – Área mais indicada em Montes Claros (MG)</i>	150
<i>Figura 71 – Área mais indicada em Bom Jesus da Lapa (BA)</i>	151
<i>Figura 72 – Composição dos custos diretos e indiretos para a construção da usina solar</i>	154
<i>Figura 73 – Produção de energia elétrica em kWh anualmente em Uruguaiana (RS)</i>	159
<i>Figura 74 – Análise do fluxo de caixa em Uruguaiana (RS)</i>	160
<i>Figura 75 – Produção de energia elétrica em kWh anualmente em Montes Claros (MG)</i>	161
<i>Figura 76 – Análise do fluxo de caixa em Montes Claros (MG)</i>	162
<i>Figura 77 – Produção de energia elétrica em kWh anualmente em Bom Jesus da Lapa (BA)</i>	163
<i>Figura 78 – Análise do fluxo de caixa em Bom Jesus da Lapa (BA)</i>	164

LISTA DE TABELAS

<i>Tabela 1 – Futuras necessidades, tendências e vantagens dos motores Stirling</i>	22
<i>Tabela 2 – Características dos principais conjuntos motor Stirling-coletor solar</i>	44
<i>Tabela 3 – Comparação entre dados operacionais das quatro principais tecnologias de geração de energia elétrica por concentração de energia solar</i>	67
<i>Tabela 4 – Comparação entre dados operacionais, econômicos e ambientais das quatro principais tecnologias de geração de energia elétrica por concentração de energia solar</i>	68
<i>Tabela 5 – A escala fundamental dos números absolutos</i>	72
<i>Tabela 6 – Índice de Consistência Randômico (RI)</i>	74
<i>Tabela 7 – Função característica das classes de altura</i>	77
<i>Tabela 8 – Os valores de associação para as classes de altura</i>	78
<i>Tabela 9 – Regra do Valor Presente Líquido</i>	86
<i>Tabela 10 – Regra da Taxa Interna de Retorno</i>	87
<i>Tabela 11 – Regra do Payback Descontado</i>	87
<i>Tabela 12 – Os dados georreferenciados da parte 1</i>	94
<i>Tabela 13 – Os dados georreferenciados da parte 2</i>	95
<i>Tabela 14 – Matriz de comparação par a par dos critérios</i>	100
<i>Tabela 15 – Matriz de comparação par a par normalizada dos critérios</i>	100
<i>Tabela 16 – Cálculo do Autovalor máximo (λ_{max})</i>	101
<i>Tabela 17 – Matriz de comparação par a par dos subcritérios de proximidade</i>	101
<i>Tabela 18 – Matriz de comparação par a par normalizada dos subcritérios de proximidade</i>	102
<i>Tabela 19 – Cálculo do Autovalor máximo (λ_{max}) dos subcritérios de proximidade</i>	102
<i>Tabela 20 – Matriz de comparação par a par dos subcritérios de terreno</i>	103
<i>Tabela 21 – Matriz de comparação par a par normalizada dos subcritérios de terreno</i>	103
<i>Tabela 22 – Cálculo do Autovalor máximo (λ_{max}) dos subcritérios de terreno</i>	104
<i>Tabela 23 – Definição de λ_{max}, CI, CR e dos pesos finais dos subcritérios</i>	104
<i>Tabela 24 – Indicadores Fuzzy do grau de aptidão</i>	106
<i>Tabela 25 – Comparação entre os estudos de localização dos três municípios</i>	147
<i>Tabela 26 – Levantamento de dados para calcular o fluxo de caixa e simulações no SAM</i>	152
<i>Tabela 27 – Custos totais de construção da planta solar</i>	153
<i>Tabela 28 – Custos totais anuais de operação e manutenção</i>	156
<i>Tabela 29 – Receitas anuais calculadas no SAM</i>	156
<i>Tabela 30 – Custos totais anuais de operação e manutenção</i>	158
<i>Tabela 31 – Comparação entre as análises financeiras dos três municípios</i>	164

LISTA DE SIGLAS

ADM	Análise de Decisão Multicritério
AHP	<i>Analytic Hierarchy Process</i>
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ANU	<i>Australian National University</i>
APP	Áreas de Preservação Permanente
BNDES	Banco Nacional do Desenvolvimento
CAGED	Cadastro Geral de Empregados e Desempregados
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CAPEX	<i>Capital Expenditure</i>
CCST	Centro de Ciência do Sistema Terrestre
CFR	Fator de Recuperação do Capital ou <i>Capital Recovery Factor</i>
CI	Índice de Consistência ou <i>Consistency Index</i>
CIEMAT	<i>Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas</i>
CMPC	Custo Médio Ponderado de Capital
CNRS	<i>Centre National de la Recherche Scientifique</i>
CPG	Cummins Power Generation
CR	Razão de Consistência ou <i>Consistency Ratio</i>
CRS	Sistemas de Coordenadas de Referência ou <i>Coordinate Reference Systems</i>
CRESESB	Centro de Referência para Energia Solar e Eólica
CSP	<i>Concentrating Solar Power</i>
DHI	Irradiância Direta Horizontal
DNI	Irradiância Direta Normal
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
DOE	<i>U. S. Department of Energy</i>
DSG	<i>Direct Steam Generation</i>
ERDA	<i>Energy Research and Development Administration</i>
ESI	<i>Escuela Superior de Ingenieros</i>
FC	Fluxo Líquido de Caixa
GDAL	<i>Geospatial Data Abstraction Library</i>
GEE	Gases de Efeito Estufa
GIS	<i>Geographic Information System</i>
GHI	Irradiância Global Horizontal
HTF	<i>Heat Transfer Fluid</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IEA	<i>International Energy Agency</i>
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IRENA	<i>International Renewable Energy Agency</i>
LABREN	Laboratório de Modelagem e Estudos de Recursos Renováveis de Energia
LCOE	Custo Nivelado de Energia ou <i>Levelized Cost of Electricity</i>
MAHP	<i>Multiplicative Analytic Hierarchy Process</i>
MCDM	<i>Multiple Criteria Decision Making</i>
MDAC	McDonnell Douglas Aerospace Corporation

MEC	Ministério da Educação
MMA	Ministério do Meio Ambiente
MTE	Ministério do Trabalho e Emprego
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
NREL	<i>National Renewable Energy Laboratory</i>
OEERE	<i>Office of Energy Efficiency & Renewable Energy</i>
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
OPEX	<i>Operational Expenditure</i>
PSA	<i>Plataforma Solar de Almería</i>
ProGD	Programa de Geração Distribuída de Energia Elétrica
QGIS	<i>Free and Open Source Geographic Information System</i>
RI	Consistência Randômico ou <i>Random Consistency Indexes</i>
SAM	<i>System Advisor Model</i>
SBP	Schlaich Bergermann Partner
SES	Stirling Energy Systems
SIG	Sistema de Informação Geográfica
SIN	Sistema Interligado Nacional
SIRGAS	Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas
S&L	Sargent & Lundy Consulting Group
SML	<i>Security Market Line</i>
SNL	Sandia National Laboratories.
SRTM	<i>Shuttle Radar Topography Mission</i>
TIR	Taxa Interna de Retorno
TMA	Taxa Mínima de Atratividade
UC	Unidade de Conservação
USGS	<i>United States Geological Survey</i>
UTM	<i>Universal Transverse Mercator</i>
VPL	Valor Presente Líquido
WGS 84	<i>World Geodetic System</i>
WLC	<i>Weighted Linear Combination</i>
XEMC	Xiangtan Electric Manufacturing Group Corporation

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO	16
1.2	OBJETIVO DA PESQUISA	18
1.3	JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA DA PESQUISA	18
2	REVISÃO DE LITERATURA	21
2.1	A GERAÇÃO DE ENERGIA A PARTIR DA CONVERSÃO TÉRMICA DA RADIAÇÃO SOLAR	21
2.1.1	O MOTOR STIRLING	21
2.1.1.1	O ciclo termodinâmico do motor Stirling	24
2.1.2	OS TIPOS DE MOTOR STIRLING	26
2.1.2.1	O motor Stirling do tipo <i>Alfa</i>	27
2.1.2.2	O motor Stirling do tipo <i>Beta</i>	28
2.1.2.3	O motor Stirling do tipo <i>Gama</i>	29
2.1.3	OS CONCEITOS SOBRE RADIAÇÃO SOLAR	30
2.1.4	A CONVERSÃO DE ENERGIA SOLAR EM ENERGIA ELÉTRICA	32
2.1.5	O COLETOR OU CONCENTRADOR SOLAR	33
2.1.5.1	O concentrador do tipo disco parabólico	34
2.1.5.2	O concentrador do tipo Fresnel linear	37
2.1.5.3	O concentrador do tipo cilindro parabólico	38
2.1.5.4	A torre solar com heliostatos	39
2.1.6	O CONJUNTO MOTOR STIRLING-COLETOR SOLAR	41
2.1.6.1	O sistema Vanguard da Advanco	44
2.1.6.2	O sistema da Schlaich Bergermann Partner	45
2.1.6.3	O sistema McDonnell Douglas Aerospace Corporation (MDAC)/Stirling Energy Systems (SES)	46
2.1.6.4	Os sistemas da Cummins Power Generation de 7 kW e de 25 kW	48
2.1.6.5	O sistema da Aisin Seiki	49
2.1.6.6	O sistema <i>Big Dish</i>	50
2.1.6.7	O sistema EUROdish	51
2.1.6.8	O sistema PowerDish da Infinia Corporation	52
2.1.6.9	O sistema SunBox da Cleanergy	53
2.1.6.10	O sistema da Ripasso Energy	54
2.1.7	AS USINAS SOLARES COM MOTORES STIRLING E CONCENTRADORES SOLARES	56
2.1.7.1	A <i>Maricopa Solar Plant</i>	56
2.1.7.2	As plantas DISTAL I, DISTAL II e EUROdish	57
2.1.7.3	As plantas da GH Dairy e da Frito Lay	59
2.1.7.4	A planta Tooele Army Depot	60
2.1.7.5	As plantas da Cleanergy na China e nos Emirados Árabes Unidos	61
2.1.7.6	A planta da Ripasso Energy na África do Sul	62
2.2	A COMPARAÇÃO ENTRE AS TECNOLOGIAS DE CONCENTRAÇÃO DE ENERGIA SOLAR	64
2.3	O ESTUDO DE LOCALIZAÇÃO	68
2.3.1	ANALYTIC HIERARCHY PROCESS (AHP)	71
2.3.2	SISTEMA DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA (SIG)	74
2.3.3	TEORIA DOS CONJUNTOS FUZZY OU LÓGICA FUZZY	76
2.4	OS CUSTOS DE UMA USINA SOLAR	78
2.4.1	O CUSTO NIVELADO DE ENERGIA (LCOE)	78
2.4.2	O CUSTO DE INVESTIMENTO INICIAL (CAPEX)	80

2.4.3	O CUSTO OPERACIONAL (OPEX).....	80
2.4.4	O CUSTO PARA INTERLIGAR UMA USINA SOLAR COM O SISTEMA INTERLIGADO NACIONAL (SIN) 81	
2.4.5	O CÁLCULO DO LCOE COM O <i>SYSTEM ADVISOR MODEL</i> (SAM)	82
2.5	O VALOR PRESENTE LÍQUIDO (VPL), A TAXA INTERNA DE RETORNO (TIR) E O <i>PAYBACK</i> DESCONTADO	84
2.5.1	VALOR PRESENTE LÍQUIDO (VPL).....	85
2.5.2	TAXA INTERNA DE RETORNO (TIR)	86
2.5.3	<i>PAYBACK</i> DESCONTADO	87
3	METODOLOGIA.....	88
3.1	O ESTUDO DE LOCALIZAÇÃO PARA A IMPLANTAÇÃO DA USINA SOLAR COM O SISTEMA <i>DISH-STIRLING</i>	88
3.1.1	ETAPA 1 - ESCOLHA DOS MUNICÍPIOS DE CADA REGIÃO DO BRASIL PARA O ESTUDO DETALHADO.....	93
3.1.2	ETAPA 2 - ESTUDO DETALHADO PARA DEFINIR O LOCAL MAIS INDICADO PARA A USINA SOLAR 94	
3.1.2.1	Definição dos pesos dos critérios e dos subcritérios para a aplicação do método AHP.....	96
3.1.2.2	Definição dos indicadores <i>Fuzzy</i> do grau de aptidão.....	105
3.1.2.3	Execução do estudo de localização na ferramenta GIS	108
3.2	A ANÁLISE FINANCEIRA DE UMA USINA SOLAR COM O SISTEMA <i>DISH-STIRLING</i> 112	
3.2.1	A ESTIMATIVA DE CUSTOS PARA A CONSTRUÇÃO E OPERAÇÃO DA USINA SOLAR	112
3.2.2	A AVALIAÇÃO ECONÔMICA PARA A CONSTRUÇÃO DA USINA SOLAR.....	113
4	RESULTADOS	115
4.1	OS RESULTADOS DO ESTUDO DE LOCALIZAÇÃO PARA A IMPLANTAÇÃO DA USINA SOLAR COM O SISTEMA <i>DISH-STIRLING</i>	115
4.1.1	RESULTADO DA ETAPA 1 - DEFINIÇÃO DO MUNICÍPIO ONDE FOI REALIZADO O ESTUDO DETALHADO.....	115
4.1.1.1	A escolha do município da Região Sul do Brasil	115
4.1.1.2	A escolha do município da Região Sudeste do Brasil	118
4.1.1.3	A escolha do município da Região Nordeste do Brasil	120
4.1.2	RESULTADO DA ETAPA 2 - ESTUDO DE LOCALIZAÇÃO DETALHADO PARA A CONSTRUÇÃO DA USINA SOLAR	123
4.1.2.1	A aplicação da Lógica <i>Fuzzy</i> para a proximidade de linhas de transmissão	123
4.1.2.2	A aplicação da Lógica <i>Fuzzy</i> para a proximidade de principais rodovias	126
4.1.2.3	A aplicação da Lógica <i>Fuzzy</i> para a proximidade de áreas urbanas.....	130
4.1.2.4	A aplicação da Lógica <i>Fuzzy</i> para a Irradiância Direta Normal (DNI)	134
4.1.2.5	A aplicação da Lógica <i>Fuzzy</i> para a declividade do terreno.....	137
4.1.2.6	A aplicação da Lógica <i>Fuzzy</i> para o aspecto do terreno.....	140
4.1.2.7	As zonas de exclusão para o estudo de localização.....	143
4.1.3	RESULTADO FINAL DO ESTUDO DE LOCALIZAÇÃO	147
4.2	OS RESULTADOS DA ANÁLISE FINANCEIRA PARA A IMPLANTAÇÃO DE UMA USINA SOLAR COM O SISTEMA <i>DISH-STIRLING</i>	152
4.2.1	RESULTADO DA ESTIMATIVA DE CUSTOS PARA A CONSTRUÇÃO DA USINA SOLAR.....	152
4.2.2	RESULTADO DA AVALIAÇÃO ECONÔMICA PARA A CONSTRUÇÃO DA USINA SOLAR	156
4.2.3	RESULTADO FINAL DA ANÁLISE FINANCEIRA	158
5	CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	165
5.1	CONCLUSÃO	165

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	166
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	167
ANEXOS	178
ANEXO A – EQUAÇÕES APRESENTADAS NA DISSERTAÇÃO	178
ANEXO B – LÓGICAS <i>FUZZY</i> UTILIZADAS NO ESTUDO DE LOCALIZAÇÃO.....	181

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

A Terra recebe uma quantidade gigantesca de energia fornecida pelo Sol, cerca de 120.000 Terawatts por ano. Em 2009, seria aproximadamente 6.000 vezes o consumo total da população global. Como a demanda por energia elétrica no planeta possivelmente duplicará nos próximos 40 anos, o cenário provável é de um grande déficit de abastecimento, a menos que a energia renovável possa cobrir esta carência que não será suprida pelas fontes de energia tradicionais (GRÄTZEL, 2009).

Segundo Mancini et al. (2003), o aumento na procura por unidades de geração de energia elétrica de forma distribuída, gera grandes oportunidades para pequenas centrais de energia que variam em tamanho de alguns kW até vários MW. Nessa forma de geração de eletricidade, muitas vezes são utilizados geradores com motores de combustão interna e com turbinas a gás. Porém, novas tecnologias podem ser empregadas como microturbinas, células de combustível e outros sistemas geradores de energia alternativos e com fontes renováveis e limpas.

Utilizando a energia solar, existem duas principais formas de gerar energia elétrica: a conversão fotovoltaica, na qual a geração de eletricidade é realizada diretamente a partir da conversão das células fotovoltaicas e a concentração ou conversão térmica (PINHO; GALDINO, 2014). A tecnologia de geração de energia aplicando a conversão térmica a partir da energia solar é definida pela *International Energy Agency* (2014) como *Concentrating Solar Power* (CSP), sendo utilizada no meio acadêmico a expressão *plantas CSP* para definir uma usina de geração de energia que emprega a concentração solar.

O *Office of Energy Efficiency & Renewable Energy* (OEERE), órgão do governo dos Estados Unidos, possui um programa de apoio à pesquisa e ao desenvolvimento de tecnologias de energia solar por meio da conversão térmica (CSP) para a redução de custos. Segundo o OEERE (2017), desde a criação do programa, o custo da eletricidade gerada a partir de plantas CSP diminuiu de US\$ 0,21 em 2010 para US\$ 0,12 por quilowatt-hora (kWh) em 2015. A meta é alcançar um custo de US\$ 0,06 por quilowatt-hora em 2020.

No Brasil, o Ministério de Minas e Energia lançou no final de 2015 o Programa de Geração Distribuída de Energia Elétrica (ProGD), para estimular a geração de energia pelos

próprios consumidores em residências, comércios, indústrias e na área agrícola. O foco é a geração de energia a partir de fontes renováveis, com destaque para a energia solar, apesar de ser prioridade a geração fotovoltaica (BRASIL, 2015).

O Programa, de acordo com o governo brasileiro, pode movimentar mais de 100 bilhões de reais em investimentos até 2030. Assim, aproximadamente 2,7 milhões de consumidores poderão gerar a sua própria energia, resultando em uma carga instalada de 23.500 MW, produzindo energia limpa e renovável. Seria o equivalente à metade da capacidade da Usina Hidrelétrica de Itaipu, evitando que sejam emitidas pelo Brasil um total 29 milhões de toneladas de CO₂ por ano na atmosfera (BRASIL, 2015).

Existem quatro principais tecnologias desenvolvidas para a geração de energia elétrica por meio da conversão térmica em plantas CSP. Basicamente, o que caracteriza o processo de produção da energia são os diferentes tipos de coletores ou concentradores solares: o primeiro em formato de disco parabólico, o concentrador chamado de Fresnel linear, o cilindro parabólico e por último a torre solar com heliostatos (IEA, 2014).

Os sistemas com discos parabólicos são formados pelo concentrador solar e um receptor, para onde é direcionada a luz solar, composto de um motor, normalmente do tipo Stirling e um gerador de energia (MANCINI et al., 2003). Foco desta dissertação, esses sistemas são chamados de conjunto motor Stirling-coletor solar, motor Stirling-disco parabólico ou ainda a expressão em inglês *Dish-Stirling*.

Na realização da conversão térmica, os sistemas com motores Stirling são uma das soluções mais promissoras. Combinam um recurso abundante com um ciclo térmico simples e eficiente. Esses motores apresentam diversas vantagens como: a alta eficiência termodinâmica, a capacidade de usar qualquer fonte de calor, incluindo combustíveis líquidos ou gases, energia solar, geotérmica ou calor residual e, ainda, possuem baixos níveis de ruído (BARRETO; CANHOTO, 2017). Segundo Greyvenstein (2011), o conjunto motor Stirling - coletor solar do tipo disco parabólico possui a melhor eficiência entre as tecnologias CSP com uma média de 21,4%.

Por essas razões, Barreto e Canhoto (2017) destacam que a utilização de conjuntos de motores Stirling e concentradores solares tem recebido a atenção de pesquisadores nos últimos anos visando a sua modelagem, otimização e aplicação em sistemas de geração de energia.

Scollo et al. (2008) acrescentam que atualmente os motores Stirling estão novamente em evidência por causa de suas vantagens em um cenário de escassez de combustíveis fósseis.

1.2 OBJETIVO DA PESQUISA

O objetivo principal deste trabalho foi a realização de um estudo da viabilidade técnica e econômica para a implantação de uma usina de geração de energia elétrica no Brasil, utilizando como fonte de energia a luz solar com a tecnologia de motores Stirling e coletores solares do tipo disco parabólico. Para a melhoria do desenvolvimento dos projetos de energias renováveis e limpas no Brasil, os objetivos específicos para a concretização do objetivo geral desta pesquisa foram:

- Levantamento na literatura de trabalhos acadêmicos sobre a geração de energia elétrica com a tecnologia motor Stirling-coletor solar;
- Coleta de dados e dos métodos de análises econômico-financeiras para a realização do estudo de viabilidade da usina de geração de energia elétrica;
- Realização de uma análise técnica e econômica para a implantação de uma usina de geração de energia elétrica no Brasil com a utilização da tecnologia estudada neste trabalho.

1.3 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA DA PESQUISA

A partir da década de 1970, com a primeira crise do petróleo, diversos países começaram a buscar uma maior segurança na produção de energia e também uma diminuição da dependência na importação de combustíveis. Porém, atualmente a preocupação com o meio ambiente e com as mudanças climáticas são os principais fatores para as pesquisas em fontes de energias renováveis e limpas (SIMAS; PACCA, 2013).

Segundo a *International Energy Agency* (2016), o acordo de Paris sobre a mudança global do clima, que entrou em vigor em novembro de 2016, na realidade é um acordo sobre energia. Para alcançar os objetivos desse acordo, é necessária uma grande transformação do setor energético, fonte de pelo menos 2/3 das emissões de gases de efeito estufa.

Uczai et al. (2012) descrevem que alguns países apresentaram um grande sucesso no aumento da participação das fontes renováveis em suas matrizes energéticas, adotando políticas pioneiras, e se tornaram referências no mundo, que é o caso da Alemanha e da Espanha. Uczai et al. (2012) destacam que a China é líder no aproveitamento da energia solar para o aquecimento de água e para a geração de energia elétrica, utilizando pequenas unidades de geração descentralizadas.

Países emergentes como Brasil, África do Sul e Índia se tornaram grandes poluentes devido ao aumento do uso de energias de origem fóssil por suas populações de classe média (ÖHLEN, 2013). A indústria da energia renovável pode ajudar no desenvolvimento de soluções sustentáveis com a redução do uso de fontes energéticas poluentes e não renováveis (ÖHLEN, 2013). A transformação do setor elétrico, liderada pelas energias renováveis tem se tornado o ponto central em um novo debate sobre o desenho do mercado da eletricidade e da segurança energética que é um tópico importante para a economia de qualquer nação (IEA, 2016).

Segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2018), 60,8% da eletricidade no Brasil é gerada a partir da energia hídrica. Embora o país tenha um alto percentual de fontes de energias renováveis em sua matriz energética, a energia hídrica não é uma energia limpa. Fearnside (2015) descreve que a emissão de Gases de Efeito Estufa (GEE) inicia durante a construção de uma hidrelétrica, devido ao uso de cimento, aço e combustível.

Por exemplo, as emissões de carbono equivalente de CO₂ para a construção da usina hidrelétrica de Belo Monte, situada no município de Vitória do Xingu (PA), foram estimadas em 0,98 milhões de toneladas. Fearnside (2015) acrescenta que uma hidrelétrica produz mais GEE, quando comparada a uma instalação equivalente para gerar a mesma quantidade de energia elétrica com o emprego de combustíveis fósseis ou de fontes alternativas como a eólica e a solar.

As árvores que morrem e se decompõem após a inundação, contribuem de forma significativa para a emissão de gases de efeito estufa, pois muitas se projetam acima da água e liberam o CO₂, antes mesmo da usina entrar em operação. Além disso, árvores na floresta próxima da margem são afetadas, incluindo as ilhas formadas no reservatório, pois há uma ascensão ao lençol freático (FEARNSIDE, 2015).

O complexo envolvendo a usina de Belo Monte e de Babaquara, de acordo com Fearnside (2015), emitirá nos primeiros dez anos de operação, em média, quatro vezes mais

dióxido de carbono que uma usina termelétrica que utiliza combustíveis fósseis. Apenas realizando o cálculo de uma média de 50 anos a usina hidrelétrica vai emitir menos gases de efeito estufa.

Como o Brasil possui uma capacidade imensa de geração de energia elétrica a partir do Sol, este potencial poderia ser melhor explorado. No país, a energia solar tem um alto potencial e uma baixa utilização, uma vez que somente 0,6% da eletricidade gerada é provida pela luz solar (ANEEL, 2018). O Atlas Brasileiro de Energia Solar é um estudo desenvolvido pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) em parceria com outras instituições que tem como objetivo promover a inserção da energia solar na matriz energética brasileira.

A geração de energia elétrica com motores Stirling associados a coletores solares se apresenta como uma aliada nessa tarefa. O conjunto *Dish-Stirling* apresenta a maior eficiência entre as tecnologias de concentração solar que atualmente está em torno de 30% (RIPASSO ENERGY, 2016), seguido pelas torres solares com uma eficiência de aproximadamente 20% (CEKIRGE; ELHASSAN, 2015).

A relevância deste trabalho reside no fato de que a pesquisa no Brasil para a emprego da energia solar na geração de eletricidade, por meio da conversão térmica ainda é muito incipiente, principalmente na tecnologia apresentada nesta dissertação. Desta forma, este trabalho se propõe a fornecer subsídios para a implantação de futuras unidades de geração de energia elétrica com a utilização da tecnologia *Dish-Stirling*.

2 REVISÃO DE LITERATURA

Neste capítulo, inicialmente é apresentado um resumo sobre o motor *Stirling* e as suas variações. Em seguida são descritos os conceitos sobre radiação solar e a conversão da luz solar em energia elétrica, incluindo uma breve introdução dos tipos de tecnologias de conversão ou concentração térmica. A parte final deste primeiro item do capítulo 2 descreve o estado da arte sobre a utilização do conjunto motor Stirling-coletor solar na geração de energia elétrica.

O item 2.2 exhibe uma comparação entre as tecnologias de concentração de energia solar em relação aos sistemas *Dish-Stirling*. Depois, na seção 2.3, estão os conceitos que posteriormente foram aplicados para o desenvolvimento do estudo de localização, incluindo o método *Analytic Hierarchy Process* (AHP) e os princípios básicos dos Sistemas de Informações Geográficas (SIG).

Esta parte da dissertação, seção 2.4, descreve ainda os custos que devem ser previstos para uma análise de viabilidade técnica e econômica. Finalmente, o capítulo é concluído com uma apresentação dos índices econômicos que foram empregados para a análise financeira para prever se a construção de uma usina solar com a tecnologia *Dish-Stirling* seria exequível.

2.1 A GERAÇÃO DE ENERGIA A PARTIR DA CONVERSÃO TÉRMICA DA RADIAÇÃO SOLAR

2.1.1 O motor Stirling

O motor Stirling foi inventado na Escócia em 1816 por Robert Stirling, cerca de 80 anos antes da invenção do motor a diesel, tendo um importante sucesso comercial até o início dos anos 1900. Posteriormente, ao longo do século XX, perdeu espaço com a popularização dos automóveis e o emprego em massa dos motores à combustão. Porém, a partir de 1980, após a crise do petróleo, os motores Stirling se tornaram uma proposição viável e surgiram diversas pesquisas, apresentando rápidos avanços. Esta é considerada uma segunda fase da transformação dos motores Stirling (THOMBARE; VERMA, 2008).

Este motor é diferente dos dois motores mais populares: o motor a vapor e o de combustão interna. Semelhante ao motor a vapor, ele usa uma fonte de calor externa. No entanto, ao invés de constantemente descartar a água na forma de vapor, o motor Stirling utiliza um gás de trabalho em um cilindro fechado. É o motor de calor mais simples, pois não são

necessárias as válvulas de admissão e de exaustão. Pode ser operado com qualquer tipo de fonte de calor, sendo perfeito para ser utilizado com energia solar (CHEN, 2011).

Atualmente, os motores Stirling são empregados minoritariamente para aplicações de cogeração e também em sistemas com discos parabólicos alimentados com energia solar (DOMÍNGUEZ; ANTONIO, 2014). Entretanto, Thombare e Verma (2008) descrevem diversos benefícios para a aplicação desta tecnologia como: alta eficiência térmica, possibilidade de trabalhar com diferentes tipos de combustíveis não fósseis, além de uma operação ambientalmente segura e com baixo ruído.

Entre os meios de geração de energia elétrica a partir de fontes renováveis e limpas, os motores Stirling são considerados as melhores e mais eficientes (TLILI, 2012). Na tabela 1 a seguir estão descritas as futuras necessidades e possíveis tendências, incluindo as vantagens no emprego dos motores Stirling.

Tabela 1 – Futuras necessidades, tendências e vantagens dos motores Stirling

Futuras necessidades e tendências	Propriedades atraentes dos motores Stirling
1. Esgotamento dos combustíveis tradicionais	<ul style="list-style-type: none"> ● Capacidade de funcionar com diversos combustíveis ● Baixo consumo de combustível
2. Aumento de custo dos combustíveis fósseis	<ul style="list-style-type: none"> ● Alta eficiência (utilização de combustíveis não fósseis)
3. Utilização de combustíveis alternativos	<ul style="list-style-type: none"> ● Capacidade de funcionar com diversos combustíveis (utilização de combustíveis não fósseis)
4. Demanda para motores com baixas taxas de ruído e poluição do ar	<ul style="list-style-type: none"> ● Combustão limpa ● Baixos níveis de ruído
5. Recuperação de calor residual	<ul style="list-style-type: none"> ● Operação com baixas temperaturas

Fonte: Adaptado de Thombare e Verma (2008).

Segundo Flórez et al. (2002), o motor Stirling é um dispositivo que converte calor em trabalho, ou vice-versa, por meio de um ciclo termodinâmico regenerativo, com compressões e expansões cíclicas do fluido (gás) de trabalho, O fluido opera entre duas temperaturas, de um lado quente e de outro lado frio. Ainda, de acordo com Flórez et al. (2002), quando uma máquina opera de modo volumétrico recebe o nome de motor Stirling, que não pode ser confundido com uma máquina com uma operação de fluxo permanente contínuo, denominado de motor Ericsson.

O primeiro nome dado a este tipo de máquina foi motor de ar quente (*hot-air engine*) porque utilizava apenas o ar como o fluido de trabalho. Posteriormente, com o emprego de outros gases, surgiu a necessidade de buscar um nome para esta máquina. Surgiu o nome de motor Stirling em homenagem a Robert Stirling, o idealizador do regenerador que é empregado neste tipo de máquina (FLÓREZ et al., 2002).

Barros et al. (2004) descrevem que o motor Stirling possui dois cilindros selados, um quente e outro frio. O gás de trabalho (hélio ou hidrogênio) que circula dentro do motor, podendo ser o próprio ar, é transportado por um mecanismo do cilindro quente para o frio. Quando o gás está no cilindro quente, ele se expande e empurra um pistão. Quando ele retorna para o lado frio, se contrai.

Sobre o seu funcionamento, no esquema conceitual do motor Stirling (figura 1), o fluido está confinado dentro de um cilindro entre dois pistões opostos, sendo separados pelo regenerador. O fluido atravessa o regenerador e se adequa à temperatura da câmara em que se encontra, sendo que a temperatura vai ser baixa na câmara de compressão e alta na câmara de expansão (FLÓREZ et al., 2002). O regenerador é uma matriz de metal muito fina na forma de fios ou tiras que funciona como uma esponja térmica que absorve e libera o calor do fluido de trabalho (SHENDAGE et al., 2011).

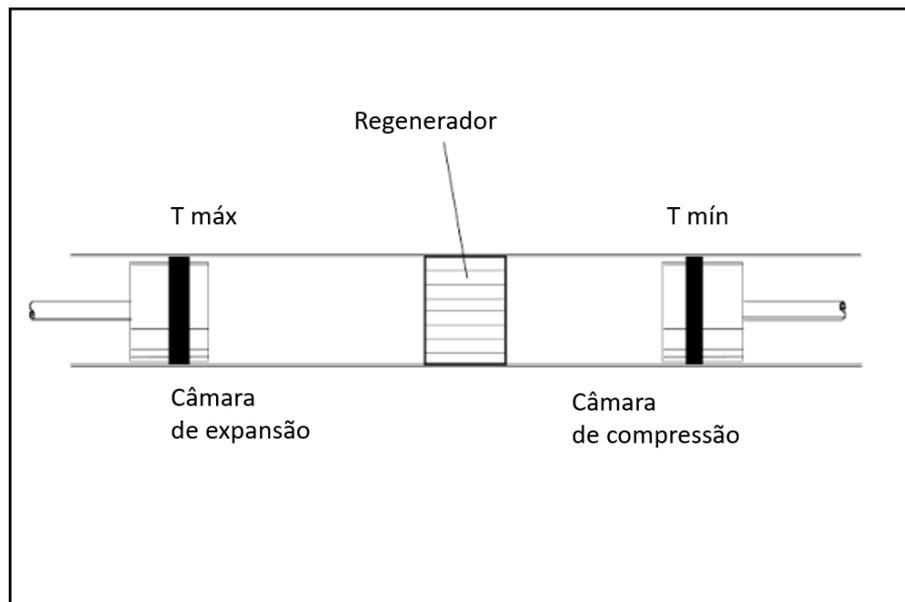


Figura 1 – Esquema de uma máquina Stirling ideal isotérmica

Fonte: Adaptada de Flórez et al. (2002).

2.1.1.1 O ciclo termodinâmico do motor Stirling

O ciclo termodinâmico de um motor Stirling ideal está representado nos diagramas PV e TS, exibidos a seguir na figura 2. O ciclo consiste em quatro processos definidos como: compressão isotérmica (1–2), aquecimento com volume constante (2–3), expansão isotérmica (3–4) e, por último, um processo (4–1) de rejeição de calor com volume constante (SCOLLO et al., 2008).

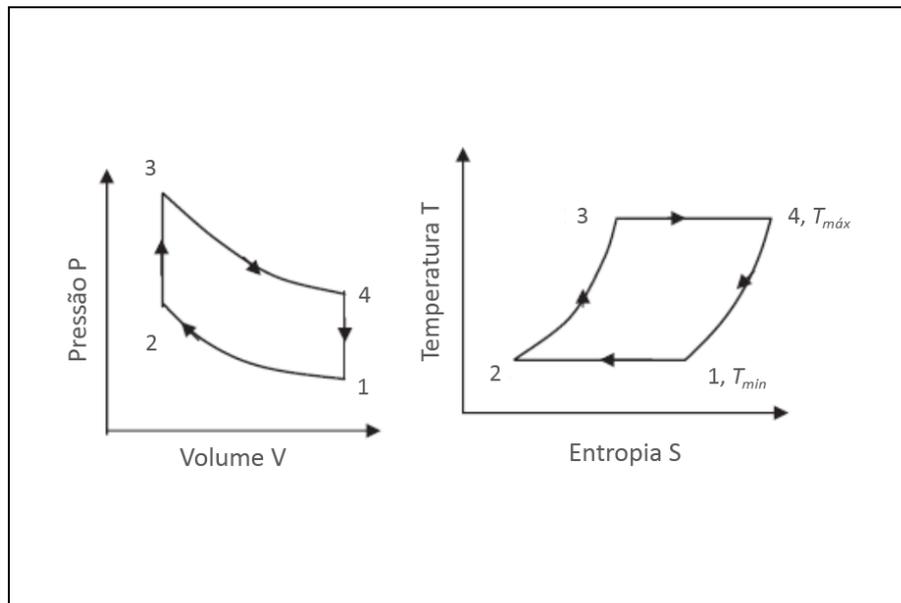


Figura 2 – Diagramas PV e TS do ciclo termodinâmico de um motor Stirling ideal
Fonte: Adaptada de Thombare e Verma (2008).

O ciclo termodinâmico de um motor Stirling descrito na figura 2 é apresentado de forma detalhada a seguir na figura 3. A região entre regenerador e o pistão do lado direito é o volume de compressão e entre o regenerador e o pistão do lado esquerdo é o volume de expansão. O volume de compressão é mantido em alta temperatura e o volume de expansão é mantido a baixa temperatura. O gradiente de temperatura de $(T_{máx} - T_{mín})$ entre as extremidades do regenerador é mantido (THOMBARE; VERMA, 2008).

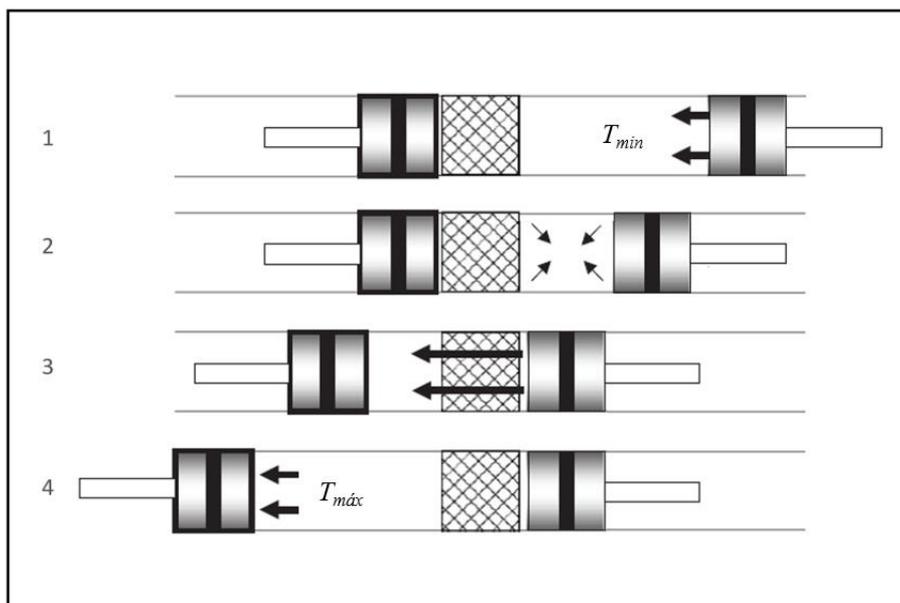


Figura 3 – Representação do ciclo termodinâmico de um motor Stirling ideal
 Fonte: Thombare e Verma (2008).

No ponto 1 (figura 3) do ciclo do motor Stirling, todo o fluido de trabalho está no espaço de compressão a frio, o volume de compressão está no valor máximo e a pressão e a temperatura estão em seus valores mínimos (CASTELHANOS, 2012). O pistão de compressão está no lado direito, em seu ponto mínimo externo e o pistão de expansão, no ponto interno mais próximo ao regenerador. Castelhanos (2012) ressalta que o ciclo de Stirling é válido para gases perfeitos, diferentemente de um ciclo real medido por instrumentos e está muito próximo do ciclo de Carnot. Assim, detalhando o ciclo de um motor Stirling, os quatro processos são:

- Processo de compressão isotérmica (1–2): O pistão de compressão realiza um movimento para a esquerda em direção ao regenerador e realiza uma compressão no fluido de trabalho dentro do motor. A temperatura é constante, sendo que o calor é rejeitado para o sistema de resfriamento (BARROS, 2005). O pistão de expansão permanece em repouso e haverá um aumento de pressão no fluido de trabalho. Não haverá mudança na energia interna e a entropia diminuirá (THOMBARE; VERMA, 2008);
- Processo de aquecimento com volume constante (2–3): O pistão de compressão começa a se aproximar do regenerador e o pistão de expansão a se afastar e, desta forma, o volume permanece constante (ROMANELLI, 2017). Assim, o fluido de trabalho é transferido para o espaço de expansão, sendo aquecido pela fonte externa e havendo um aumento de pressão (BARROS, 2005). A temperatura do fluido de trabalho aumentará

de T_{\min} para T_{\max} . Não haverá trabalho, aumentando a entropia e a energia interna do fluido de trabalho (THOMBARE; VERMA, 2008);

- Processo de expansão isotérmica (3–4): A temperatura é constante e durante a expansão, o fluido de trabalho recebe calor da fonte externa (BARROS, 2005). Assim, haverá um trabalho realizado pelo fluido e não haverá mudança na energia interna, mas a entropia do fluido de trabalho aumentará. Devido à expansão, o volume aumentará e a pressão vai diminuir (ROMANELLI, 2017);
- Processo de rejeição de calor com volume constante (4–1): Os dois pistões se movem simultaneamente para transferir o fluido de trabalho do volume de expansão para o volume de compressão através do regenerador com volume constante. Durante este período, o calor é transferido do fluido de trabalho para o regenerador, reduzindo a temperatura do fluido de trabalho para a T_{\min} . Ocorre um decaimento da energia interna e da entropia, não havendo trabalho (THOMBARE; VERMA, 2008).

2.1.2 Os tipos de motor Stirling

Provavelmente, um dos principais motivos que limitou o desenvolvimento dos motores Stirling foi a falta de compreensão da importância do regenerador por cerca de 100 anos após o registro da patente original de Stirling. A tentativa inicial de análise do motor de Stirling foi publicada em 1871 por Gustav Schmidt em seu trabalho *Classical analysis of operation of Stirling engine* (URIELI, 2017).

Segundo Shendage et al. (2011), existem três configurações de motores Stirling chamadas de *Alfa* (α), *Beta* (β) e *Gama* (γ) e Schmidt realizou a sua análise nos três tipos. Formosa e Despesse (2010) descrevem que os resultados encontrados por Schmidt se resumem em um equilíbrio energético, incluindo uma regeneração não ideal e, além das limitações anteriores, as transferências térmicas entre a máquina e suas fontes térmicas devem ser levadas em consideração em um modelo de motor Stirling, mais realista do que o ciclo ideal de Stirling.

Os motores Stirling são classificados quanto ao seu tipo (*Alfa*, *Beta* ou *Gama*), dependendo da disposição das câmaras de compressão e expansão e também do fluxo de gás de trabalho (BARRETO; CANHOTO, 2017). Segundo Song et al. (2012), os motores Stirling também podem ser classificados em motores de altas e de baixas temperaturas, dependendo do intervalo de temperaturas dos reservatórios quente e frio, o que depende do tipo de aplicação.

Segundo Wood et al. (1982), outros fatores importantes para a definição das configurações de um motor Stirling são a velocidade do motor, a pressão e o deslocamento. Esses parâmetros são selecionados para simplificar o motor e reduzir custos com a sua construção. Os autores classificam os motores Stirling em três níveis que precisam ser considerados na configuração destes motores.

- Configuração dos cilindros: *Alfa*, *Beta* e *Gama*;
- Modo de operação: ação simples, ação dupla, fase única, multifase, ressonante e não ressonante;
- Configuração dos pistões: acoplamentos rígidos, com gás e líquido.

A seguir, estão descritos os motores Stirling no que diz respeito à configuração dos cilindros, apresentando as diferenças entre os motores do tipo *Alfa*, *Beta* e *Gama*.

2.1.2.1 O motor Stirling do tipo *Alfa*

O motor Stirling do tipo *Alfa* possui dois pistões em cilindros separados, conectados em série e entre eles estão o aquecedor, o regenerador e o resfriador, conforme exibido a seguir na figura 4. O tipo *Alfa* é conceitualmente a configuração mais simples de motor Stirling, porém, possui a desvantagem de tanto o pistão quente quanto o pistão frio precisarem ser selados para manter o gás de trabalho em seu interior. Nesta disposição básica de motor Stirling, os dois pistões ficam conectados ao eixo do motor (URIELI, 2017).

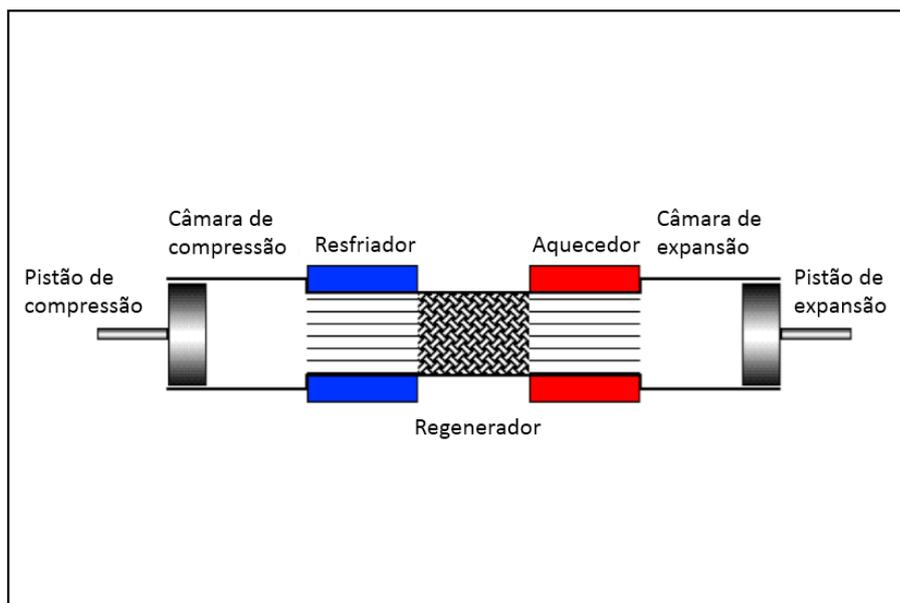


Figura 4 – Configuração do motor Stirling tipo *Alfa*

Fonte: Adaptada de Urieli (2017).

O estudo deste tipo de motor foi evoluindo por meio de publicações de diversos trabalhos na área. Uma empresa dos Estados Unidos chamada *Cool Energy Inc.*, desde 2006 produz motores Stirling do tipo *Alfa* de baixa temperatura (150 a 400°C) para a aplicação na geração de energia elétrica com capacidade de 25 kW. Ela está produzindo um sistema completo de geração de energia para aplicação residencial, incluindo concentrador solar, equipamentos para o armazenamento de energia térmica, aquecimento de água e de ambientes (URIELI, 2017).

2.1.2.2 O motor Stirling do tipo *Beta*

O motor Stirling do tipo *Beta* é o segundo tipo de configuração do posicionamento dos cilindros. Barreto (2015) indica este como sendo o arranjo clássico, possuindo um único pistão e também um deslocador em um mesmo cilindro. O deslocador tem como objetivo mover o fluido de trabalho entre a fonte quente e a fonte fria. O motor do tipo *Beta* pode ser observado na figura 5.

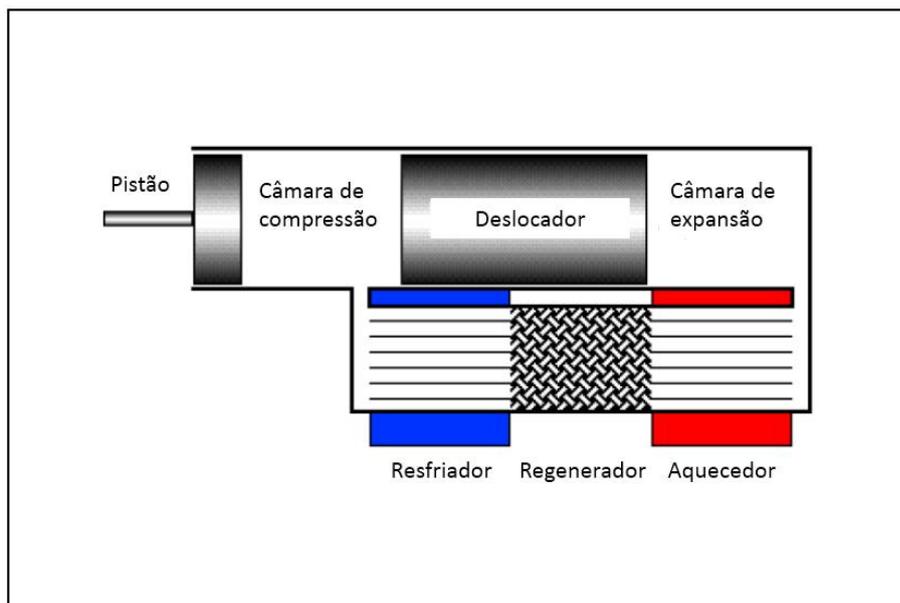


Figura 5 – Configuração do motor Stirling tipo *Beta*

Fonte: Adaptada de Urieli (2017).

Segundo Shendage et al. (2011), na configuração *Beta*, tanto o deslocador quanto o cilindro são acomodados no mesmo cilindro e, apesar dos motores tipo *Beta* serem mais complexos, possuem vantagens em relação aos outros tipos, devido à sua capacidade de fornecer uma maior quantidade de energia. O motor original descrito na patente de Robert Stirling em 1816 faz referência a um arranjo de motor do tipo *Beta*.

Nos motores reais, a ligação que conduz o pistão e o deslocador moverá os dois elementos de modo que o gás de trabalho seja comprimido enquanto está resfriado na câmara de compressão. Quando este gás estiver na câmara de expansão, o deslocador realizará o trabalho inverso e permitirá a sua expansão (URIELI, 2017).

2.1.2.3 O motor Stirling do tipo *Gama*

A configuração do motor *Gama* possui um deslocador e um pistão, muito semelhante ao tipo *Beta*, mas estão localizados em cilindros diferentes. Esse detalhe permite uma separação completa entre os trocadores de calor associados ao cilindro do deslocador e os espaços de trabalho de compressão e expansão associados ao pistão. Dessa forma, eles tendem a ter volumes um pouco maiores do que os motores *Alfa* e *Beta* (URIELI, 2017). O motor do tipo *Gama* está representado a seguir na figura 6.

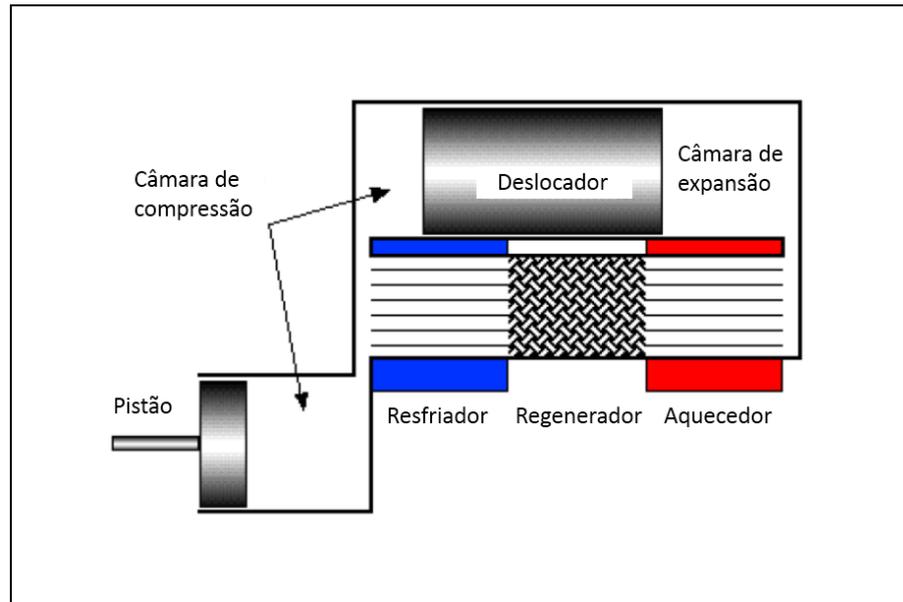


Figura 6 – Configuração do motor Stirling tipo *Gama*

Fonte: Adaptada de Urieli (2017).

Apresenta como vantagem o fato de possuir uma mecânica muito simples, sendo mais apropriado em aplicações com múltiplos cilindros (BARRETO, 2015). Porém, Urieli (2017) descreve que durante o processo de expansão, no espaço de compressão deve ocorrer parte dessa expansão, levando a uma redução da energia específica. Os motores *Gama* são, portanto, usados quando as vantagens de ter cilindros separados superam a desvantagem da perda de energia específica.

Sobre as aplicações dos motores Stirling do tipo *Gama*, devido à conveniência estrutural de dois cilindros que permitem um dimensionamento e construção completamente independentes das montagens de deslocador e pistão, a configuração *Gama* é uma das preferidas para a construção de modelos (carros e aviões por controle remoto). Existem também trabalhos publicados divulgando a construção de motores *Gama* para a utilização em barcos (URIELI, 2017).

2.1.3 Os conceitos sobre radiação solar

O Sol fornece à Terra em uma hora energia suficiente para satisfazer as necessidades mundiais de eletricidade por um ano (SARGENT, 2012). Assim, além de ter a importante função de manter a vida na Terra, a radiação solar é uma inesgotável fonte energética. Este incrível potencial pode ser amplamente aproveitado por meio de sistemas de recepção e conversão em outras formas de energia, como a térmica e a elétrica (CRESESB, 2017).

Esta energia chega à Terra na forma de radiação ou luz solar com a maioria dos componentes espectrais visíveis, próximos ao infravermelho e à ultravioleta. Para um melhor entendimento das propriedades da luz solar, primeiramente é preciso considerar e compreender dois diferentes pontos de vista: a luz como uma onda eletromagnética e como um fluxo de fótons (CHEN, 2011).

O primeiro ponto de vista é essencial para todas as aplicações térmicas solares e os revestimentos anti-reflexo para células solares. A segunda perspectiva é essencial também para as células solares e para a fotoquímica solar. A unificação dos dois pontos de vista é representada pela eletrodinâmica quântica, um dos campos mais frutíferos e amadurecidos da física moderna. A seguir, estão apresentados esses dois enfoques sobre a luz, separadamente. (CHEN, 2011).

Em relação à luz como uma onda eletromagnética, até meados do século XIX, os fenômenos eletromagnéticos e a luz foram considerados como entidades totalmente independentes. Em 1865, em um revolucionário artigo intitulado de *A Dynamic Theory of the Electromagnetic Field*, James Clerk Maxwell propôs que a luz é uma onda eletromagnética (CHEN, 2011).

Em seu artigo, Maxwell (1865) descreve que existe uma forte razão, conforme é detalhado no artigo, para concluir que a própria luz (incluindo o calor radiante e outras radiações, se houver) é um distúrbio eletromagnético sob a forma de ondas propagadas através do campo eletromagnético de acordo com as leis eletromagnéticas.

Nessa publicação, ele desenvolveu um conjunto completo de equações que explicam os fenômenos eletromagnéticos, hoje conhecidos como equações de Maxwell. Com base nessas equações, foi prevista a existência de ondas eletromagnéticas, propagando-se em um espaço livre com velocidade exatamente igual à velocidade da luz, sendo verificada experimentalmente por Heinrich Hertz. Esta postulação ousada de Maxwell desde então tornou-se um dos pilares da física (CHEN, 2011).

No caso do segundo ponto de vista, o efeito fotoelétrico foi descoberto em 1887 acidentalmente por Heinrich Hertz durante experiências para gerar ondas eletromagnéticas e, desde então, vários estudos foram conduzidos na tentativa de entender o fenômeno. Por volta de 1900, Phillip Lenard fez uma série de estudos críticos sobre a relação da energia cinética de elétrons ejetados com a intensidade e comprimento de onda da luz incidente (CHEN, 2011).

Os resultados encontrados por Phillip Lenard estavam em conflito direto com a teoria das ondas da luz e inspiraram Albert Einstein a desenvolver sua teoria dos fótons (CHEN, 2011). Einstein propôs que, além de seu conhecido aspecto de onda, amplamente encontrado em fenômenos de interferência, a luz também deve possuir um aspecto de partícula (THORNTON; REX, 2013). Segundo Yadav et al. (2014), Einstein também explicou o efeito fotoelétrico com base na teoria de Max Planck, assumindo que a luz viaja sob a forma de pequenos pacotes de energia, denominados de fótons.

Quando o fóton penetra em uma superfície metálica, transfere toda a sua energia para um elétron presente neste metal, desaparecendo. Esse fenômeno é chamado de efeito fotoelétrico inelástico, porque o fóton incidente desaparece. A energia de cada fóton é determinada pela equação 1, onde h é a constante de Planck e f é a frequência da luz, sendo que a intensidade da luz depende da quantidade de fótons (THORNTON; REX, 2013).

$$E = h.f \quad (1)$$

Uma parte dessa energia é usada para expulsar os elétrons do metal e o resto é dado ao elétron como energia cinética que é a cinética máxima para esse elétron (YADAV et al., 2014). Com a entrega de toda a energia do fóton para o elétron, para deixar o material, o elétron atingido deve ceder uma quantidade de energia (ϕ) para superar sua ligação deste material (THORNTON; REX, 2013).

O elétron pode perder alguma energia adicional ao interagir com outros elétrons a caminho da superfície. Qualquer energia que permaneça vai aparecer como energia cinética (K) do elétron à medida que ele sai do emissor. A conservação de energia no elétron é definida pela equação descrita a seguir (THORNTON; REX, 2013).

$$hf = \phi + K.E \quad (2)$$

2.1.4 A conversão de energia solar em energia elétrica

Existem, basicamente, duas formas de conversão de energia solar em energia elétrica: através da conversão fotovoltaica ou pela conversão térmica. A energia solar fotovoltaica é obtida por meio da conversão direta da luz em eletricidade, no chamado efeito fotovoltaico. A célula fotovoltaica é um dispositivo manufaturado com um material semicondutor que é a

unidade fundamental no processo de transformação de energia solar em elétrica (Pinho; Galdino, 2014).

A segunda maneira de converter a energia solar em eletricidade é realizando a conversão térmica. Esta tecnologia normalmente é baseada no conceito de concentração solar para produzir calor ou vapor que podem ser utilizados para a geração de energia elétrica de forma convencional. Para a concentração, a maioria dos sistemas utilizam espelhos de vidro devido à alta reflexividade, utilizados como coletores ou concentradores solares (MÜLLER-STEINHAGEN; TRIEB, 2004).

Segundo a IEA (2014), os quatro principais tipos de plantas CSP com coletores solares com disco parabólico, o Fresnel linear, o cilindro parabólico e a torre solar são responsáveis por praticamente toda a energia elétrica gerada no mundo a partir da conversão térmica. Müller-Steinhagen e Trieb (2004) descrevem que na conversão térmica, são empregados sistemas com foco pontual e também com foco linear, sendo o segundo tipo uma técnica em que a energia não fica concentrada em apenas um ponto. Os sistemas com o foco linear são mais simples para captar a energia solar, mas possuem uma concentração de energia menor, atingindo temperaturas menores e, conseqüentemente, gerando menos energia elétrica.

Nesta dissertação, foi estudada a variedade de geração de energia elétrica por meio da conversão térmica com o emprego de motores Stirling e concentradores solares do tipo disco parabólico. Esses sistemas realizam a conversão térmica com foco pontual, possuindo uma maior eficiência por apresentar uma maior concentração de energia solar. Segundo Burgi (2013), as plantas de geração de energia elétrica que empregam a tecnologia de conversão térmica recebem os nomes de usinas de concentração solar, usinas solares heliotérmicas ou termossolares.

2.1.5 O coletor ou concentrador solar

Segundo Ragheb (2014), o desenvolvimento da tecnologia de coletores solares iniciou nos Estados Unidos na metade da década de 1970 por meio do *Energy Research and Development Administration* (ERDA) e continuou a partir de 1977 com o *U. S. Department of Energy* (DOE). Em 1979, na cidade de Albuquerque, estado do Novo México, foi implantada a primeira unidade solar comercial pelo Sandia National Laboratories (SNL). Esta planta

utilizava coletores cilíndrico-parabólicos, alcançando temperaturas em torno de 500°C, sendo desenvolvida para processos industriais de aquecimento.

Os esforços para o aperfeiçoamento das plantas CSP estão focados no aumento da eficiência na conversão da energia do sol em eletricidade, ao mesmo tempo em que reduzem os custos de investimento. As temperaturas de trabalho mais elevadas são fundamentais para aumentar a eficiência na conversão do calor em energia elétrica, assim como os custos de armazenamento que também podem ser drasticamente reduzidos (IEA, 2014).

2.1.5.1 O concentrador do tipo disco parabólico

A partir do século XIX, diversos cientistas começaram a pesquisar sobre a conversão de energia solar em outros tipos de energia, principalmente para a geração de vapor de baixa pressão para operar motores a vapor. August Monchot, um pioneiro nesta área, construiu diversos sistemas de conversão de energia solar com motores a vapor entre os anos de 1864 e 1878 (KALOGIROU, 2009).

Uma dessas máquinas em formato de disco parabólico foi apresentada em uma exibição em Paris (figura 7) no ano de 1878. Esse equipamento era utilizado para produzir vapor a partir da energia solar, alimentando um motor a vapor instalado em uma máquina de impressão (KALOGIROU, 2009).

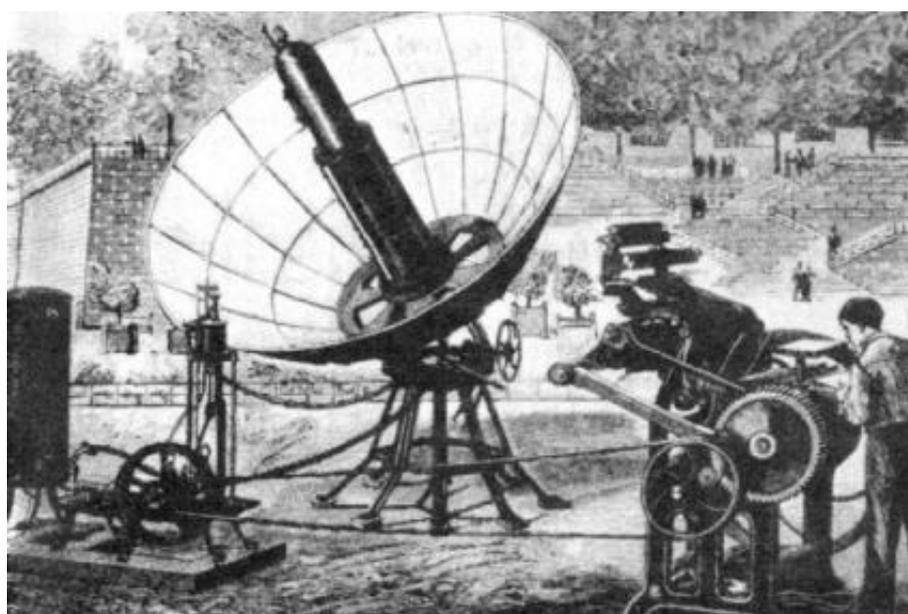


Figura 7 – Máquina de conversão de energia solar para a geração de vapor
Fonte: Kalogirou (2009).

O disco parabólico é um refletor de foco pontual e possui um movimento de acompanhamento do Sol. Normalmente, este disco de concentração tem em seu foco um motor Stirling acoplado (figura 8), convertendo a energia térmica do fluido dentro do motor com alta temperatura em energia mecânica, que por sua vez é convertida em energia elétrica, quando há um gerador elétrico no conjunto (BARRETO, 2015).

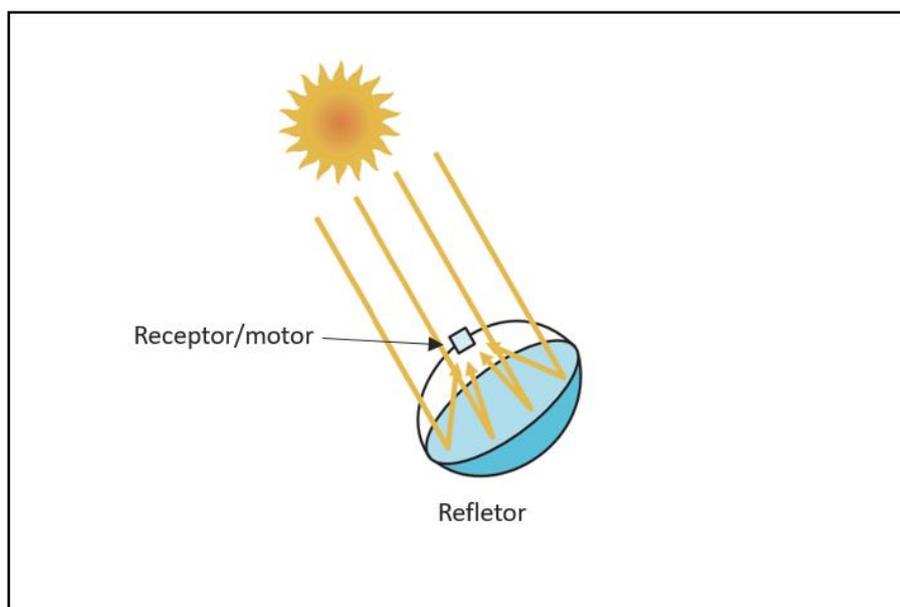


Figura 8 – Geração de energia com concentrador solar do tipo disco parabólico
Fonte: Adaptada de IEA (2014).

Segundo Kalogirou (2009), além dos sistemas que geram energia elétrica com motores acoplados a geradores localizados nos receptores, também existe a técnica em que a energia térmica gerada no fluido pelos discos parabólicos é transportada por tubos até uma central de conversão de energia. Os discos parabólicos podem atingir temperaturas que excedem os 1500°C.

Porém, o sistema que transforma a energia térmica em eletricidade no próprio motor Stirling acoplado ao gerador em cada disco é o mais comum e normalmente é chamado de tecnologia *Dish-Stirling*. Este formato é mais interessante tecnicamente e economicamente, pois não existe a perda térmica no transporte de um fluido até uma central de geração de energia elétrica (KALOGIROU, 2009).

O disco deve rastrear o Sol para refletir o feixe no receptor térmico. Dessa forma, mecanismos de rastreamento são empregados em dois eixos, de modo que o concentrador possa seguir a luz solar de forma mais eficiente. O formato ideal de concentrador é evidentemente

parabólico, composto por uma única superfície reflexiva ou por vários refletores ou espelhos, conforme demonstrado na figura 9 (KALOGIROU, 2009).



Figura 9 – Concentrador solar do tipo disco parabólico com vários refletores
Fonte: Sandia National Laboratories (2017).

Como vantagens na utilização desta tecnologia, De Laquil et al. (1993) destacam que como esses concentradores solares estão sempre voltados para o Sol, são os refletores com maior eficiência, quando comparados com os demais. Eles atingem altas temperaturas entre 600°C e 2000°C, sendo altamente eficientes para serem utilizados na absorção de energia térmica em sistemas de conversão de energia.

De Laquil et al. (1993), Goswami (1998) e Mancini et al. (2003) destacam a modularização como uma vantagem dos sistemas com discos parabólicos, pois podem funcionar de forma independente ou fazer parte de um grande sistema de geração de energia. Goswami (1998) e Mancini et al. (2003) também acrescentam o fato de não existir a necessidade de empregar grandes investimentos iniciais, permitindo futuros aumentos de capacidade instalada.

Entretanto, existem algumas desvantagens citadas por Trieb et al. (1997): disponibilidade de baixa potência e pouco tempo de geração de energia anualmente, pois não gera energia à noite e diminui a eficiência em dias com nuvens. Além disso, requer estruturas de suporte rígidas e um rastreamento do Sol perfeito, podendo levar a um aumento nos custos. E, para ter sempre uma boa eficiência, precisam ser realizadas limpezas periódicas nos refletores.

2.1.5.2 O concentrador do tipo Fresnel linear

O emprego desta tecnologia de geração de energia tem crescido nos últimos anos. Em 2010, apenas duas plantas com concentradores ou refletores do tipo Fresnel linear estavam em construção no mundo. A primeira com 30 MW foi construída em Calasparra, na Espanha pela empresa alemã Novatec Solar, iniciando as suas atividades em 2012. A segunda, uma usina comercial de 125 MW construída no Rajastão, Índia, da empresa AREVA Solar, subsidiária de uma grande empresa nuclear francesa, entrando em operação no ano de 2014 (IEA, 2014).

Segundo Almeida (2013), o sistema que emprega os refletores do tipo Fresnel linear se diferencia pouco dos cilindros parabólicos. A diferença é que vários espelhos planos ou ligeiramente curvados são utilizados, seguindo o princípio das lentes de Fresnel que recriam virtualmente o perfil de uma parábola. O tubo receptor localiza-se na mediatriz, acima do campo dos espelhos refletores e a separação física entre o receptor e os refletores não exige um sistema de controle com muita complexidade (figura 10). Assim, a reflexão é mais simples e precisa.

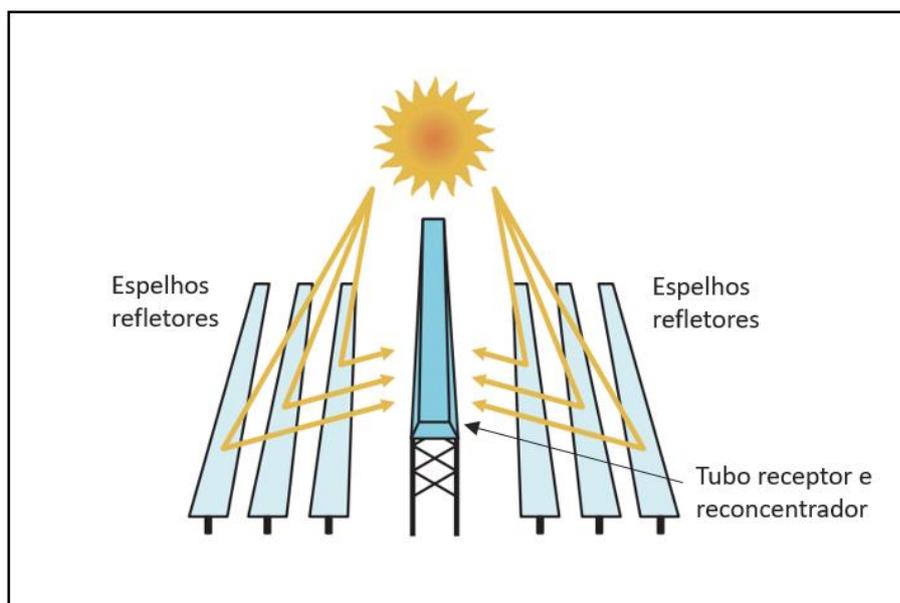


Figura 10 – Geração de energia com concentrador solar do tipo Fresnel linear

Fonte: Adaptada de IEA (2014).

Existem duas variações de concentradores Fresnel: o coletor Fresnel de lentes e o refletor Fresnel linear. O coletor de lentes é constituído de um material plástico transparente posicionado para concentrar os raios em um receptor. O Fresnel linear é composto por uma série de filetes planos lineares com espelhos. Os refletores Fresnel lineares podem ter diferentes arranjos: podem ser dispostos em forma de parábola ou próximos ao solo com um esquema de suportes simples, refletindo a luz no receptor em uma torre (KALOGIROU, 2009).

Uma das vantagens deste sistema é o baixo custo de espelhos planos, quando comparados aos espelhos utilizados nos cilindros parabólicos. Um outro benefício é o fato do controle de posicionamento dos refletores ser mais simples, tornando a sua construção mais barata. No entanto, o tubo receptor se apresenta como uma desvantagem, porque projeta uma sombra indesejada nos espelhos durante o deslocamento do Sol (ALMEIDA, 2013).

2.1.5.3 O concentrador do tipo cilindro parabólico

Os sistemas de concentração solar do tipo cilindro parabólico são os mais empregados no mundo para a geração de energia elétrica, respondendo por cerca de 88 a 90% de toda a capacidade instalada (ALMEIDA, 2013). Na atualidade, é a tecnologia solar mais madura que normalmente utiliza um óleo como o fluido para transferir calor, chamado de *Heat Transfer Fluid* (HTF) que é utilizado no processo de geração de energia elétrica (IEA, 2014).

As superfícies dos concentradores solares são expostas ao Sol ao longo do dia, sendo movimentados em um eixo paralelo ao plano horizontal para um máximo aproveitamento da radiação solar direta normal que incide na superfície terrestre. Os tubos receptores se movimentam da mesma forma que os refletores, enquanto é realizado o rastreamento da energia solar ao longo do dia (BURGI, 2013).

Nesta técnica de geração de energia elétrica, espelhos na forma de cilindros parabólicos refletem e concentram a energia solar em um tubo receptor (figura 11), sendo transferida para o fluido de transferência de calor (HTF) que muitas vezes é um óleo sintético ou uma mistura com óxido de bifenilo e difenilo. Este fluido transporta a energia térmica pelo tubo receptor até um permutador, onde essa energia é transferida para a água de alimentação que provém do ciclo da central, gerando vapor (ALMEIDA, 2013).

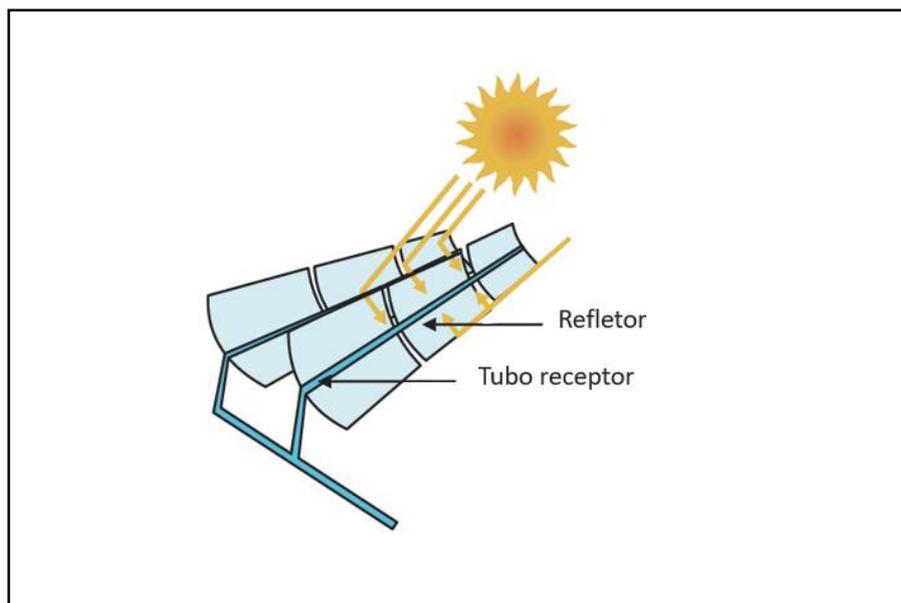


Figura 11 – Geração de energia com concentrador solar do tipo cilindro parabólico
Fonte: Adaptada de IEA (2014).

Segundo Burgi (2013), vem sendo estudada a possibilidade de substituir os óleos sintéticos utilizados como fluidos de trabalho pela geração direta de vapor, ou seja, a substituição dos óleos por água, reduzindo significativamente os custos deste tipo de planta CSP. Assim, todo o sistema de troca de calor poderia ser dispensado e ainda haveria uma redução de custos associados à compra de óleos sintéticos.

No entanto, o armazenamento é um desafio particular para plantas CSP que venham a utilizar essa tecnologia chamada de *Direct Steam Generation* (DSG). Como a evaporação da água é isotérmica, o armazenamento de calor resultaria em temperaturas severas de vapor e quedas de pressão, prejudicando a eficiência do ciclo termodinâmico. O armazenamento de calor em recipientes pressurizados é caro e não proporciona redução de custo (IEA, 2014).

A primeira planta de energia solar construída com cilindros parabólicos foi estabelecida na Califórnia, Estados Unidos. Mais precisamente no deserto de Mojave no ano de 1984 e, desde então, ainda está gerando energia elétrica (AKSOY; KARABULUT, 2013).

2.1.5.4 A torre solar com heliostatos

A torre solar é um sistema com o foco da luz solar refletida por meio da utilização de um grupo de espelhos em apenas um ponto onde está localizado o receptor em uma torre. Os espelhos refletores ficam alinhados ao redor da torre, conforme apresentado na imagem a seguir

(figura 12). Normalmente, esses concentradores têm uma superfície esférica e são chamados de heliostatos (AKSOY; KARABULUT, 2013).

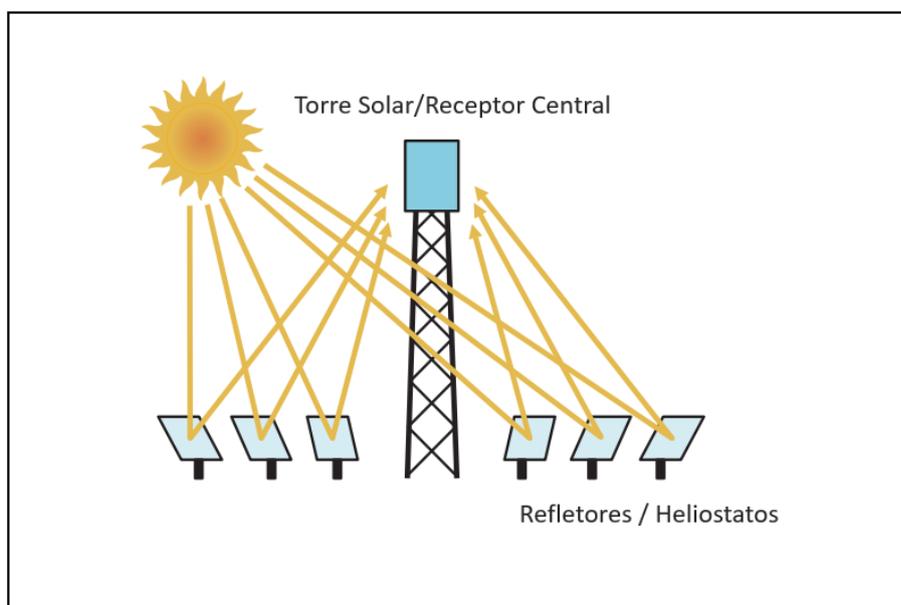


Figura 12 – Geração de energia com torre solar e heliostatos

Fonte: Adaptada de IEA (2014).

Os heliostatos são utilizados quando é necessário concentrar elevadas temperaturas em apenas um ponto, que é o caso da torre solar. Esses refletores podem ter entre 50 e 150 m² de superfície refletora com quatro espelhos instalados em cada poste para reduzir custos, conforme pode ser observado na figura 13. A energia térmica pode ser direcionada de forma a gerar vapor de alta temperatura e pressão (KALOGIROU, 2009).



Figura 13 – Sistema de suportes com quatro espelhos refletivos instalados

Fonte: Kalogirou (2009).

Na captura de energia solar com este método, Pinto et al. (2015) descrevem que deve haver uma área com grandes dimensões para o posicionamento dos refletores, orientados para o sol, normalmente de forma circular ao redor da torre, localizada no centro. Nesta torre, onde está o receptor, um fluido é aquecido e a sua energia térmica é transferida para a água, que é aquecida e entrará em evaporação, movimentando uma turbina acoplada a um gerador de energia elétrica.

Segundo De Laquil et al. (1993), a energia do calor concentrada que é absorvida pelo receptor é transferida para o fluido que circula no sistema, sendo armazenado para posteriormente ser usado para produzir energia elétrica. As torres solares com heliostatos possuem diversas vantagens como coletar a energia solar, realizando a transferência para um único receptor, minimizando o transporte da energia térmica. Podem também convenientemente armazenar energia térmica e são plantas grandes com geralmente mais de 10 MW e, assim, se beneficiam da economia de escala.

Em relação às desvantagens, o sistema de torre solar com heliostatos produz uma temperatura de fluido maior do que os sistemas com concentradores Fresnel linear e cilindro parabólico, mas inferior ao dos coletores do tipo disco parabólico com motores Stirling. Assim, não é possível conseguir uma eficiência tão alta na conversão de eletricidade a partir da energia térmica, quando comparada à realizada com o conjunto motor Stirling-disco parabólico (TRIEB et al., 1997).

2.1.6 O conjunto motor Stirling-coletor solar

O conjunto estudado nesta dissertação pode ser chamado de conjunto motor Stirling-coletor solar, motor Stirling-concentrador solar ou sistema *Dish-Stirling*. É composto por um disco parabólico refletor (concentrador solar) que projeta a luz solar em um ponto focal, onde está instalado o motor Stirling. A energia térmica é recebida pelo motor que entra em funcionamento. Um gerador, diretamente conectado ao motor, converte a energia mecânica em eletricidade. A saída do sistema é proporcional ao tamanho do refletor, suas perdas ópticas e as eficiências do motor Stirling e do gerador (MANCINI et al., 2003).

Segundo Kalogirou (2009), o conjunto trabalha coletando e concentrando a energia solar, estando sempre apontado na direção do Sol. Para manter constantemente a radiação refletida no ponto focal, durante o dia, um sistema movimenta o concentrador solar

continuamente em torno de dois eixos para seguir o caminho diário do Sol. Assim, haverá um melhor aproveitamento da energia solar que é transferida para o motor.

Estes sistemas são os mais eficientes para a geração de energia a partir da luz solar. Fornecem energia com baixo custo e são capazes e podem produzir energia de forma totalmente autônoma para localidades remotas (KALOGIROU, 2009). O Sandia National Laboratories divulgou em 2008 que um sistema *Dish-Stirling* desenvolvido em parceria com a empresa Stirling Energy Systems (SES), atingiu uma eficiência de conversão de energia solar de 31,25%, batendo o recorde mundial anterior de 1984 que era de 29,4%. Em 2012, o equipamento da empresa Ripasso Energy chegou a uma nova marca de 32%.

Devido às dimensões reduzidas, são adequados para aplicações descentralizadas em pequenas unidades, mas também podem formar um grande agrupamento de geradores para produzir energia em grande escala. Adicionalmente, podem ser alimentados por combustíveis fósseis ou biomassa, fornecendo energia elétrica em qualquer condição, mesmo na ausência de energia solar (KALOGIROU, 2009). Por exemplo, o conjunto *Dish-Stirling* da Ripasso Energy que é apresentado a seguir, durante o dia opera utilizando a energia solar e, quando necessário, pode trabalhar com uma outra fonte de energia como um gás residual.

Segundo Mancini et al. (2003), a partir de década de 1980, diversos sistemas com motores Stirling e concentradores solares foram construídos com capacidades de geração de energia que variam entre 2 e 50 kW nos Estados Unidos, Alemanha, Japão e Rússia. Mancini et al. (2003) também acrescenta que recentemente os esforços de pesquisa estão focados no aumento da confiabilidade, identificando os componentes que exigem melhorias. A seguir, a figura 14 apresenta um esquema com o histórico do desenvolvimento do conjunto concentrador solar-motor Stirling, desenvolvidos desde o final da década de 1970 em todo o mundo.

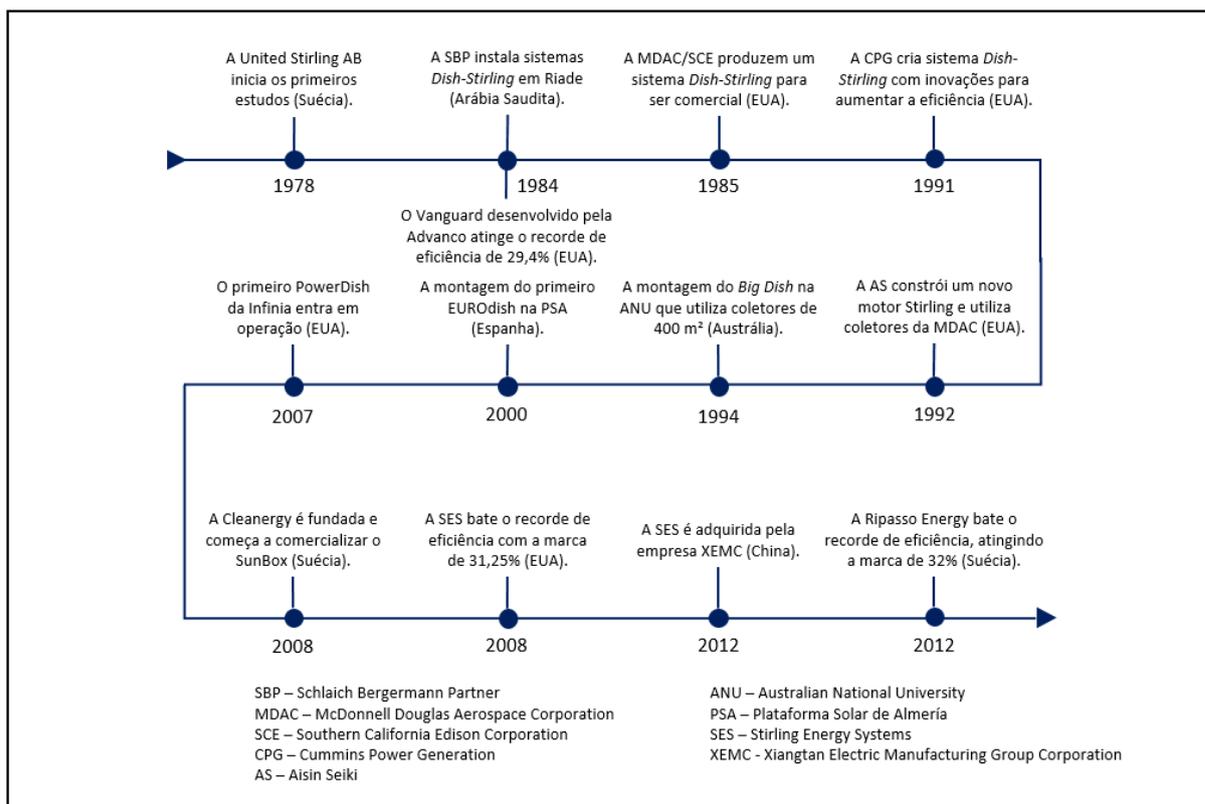


Figura 14 – O histórico de desenvolvimento dos sistemas *Dish-Stirling*

Fonte: Elaborada pelo autor (2018).

Em uma abordagem paralela, Mancini et al. (2003) descreve que são desenvolvidos estudos de componentes avançados, tais como receptores e superfícies ópticas, que prometem maior confiabilidade e menor custo. A tabela 2 apresenta as características dos principais sistemas descritos anteriormente na figura 14 e que estão apresentados de uma forma mais detalhada nas seções seguintes.

Tabela 2 – Características dos principais conjuntos motor Stirling-coletor solar

Modelo	Fabricante	Área do coletor (m ²)	Diâmetro (m)	Eficiência (%)	Potência nominal (kW)
Vanguard	Advanco	86,7	10,5	29,4	25
SBP 50 kW	Schlaich Bergermann Partner	227,0	17,0	23,0	50
SunCatcher	McDonnell Douglas/ Stirling Energy Systems	91,0	11,3	31,25	25
CPG 7 kW	Cummins Power Generation	44,0	7,2	22,0	25
Aisin Seiki	Aisin Seiki	145,0		16,0	30
<i>Big Dish</i> SG4	Australian National University/Wizard Power	494,0	25,0	24,0	>100
EUROdish	Schlaich Bergermann Partner/CIEMAT	57,0	8,5	24,5	10
PowerDish	Infinia Corporation	69,4	4,7	24,0	3
SunBox	Cleanergy	55,0	8,85	25,0-30,0	11-13
Ripasso	Ripasso Energy	113,0	12,0	32,0	30

Fonte: Adaptado de Mancini et al. (2003), Poullikkas et al. (2010), Pheng et al. (2014), Cleanergy (2017) e Ripasso Energy (2016).

2.1.6.1 O sistema Vanguard da Advanco

Lopez e Stone (1993) relatam que, em 1978, uma empresa da Suécia chamada United Stirling AB iniciou os primeiros estudos de um conjunto com motor Stirling integrado a um concentrador solar, sendo selecionada para participar de um programa do Departamento de Energia do governo dos Estados Unidos para o desenvolvimento deste tipo de sistema. Os autores acrescentam que a companhia sueca forneceu no início da década de 1980 um conjunto formado pelo receptor, o motor Stirling, o gerador e os controles para o programa Vanguard.

O programa Vanguard é descrito por Mancini et al. (2003) como um marco dos sistemas *Dish-Stirling*, desenvolvido e construído no Sul da Califórnia pela já extinta empresa Advanco (figura 15). Segundo Prinsloo (2014), o Vanguard contava com um sistema de rastreamento, realizado por um movimento de rotação sobre a coluna de sustentação do disco e a elevação era conseguida por meio de um cardan. Em média, 8% da energia gerada era usada para o rastreamento solar.



Figura 15 – O sistema Vanguard da Advanco

Fonte: Prinsloo (2014).

De acordo com Stine e Diver (1994), o modelo entrou em operação em 1984 com uma capacidade de geração de 25 kW de energia elétrica, produzindo o recorde de eficiência de 29,4% na conversão de energia solar em eletricidade. Apenas um modelo Vanguard foi construído com um concentrador de aproximadamente 11 metros de diâmetro e um total de 336 espelhos de 45 x 60 cm, montados em uma estrutura treliçada.

Durante a operação do sistema, foi necessário substituir duas vezes o motor por motivos diferentes. A primeira substituição foi necessária devido à falha de uma válvula de retenção e a segunda por causa de uma falha no eixo da bomba de óleo. Outros problemas, como ruídos excessivos, vibrações e falhas nas placas de circuito, parecem ter sido o resultado do uso de engrenagens não endurecidas. Além disso, houve vazamentos substanciais de hidrogênio. Apesar desses problemas, o Vanguard operou durante quase 2000 horas durante a fase de testes de 18 meses (MANCINI, 1997).

2.1.6.2 O sistema da Schlaich Bergermann Partner

Em 1984, foram construídos em Riade, Arábia Saudita, a partir do projeto realizado pela empresa alemã Schlaich Bergermann Partner (SBP), dois sistemas de 50 kW. Cada concentrador possuía 17 metros de diâmetro, abrangendo uma área total de 277 m². Segundo Mancini (1997), os concentradores eram compostos por uma membrana esticada de aço

inoxidável de 0,5 mm de espessura. A membrana era mantida no formato de um disco parabólico por uma bomba de vácuo.

Os receptores continham motores Stirling fornecidos pela United Stirling AB, modelo SOLO V160. Os sistemas foram instalados com um controle para seguir o movimento do Sol totalmente automático, entrando em operação no ano de 1986 e permaneceram em operação continuamente até meados de 1990 (SCHLAICH BERGERMANN PARTNER, 2017), operando por mais de 30000 horas (MANCINI, 2003). A figura 16 apresenta os equipamentos instalados no país do Oriente Médio.



Figura 16 – Os equipamentos instalados pela SBP em Riade, Arábia Saudita
Fonte: Schlaich Bergermann Partner (2017).

2.1.6.3 O sistema McDonnell Douglas Aerospace Corporation (MDAC)/Stirling Energy Systems (SES)

O terceiro conjunto motor Stirling-concentrador solar que obteve destaque foi construído nos Estados Unidos pela McDonnell Douglas Aerospace Corporation (MDAC) em meados de 1980 em Huntington Beach, Califórnia. Foi o primeiro a ser projetado para ser um produto comercial, sendo construído sobre o projeto do sistema Vanguard (MANCINI et al., 2003). Desta forma, o motor Stirling utilizado neste equipamento era também fornecido pela mesma empresa, a United Stirling AB e produzia 25 kW de energia elétrica (Stine; Diver, 1994).

Segundo Stine e Diver (1994), a MDAC vendeu a sua tecnologia para a Southern California Edison Corporation (SCE) em 1986. A SCE continuou os trabalhos de melhoria do equipamento em suas instalações na cidade de Barstow, Califórnia. Em 1996, a empresa Stirling Energy Systems (SES) de Phoenix, Arizona, adquiriu os direitos de tecnologia, continuando os trabalhos de pesquisa e desenvolvimento do sistema (MANCINI et al., 2003).

Na metade final da década de 1990, a SES iniciou um programa de comercialização, enquanto os equipamentos instalados em Huntington Beach, nos Estados Unidos (figura 17), continuavam em operação para estudos e aperfeiçoamentos no sistema. O objetivo era desenvolver um produto para ser comercializado em mercados emergentes. O conjunto foi exaustivamente testado e apresentou uma disponibilidade maior do que 98% em 1000 horas de funcionamento (MANCINI, 2003).



Figura 17 – A primeira geração dos equipamentos desenvolvidos pela SES
Fonte: Sandia National Laboratories (2017).

Em 2009, a SES iniciou o desenvolvimento de uma nova geração de concentradores nas instalações do Sandia National Laboratories em Albuquerque, Novo México, que foram batizados de SunCatcher (O'BRIEN, 2010). O SunCatcher (figura 18) foi responsável por bater o recorde de eficiência de conversão de energia solar de 31,25% em 2008, anteriormente atingido pelo Vanguard que era de 29,4%.



Figura 18 – O SunCatcher desenvolvido pela SES

Fonte: Sandia National Laboratories (2017).

Em 2012, de acordo com Zhang (2016), a Stirling Energy Systems (SES) foi adquirida pela empresa chinesa *Xiangtan Electric Manufacturing Group Corporation* (XEMC). A partir daquele ano, a XEMC começou a acelerar o desenvolvimento e a promoção da tecnologia dos sistemas *Dish-Stirling*. Ainda, segundo Zhang (2016), atualmente a empresa já tem uma considerável capacidade de produção, podendo disponibilizar sistemas de geração de eletricidade, a partir da energia solar de 15 kW, 25 kW e 38 kW.

2.1.6.4 Os sistemas da Cummins Power Generation de 7 kW e de 25 kW

Entre os anos de 1991 e 1996, a Cummins Power Generation (CPG), trabalhando em conjunto com o Departamento de Energia dos Estados Unidos e o Sandia National Laboratories, iniciou o desenvolvimento de duas configurações de conjuntos de motores Stirling com concentradores solares: o primeiro com uma capacidade de geração de energia elétrica de 7 kW para aplicações em locais remotos e o segundo de 25 kW para gerar eletricidade conectado à rede (MANCINI, 2003).

Os equipamentos desenvolvidos pela CPG apresentaram inovações como receptores de tubo de calor e motores Stirling de pistão livre. Os receptores de tubo de calor transferiam o calor absorvido pela energia solar para o motor evaporando e condensando o sódio nos tubos em um aquecedor localizado na cabeça do motor (MANCINI, 2003). Essa transferência de calor

por condensação permitia que a operação do motor fosse realizada com temperaturas elevadas e com alta eficiência (ANDRAKA et al., 1995).

Em outubro de 1995, o governo dos Estados Unidos contratou a CPG para instalar uma unidade experimental nas instalações do seu exército em Fort Huachaca, no estado do Arizona. O modelo implantado naquele local foi o CPG-460 (figura 19) que produzia 7 kW de energia elétrica com um motor Stirling SOLO 161 (DIVER et al., 1998). Em 1996, os programas foram abandonados pela CPG para focar no desenvolvimento de tecnologia na principal área de negócios da empresa, os motores a diesel. Os seus ativos do setor de energia solar foram vendidos para a empresa Kombassan, sediada em Alanya, Turquia (MANCINI, 2003).



Figura 19 – O equipamento da CPG instalado no Arizona, Estados Unidos

Fonte: Wiese et al. (2010).

2.1.6.5 O sistema da Aisin Seiki

No Japão, a empresa Aisin Seiki construiu em 1992 o motor NS30A de 30 kW a pedido do *New Energy and Industrial Development Organization* (NEDO), órgão do governo japonês que promove o desenvolvimento e a introdução de novas tecnologias na área de energia. Alguns testes foram realizados com um concentrador solar da McDonnell Douglas nas instalações da empresa, na cidade de Kariya (STINE; DIVER, 1994).

A empresa japonesa também instalou outros três equipamentos com uma capacidade reduzida de 8,5 kW e com os concentradores solares de membrana esticado da Cummins,

modelo CPG-460, usados para gerar energia elétrica na Ilha Miyako, 290 km a sudoeste de Okinawa, no Sul do Japão. Para fornecer energia após o pôr do sol e durante as fases com nuvens, a Aisin Seiki incorporou baterias eletroquímicas de 30 kWh em cada sistema *Dish-Stirling* instalado na ilha (KAUSHIKA et al., 2016).

2.1.6.6 O sistema *Big Dish*

Segundo Lovegrove et al. (2009), a *Australian National University* (ANU) trabalhou muitos anos em concentradores solares parabólicos e, em 1994, foi montado o primeiro sistema com um concentrador de 400 m² que passou a ser chamado de *Big Dish*, modelo SG3. Lovegrove et al. (2009) acrescentam que o protótipo (SG3) provou com sucesso a viabilidade técnica de um concentrador com um diâmetro aproximadamente 3 vezes maior do que qualquer outro produzido. Um sistema similar foi fornecido à Universidade Ben Gurion em Israel.

Atualmente, a ANU tem um *Big Dish*, modelo SG4, considerado como o equipamento com o maior concentrador solar do mundo que tem um diâmetro de 25 metros e uma área de 494 m², utilizando 380 espelhos idênticos de 1,17 m × 1,17 m. Cada SG4 pode gerar cerca de 100 kW de energia elétrica, o que seria suficiente para abastecer cerca de 100 residências. A construção de um primeiro protótipo (figura 20) no campus da ANU em Canberra, capital da Austrália, começou no primeiro trimestre de 2008 e o primeiro teste foi realizado em 29 de junho de 2009 (LOVEGROVE et al., 2009).



Figura 20 – O *Big Dish*, modelo SG4, construído em Canberra, Austrália
Fonte: Lovegrove et al. (2009).

2.1.6.7 O sistema EUROdish

O EUROdish (figura 21) é um sistema desenvolvido em uma parceria entre os governos espanhol e alemão na *Plataforma Solar de Almería* (PSA), no deserto de Tabernas, Espanha, onde foi instalado o primeiro equipamento em 2000. Neste local, estão as instalações do *Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas* (CIEMAT), órgão de pesquisa do governo da Espanha. Com uma capacidade de geração de energia de 10 kW, tem um diâmetro de 8,5 metros e possui um sistema de rastreamento do Sol (CIEMAT, 2017).



Figura 21 – O EUROdish instalado na *Plataforma Solar de Almería*
Fonte: CIEMAT (2017).

Segundo Poullikkas (2010), a empresa alemã Schlaich Bergermann Partner (SBP) instalou diversos modelos do EUROdish com motores Stirling SOLO 161 de 10 kW pela Europa e também na Índia. A Schlaich Bergermann Partner (2017) descreve que em 2002, na cidade de Milão (Itália), foi instalada uma unidade de referência no CESI, centro eletrotécnico de pesquisas italiano. E, no mesmo ano, no campus da Universidade de Vellore, no Sul da Índia, foi instalada uma unidade do EUROdish com as mesmas características.

Em 2004, mais três conjuntos do EUROdish foram instalados na Europa. O primeiro, na *Escuela Superior de Ingenieros* (ESI) em Sevilha, Espanha. O segundo, está operando em Eibelstadt (Alemanha), em frente à sede da empresa Krick. E o último equipamento, instalado no mesmo ano, está localizado no *Centre National de la Recherche Scientifique* (CNRS), instituto de pesquisa francês. Este equipamento está em um local com condições operacionais

particularmente difíceis em uma região montanhosa, a 1800 metros de altitude com radiação solar muito alta, geadas extremas e queda de neve no inverno. Todos os equipamentos estão continuamente em operação (SCHLAICH BERGERMANN PARTNER, 2017).

2.1.6.8 O sistema PowerDish da Infinia Corporation

A empresa norte-americana Infinia Corporation, fundada em 1985, foi responsável pelo desenvolvimento de diversos modelos de motores Stirling para clientes como a agência espacial (NASA) e o departamento de energia (DOE) dos Estados Unidos. No ano de 2004, iniciou o trabalho de pesquisa para a comercialização de um conjunto motor Stirling-coletor solar que posteriormente foi chamado de PowerDish (COVENTRY; ANDRAKA, 2017).

Em 2006, a Infinia em parceria com a empresa Schlaich Bergermann Partner (SBP), iniciou a realização de testes do PowerDish (SCHLAICH BERGERMANN PARTNER, 2017). Segundo Poullikkas (2007), o equipamento era composto por um motor Stirling de pistão livre de 3 kW, produzido pela Infinia e um concentrador solar de 4,7 metros de diâmetro. As primeiras unidades entraram em funcionamento na Espanha em 2007. De acordo com Coventry e Andraka (2017), os modelos PowerDish II e III possuíam essas mesmas características.

Williams (2017) descreve que, a partir do ano de 2008, muitas unidades do PowerDish (figura 22) foram instaladas em diversas localidades ao redor do mundo. Nos Estados Unidos, entre os anos de 2008 e 2009, foram montados equipamentos em plantas de testes nos estados de Washington, Califórnia, Utah e Novo México. Desde 2009, seis unidades estão operando continuamente nas instalações do Sandia National Laboratories. Em 2010, a Espanha e a Índia também receberam alguns modelos do PowerDish para pesquisa e desenvolvimento.



Figura 22 – O PowerDish III da Infinia Corporation

Fonte: Greyvenstein (2011).

Coventry e Andraka (2017) descrevem que o modelo PowerDish IV foi desenvolvido e implantado pela primeira vez no projeto de uma unidade para o exército dos Estados Unidos. O concentrador solar também era no formato de um disco parabólico, mas tinha um design bastante diferente, pois os recortes nos espelhos foram removidos e foi instalado um contrapeso para melhorar o equilíbrio do conjunto. A última diferença era a capacidade de geração de energia elétrica, aumentada para 3,5 kW.

Williams (2017) acrescenta que em 2011 os motores Stirling de pistão livre, utilizados no PowerDish, já acumulavam 1,5 milhão de horas de operação. A expectativa do tempo de operação estimado pela Infinia Corporation era superior a 25 anos. Atualmente, além das unidades experimentais em funcionamento em centros de pesquisa, existem plantas comerciais em atividade.

2.1.6.9 O sistema SunBox da Cleanergy

O SunBox (figura 23) é um sistema *Dish-Stirling* produzido pela Cleanergy, empresa com sede na Suécia, fundada em 2008. O equipamento dessa empresa é constituído de um motor Stirling V161 com uma configuração *Alfa*, utilizando como fluido de trabalho o hidrogênio. Tem uma capacidade de geração de energia entre 11 e 13 kW e a eficiência informada pela empresa está entre 25 e 30%. O concentrador do tipo disco parabólico possui um diâmetro de 8,85 metros e uma área de 55 m² (CLEANERGY, 2017).



Figura 23 – O SunBox da Cleanergy em Dubai

Fonte: Cleanergy (2017).

Segundo a Cleanergy (2017), apenas na Espanha, mais precisamente na *Plataforma Solar de Almería*, os seus equipamentos em 2017 já acumulavam mais de 35000 horas de operação. A empresa completa que o seu sistema consegue operar normalmente com uma velocidade média do vento de 16 m/s e que suporta uma velocidade máxima de 44 m/s. A expectativa de vida do conjunto é de 25 anos.

2.1.6.10 O sistema da Ripasso Energy

A Ripasso Energy foi fundada na Suécia em 2008 e o seu objetivo principal era desenvolver e comercializar um motor Stirling licenciado pela empresa Kockums. Em 2012, foi estabelecido o atual recorde de eficiência na conversão de energia solar em eletricidade de 32% com um equipamento de 30 kW, em uma localidade próxima a Upington, África do Sul. O conjunto era composto de um motor Stirling da Kockums e um concentrador da empresa espanhola Titan Tracker (COVENTRY; ANDRAKA, 2017).

Atualmente, os equipamentos da Ripasso Energy utilizam um concentrador desenvolvido pela empresa, onde um protótipo também foi instalado na África do Sul, mesmo local de testes dos equipamentos da geração anterior. O design do refletor e da suportação são semelhantes ao modelo anterior, mas as faces dos espelhos são constituídas por um espelho de vidro ligado a um compósito de plástico reforçado (COVENTRY; ANDRAKA, 2017).

Além disso, o novo concentrador tem a forma de refletor único, tendo um movimento semelhante a um carrossel com quatro rodas na rotação de azimute. Além de uma estrutura semelhante a um berço para a rotação de elevação, com duas vigas em formato de anéis semicirculares. O berço ainda tem um contrapeso na parte traseira, atrás do disco, para o equilíbrio (COVENTRY; ANDRAKA, 2017).

O sistema, como todos os demais, converte a radiação solar concentrada em energia elétrica com uma alta taxa de eficiência, mas possui uma adaptação híbrida única: a energia solar pode ser complementada com biogás, gás natural, um gás residual ou outros combustíveis fluidos, nos momentos em que a radiação solar não está disponível. O sistema híbrido não utiliza água para produzir eletricidade e o produto tem uma vida útil esperada de pelo menos 25 anos (RIPASSO ENERGY, 2016).

Nesse equipamento (figura 24), a radiação solar é absorvida no receptor e o calor aquece o fluido de trabalho (hidrogênio) no motor Stirling a uma temperatura de aproximadamente 720° C. A potência de saída do sistema é proporcional à radiação solar, mas com um DNI¹ de 960 W/m², a unidade pode fornecer uma potência de saída típica de 31,5 kW de eletricidade (RIPASSO ENERGY, 2016).



Figura 24 – A segunda geração do equipamento da Ripasso Energy instalado na África do Sul
Fonte: Ripasso Energy (2016).

¹ DNI é a sigla em inglês para Irradiância Direta Normal (Direct Normal Irradiance). É a radiação recebida diretamente do sol por unidade de área em W/m² (ERBS et al., 1982).

2.1.7 As usinas solares com motores Stirling e concentradores solares

2.1.7.1 A Maricopa Solar Plant

A primeira usina de geração de energia elétrica por meio da conversão térmica, empregando motores Stirling com concentradores solares do tipo disco parabólico (*Dish-Stirling*) foi a *Maricopa Solar Plant*, construída no estado do Arizona, nos Estados Unidos. A unidade tinha uma capacidade de geração de 1,5 MW de energia elétrica, onde foram instalados 60 conjuntos *Dish-Stirling* da empresa Stirling Energy Systems (SES), modelo SunCatcher que produziam 25 kW (O'BRIEN, 2010).

Segundo Poullikkas et al. (2010), a *Maricopa Solar Plant* foi a primeira unidade com esta tecnologia a operar em escala comercial nos Estados Unidos, entrando em operação em janeiro de 2010 (figura 25). A planta ocupava uma área de aproximadamente 60000 m² e as atividades foram encerradas em setembro de 2011. De acordo com Randazzo (2012), em um leilão realizado em abril de 2012, a empresa chinesa Huayi CondiSys Solar Technology adquiriu a usina por US\$ 250.000,00.



Figura 25 – *Maricopa Solar Plant*, no estado do Arizona, Estados Unidos
Fonte: O'Brien (2010).

Porém, Randazzo (2012) acrescenta que o governo dos Estados Unidos fez um repasse de aproximadamente 30% do custo total da planta, devido a um programa de incentivo às energias renováveis. Esse valor pode ter chegado a 7 milhões de dólares em 2010, definindo um custo estimado da unidade de cerca de 23 milhões de dólares. O valor pago no leilão pode

parecer absurdamente baixo, mas o comprador precisou remover todos os 60 dos conjuntos *Dish-Stirling* e realizar um complexo trabalho de desconexão da rede elétrica e do sistema de hidrogênio.

2.1.7.2 As plantas DISTAL I, DISTAL II e EUROdish

Na *Plataforma Solar de Almería* (PSA), instalações do CIEMAT que é o órgão de pesquisa do governo espanhol, existem unidades *Dish-Stirling* produzindo energia elétrica. Desde 1992, ano de início das pesquisas com esta tecnologia, três gerações de protótipos foram desenvolvidas em parceria com o centro de pesquisa em energia solar da Alemanha, o *Institut für Solarforschung* e a empresa alemã Schlaich Bergermann Partner (SBP). Na PSA, estão continuamente em operação os seguintes sistemas: o DISTAL I, o DISTAL II e o EUROdish (CIEMAT, 2017).

Em operação desde 1992, a unidade com os protótipos DISTAL I possuía inicialmente três equipamentos com concentradores parabólicos de 7,5 metros de diâmetro, possuindo rastreamento solar polar e capazes de coletar até 40 kW de energia com um motor Stirling SOLO V160 de 9 kW. O concentrador, com uma técnica de membrana esticada, mantém a forma parabólica com uma pequena bomba de vácuo. Com reflexão de 94%, a luz solar é concentrada até 12.000 vezes com foco de 12 cm de diâmetro. Em 2000, duas unidades foram desmontadas e substituídas por unidades EUROdish de terceira geração (CIEMAT, 2017).

Posteriormente, na PSA o projeto DISTAL II foi criado na tentativa de desenvolver um sistema com melhor desempenho e um menor custo por kW. Durante os anos de 1996 e 1997, três novos equipamentos com concentradores utilizando a mesma tecnologia de membrana tensionada entraram em operação (figura 26). Em relação à geração anterior, esses protótipos foram projetados com um diâmetro de 8,5 metros, ligeiramente maior do que os 7,5 metros do DISTAL I, além de um valor de luz solar concentrada de 16.000 vezes no foco. Assim, a energia térmica aportada pelo motor também aumentou de 40 kW para 50 kW (CIEMAT, 2017).



Figura 26 – Os equipamentos do projeto DISTAL II

Fonte: Schlaich Bergermann Partner (2017).

No caso do motor, um modelo SOLO V161 de 10 kW foi utilizado no sistema DISTAL II, ou seja, produz 1 kW a mais de energia elétrica do que a versão anterior. O rastreamento solar também evoluiu, sendo instalado um sistema azimutal, permitindo uma operação automática do nascer ao pôr do sol (CIEMAT, 2017). Segundo Lira (2014), os rastreadores solares do tipo azimutal realizam uma rotação em um eixo vertical no sentido leste-oeste e ainda possuem um ajuste de inclinação no sentido norte-sul.

A última geração de sistema *Dish-Stirling* desenvolvido na *Plataforma Solar de Almería* é o equipamento citado anteriormente e batizado de EUROdish. Esse novo modelo foi concebido com o objetivo de reduzir o preço dos componentes, usando elementos industriais padrão. No desenvolvimento desse novo modelo, foi implantado um novo sistema de produção do concentrador solar, descartando a tecnologia de membrana esticada e a aplicação de um material compósito (CIEMAT, 2017).

Além disso, no projeto do EUROdish (figura 27), os trabalhos também foram focados no aperfeiçoamento do motor Stirling SOLO V161 e os componentes localizados dentro do receptor. Também foi criado um sistema de controle e monitoramento remoto por meio da internet e o processo de montagem foi aperfeiçoado. Por último, os equipamentos foram colocados em testes para a comercialização (CIEMAT, 2017). Na *Plataforma Solar de Almería*, seis unidades do EUROdish estão em operação e produzindo energia elétrica.



Figura 27 – Os equipamentos do projeto EUROdish

Fonte: Schlaich Bergermann Partner (2017).

2.1.7.3 As plantas da GH Dairy e da Frito Lay

Em 2008 foi fundada a PowerPlay Solar, empresa que atua em marketing, financiamento e desenvolvimento de projetos em energia solar nos Estados Unidos. Entre as suas atividades estão: providenciar as licenças de instalação, financiamento, engenharia, construção, gerenciamento, manutenção e serviços de suporte pós-instalação, além da comercialização de equipamentos em projetos de energia solar. A PowerPlay Solar atende os setores governamentais, agrícolas, comerciais, industriais, comunitários e educacionais (POWERPLAY SOLAR, 2017).

A PowerPlay Solar fez uma parceria com o maior produtor de leite independente dos Estados Unidos, a GH Dairy, para instalar um projeto solar de 100 kW em uma das suas instalações de processamento de leite. A unidade Sarah Farms (figura 28) está localizada na cidade de Yuma, Arizona (POWERPLAY SOLAR, 2017). A planta solar utiliza os equipamentos PowerDish II da Infinia Corporation, sendo que cada equipamento produz 2,0 kW de energia elétrica. A conclusão do comissionamento e, conseqüentemente, a partida da unidade foram em agosto de 2010 e atualmente está em operação (WILLIAMS, 2017).



Figura 28 – As plantas da GH Dairy e da Frito Lay

Fonte: Williams (2017).

O grupo que é proprietário da GH Dairy é pioneiro na indústria de laticínios nos Estados Unidos e, ao longo dos anos, integraram verticalmente as suas operações. Com a instalação de uma planta solar no local, avançaram significativamente para a independência energética. Além de assumir uma liderança na questão ambiental, reduziram os custos operacionais, pois o processamento de produtos lácteos é uma atividade de grande consumo de energia elétrica (POWERPLAY SOLAR, 2017).

A outra planta de geração de energia elétrica implantada pela PowerPlay Solar foi construída nas instalações da empresa Frito Lay (figura 28), uma divisão do grupo PepsiCo. Nessa usina de 30 kW que entrou em operação na cidade norte-americana de Casa Grande em janeiro de 2011, no estado do Arizona, também foram empregados os conjuntos da Infinia Corporation. Porém o modelo é o PowerDish III, gerando 2,7 kW de energia elétrica cada equipamento (WILLIAMS, 2017).

2.1.7.4 A planta Tooele Army Depot

A planta chamada de *Tooele Army Depot* (figura 29) é uma usina de energia solar de 1,5 MW do exército dos Estados Unidos, localizada na cidade de Tooele, estado de Utah. Em suas instalações foram montados 429 sistemas de fabricante Infinia, modelo PowerDish IV, sendo que cada unidade possui uma capacidade de geração de energia elétrica de 3,5 kW. Está

ocupando uma área de aproximadamente 69000 m² e entrou em operação em julho de 2013 (PROTENDERS, 2017).



Figura 29 – A planta *Tooele Army Depot*

Fonte: Protenders (2017).

Nessa planta foram investidos 9,6 milhões de dólares pelo exército norte-americano. A geração da unidade de 1,5 MW tem capacidade de fornecer 30% da energia elétrica consumida por esta unidade militar. Em estimativa realizada, ao longo de um ano, o valor da eletricidade produzida por esta planta, a partir da energia solar, pode ser igual a quase US\$ 260.000,00. O Departamento de Defesa dos Estados Unidos tem um programa de investimentos em energias renováveis que tem como objetivo construir projetos nessa área que possam produzir 1 GW de eletricidade até 2025 (FRYE, 2012).

2.1.7.5 As plantas da Cleanergy na China e nos Emirados Árabes Unidos

A Cleanergy é uma empresa sueca que utiliza motores Stirling com a configuração *Alfa*, compatíveis com gás e energia solar. Em 2011, os primeiros conjuntos *Dish-Stirling* foram entregues para a China, compostos pelos motores Stirling, os geradores e os concentradores. A Cleanergy colocou em operação na China, localizada na Região da Mongólia Interior, a sua primeira planta de geração de energia solar (figura 30) com 10 unidades e uma capacidade de geração de eletricidade de 110 kW no ano de 2012 (GADRÉ, 2014).

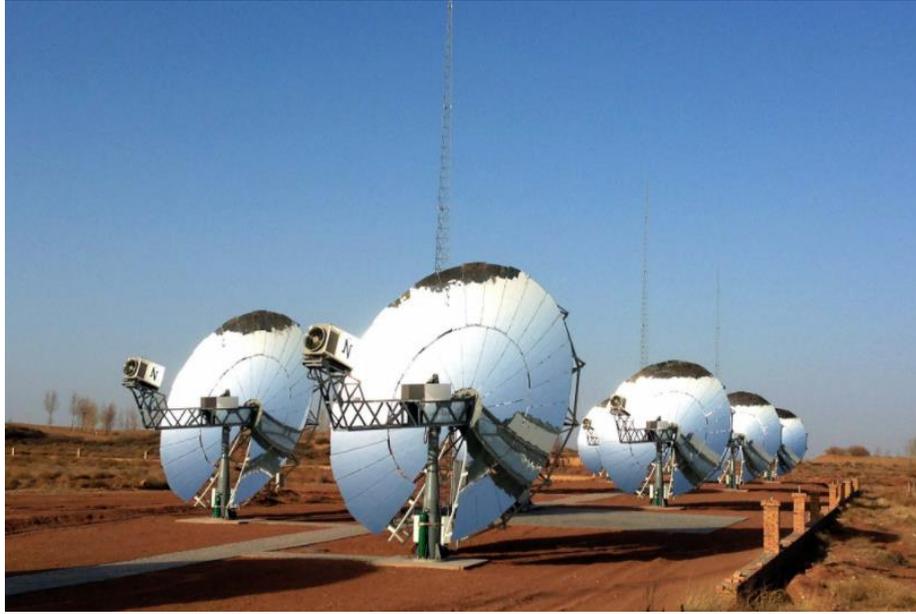


Figura 30 – A planta da Cleanergy na China

Fonte: CSP World (2014).

Devido ao fato de possuir uma grande demanda na área de energias renováveis, quando comparada com outros países, a China é um importante mercado para a geração de energia solar, e para a Cleanergy este mercado é uma prioridade. Em 2011, o principal objetivo da empresa com a implantação da usina na China foi demonstrar a tecnologia para potenciais clientes e investidores. Além disso, a planta também é utilizada para pesquisa e desenvolvimento (GADRÉ, 2014).

Em Dubai, nos Emirados Árabes Unidos, foi inaugurado um parque solar no ano de 2015. Nessa planta, também foram instalados dez equipamentos da Cleanergy, totalizando uma capacidade de geração de energia elétrica de 110 kW. Chamados de Sunbox, possuem concentradores do tipo disco parabólico de 8,85 metros de diâmetro e rastreamento automático do sol. Até o mês de outubro de 2015, a planta em Dubai já estava com mais de 12650 horas de operação (CLEANERGY, 2015).

2.1.7.6 A planta da Ripasso Energy na África do Sul

Em 2012, a empresa sueca Ripasso Energy colocou em operação a sua primeira usina comercial, empregando a tecnologia de conversão térmica com motores Stirling e os concentradores do tipo disco parabólico na cidade de Upington, África do Sul (figura 31). Cada equipamento da planta possui uma capacidade de geração de eletricidade de 30 kW (GADRÉ,

2014). A Ripasso Energy acredita que o país africano e o Chile têm condições solares que podem permitir uma redução nos custos operacionais para ficarem inferiores a € 0,1 por kWh para uma usina de energia de 30 MW (RIPASSO ENERGY, 2016).



Figura 31 – Os equipamentos da Ripasso Energy instalados em Upington, África do Sul
Fonte: Coventry e Andraka (2017).

Além da planta da África do Sul, a Ripasso Energy já estava realizando testes desde 2011 com o seu equipamento híbrido, que funciona com energia solar e com outras fontes, como gases residuais. Os testes são realizados em parceria com a empresa Argenda, na cidade de Antalya, Turquia. E também em sua planta de testes na cidade de Sibbhult, Suécia. Combinando o período de suas unidades, a empresa afirma que já possui mais de 20000 horas de operação. Não sendo detectadas falhas de funcionamento, foi apresentado um baixo custo de manutenção e eficiência na conversão de energia (RIPASSO ENERGY, 2017).

Em 2017, a empresa recebeu o primeiro pedido comercial do sistema híbrido para a construção de uma planta que será operada pela empresa italiana Horizon S. R. L que tem grande experiência na área de energias renováveis. A empresa já possui mais de 2000 plantas em operação, totalizando 90 MW. A previsão é que os primeiros equipamentos estejam operando na nova planta na Região da Sicília (Itália) até abril de 2018. Serão 100 conjuntos *Dish-Stirling* da Ripasso Energy, a partir de um programa de energias renováveis, gerando e vendendo energia elétrica para a concessionária Enel Italia S. R. L. que opera no local (RIPASSO ENERGY, 2017).

2.2 A COMPARAÇÃO ENTRE AS TECNOLOGIAS DE CONCENTRAÇÃO DE ENERGIA SOLAR

As tecnologias para a geração de energia elétrica a partir da concentração de energia solar ou *Concentrating Solar Power* (CSP) vêm sendo pesquisadas há muitas décadas. Independente da técnica aplicada, seguem um esquema geral simples: utilizando espelhos, a luz solar pode ser redirecionada, focada e coletada na forma de calor para alimentar uma turbina ou uma máquina térmica, como um motor Stirling, para gerar eletricidade (BARLEV et al., 2011). Os quatro principais tipos de concentradores solares existentes na atualidade desenvolvidos para a geração de energia elétrica são:

- O concentrador do tipo disco parabólico (*Dish-Stirling*).
- O concentrador do tipo Fresnel linear;
- O concentrador do tipo cilindro parabólico;
- A torre solar com heliostatos.

A figura 32 exibe um mapa do mundo que destaca os principais países que possuem unidades com tecnologias CSP em operação, em construção e em desenvolvimento. O somatório mundial até dezembro de 2016, data de atualização deste mapa, estava com um total de capacidade operacional de 8784 MW. Segundo Mehos et al. (2017), a maior parte das unidades pelo mundo, representando uma maior carga instalada, possuem a tecnologia do tipo cilindro parabólico utilizando óleo sintético como o fluido de transferência de calor.

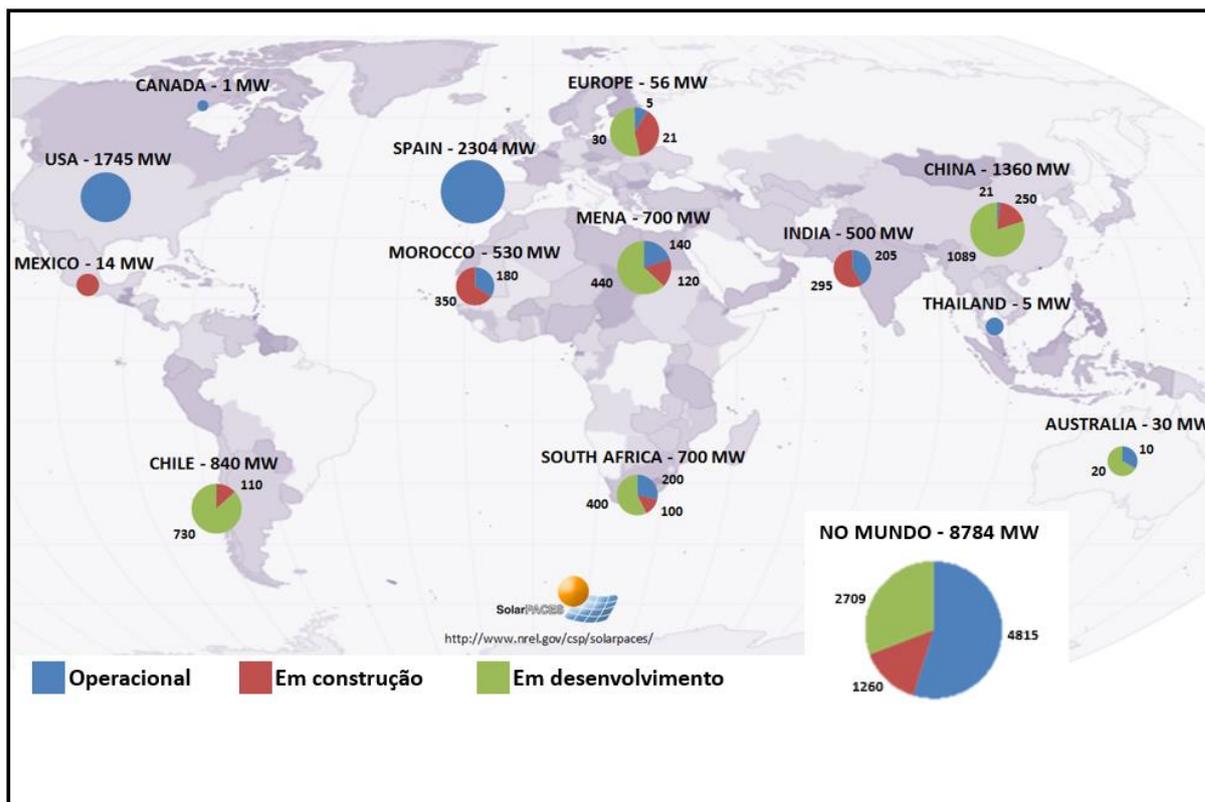


Figura 32 – Capacidade operacional das tecnologias CSP por país até dezembro de 2016
 Fonte: Adaptada de Mehos et al. (2017).

Atualmente, já existem em operação unidades de média e grande escala utilizando a concentração de energia solar, principalmente na Espanha e nos Estados Unidos. As usinas com concentradores do tipo cilindro parabólico e as torres solares com heliostatos são a grande maioria das plantas em operação nesses países. A China também está investindo fortemente neste setor e está se tornando um importante país na geração deste tipo de energia renovável (ZHANG et al., 2013).

A tecnologia de concentradores de cilindros parabólicos é a mais desenvolvida e com menores custos, sendo a única com plantas produzindo energia comercialmente. Em termos de custos com desenvolvimento das usinas, os sistemas de torres solares e com concentradores de discos parabólicos, hoje, são mais caros, embora existam estudos realizados pelo Sandia National Laboratories (SNL) e pelo Sargent & Lundy Consulting Group (S&L) indicando que os custos entre as tecnologias de concentração solar estarão nivelados até 2020 (ZHANG et al., 2013).

Embora o custo da energia elétrica produzida com tecnologias CSP ainda seja alto, quando comparado às fontes de energias não-renováveis, o progresso realizado em todos os

aspectos, especialmente na última década, foi orientado para expandir a eficiência da produção de eletricidade com a luz solar, com a intenção de torná-las competitivas e acessíveis em um futuro próximo (BARLEV et al., 2011).

Basicamente, existem duas categorias de coletores ou concentradores solares. A primeira inclui os coletores solares estacionários, que não concentram a energia em um ponto focal. A mesma área é utilizada para a interceptação e absorção da radiação incidente. Estão nesta categoria os coletores do tipo cilindro parabólico e também o Fresnel linear (MOUSAZADEH et al., 2009).

A segunda categoria consiste nos coletores com rastreamento solar, sendo efetivamente concentradores de energia que empregam, inclusive, elementos ópticos para concentrar grandes quantidades de radiação em uma pequena área de recepção, seguindo o sol ao longo de seu curso diário para manter o máximo de fluxo solar no foco. As torres solares e os sistemas *Dish-Stirling* se enquadram nesta categoria (MOUSAZADEH et al., 2009).

Os concentradores com rastreamento solar têm inúmeras vantagens em relação aos coletores estacionários, geralmente alcançam temperaturas de operação superiores e são mais eficientes. A adição de um dispositivo óptico ao coletor solar convencional (receptor) se mostrou útil em vários aspectos, aumentando a temperatura de operação, bem como a quantidade de calor coletada em uma determinada área e, como consequência, melhorando a eficiência termodinâmica do processo. A tabela 3 exibe uma comparação realizada por Barlev et al. (2011) de dados operacionais das quatro principais tecnologias de concentração de energia solar.

Tabela 3 – Comparação entre dados operacionais das quatro principais tecnologias de geração de energia elétrica por concentração de energia solar

Tecnologia de concentração solar	Descrição	Faixa de temperatura operacional (°C)	Taxa de concentração (Sol)	Maturidade da tecnologia	Rastreamento solar
Cilindro parabólico	<ul style="list-style-type: none"> • Lâmina parabólica de material reflexivo; • Receptor linear (tubo de metal com fluido de transferência de calor). 	50 – 400	15 – 45	Muito madura	1 eixo
Fresnel linear	<ul style="list-style-type: none"> • Conjunto de espelhos lineares com foco em uma torre ou tubo, montado em um receptor. 	50 – 300	10 – 40	Madura	1 eixo
Torre solar	<ul style="list-style-type: none"> • Grande quantidade de heliostatos em um campo com uma torre alta no centro; • No topo da torre, o receptor aquece água ou fluido de transferência de calor; • Pode ser utilizado para armazenamento térmico contínuo. 	300 – 2000	150 – 1500	Mais recente	2 eixos
Disco parabólico (<i>Dish-Stirling</i>)	<ul style="list-style-type: none"> • Disco parabólico altamente reflexivo e um motor Stirling, dentro de um receptor no ponto focal. • Pode ser utilizado com ou sem fluido de transferência de calor. O motor produz eletricidade diretamente com a energia térmica, caso não exista um sistema de armazenamento 	150 – 1500	100 – 1000	Recente	2 eixos

Fonte: Adaptado de Barlev et al. (2011).

Em termos de ocupação de área, para produzir uma determinada quantidade de energia elétrica, as usinas com concentradores de cilindros parabólicos são as que necessitam de maiores áreas para a operação. Comparativamente, as tecnologias de torres solares com heliostatos e com concentradores Fresnel lineares precisam de áreas de tamanhos médios. As plantas com motores Stirling e discos parabólicos ocupam terrenos com as menores dimensões (ZHANG et al., 2013).

Sobre os requisitos ambientais, as áreas desérticas com escassez de água normalmente são os melhores locais para a construção de usinas de energia solar. Entretanto, como em outras unidades de geração de energia elétrica, é necessária uma quantidade considerável de água para processos de refrigeração e condensação. Esta restrição se aplica para as tecnologias CSP, com

exceção dos sistemas *Dish-Stirling* que não precisam de água para operar (ZHANG et al., 2013).

As usinas com cilindros parabólicos e Fresnel lineares são as que demandam mais água para operar: cerca de 3000 litros para cada MWh produzido. Semelhante a uma usina nuclear e superior a uma termelétrica a carvão com aproximadamente 2000 litros por cada MWh gerado. As torres solares trabalham com um volume menor, em torno de 1500 litros por MWh (ZHANG et al., 2013).

O resfriamento seco (com ar) é uma alternativa viável, conforme comprovado por plantas em construção no norte da África. No entanto, análises em plantas com resfriamento seco localizadas em desertos quentes, indicam uma redução na produção anual de 7%, aumentando o custo da eletricidade produzida em cerca de 10% (ZHANG et al., 2013). A tabela 4 compara dados operacionais, econômicos e ambientais das quatro principais tecnologias de concentração de energia solar apresentadas neste trabalho.

Tabela 4 – Comparação entre dados operacionais, econômicos e ambientais das quatro principais tecnologias de geração de energia elétrica por concentração de energia solar

Tecnologia de concentração solar	Custo Relativo	Tamanho da área ocupada	Água de resfriamento (litros/MWh)	Eficiência termodinâmica	Perspectivas para melhorias
Cilindro parabólico	Baixo	Grande	3000 ou resfriamento seco	Baixa	Limitada
Fresnel linear	Muito baixo	Médio	3000 ou resfriamento seco	Baixa	Significativa
Torre solar	Alto	Médio	1500 ou resfriamento seco	Alta	Muito significativa
Disco parabólico (<i>Dish-Stirling</i>)	Muito alto	Pequeno	Sem água	Alta	Alto potencial para a aplicação na produção em massa

Fonte: Adaptado de Zhang et al. (2013).

2.3 O ESTUDO DE LOCALIZAÇÃO

O estudo de localização é um dos principais fatores que devem ser levados em consideração para a implantação de usinas de geração de energia elétrica utilizando o Sol como fonte primária de energia. De acordo com Carrión et al. (2008), é imperativo que os projetistas tenham acesso às informações locais como o clima e as características do terreno. Sem esses dados, a seleção do local ideal para a instalação da usina solar pode ser comprometida. Carrión

et al. (2008) ainda acrescentam que a realização de um estudo de localização detalhado para a construção da usina pode trazer diversas vantagens como:

- Um desempenho elevado da instalação se o local possuir condições climáticas adequadas. Em outras palavras, altos níveis de irradiação solar, temperaturas moderadas, grande número de horas de incidência solar por ano, etc.;
- Uma otimização das instalações quando elas são construídas em terreno plano, possuindo uma boa orientação solar e sem obstáculos que possam produzir sombras;
- Uma redução de perdas na transmissão de energia quando as plantas de geração de energia elétrica estão próximas dos centros urbanos, os quais são os principais pontos de consumo;
- Custos de manutenção mais baixos ao longo da vida útil da instalação se a planta estiver nas proximidades de áreas urbanas;
- Impactos mínimos ao meio ambiente, à sociedade e às infraestruturas.

Segundo Azevêdo (2016), nos últimos anos, diversos estudos de localização para a construção de usinas solares foram realizados em muitos países, apresentando como o objetivo principal, a identificação de potenciais áreas. Nos estudos realizados, normalmente essas áreas são identificadas por meio de avaliações das questões técnicas, econômicas e ambientais.

Além disso, existem outros fatores que podem influenciar na definição da localização de plantas industriais. Sousa (2002) descreve como um desses elementos a condição social do estado onde a planta é construída, principalmente em relação à oferta de cientistas e pesquisadores e o nível de escolaridade e de capacitação na região de interesse. O outro fator é o político, pois o governo local pode oferecer, por exemplo, subsídios tributários e também um suporte com a infraestrutura para viabilizar o empreendimento.

Azevêdo (2016) descreve que nos estudos necessários para identificar as áreas mais adequadas para instalação de usinas solares utiliza-se, comumente, um método de Análise de Decisão Multicritério (ADM) associado ao SIG (Sistema de Informação Geográfica). Guglielmetti et al. (2003) descrevem que existe um grande número de métodos de ADM, também chamados de *Multiple Criteria Decision Making* (MCDM).

Basicamente, de acordo com Mello et al. (2003), existem duas principais linhas de pensamento para a tomada de decisão multicritério: a Escola Francesa e a Escola Americana.

Na Escola Francesa, os principais tipos de ADM são o ELECTRE e o PROMETHEE. Em relação à Escola americana, podem ser citados os métodos TODIM, o MACBETH, o UTA e o AHP que foi aplicado nesta pesquisa.

O AHP é um dos métodos mais populares de Análise de Decisão Multicritério e a sua principal característica é a modelagem de uma hierarquia em que o nível mais alto representa o problema e as possíveis alternativas a serem avaliadas estão localizadas na base (LOZANO et al., 2013). No caso do *Multiplicative Analytic Hierarchy Process* (MAHP), é realizado o uso de fórmulas multiplicativas na derivação quando os critérios são agregados aos pesos (TRIANANTAPHYLLOU, 2001). Os métodos AHP e MAHP possuem uma metodologia para composição e resolução de problemas com hierarquias profundas em relação à aplicação em decisões de vários níveis (GUGLIELMETTI et al., 2003).

No estudo de localização deste trabalho, o método AHP foi escolhido para ser aplicado em conjunto com uma ferramenta SIG. Segundo Carrión et al. (2008), é uma das mais importantes técnicas de Análise de Decisão Multicritério e possui diversas vantagens, podendo ser empregado em casos que necessitem de um alto grau de flexibilidade e de confiabilidade.

O SIG, por definição, é uma coleção integrada de dados geográficos que pode ser utilizada para analisar, criar, adquirir, armazenar, editar, transformar, visualizar e distribuir com o objetivo de resolver problemas complexos de planejamento e gerenciamento (DELGADO; SENDRA, 2004). Desde os anos 1970 as ferramentas SIG evoluíram para um alto nível de maturidade e começaram a ser aplicadas em uma série de campos acadêmicos, incluindo Geografia, Engenharia Civil, Ciências da Computação, Ciências Ambientais e para o planejamento do uso de terras (CHURCH, 2002).

A base de dados de um SIG possui uma gama de recursos espaciais e consultas que podem ser utilizados para estudos de localização (CHURCH, 2002). Os métodos de Análise de Decisão Multicritério que são procedimentos valiosos para a realização de tarefas de planejamento territorial e são frequentemente integrados com um SIG, quando é necessário selecionar a melhor localização para uma determinada atividade (CARRIÓN et al., 2008). Os detalhes da aplicação do método AHP e dos Sistemas de Informação Geográfica estão apresentados a seguir nas seções 2.3.1 e 2.3.2.

2.3.1 Analytic Hierarchy Process (AHP)

O *Analytic Hierarchy Process* é um método de comparação par a par no contexto do processo de tomada de decisão, baseado em uma matriz quadrada $n \times n$. As linhas e as colunas correspondem aos n critérios que são analisados para o problema proposto. Dessa forma, o valor a_{ij} representa a importância relativa do critério da linha i em relação ao critério localizado na coluna j . Como a matriz é recíproca, somente a metade triangular inferior precisará ser avaliada, pois a outra metade é derivada da primeira parte e a diagonal principal conterá valores iguais a 1 (ZAMBON, 2005).

O AHP é baseado na decomposição, julgamento comparativo e síntese das prioridades do problema de decisão que deve ser dividido em uma hierarquia com os elementos essenciais do problema, como por exemplo para este trabalho o nível de incidência solar e a distância das linhas de transmissão. O princípio do julgamento comparativo deverá ser moldado pela comparação dos elementos de cada nível da hierarquia por pares. Finalmente, a síntese das prioridades envolve a tomada de cada uma das escalas de prioridade resultantes em cada nível da hierarquia e a construção de um conjunto de prioridades global (composto) para o último nível da hierarquia, que foi utilizado para avaliar as diferentes alternativas (DELGADO et al., 2004).

Segundo Saaty (2008), para tomar uma decisão de forma organizada, definindo as prioridades, é preciso decompor a decisão nas seguintes etapas:

- 1) Definir o problema e determinar qual o tipo de conhecimento que está sendo procurado;
- 2) Estruturar a hierarquia de decisão a partir do topo com o objetivo da decisão. Depois, os objetivos de uma ampla perspectiva, por meio de níveis intermediários (critérios nos quais os elementos subsequentes dependem) para o nível mais baixo (o que normalmente é um conjunto de alternativas);
- 3) Construir um conjunto de matrizes de comparação. Cada elemento em um nível superior é usado para comparar os elementos no nível imediatamente abaixo em relação a ele.
- 4) Utilizar as prioridades obtidas das comparações para definir os pesos das prioridades no nível imediatamente abaixo. Esse procedimento deve ser realizado para cada elemento. Então, para cada elemento no nível abaixo, adicionar seus valores ponderados para obter

a sua prioridade geral ou global. Continuar este processo de definição e adição de pesos até que as prioridades finais das alternativas do nível mais inferior sejam definidas.

Para realizar comparações, uma escala de números é necessária para indicar o quanto um critério é mais importante ou dominante sobre um outro critério para a tomada de decisão. Assim, é possível comparar os critérios e a tabela 5, proposta por Saaty (2008), exibe uma escala para a definição dos pesos dos critérios.

Tabela 5 – A escala fundamental dos números absolutos

Intensidade de Importância	Definição	Explicação
1	Importância igual	Duas atividades contribuem igualmente para o objetivo
2	Importância fraca ou leve	Quando se procura uma condição de compromisso entre duas definições
3	Importância moderada	Experiência e julgamento favorecem ligeiramente uma atividade sobre outra
4	Importância moderada <i>plus</i>	Quando se procura uma condição de compromisso entre duas definições
5	Importância forte	Experiência e julgamento favorecem fortemente uma atividade sobre outra
6	Importância forte <i>plus</i>	Quando se procura uma condição de compromisso entre duas definições
7	Importância muito forte	Uma atividade é favorecida muito fortemente sobre outra e seu domínio é demonstrado na prática
8	Importância muito, muito forte	Quando se procura uma condição de compromisso entre duas definições
9	Importância extrema	A evidência de uma atividade sobre outra é da mais alta ordem possível de afirmação
Recíprocas acima	Se a atividade i tiver um dos números acima diferentes de zero atribuídos a ela quando comparado com a atividade j , então j tem o valor recíproco quando comparado com i	Uma suposição razoável
1.1 – 1.9	Se as atividades são muito próximas	Pode ser difícil atribuir o melhor valor, mas quando comparado com outras atividades contrastantes, o tamanho dos pequenos números não seria muito notável, mas ainda podem indicar a importância relativa das atividades

Fonte: Adaptado de Saaty (2008).

A aplicação do método inicia com o preenchimento de uma matriz para realizar a comparação par a par com base na escala fundamental da tabela 5. Em seguida, uma nova matriz normalizada deve ser criada, realizando um cálculo de divisão do valor na matriz de comparação original pelo somatório de cada coluna. Com os resultados desta nova matriz normalizada é possível calcular o Vetor prioridade normalizado (W_j), calculado a partir do

somatório dos elementos das linhas pelo o número de elementos, utilizando a expressão a seguir.

$$W_j = \frac{\sum a_{ij}}{n} \quad (3)$$

Onde:

$\sum a_{ij}$: é o somatório de todos os elementos da linha;

n : é o número de elementos da linha.

O desempenho das alternativas em relação a cada critério pode ser verificado por meio da avaliação da quantidade de julgamentos (q), conforme a equação apresentada a seguir, onde n é o número de alternativas comparadas. Esta verificação pode ser importante para a seleção da melhor opção, eliminando a tendenciosidade das decisões.

$$q = \frac{[n \cdot (n - 1)]}{2} \quad (4)$$

Onde:

n : é o número de alternativas comparadas.

A medição da consistência das comparações normalmente é realizada com o cálculo do Índice de Consistência ou *Consistency Index* (CI). Este índice é obtido utilizando o Autovalor máximo (λ_{max}) e a ordem da matriz de comparação par a par. O λ_{max} é encontrado por meio da multiplicação da matriz inicial de comparação par a par pelo Vetor prioridade normalizado. A equação para encontrar o CI está apresenta a seguir.

$$CI = \frac{(\lambda_{max} - n)}{(n - 1)} \quad (5)$$

Onde:

λ_{max} : é o Autovalor máximo

n : é a ordem da matriz.

Segundo Saaty (1991), a Razão de Consistência ou *Consistency Ratio* (CR) considera um erro aleatório diretamente relacionado com a ordem da matriz, definido pelo Índice de Consistência Randômico ou *Random Consistency Index* (RI). A tabela a seguir apresenta os valores de RI que devem ser utilizados para matrizes com ordens de 1 a 10.

Tabela 6 – Índice de Consistência Randômico (RI)

Ordem da matriz	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RI	0,00	0,00	0,58	0,90	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49

Fonte: Adaptada de Saaty (1991).

A Razão de Consistência (CR) é encontrada utilizando a seguinte equação definida a seguir.

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (6)$$

Onde:

CI: é o Índice de Consistência;

RI: é o Índice de Consistência Randômico.

Em sua publicação, Saaty (1991) apresentou resultados da Razão de Consistência em função da ordem da matriz. O autor determinou que esta razão seria aceitável quando o CR fosse igual ou menor do que 0,10. Assim, neste trabalho foi adotado este critério para analisar a consistência dos resultados.

2.3.2 Sistema de Informação Geográfica (SIG)

Um Sistema de Informação Geográfica (SIG) que também pode ser chamado de *Geographic Information System (GIS)* é uma ferramenta para consulta, análise e edição de dados, mapas e informações espaciais em geral. Assim, SIG são sistemas que trabalham com bancos de dados geograficamente referenciados. Em um mapa digital, com um banco de dados associado, é possível obter as coordenadas geográficas de cada ponto, permitindo a busca por informações diretamente nessa base de dados (LOZANO et al., 2013).

Existem dois tipos de representações nas ferramentas SIG: de estrutura vetorial e o de estrutura matricial (*raster*). No modelo vetorial, as características geográficas dos SIG são expressas como vetores, mantendo os recursos geométricos das figuras e são usados para definir limites ou fronteiras. Os elementos geométricos vetoriais possuem informações associadas no banco de dados, normalmente são utilizados pontos, linhas e polígonos.

Os sistemas SIG com estruturas matriciais são representados por uma malha ou uma grade de retângulos, todos com o mesmo tamanho. Cada elemento é chamado de pixel ou célula e tem a sua informação e localização geográfica atribuídas no banco de dados (LOZANO et al., 2013). A figura 33 a seguir proposta por Coelho (2006) apresenta os mapas sendo representados na estrutura vetorial e na estrutura matricial.

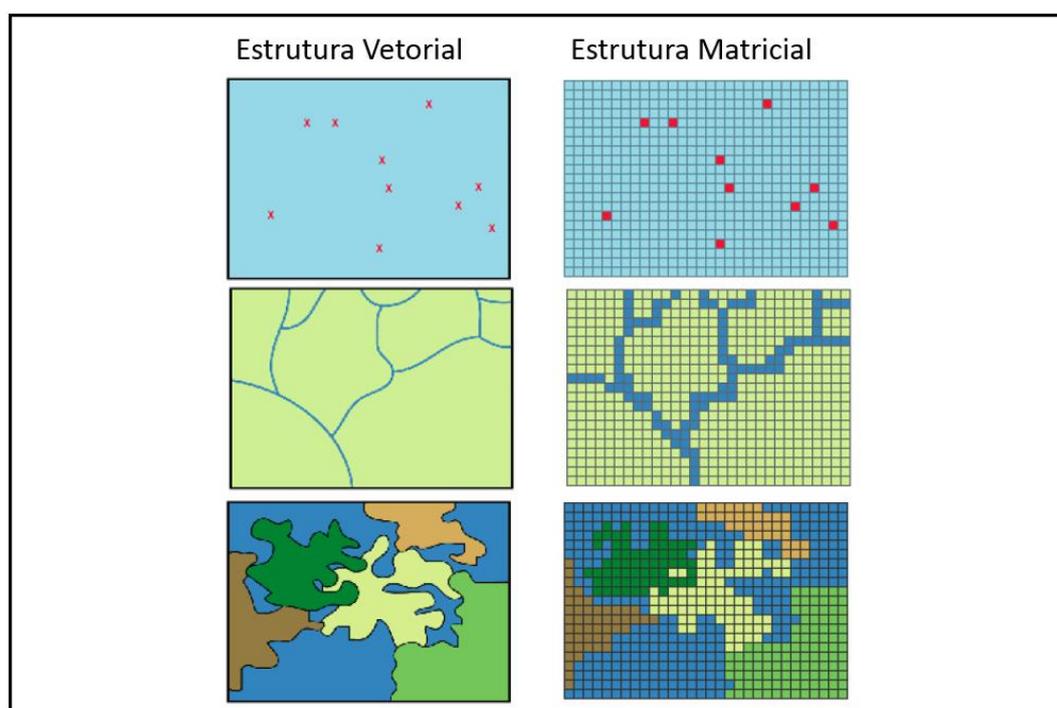


Figura 33 – Tipos de estruturas em ferramentas SIG

Fonte: Adaptada de Coelho (2006).

No contexto da tomada de decisões na gestão territorial, qualquer decisão geralmente implica em uma avaliação na distribuição dos recursos. Segundo Church (2002), as ferramentas SIG possuem a capacidade de combinar e selecionar rapidamente uma grande quantidade de dados e permite que o analista considere critérios mais apropriados e específicos. Muitos estudos necessitam de uma grande quantidade de informações espaciais para visualizar os resultados, bem como para facilitar o processo de tomada de decisão e os SIG são essenciais para essa tarefa (RIZZOLI; YOUNG, 1997).

Os estudos de localização de instalações são realizados escolhendo o melhor local para o estabelecimento de uma ou mais instalações, a partir de um conjunto de possíveis locais e encontrando uma solução ótima. Assim, é fornecido um serviço de melhor qualidade aos clientes, minimizando os custos operacionais e maximizando os lucros (MAPA; LIMA, 2012).

Nesta dissertação, a ferramenta SIG utilizada para a avaliação do estudo de localização da usina solar foi o QGIS, versão 2.18.18 Las Palmas, apresentado na figura a seguir.

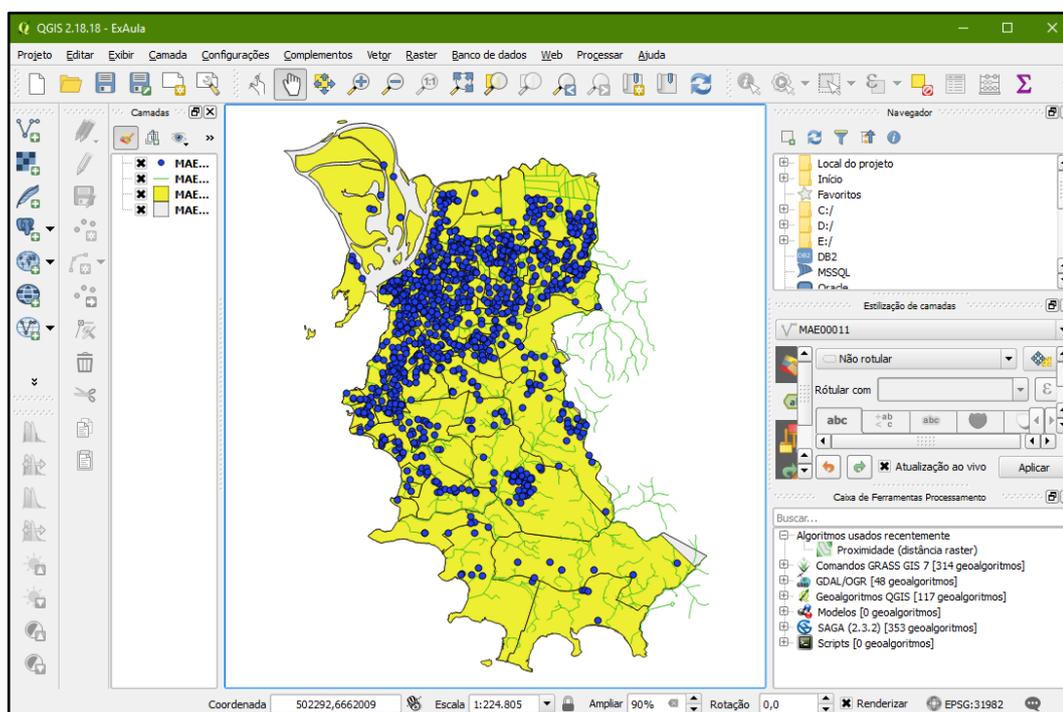


Figura 34 – Tela da ferramenta QGIS

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

2.3.3 Teoria dos Conjuntos *Fuzzy* ou Lógica *Fuzzy*

A Teoria dos Conjuntos *Fuzzy* foi desenvolvida por Lofti A. Zadeh em 1965 para a modelagem matemática em regiões com incertezas e sem precisão (METTERNICHT, 2001). Segundo Kainz (2018), frequentemente as variáveis espaciais, como por exemplo, a declividade e o aspecto do terreno, não possuem claramente limites e conceitos definidos como “íngreme”, “próximo” ou “adequado”. Dessa forma, podem ser melhor expressos com graus de associação a um conjunto *Fuzzy* do que simplesmente utilizar uma classificação binária (sim/não).

A Lógica *Fuzzy* é algo inerente na utilização dos Sistemas de Informação Geográfica (SIG) e dos bancos de dados espaciais. Um problema encontrado na integração entre um método de Análise de Decisão Multicritério (ADM) e um Sistema de Informação Geográfica (SIG) é que os pesos dos critérios são atribuídos com arbitrariedade, ou muitas vezes são definidos como estritamente booleanos. Assim, é necessário implementar uma Lógica *Fuzzy* para a criação de funções contínuas ou difusas, na qual os valores lógicos das variáveis podem ser qualquer número real entre zero e um (MORRIS; JANKOWSKI, 2005).

Em um exemplo apresentado por Kainz (2018), pode-se imaginar um grupo de três pessoas A, B e C, sendo que suas respectivas alturas são 185 cm (A), 165 cm (B) e 186 (C). O objetivo é incluir essas três pessoas nas classes de estatura: baixa, média ou alta. Se for definida uma divisão de classes, onde $(-, 165]$ a estatura da pessoa é baixa, $(165, 185]$ é média e $(185, -)$ é alta, a pessoa A ficaria na classe média, a B na classe baixa e a C na classe alta. A pessoa A é quase tão alta quanto a C, porém elas estão em classes diferentes, segundo esta classificação. As funções características das três classes estão apresentadas na tabela 7.

Tabela 7 – Função característica das classes de altura

	Baixa	Média	Alta
A	0	1	0
B	1	0	0
C	0	0	1

Fonte: Adaptada de Kainz (2018).

Quando são criados conjuntos *Fuzzy*, devem ser definidas funções de associação, conforme foi definido para as três classes, apresentadas no gráfico da figura 35.

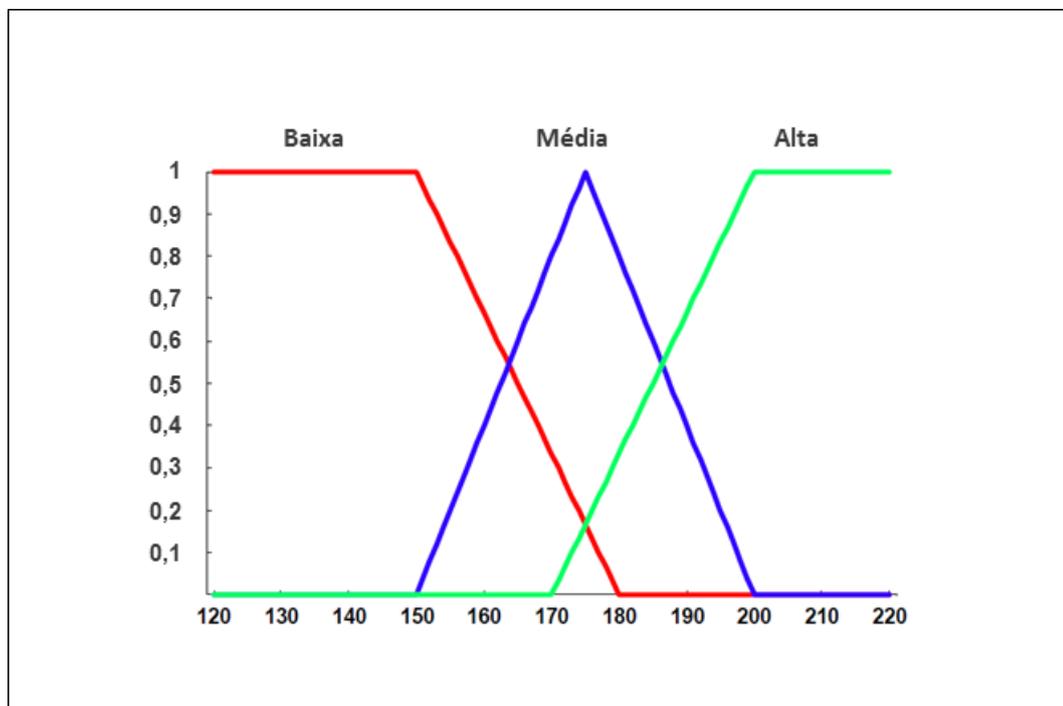


Figura 35 – Funções de associação para as classes para estaturas “baixa”, “média” e “alta”
Fonte: Adaptada de Kainz (2018).

Resumindo o exemplo, para a estatura baixa foi selecionada uma função de associação linear que define um valor de associação de 1 (um) para pessoas menores que 150 cm e diminui até atingir 0 (zero) em 180 cm. A função de associação para a altura média apresenta valores iguais a 0 (zero) para pessoas menores que 150 cm, depois aumenta até atingir 1 (um) em 175 cm e, a partir desta altura, diminui até atingir 0 (zero) em 200 cm. A função de associação para a estatura alta é 0 (zero) até 170 cm e vai aumentando até atingir 1 (um) em 200 cm. Os valores de associação das três pessoas deste exemplo são apresentados na Tabela 2.

Tabela 8 – Os valores de associação para as classes de altura

	Baixa	Média	Alta
A	0,00	0,60	0,50
B	0,50	0,60	0,00
C	0,00	0,56	0,53

Fonte: Adaptada de Kainz (2018).

2.4 OS CUSTOS DE UMA USINA SOLAR

2.4.1 O Custo Nivelado de Energia (LCOE)

O Custo Nivelado de Energia ou *Levelized Cost of Electricity* (LCOE) é o cálculo do custo unitário de produção de uma determinada usina de geração de energia elétrica, durante a sua vida útil. O LCOE é uma grandeza utilizada internacionalmente para determinar esse custo unitário de produção que depende basicamente do custo de investimento inicial (CAPEX), dos custos de manutenção e operação (OPEX) e de custos associados a juros de empréstimos (SILVA, 2013).

Segundo Short et al. (1995), o LCOE também é aplicado na comparação de custos de produção de diferentes tecnologias de geração de eletricidade para a avaliação de viabilidade econômica. Short et al. (1995) acrescentam que nesse cálculo é comparada a energia gerada com todos os custos esperados ao longo do período de operação da usina como: investimento inicial (CI), operação e manutenção ($C_{O\&M}$), financiamento, impostos, seguros, incentivos, inflação e de combustível (caso seja aplicável), sendo que todos devem estar no valor presente.

Para a obtenção do LCOE, pode ser realizada uma simplificação no cálculo com a intenção de facilitar a análise para chegar a um valor próximo do real. Ao invés de ser

considerada a taxa de juros do empréstimo para o investimento, é utilizado o Fator de Recuperação do Capital ou *Capital Recovery Factor* (CFR), apresentado em (%/ano), que leva em consideração a taxa de juros e o tempo de duração do empréstimo. Segundo Reis (2011), com o cálculo do CFR pode ser obtida a taxa de recuperação anual do investimento inicial, permitindo definir o tempo de retorno para o ressarcimento deste montante desembolsado. O CFR é calculado pela equação a seguir (SHORT et al., 1995 apud SILVA, 2013).

$$CFR = \frac{DR(1+DR)^n}{(1+DR)^n - 1} \quad (7)$$

Onde:

DR (*Discount Rate*): é a taxa de desconto (normalmente uma média ponderada das diferentes taxas de juros pagas para o custo de capital);

n: é o número de anos.

Assim, o LCOE pode ser determinado utilizando o custo do investimento, o custo de capital no ano em questão (com a aplicação do CFR), a potência instalada e o fator de carga da usina. Finalizando com a soma dos custos de operação e manutenção (SILVA, 2013). De acordo com Lovegrove e Stein (2012), o LCOE pode também ser definido como a constante por custo unitário de energia elétrica (US\$/MWh), ao longo da vida útil do sistema, que resultará em um VPL total de zero. O LCOE é calculado pela equação descrita a seguir (SHORT et al., 1995 apud SILVA, 2013).

$$LCOE = \frac{CI \times CFR}{8760 \times P \times FC} + C_{O\&M} \quad (8)$$

Onde:

CI: é o custo do investimento (R\$);

P: é a capacidade total de geração de energia elétrica da usina solar (kW);

FC: é o fator de carga da usina solar (%);

C_{O&M}: é o custo variável anual de operação e manutenção.

Uma observação importante é que o LCOE não reflete o preço de venda ao consumidor, pois não estão incluídos os impostos e o lucro de venda da energia. Apenas o custo para produzir com a tecnologia analisada e ainda não varia com o tempo (SCHLIPF et al., 2014). Além disso, os custos de emissões de carbono e de descomissionamento (desmontagem da unidade) são levados em consideração para o cálculo do LCOE (IEA & NEA, 2015). Porém, esses custos não foram considerados no cálculo do LCOE nesta pesquisa. O custo de descomissionamento

foi desconsiderado, pois a desmontagem da unidade no final da vida útil do projeto é simples e o local pode ser reaproveitado para um novo projeto.

Portanto, o LCOE é equivalente a um custo por kWh, no momento em que são realizados os gastos e a energia está sendo gerada. No caso de comparações entre diferentes tecnologias, por exemplo, os custos unitários de produção de usinas eólicas, hidrelétricas e termelétricas que possuem diferentes custos de investimento, de manutenção e de operação podem ser comparados. É também um importante índice para avaliar a viabilidade de um projeto (SHORT et al., 1995).

2.4.2 O Custo de Investimento Inicial (CAPEX)

O *Capital Expenditure* (CAPEX) é a expressão utilizada para definir o custo de investimento inicial ou investimento em bens de capital. É o montante de recursos investidos para a aquisição ou melhoria de bens (máquinas, equipamentos, instalações, terrenos e demais itens considerados como investimentos fixos) de uma empresa. Esse termo é empregado nas análises de investimentos em projetos, servindo como uma medida de base para verificar o retorno sobre um investimento que é realizado (VAZZOLER, 2015).

Segundo Castro (2016), em plantas CSP, aproximadamente 80% da composição do LCOE se refere ao CAPEX. Os demais custos identificados na LCOE são relativos à operação e manutenção e também com seguros da usina. É o contrário, quando comparadas com termelétricas a gás natural ou carvão, onde os custos com o investimento inicial não são muito altos, devido a um grau maior de maturidade da tecnologia, mas possuem custos operacionais mais altos, principalmente com a aquisição de combustíveis.

2.4.3 O Custo Operacional (OPEX)

O *Operational Expenditure* (OPEX) é a expressão que define as despesas operacionais ou também os custos de manutenção e operação. É o montante de recursos gastos (custos ou despesas), inevitáveis para que uma determinada empresa se mantenha em atividade. Dessa maneira, o OPEX se refere aos gastos cotidianos, seja custo ou despesa, dependendo da sua destinação, para que a empresa continue em funcionamento, sendo aplicados com empregados,

combustíveis, manutenção de equipamentos, além de despesas administrativas, comerciais e tributárias, incluindo os gastos em serviços terceirizados (VAZZOLER, 2015).

FARIA (2016) descreve em sua publicação custos e despesas do OPEX decorrentes da geração de energia elétrica. Alguns exemplos estão descritos a seguir:

- Despesas com pessoal;
- Matéria-prima e insumos para a produção de energia elétrica;
- Encargos de uso da rede elétrica;
- Profissionais e/ou empresas terceirizadas.

Geralmente, as unidades de geração de energia elétrica que utilizam fontes renováveis e, principalmente as plantas solares, possuem custos operacionais muito baixos ou nulos. Essa vantagem existe porque o recurso (a energia solar) está disponível livremente na natureza (CASTRO, 2015). Especificamente no caso da energia elétrica gerada com a tecnologia *Dish-Stirling*, Abbas (2011) descreve que tanto o custo de manutenção dos discos parabólicos quanto os custos para manter em funcionamento os motores Stirling são baixos.

2.4.4 O custo para interligar uma usina solar com o Sistema Interligado Nacional (SIN)

Segundo Castro (2015), a grande maioria das usinas de geração de energia elétrica e consumidores no Brasil estão interconectados em uma rede única, o Sistema Interligado Nacional (SIN). Assim, é possível realizar a distribuição da eletricidade no país, conforme a necessidade de cada região, a partir das diversas fontes geradoras. O Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) é o órgão responsável pela coordenação e operação do SIN, definindo como é realizada a produção de eletricidade nas usinas do sistema e minimizando os custos operacionais.

Se a usina de geração de eletricidade a partir da energia solar não for construída em local onde exista uma linha de transmissão disponível para a interligação ao SIN, é necessário construir uma nova linha de transmissão. Segundo Menezes (2015), no cálculo orçamentário para a construção de uma linha de transmissão, duas premissas básicas devem ser observadas: as quantidades e os custos unitários dos materiais e dos serviços.

Durante a fase de estimativa de custos, são avaliados os preços dos condutores e demais materiais utilizados, os possíveis encaminhamentos, o prazo de execução, as equipes envolvidas, entre outras variáveis para a construção da linha de transmissão. O objetivo é associar a melhor solução técnica com o menor custo associado. É importante observar que o valor a ser desembolsado com os materiais de construção possui uma variação, dependendo da localização da obra. Inclusive, podem aumentar ainda mais caso a execução do projeto seja longe de grandes centros, como capitais e grandes cidades (MENEZES, 2015).

A tensão e a corrente da linha de transmissão são fatores determinantes para o custo de construção. A seção e o número de condutores por fase influenciam no peso das estruturas e nas fundações das torres. Dependendo do nível de tensão, pode haver um alargamento da faixa de servidão, podendo aumentar também o número de desapropriações ou a área de supressão vegetal. A mão-de-obra, dependendo da região, pode variar também, incluindo os custos de transporte, alimentação, etc. Por último, os impostos devem ter um impacto considerável no preço final, sobre os materiais e serviços (MENEZES, 2015).

Na construção de uma usina de geração de energia elétrica empregando a luz solar, a proximidade de uma linha de transmissão pode ser um fator determinante para a viabilidade econômico-financeira do projeto. A construção de extensas linhas de transmissão e de subestações pode aumentar significativamente os custos. Assim, uma localidade pode ter um imenso potencial solar, mas estar muito distante de uma linha de transmissão ou de um centro de consumo de energia elétrica, diminuindo muito a sua atratividade.

Nesta dissertação, o estudo de localização foi realizado com a intenção de encontrar uma área para a construção da planta solar com uma distância de linhas de transmissão que possa ser considerada inexpressiva para ser desconsiderada na análise financeira.

2.4.5 O cálculo do LCOE com o *System Advisor Model* (SAM)

A lista de ferramentas computacionais de modelagem para a aplicação em análises de plantas CSP é extensa, mas as avaliações realizadas, muitas vezes são redundantes. Os modelos e códigos desses *softwares* podem ser classificados e organizados em um formato de "pirâmide de modelagem" (figura 36), descrevendo uma hierarquia natural para a modelagem de sistemas complexos (HO, 2008).

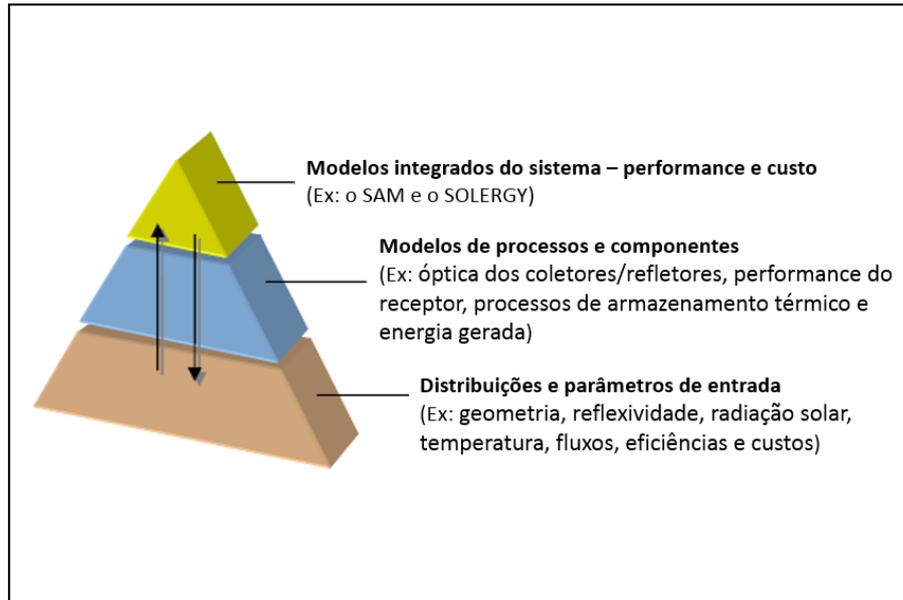


Figura 36 – A “pirâmide de modelagem”

Fonte: Adaptada de Ho (2008).

No topo dessa pirâmide encontram-se as ferramentas ou modelos que podem ser utilizados para a avaliação das métricas gerais de desempenho, como o LCOE e a energia gerada pela planta. Esses modelos dependem da entrada de dados de outros modelos de processos mais detalhados que fornecem informações sobre o desempenho de componentes individuais, como por exemplo, o desempenho de receptores. Os modelos de processo exigem a inserção de parâmetros e distribuições (para analisar incertezas e sensibilidade), sendo adquiridos em vários meios, tais como testes, na literatura, em pesquisas ou pela experiência profissional. (HO, 2008).

A pirâmide de modelagem é frequentemente usada como a estrutura para a modelagem de sistemas complexos, pois fornece um fluxo lógico e organiza as informações para as atividades de modelagem (HO, 2008). Segundo Lodi (2011), as informações são transferidas tanto da base (parâmetros e modelagem de detalhes do processo) para o topo (desempenho e custos), como do topo para a base. Assim, os esforços na modelagem são direcionados para áreas que possam impactar o projeto, como custos e desempenho.

No estudo de viabilidade técnica e econômica desta dissertação, foi definido como o *software* para as análises da planta, o *System Advisor Model* (SAM), versão 2017.9.5, criado pelo *National Renewable Energy Laboratory* (NREL) e outras instituições de ensino e pesquisa. Segundo Blair (2014), o SAM (figura 37) pode realizar avaliações de desempenho e cálculos

de LCOE de unidades de geração de energia elétrica de diversos tipos, incluindo a tecnologia *Dish-Stirling*.

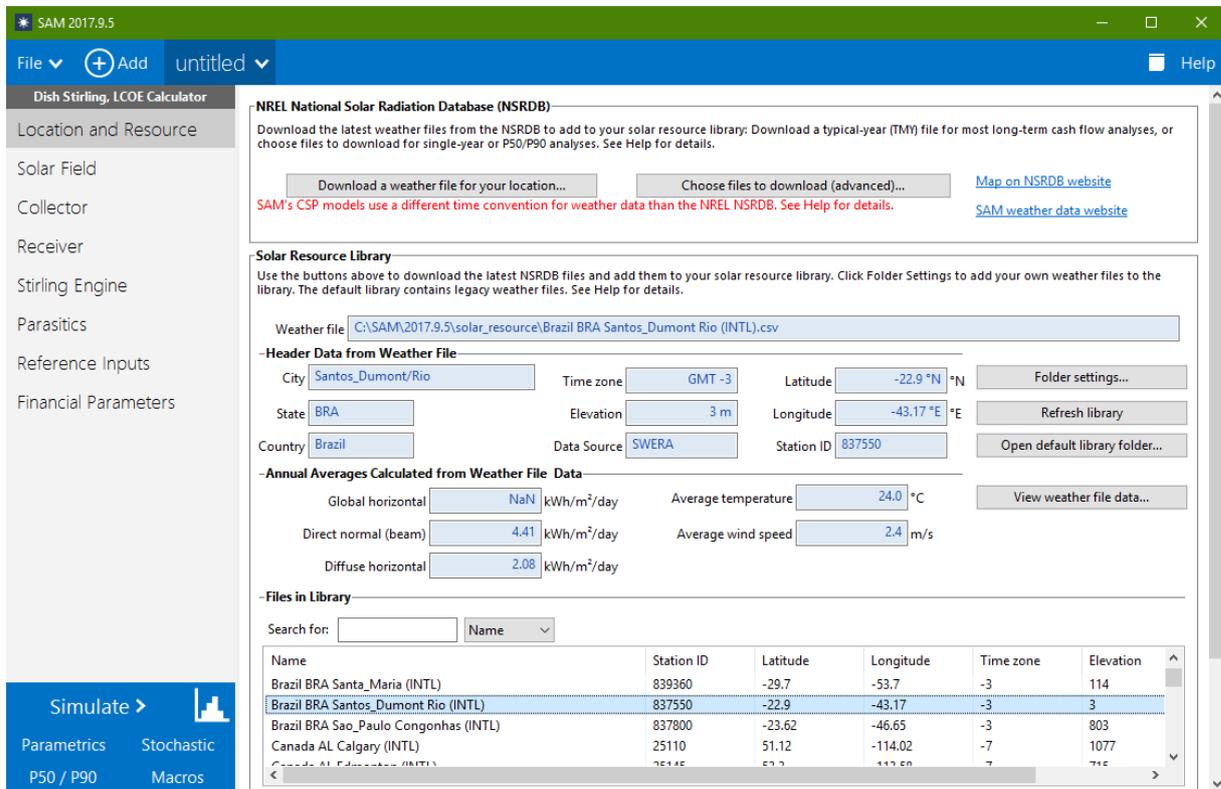


Figura 37 – O System Advisor Model (SAM)

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Segundo Blair (2014), o SAM pode modelar uma planta CSP com ou sem armazenamento térmico e também é possível escolher se existirá ou não um backup de combustível. Para o cálculo do LCOE, dados de entrada devem ser fornecidos pelo usuário como: localidade, dados meteorológicos, custos de instalação, operação e manutenção, financiamentos, incentivos, tecnologia e demais especificações do sistema. O SAM também fornece estimativas de energia gerada, de fluxo de caixa e custos do sistema (LODI, 2011).

2.5 O VALOR PRESENTE LÍQUIDO (VPL), A TAXA INTERNA DE RETORNO (TIR) E O PAYBACK DESCONTADO

Em análises de investimentos, o Valor Presente Líquido (VPL), a Taxa Interna de Retorno (TIR) e o Payback Descontado estão entre as principais técnicas para a elaboração de uma análise financeira. O objetivo desses índices é fornecer ao responsável pela análise quais são as previsões de lucro (ABENSUR, 2012).

Segundo Dassi et al. (2015), muitos tipos diferentes de indicadores podem ser utilizados em estudos para analisar a viabilidade econômico-financeira, dependendo evidentemente das características de cada projeto. Nesta dissertação, para realizar essa análise foram utilizados o *Payback* Descontado, o Valor Presente Líquido e a Taxa Interna de Retorno.

2.5.1 Valor Presente Líquido (VPL)

Em um estudo de viabilidade técnica e econômica de unidades geradoras de energia, segundo Mota (2011), o Valor Presente Líquido deve ser levado em consideração. Esse índice revela a expectativa do ganho de capital maior que o retorno mínimo esperado se o valor for positivo. Caso o valor seja negativo, o retorno é menor do que o mínimo esperado, tornando o investimento inviável (MOTA, 2011).

Como o VPL é uma medida de valor em que é necessário definir uma taxa de desconto, não existe um único Valor Presente Líquido, mas vários, sendo um para cada taxa de desconto considerada. Porém, utilizando uma taxa de desconto mais apropriada, o VPL é uma ferramenta de avaliação da viabilidade que apresenta uma maior segurança para tomar uma decisão. Isto porque se supõe que os fluxos gerados possam ser reinvestidos, considerando a taxa de desconto, o investimento inicial e seu custo de oportunidade (MOTA, 2011).

O Valor Presente Líquido, conforme descrevem Lemes Júnior et al. (2010), descontando o custo de capital da empresa, é o valor presente do fluxo de caixa operacional em um determinado projeto. Este método considera o fluxo de caixa descontado e quanto maior for o VPL, mais rentável é o projeto. O VPL é muito utilizado para avaliar a viabilidade econômico-financeira e o cálculo é realizado empregando a equação a seguir.

$$VPL = (FC_0) + \frac{FC_1}{(1+k)} + \frac{FC_2}{(1+k)^2} + \frac{FC_3}{(1+k)^3} + \frac{FC_4}{(1+k)^4} + \dots + \frac{FC_n}{(1+k)^n} \quad (9)$$

Onde:

FC: é o fluxo líquido de caixa;

k: é o custo de capital;

n: é a vida útil do projeto.

O *FC* é o fluxo líquido de caixa, o *k* é o custo de capital e *n* é a vida útil do projeto. As saídas de caixa são representadas por valores negativos. O fundamento do VPL é que se o

projeto está retornando para a empresa uma remuneração ao seu custo de capital, haverá caixa suficiente para pagar os juros e para remunerar os acionistas. O VPL sendo positivo no projeto, a empresa estará aumentando sua riqueza ao aceitá-lo. O projeto de investimento deve ser aceito quando o VPL for maior que zero e rejeitado quando for menor que zero. A tabela 9 apresenta a regra para a avaliação do Valor Presente Líquido (LEMES JÚNIOR et al., 2010).

VPL > 0	Aceita-se o projeto
VPL = 0	Indiferente
VPL < 0	Rejeita-se o projeto

Fonte: Adaptado de Lemes Júnior et al. (2010).

2.5.2 Taxa Interna de Retorno (TIR)

A Taxa Interna de Retorno é o índice que iguala o fluxo de caixa operacional ao valor que deverá ser investido no projeto. A TIR em um investimento é a maior taxa de desconto possível para tornar o Valor Presente Líquido igual a zero. Por meio da TIR, é determinada uma única taxa de retorno para justificar os méritos de um projeto (LEMES JÚNIOR et al., 2010).

Ladeira (2013) descreve que a TIR é independente do mercado externo, dependendo somente dos fluxos de caixa do projeto. É o valor da remuneração do capital investido para que o Valor Presente Líquido seja igual a zero. Quanto maior a sua diferença em relação à taxa de desconto que seria obtida no mercado, mais lucrativo é o projeto. Lemes Júnior et al. (2010) acrescentam que da mesma forma que o VPL, a TIR é um dos índices mais utilizados para a avaliação de viabilidade e o cálculo é realizado empregando a equação a seguir (LEMES JÚNIOR et al., 2010).

$$FC_0 + \frac{FC_1}{(1+TIR)} + \frac{FC_2}{(1+TIR)^2} + \frac{FC_3}{(1+TIR)^3} + \frac{FC_4}{(1+TIR)^4} + \dots + \frac{FC_n}{(1+TIR)^n} = 0 \quad (10)$$

Onde:

FC : é o fluxo líquido de caixa.

Lemes Júnior et al. (2010) descrevem que um investimento é viável quando a sua Taxa Interna de Retorno for igual ou superior ao custo de capital (k_e). Caso o valor da TIR seja menor, o projeto deve ser rejeitado. A tabela 10 apresenta a regra para a avaliação da TIR.

Tabela 10 – Regra da Taxa Interna de Retorno

$TIR > k_e$	Aceita-se o projeto
$TIR = k_e$	Indiferente
$TIR < k_e$	Rejeita-se o projeto

Fonte: Adaptado de Lemes Júnior et al. (2010).

2.5.3 *Payback* Descontado

Lemes Júnior et al. (2010) definem o *Payback* Descontado como o período de tempo necessário para que o investimento inicial seja recuperado, incluindo os fluxos de caixa descontados. Inclusive, o valor do dinheiro no tempo está sendo levado em consideração e, por consequência, emprega uma taxa de desconto que servirá para verificar o número exato de períodos em que o valor inicial investido é recuperado no projeto.

Geralmente, a taxa de desconto aplicada é a taxa mínima de atratividade, determinada pelo próprio investidor, sendo utilizada como parâmetro para remunerar o que foi desembolsado. Assim, um investimento é aceitável quando o capital que foi aplicado retorna em um tempo igual ou menor que o período definido pela empresa responsável pelo projeto ou seus investidores (LEMES JÚNIOR et al., 2010). A tabela 11 apresenta a forma de avaliação do *Payback* Descontado que é um critério simples de compreensão e de avaliação.

Tabela 11 – Regra do *Payback* Descontado

<i>Payback</i> descontado < período definido pela empresa	Aceita-se o projeto
<i>Payback</i> descontado = período definido pela empresa	Aceita-se o projeto
<i>Payback</i> descontado > período definido pela empresa	Rejeita-se o projeto

Fonte: Adaptado de Lemes Júnior et al. (2010).

3 METODOLOGIA

Neste capítulo são descritas as etapas adotadas para realizar as tarefas, segundo Silva (2013), mais importantes de uma avaliação de viabilidade técnica e econômica que são o estudo de localização da planta e a análise financeira. O primeiro é essencial para definir informações como os níveis de incidência solar e a distância da rede de distribuição elétrica, sendo possível realizar a avaliação financeira prévia de sua viabilidade.

3.1 O ESTUDO DE LOCALIZAÇÃO PARA A IMPLANTAÇÃO DA USINA SOLAR COM O SISTEMA *DISH-STIRLING*

O estudo de localização teve como objetivo definir qual a melhor região do país e, dentro desta região, estabelecer qual seria o local mais adequado para a implantação da usina solar. Foram escolhidas três regiões do Brasil para a realização do estudo de localização: Sul, Sudeste e Nordeste. Em seguida, foi realizada uma análise comparativa para definir qual seria o local mais indicado para construir a planta solar.

Essas três regiões do Brasil foram escolhidas por apresentarem diferentes latitudes e, conseqüentemente, diferentes níveis de incidência solar. A Região Norte foi descartada por não ter uma boa incidência solar e porque a presença da floresta Amazônica impõe restrições à implantação de uma usina desta natureza, limitações definidas pelo Novo Código Florestal (Lei 12.651 de 2012). Por exemplo, este código determina que 80% de um imóvel situado em área de floresta deve manter a vegetação nativa, sem levar em consideração as áreas de preservação permanente. Em relação à Região Centro Oeste, conforme foi observado no Atlas Brasileiro da Energia Solar (PEREIRA et al., 2006), foi descartada por possuir menor incidência solar que a Região Sudeste, apesar de estar aproximadamente na mesma latitude.

Uma tarefa importante foi definir, entre as diversas ferramentas disponíveis, qual seria adotada para o estudo de localização. Em sua publicação, Lozano et al. (2013) relata o sucesso na combinação das ferramentas SIG com as técnicas de análise de decisão multicritério. Lozano et al. (2013) complementa que um SIG oferece ao responsável pela tomada de decisão a possibilidade de realizar a análise, gerenciamento, armazenamento e visualização de toda a informação em uma dimensão geoespacial.

Realizar o processamento de todos os dados necessários para o estudo de localização, principalmente os arquivos de relevo, disponibilizados pela *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) e pelo *United States Geological Survey* (USGS), seria inviável. Estes arquivos são fornecidos no formato GeoTIFF e apresentam uma área de 10 km x 10 km. A execução do estudo de localização com o emprego destes arquivos, abrangendo todo o território nacional não foi possível utilizando o microcomputador com 64 GB de memória RAM, disponível para este trabalho. O processamento dos dados durante a aplicação da Lógica *Fuzzy* na fase final do estudo de localização foi previamente testado em escalas maiores e a ferramenta QGIS não executou as análises devido à falta de memória. Principalmente por esse motivo, o estudo de localização foi dividido em duas partes e a execução da segunda etapa foi realizada em escala municipal.

Na primeira etapa, foram utilizados os dados georreferenciados de Irradiância Direta Normal (DNI) e de população dos municípios com o auxílio da ferramenta QGIS. Com a utilização dessas informações, foram escolhidos três municípios para realizar o estudo de localização mais detalhado. Assim, a aplicação da Lógica *Fuzzy* foi realizada na segunda parte, que está descrita a seguir, apenas com os dados georreferenciados dos municípios escolhidos.

Na segunda parte, foi realizado um levantamento de todos os dados georreferenciados como o posicionamento de linhas de transmissão, a topografia do terreno, as restrições ambientais e as áreas urbanas (centros de consumo), disponibilizados por órgãos governamentais do Brasil e do exterior em formatos suportados pelo QGIS. Para determinar a prioridade de um dado em relação ao outro, foram definidos pesos, seguindo os critérios atribuídos por Carrión et al. (2008), Charabi e Gastli (2011) e Lozano et al. (2013), adequando às informações encontradas para o território brasileiro.

Depois, as informações foram cruzadas no QGIS para encontrar o melhor local para a construção da usina solar dentro dos três municípios das regiões Sul, Sudeste e Nordeste, previamente escolhidos na etapa anterior. As duas etapas do estudo de localização foram realizadas na ferramenta QGIS e estão descritas de forma mais detalhada nas seções 3.1.1 e 3.1.2.

O fluxograma simplificado para a análise da tomada de decisão do estudo de localização, baseada na ferramenta SIG está apresentado a seguir na figura 38, adaptado a partir do fluxo

publicado por Drobne e Lisec (2009). A etapa 1 apresentada na figura 38 se resume na definição dos três municípios que foram escolhidos para a implementação do estudo de localização.

Na etapa 2, o primeiro passo descreve a definição dos critérios e os seus pesos, ou seja, quais os critérios serão utilizados (proximidade de linhas de transmissão, de principais rodovias, etc.) e quais serão os seus pesos, estabelecidos neste trabalho com o emprego do método AHP. O segundo item representa o momento em que foi realizado o cálculo com os dados de todos os critérios e seus pesos, cruzados dentro da ferramenta SIG, apresentando as áreas mais adequadas. Nesta dissertação, essas regiões foram definidas como os locais mais indicados para a construção da usina solar em cada município. O terceiro item se refere a classificação das opções encontradas e, por último, a conclusão de qual seria o município mais recomendado para a implementação do empreendimento.

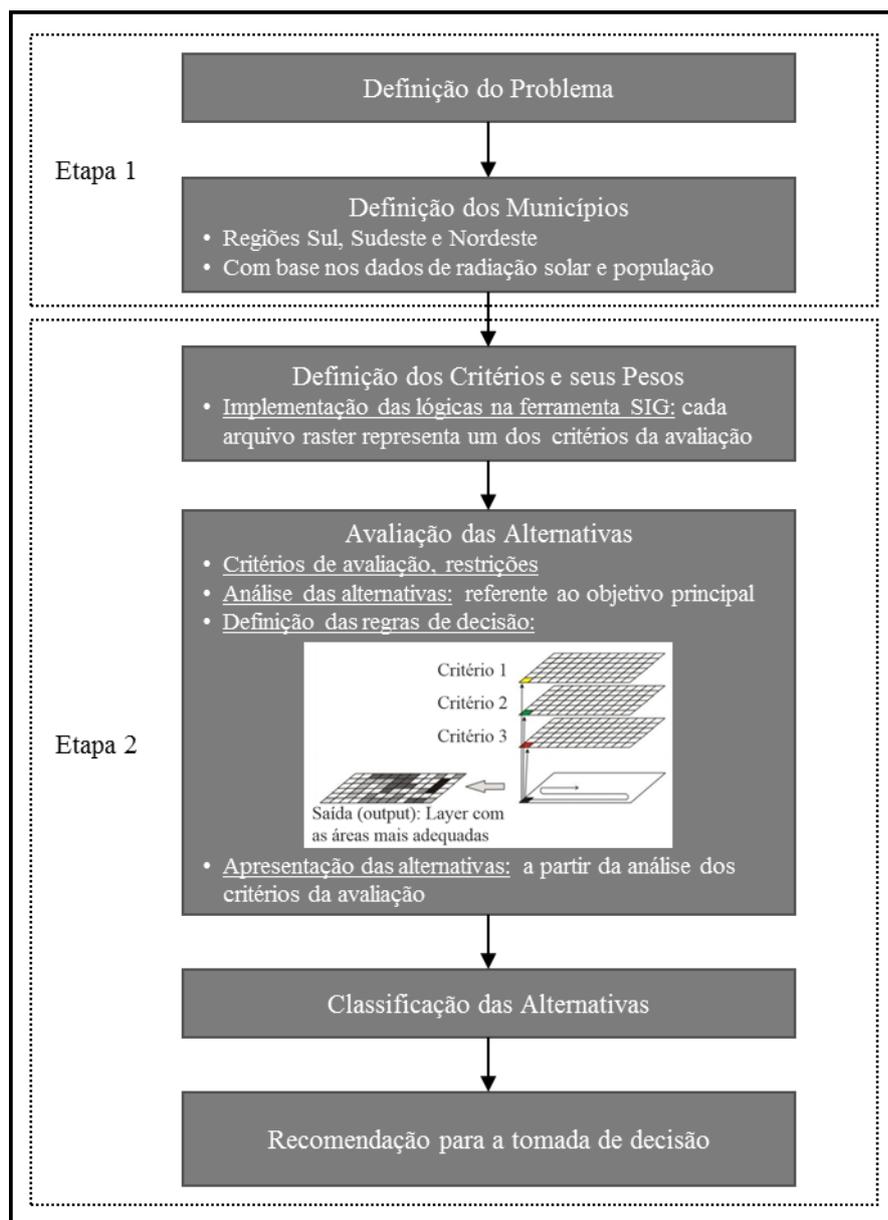


Figura 38 – Fluxograma simplificado do estudo de localização baseado na ferramenta SIG
Fonte: Adaptada de Drobne e Lisec (2009).

Para encontrar o local mais indicado para a implantação da usina solar, foi necessário realizar a aplicação da Lógica *Fuzzy*, ou seja, a execução das funções de associação ou funções de afinidade *Fuzzy* na ferramenta QGIS, efetuando duas tarefas. A primeira consistiu em rasterizar os arquivos inicialmente fornecidos no formato vetorial que é a transformação dos dados georreferenciados vetoriais para o formato matricial. A segunda foi o nivelamento para que todos os arquivos matriciais ficassem com o mesmo tamanho de pixel, pois estavam com diferentes resoluções.

Com a realização destas duas tarefas descritas anteriormente, foi possível criar as funções de afinidade *Fuzzy* para cada subcritério ou variável espacial (proximidade de rodovias,

proximidade de áreas urbanas, etc.) apresentadas no Anexo B. Finalmente, todos os critérios foram combinados em camadas dentro do QGIS com a realização do cálculo final do estudo de localização, que também está apresentado no Anexo B, conforme os passos detalhados na seção 3.1.2.

Dentro do QGIS, para facilitar a análise dos dados georreferenciados, durante a criação dos mapas temáticos, as informações foram distribuídas por classes. Por exemplo, os municípios foram ordenados por classes com diferentes cores, agrupando as cidades por número de habitantes, em ordem decrescente. Quando foi necessário categorizar os dados em classes para realizar a análise, a regra de Sturges foi aplicada. Segundo Amaro et al. (2009), Sturges propôs em 1926 uma regra empírica para definir qual é a quantidade ótima de classes, em relação ao número de observações, sendo uma relação logarítmica, conforme a equação 11.

$$k = 1 + 3,3 \log n \quad (11)$$

Onde:

k : é a quantidade de classes;

n : é o número da amostra.

A amplitude de cada intervalo ou classe é definida, da mesma forma, seguindo a regra de Sturges, utilizando a equação 12:

$$h = \frac{A}{k} \quad (12)$$

Onde:

h : é a amplitude da classe;

A : é igual a [valor máximo da amostra – valor mínimo da amostra];

k : é a quantidade de classes.

Amaro et al. (2009) relata que existem muitas discussões relevantes sobre a regra de Sturges e que existem mecanismos para modificar o número de classes ou a amplitude do intervalo, de acordo com a necessidade do utilizador. Por exemplo, quando existe um valor máximo extremo, este pode ser retirado do cálculo para que a amplitude da classe não fique

muito grande, distorcendo a apresentação dos dados. Assim, Amaro et al. (2009) destaca que é sempre importante ter uma atitude crítica em relação ao resultado.

3.1.1 Etapa 1 - Escolha dos municípios de cada Região do Brasil para o estudo detalhado

Nesta etapa, a partir dos dados de incidência solar e de população das cidades, foram escolhidos três municípios, um em cada uma das regiões Nordeste, Sudeste e Sul, que passaram por uma análise mais detalhada. O objetivo era realizar um estudo de abrangência nacional, incluindo cidades posicionadas em distintas localizações geográficas.

A radiação solar foi utilizada porque, segundo Porfirio e Ceballos (2013), a Irradiância Direta Normal (DNI) é a única componente da radiação solar que é passível de ser concentrada, sendo, portanto, o fator mais importante para a geração de energia elétrica com a utilização de plantas CSP.

A população também foi levada em consideração, pois cidades com população maiores possuem uma melhor infraestrutura de estradas e linhas de transmissão mais próximas e também possuem uma maior oferta de mão de obra qualificada para o setor de construção e montagem industrial. Além disso, em escala nacional, informações em formato vetorial de áreas urbanas foram encontradas apenas para municípios com mais de 100.000 habitantes, permitindo a análise de forma completa somente em cidades acima deste limite.

Os dados georreferenciados de radiação do Sol empregados no estudo foram obtidos no portal do Laboratório de Modelagem e Estudos de Recursos Renováveis de Energia (LABREN), do Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CCST) e do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e se referem à Irradiância Direta Normal (DNI).

As informações de população dos municípios das regiões Sul, Sudeste e Nordeste foram extraídas do Censo 2010 do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Inicialmente, foram identificados os tamanhos das populações das capitais regionais de cada região. Segundo o IBGE, capitais regionais são aquelas que polarizam uma parcela da região onde se encontram, influenciando inúmeras pequenas e médias cidades, bem como as áreas rurais ao seu redor. Adotou-se, então, o critério de que apenas os municípios com população igual ou maior que a capital regional com a menor população seriam analisados, cidades com população menor foram descartadas. Por exemplo, na Região Sul do Brasil, a capital regional com a menor

população é a cidade de Ijuí que possui 78 mil habitantes. Assim, foram analisadas apenas cidades com população igual ou maior 78 mil habitantes.

Os detalhes dos arquivos de dados utilizados na primeira etapa do estudo podem ser vistos na tabela 12.

Tabela 12 – Os dados georreferenciados da parte 1

Arquivo	Formato do arquivo	Resolução Espacial	Sistema de coordenadas geográficas	Fonte	Ano
Irradiância Direta Normal (DNI)	<i>Shapefile</i> (.shp)	0,1° x 0,1° (Aprox. 10 x 10 km)	SIRGAS 2000 / EPSG 4674	LABREN / CCST / INPE	2017
Polígonos Municípios do Brasil	<i>Shapefile</i> (.shp)	20 x 20 m	SIRGAS 2000 / EPSG 4674	IBGE	2010

Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Como resultado da etapa 1, foram escolhidas três cidades, uma em cada região do país: Sul, Sudeste e Nordeste. A escolha dos municípios para aplicar o estudo detalhado foi realizada utilizando o QGIS e seguindo os seguintes passos:

- 1) Para cada Região, Sul, Sudeste e Nordeste, foram identificados todos os municípios com população igual ou superior a da capital regional com menor população. Estes municípios foram categorizados em classes utilizando-se, para isto, a regra de Sturges;
- 2) Para cada Região, os municípios selecionados na etapa anterior foram categorizados segundo os dados de Irradiância Direta Normal (DNI). Desta forma, foram identificados dentro de cada Região os municípios classificados como os de maior incidência solar. O número de classes e suas amplitudes foram definidos pela regra de Sturges;
- 3) Finalmente, pela análise da população dos municípios identificados na etapa anterior como sendo os de maior incidência solar, foram eleitos os três municípios, um de cada Região, candidatos a um estudo mais detalhado.

3.1.2 Etapa 2 - Estudo detalhado para definir o local mais indicado para a usina solar

Na segunda etapa deste estudo de localização, todos os dados georreferenciados levantados como as principais rodovias existentes nos municípios, as linhas de transmissão de energia elétrica e a topografia do terreno foram utilizados para encontrar o local mais indicado

para a construção da planta CSP. As informações dos arquivos aplicados no estudo estão detalhadas a seguir na tabela 13.

Tabela 13 – Os dados georreferenciados da parte 2

Arquivo	Formato do arquivo	Resolução espacial	Sistema de coordenadas geográficas	Fonte	Ano
Modelos digitais de elevação	GeoTIFF (.tif)	30 x 30 m	WGS 84 / EPSG 4326	SRTM / NASA	2014
Linhas de transmissão	<i>Shapefile</i> (.shp)	Não informada	SIRGAS 2000 / EPSG 4674	ANEEL	2018
Principais rodovias	<i>Shapefile</i> (.shp)	Não informada	SIRGAS 2000 / EPSG 4674	DNIT	2015
Irradiância Direta Normal (DNI)	<i>Shapefile</i> (.shp)	0,1° x 0,1° (Aprox. 10 x 10 km)	SIRGAS 2000 / EPSG 4674	LABREN / CCST / INPE	2017
Áreas urbanizadas: cidades com mais de 100.000 habitantes	<i>Shapefile</i> (.shp)	Não informada	SIRGAS 2000 / EPSG 4674	IBGE	2015
Bioma Pampa	<i>Shapefile</i> (.shp)	50 x 50 m	SIRGAS 2000 / EPSG 4674	MMA	2002
Bioma Caatinga	<i>Shapefile</i> (.shp)	50 x 50 m	SIRGAS 2000 / EPSG 4674	MMA	2002
Bioma Cerrado	<i>Shapefile</i> (.shp)	50 x 50 m	SIRGAS 2000 / EPSG 4674	MMA	2002
Bioma Mata Atlântica	<i>Shapefile</i> (.shp)	50 x 50 m	SIRGAS 2000 / EPSG 4674	MMA	2002
Unidades de Conservação (UC)	<i>Shapefile</i> (.shp)	Não informada	WGS 84 / EPSG 4326	MMA	2016

Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Os primeiros arquivos chamados na tabela 13 de Modelos digitais de elevação foram obtidos no portal *Earth Explorer* do *United States Geological Survey* (USGS), onde é disponibilizado o material gerado no projeto *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM). Essas imagens em alta resolução foram geradas por meio de um esforço internacional de pesquisa para a obtenção de um banco de dados da topografia da Terra e serviram de base para a avaliação da declividade e do aspecto (orientação) do terreno.

As informações de linhas de transmissão e das principais rodovias nacionais foram encontradas, respectivamente, nos sítios eletrônicos da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT). O *shapefile* de Irradiância Direta Normal, utilizado na parte 1 deste estudo, foi fornecido em uma parceria de três órgãos brasileiros: LABREN, CCST e INPE.

O Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística fornece em seu portal dados georreferenciados de áreas urbanas em municípios com populações acima de 100.000 habitantes. Este material foi utilizado para excluir regiões urbanizadas como possíveis locais para a construção da planta solar e também para limitar a distância máxima em relação a centros urbanos, conforme descrito de forma mais detalhada na seção 3.1.2.2.

Os arquivos dos biomas brasileiros com importantes dados de regiões com rios, lagoas, áreas urbanas, com agricultura, pecuária e, principalmente, locais com ecossistemas sensíveis e que devem ser protegidos foram disponibilizados pelo Ministério do Meio Ambiente (MMA). Além disso, a localização de todas as Unidades de Conservação (UC) nos níveis municipal, estadual e federal foi encontrada também no portal do MMA.

3.1.2.1 Definição dos pesos dos critérios e dos subcritérios para a aplicação do método AHP

A partir dos dados georreferenciados disponíveis para os municípios selecionados na primeira parte do estudo de localização, foi possível iniciar a tarefa estruturar a hierarquia de decisão com os dados disponibilizados para a aplicação do *Analytic Hierarchy Process* (AHP). Esse é o passo inicial, pois definindo a hierarquia com os critérios e subcritérios é possível realizar a comparação par a par, proposta no método.

Baseados nos critérios e subcritérios propostos por Carrión et al. (2008), Charabi e Gastli (2011) e Lozano et al. (2013) e considerando-se a necessidade de adaptá-los às informações disponíveis no Brasil, foram estabelecidos, em ordem de importância, os seguintes critérios: “Proximidade”, “Radiação Solar”, “Terreno” e “Cobertura e Uso do Solo”. Lozano et al. (2013) justifica que é muito importante fazer uma avaliação correta do local, pois influencia fortemente na viabilidade da planta.

O critério “Proximidade” foi considerado o mais importante e seus subcritérios são “Proximidade de linhas de transmissão”, “Proximidade de principais rodovias” e “Proximidade de áreas urbanas”. Segundo os autores estudados, a possibilidade de definir um local muito próximo de linhas de transmissão para garantir o escoamento da energia produzida, sem a necessidade de construir uma nova rede elétrica é fundamental. Também, segundo os autores, evitar a construção de estradas de acesso ao ponto de construção é muito importante. Finalmente, a redução da distância de áreas urbanas é um ponto relevante a ser considerado,

pois reduz perdas de transmissão de energia elétrica e diminui o deslocamento dos trabalhadores responsáveis pela construção e depois pela operação da planta solar.

O segundo critério em ordem de importância definido neste estudo é a “Radiação solar”, havendo somente um subcritério que é o nível de “Irradiância Direta Normal”, conhecido como DNI. Na pesquisa realizada para a definição dos critérios, este é o item de maior importância na maioria dos artigos da área. Entretanto, Lozano et al. (2013) relata em seu trabalho que devido ao desenvolvimento da tecnologia de geração solar que hoje possui maior eficiência e também em virtude das excelentes condições climáticas encontradas na região de seu estudo, o critério climático foi determinado como o segundo critério mais importante.

Nesta pesquisa foi seguida a mesma linha de pensamento de Lozano et al. (2013), entrando como o segundo fator mais importante no método AHP. Como a radiação solar foi utilizada como o fator fundamental para a escolha do município que receberia o estudo detalhado, foi constatado que a variação dentro do seu próprio território era praticamente nula.

Em terceiro lugar na hierarquia de relevância está o critério “Terreno”, que está dividido em dois subcritérios, a saber, “Declividade” e “Aspecto do terreno”. No caso da “Declividade”, um local com menor inclinação é mais apropriado, evitando um aumento nos custos de construção da planta e aumentando a produção de energia elétrica, pois não haverá barreira natural para a incidência solar. Diferentemente ao proposto pelos autores consultados, em relação ao “Aspecto do terreno”, a melhor orientação é o Norte, pois a usina solar sob análise neste trabalho está situada no hemisfério Sul.

Finalmente, o último na ordem de importância é o critério “Cobertura e uso do solo”. Este critério se refere basicamente às restrições ambientais, ou seja, locais onde por força da lei a planta CSP não pode ser instalada. As áreas urbanas também foram excluídas do estudo, pois, por conta das construções dentro das cidades, os concentradores solares poderiam ficar suscetíveis à incidência de sombras. O único subitem incluído no estudo de localização foi o subcritério chamado de “Proximidade de áreas com água e reflorestamento”. Estas áreas foram excluídas neste estudo. As áreas com água, como rios e lagoas são protegidas por legislações ambientais. Enquanto as áreas de reflorestamento foram excluídas por haver a possibilidade de formar locais com sombra. Além disso, este critério está adicionando uma distância mínima destes locais: no caso da água para respeitar legislações ambientais e no caso das regiões com reflorestamento porque áreas adjacentes também podem sofrer com a formação de sombras.

Os demais subitens do critério “Cobertura e uso do solo” apresentados a seguir na figura 39 foram definidas como áreas de exclusão, ou seja, a usina não poderia ser construída em regiões identificadas como “Ecossistemas sensíveis”, “Áreas com água” e “Áreas urbanas”.

A figura 39 apresenta os critérios e os subcritérios propostos para o estudo de localização da usina solar.

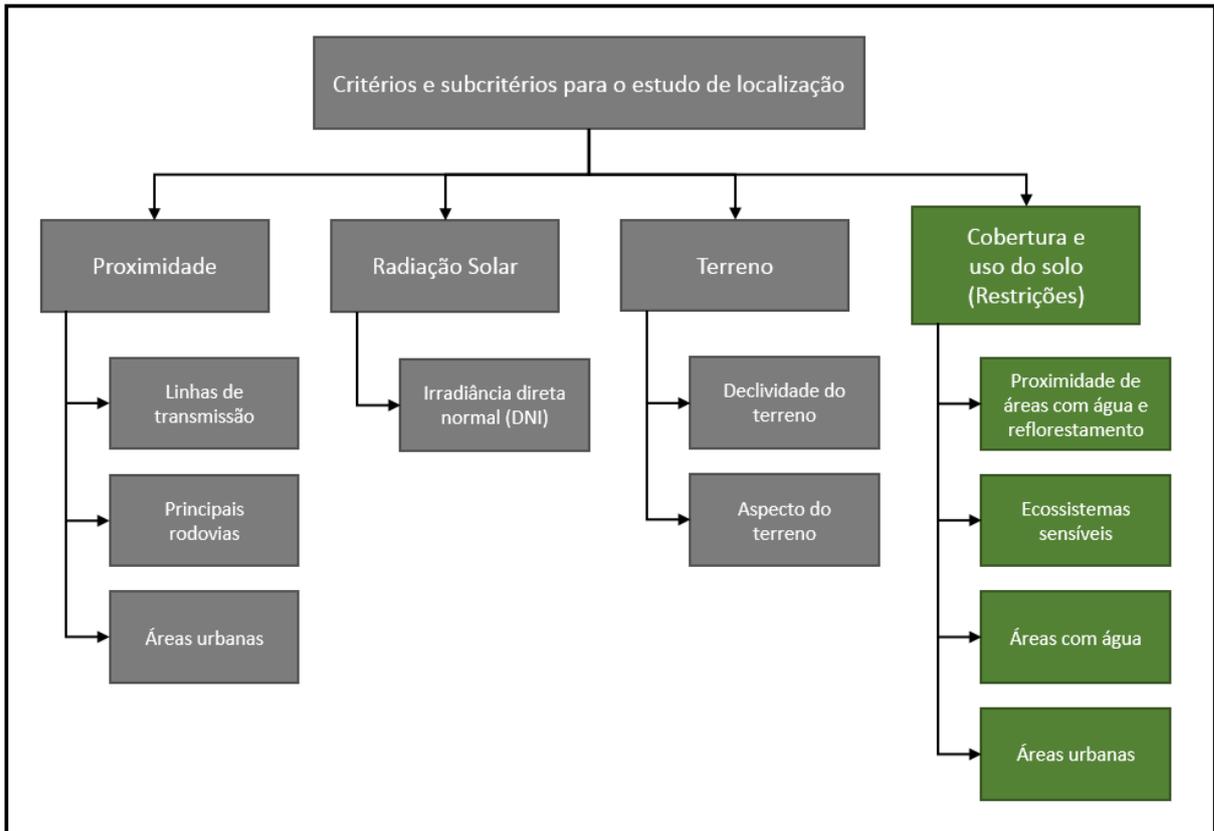


Figura 39 – Os critérios e subcritérios para o estudo de localização

Fonte: Elaborada pelo autor (2018).

Após a definição dos critérios e dos subcritérios, o passo seguinte da aplicação do método AHP iniciou com a criação da matriz de comparação, baseada na escala fundamental proposta por Saaty (2008), apresentada na tabela 5 desta dissertação e rerepresentada a seguir.

Tabela 5 – A escala fundamental dos números absolutos

Intensidade de Importância	Definição	Explicação
1	Importância igual	Duas atividades contribuem igualmente para o objetivo
2	Importância fraca ou leve	Quando se procura uma condição de compromisso entre duas definições
3	Importância moderada	Experiência e julgamento favorecem ligeiramente uma atividade sobre outra
4	Importância moderada <i>plus</i>	Quando se procura uma condição de compromisso entre duas definições
5	Importância forte	Experiência e julgamento favorecem fortemente uma atividade sobre outra
6	Importância forte <i>plus</i>	Quando se procura uma condição de compromisso entre duas definições
7	Importância muito forte	Uma atividade é favorecida muito fortemente sobre outra e seu domínio é demonstrado na prática
8	Importância muito, muito forte	Quando se procura uma condição de compromisso entre duas definições
9	Importância extrema	A evidência de uma atividade sobre outra é da mais alta ordem possível de afirmação
Recíprocas acima	Se a atividade <i>i</i> tiver um dos números acima diferentes de zero atribuídos a ela quando comparado com a atividade <i>j</i> , então <i>j</i> tem o valor recíproco quando comparado com <i>i</i>	Uma suposição razoável
1.1 – 1.9	Se as atividades são muito próximas	Pode ser difícil atribuir o melhor valor, mas quando comparado com outras atividades contrastantes, o tamanho dos pequenos números não seria muito notável, mas ainda podem indicar a importância relativa das atividades

Fonte: Adaptado de Saaty (2008).

Os julgamentos, seguindo o critério de Lozano et al. (2013), foram realizados par a par, conforme está apresentado na tabela 14. A montagem dessa matriz foi realizada incluindo os quatro critérios na primeira coluna e também na primeira linha que foram preenchidos por ordem de importância. Na diagonal, todos os campos são preenchidos com o valor 1, porque é o cruzamento do mesmo critério. Nos demais campos da matriz foi realizado um cruzamento dos critérios utilizando a “Escala fundamental dos números absolutos” apresentada por Saaty (2008). Por exemplo, o cruzamento dos critérios “Cobertura e uso do solo” e “Proximidade” é $1/9 = 0,11$ e, de forma contrária, “Proximidade” e “Cobertura e uso do solo” é $9/1 = 9$. A linha total apresenta os somatórios de cada coluna.

Tabela 14 – Matriz de comparação par a par dos critérios

Crítérios	Proximidade	Radiação solar	Terreno	Cobertura e uso do solo
Proximidade	1,00	3,00	5,00	9,00
Radiação solar	0,33	1,00	3,00	5,00
Terreno	0,20	0,33	1,00	3,00
Cobertura e uso do solo	0,11	0,20	0,33	1,00
Total	1,64	4,53	9,33	18,00

Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Em seguida, a matriz de comparação par a par foi normalizada. Para isto, cada elemento da matriz foi dividido pelo valor total de sua respectiva coluna. Depois, foi realizado o somatório dos elementos da linha e o Vetor prioridade normalizado (W_j) calculou-se dividindo cada elemento do somatório pelo valor total de sua coluna. Finalmente, a partir do Vetor prioridade normalizado definiu-se o peso final de cada um dos critérios. Os resultados destes cálculos estão na tabela 15.

Tabela 15 – Matriz de comparação par a par normalizada dos critérios

Crítérios	Proximidade	Radiação solar	Terreno	Cobertura e uso do solo	Somatório dos elementos da linha $\Sigma a_{i,j}$	Vetor prioridade normalizado (W_j)	Peso final dos critérios (%)
Proximidade	0,61	0,66	0,54	0,50	2,31	0,5770	57,70
Radiação solar	0,20	0,22	0,32	0,28	1,02	0,2553	25,53
Terreno	0,12	0,07	0,11	0,17	0,47	0,1172	11,72
Cobertura e uso do solo	0,07	0,04	0,04	0,06	0,20	0,0505	5,05
Total					4,00		100,00

Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Após o cálculo dos Vetores prioridade normalizados, os pesos dos critérios ficaram definidos da seguinte forma: “Proximidade” (57,70%), “Radiação solar” (25,53%), “Terreno” (11,72%) e “Cobertura e uso do solo” (5,05%). Depois, para realizar o cálculo de consistência, foi encontrado o Autovalor máximo (λ_{max}), efetuando a multiplicação da matriz original de comparação par a par dos critérios (tabela 16) pelo Vetor prioridade normalizado.

Tabela 16 – Cálculo do Autovalor máximo (λ_{\max})

Matriz de comparação par a par dos critérios				Vetor prioridade normalizado	
1,00	3,00	5,00	9,00	0,5770	2,3834
0,33	1,00	3,00	5,00	0,2553	1,0498
0,20	0,33	1,00	3,00	0,1172	0,4683
0,11	0,20	0,33	1,00	0,0505	0,2037
				Autovalor máximo (λ_{\max}) 4,1053	

Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

O Autovalor máximo encontrado foi igual a 4,1053. Assim, o Índice de Consistência ou *Consistency Index* (CI) pôde ser calculado utilizando a equação 5, sendo encontrado um valor igual a 0,0367. Aplicando a equação 6, definida como o quociente entre o CI encontrado e o valor do Índice de Consistência Randômico ou *Random Consistency Indexes* (RI) foi possível encontrar a Razão de Consistência ou *Consistency Ratio* (CR) com um valor de 0,0407. Segundo Carrión et al. (2008), se o CR é menor do que 0,10, então os dados definidos na Matriz de comparação par a par dos critérios estão consistentes.

O mesmo processo foi utilizado para a obtenção dos pesos proporcionais dos subcritérios, uma vez que os critérios já estavam com os pesos definidos. Para a definição dos subcritérios de “Proximidade” foi elaborada uma matriz de ordem três para comparar a “Proximidade de linhas de transmissão”, “Proximidade de principais rodovias” e “Proximidade de áreas urbanas”. A tabela 17 apresenta a matriz de comparação par a par, seguindo também a “Escala fundamental dos números absolutos” apresentada por Saaty (2008).

Tabela 17 – Matriz de comparação par a par dos subcritérios de proximidade

Critérios	Proximidade de linhas de transmissão	Proximidade de principais rodovias	Proximidade de áreas urbanas
Proximidade de linhas de transmissão	1,00	3,00	5,00
Proximidade de principais rodovias	0,33	1,00	3,00
Proximidade de áreas urbanas	0,20	0,33	1,00
Total	1,53	4,33	9,00

Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

A próxima etapa na definição dos pesos dos subcritérios de “Proximidade” foi composta pela criação da matriz de comparação par a par foi normalizada. Assim, foi possível calcular o

Vetor prioridade normalizado e encontrar os pesos de cada um dos subcritérios. Em seguida, os pesos dos subcritérios foram recalculados a partir do peso de 57,70% do critério “Proximidade” que foi encontrado na etapa anterior. Os dados dos subcritérios de “Proximidade” são apresentados na tabela 18.

Tabela 18 – Matriz de comparação par a par normalizada dos subcritérios de proximidade

Critérios	Proximidade de linhas de transmissão	Proximidade de principais rodovias	Proximidade de áreas urbanas	Somatório dos elementos da linha Σa_{ij}	Vetor prioridade normalizado (W_j)	Peso dos subcritérios (%)	Peso final dos subcritérios (%)
Proximidade de linhas de transmissão	0,65	0,69	0,56	1,90	0,6340	63,40	36,58
Proximidade de principais rodovias	0,22	0,23	0,33	0,78	0,2600	26,00	15,00
Proximidade de áreas urbanas	0,13	0,08	0,11	0,32	0,1060	10,60	6,12
Total				3,00		100,00	57,70

Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

A última coluna da tabela 18 apresenta os pesos desses subcritérios em relação ao peso do critério de “Proximidade” que é de 57,70%. Os pesos encontrados foram: “Proximidade de linhas de transmissão” (36,58%), “Proximidade de principais rodovias” (15,00%) e “Proximidade de áreas urbanas” (6,12%).

Tabela 19 – Cálculo do Autovalor máximo (λ_{\max}) dos subcritérios de proximidade

Matriz de comparação par a par dos subcritérios de proximidade			Vetor prioridade normalizado	
1,00	3,00	5,00	0,6340	1,9440
0,33	1,00	3,00	0,2600	0,7873
0,20	0,33	1,00	0,1060	0,3186

Autovalor máximo (λ_{\max}) 3,0499

Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Um Autovalor máximo igual a 3,0499 foi encontrado no cálculo dos subcritérios de “Proximidade”. O valor encontrado do Índice de Consistência (CI) foi de 0,0250 e a Razão de Consistência (CR) de 0,0431. Novamente, o CR é menor do que 0,10, corroborando com a definição apresentada por Carrión et al. (2008) em relação à consistência dos dados empregados na Matriz de comparação par a par dos subcritérios de “Proximidade”.

No caso do critério “Terreno”, criou-se uma matriz de ordem dois para realizar a comparação da “Declividade do terreno” e do “Aspecto do terreno”. A tabela 20 apresenta a matriz de comparação par a par, novamente utilizando a metodologia de Saaty (2008) com a “Escala fundamental dos números absolutos”.

Tabela 20 – Matriz de comparação par a par dos subcritérios de terreno

Critérios	Declividade do terreno	Aspecto do terreno
Declividade do terreno	1,00	2,00
Aspecto do terreno	0,50	1,00
Total	1,50	3,00

Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

A definição dos pesos dos subcritérios de “Terreno” seguiu com a elaboração da matriz de comparação par a par foi normalizada (tabela 21). Os Vetores prioridade normalizados foram calculados e também os pesos dos subcritérios. A última coluna da tabela 21 apresenta os pesos dos subcritérios em relação ao peso de 11,72% do critério “Terreno”.

Tabela 21 – Matriz de comparação par a par normalizada dos subcritérios de terreno

Critérios	Declividade do terreno	Aspecto do terreno	Somatório dos elementos da linha $\sum a_{ij}$	Vetor prioridade normalizado (W_j)	Peso dos subcritérios (%)	Peso final dos subcritérios (%)
Declividade do terreno	0,67	0,67	1,34	0,6667	66,67	7,81
Aspecto do terreno	0,33	0,33	0,66	0,3333	33,33	3,91
Total			2,00		100,00	11,72

Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

A “Declividade do terreno” ficou com um peso de 7,81% e o “Aspecto do terreno” com 3,91%. A última etapa de definição dos subcritérios de “Terreno” foi composta pela avaliação da consistência para a definição desses subcritérios, a partir do cálculo do Autovalor máximo apresentado na tabela 22.

Tabela 22 – Cálculo do Autovalor máximo (λ_{\max}) dos subcritérios de terreno

Matriz de comparação par a par dos subcritérios de terreno		Vetor prioridade normalizado	
1,00	2,00	0,6667	1,33
0,50	1,00	0,3333	0,67
Autovalor máximo (λ_{\max})			2,00

Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

No caso dos subcritérios de “Terreno”, o Autovalor máximo encontrado foi de 2,00 e, tanto o Índice de Consistência (CI) quanto a Razão de Consistência (CR) ficaram com um valor igual a zero. Mais uma vez o cálculo da consistência se mostrou positivo, pois ficou abaixo de 0,10.

Como os critérios Radiação solar e Cobertura e uso do solo possuíam apenas um subcritério, para estes fatores não foi necessário aplicar novamente a metodologia AHP para encontrar os pesos. Assim, os pesos finais de todos os subcritérios e também os cálculos do Autovalor máximo (λ_{\max}), Índice de Consistência (CI) e da Razão de Consistência (CR), estão apresentados a seguir na tabela 23.

Tabela 23 – Definição de λ_{\max} , CI, CR e dos pesos finais dos subcritérios

Subcritérios	λ_{\max}	CI	CR	Peso final dos subcritérios
Proximidade de linhas de transmissão				36,58%
Proximidade de principais rodovias	3,05	0,0250	0,0431	15,00%
Proximidade de áreas urbanas				6,02%
Irradiância Direta Normal (DNI)				25,53%
Declividade do terreno	2,00	0,0	0,0	7,81%
Aspecto do terreno				3,91%
Proximidade de áreas com água e com reflorestamento				5,05%

Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Mais uma vez, como os valores de Razão de Consistência foram menores que 0,10 para as duas comparações par a par dos subcritérios de Proximidade e de Terreno, os dados estão consistentes.

3.1.2.2 Definição dos indicadores *Fuzzy* do grau de aptidão

O próximo passo da segunda parte do estudo de localização, foi definir os indicadores *Fuzzy* do grau de aptidão que seriam implementados nos arquivos *raster*. Para a criação de cada lógica, foi realizada uma pesquisa em trabalhos descritos a seguir, na área de estudos de localização para encontrar a forma mais adequada de criação dos limiares no modelo da análise.

A tabela 24 apresenta os limiares e os pesos de todos os subcritérios utilizados em cada *raster*, ou seja, a informação necessária para realizar o estudo de localização no QGIS. A criação das Lógicas *Fuzzy* e o cálculo final implementado no QGIS, utilizando a Calculadora Raster estão apresentados no Anexo B desta dissertação.

Tabela 24 – Indicadores *Fuzzy* do grau de aptidão

Crítérios	Subcrítérios (Variáveis espaciais)	Limiares	Situação	Pesos
Proximidade	Proximidade de linhas de transmissão	Distância < 1 km	Plenamente apto	36,58%
		Distância entre 1 km e 10 km	Apto	
		Distância > 10 km	Inapto	
	Proximidade de principais rodovias	Distância < 1 km	Plenamente apto	15,00%
		Distância entre 1 km e 3 km	Apto	
		Distância > 3 km	Inapto	
	Proximidade de áreas urbanas	Distância < 5 km	Plenamente apto	6,12%
		Distância entre 5 km e 75 km	Apto	
		Distância > 75 km	Inapto	
Radiação solar	Irradiância Direta Normal (DNI)	6465 W/m ²	Plenamente apto	25,53%
		1778 W/m ²	Inapto	
Terreno	Declividade do terreno	Inclinação = 0°	Plenamente apto	7,81%
		Inclinação entre 0° e 30°	Apto	
		Inclinação > 30°	Inapto	
	Aspecto do terreno	Entre 0° (N) e 45° (NE) e entre 315° (NO) e 360° (N)	Apto	3,91%
Entre 45° (NE) e 315° (NO)		Inapto		
Cobertura e uso do solo	Proximidade de áreas com água e com reflorestamento	Distância > 0,5 km	Plenamente apto	5,05 %
		Distância entre 0,2 km e 0,5 km	Apto	
		Distância < 0,2 km	Inapto	
	Ecosistemas sensíveis	Zonas de Exclusão		
	Áreas com água	Zonas de Exclusão		
	Áreas urbanas	Zonas de Exclusão		

Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

A construção de uma linha de transmissão é um dos fatores que mais pode impactar no custo da usina solar. Da mesma forma, a construção de estradas para o acesso à planta também tem certa influência em custo. Assim, é desejável que seja construída o mais próximo possível de redes elétricas e de principais rodovias. Os valores máximos de distância aceitáveis foram definidos com base em dados propostos por Carrión et al. (2008) e Lozano et al. (2013).

Em relação à proximidade de áreas urbanas, Lameira et al. (2015) definem que deslocamentos diários de trabalhadores com distâncias menores ou iguais a 150 quilômetros, somando a ida e a volta, são considerados de curta distância. Desta maneira, neste trabalho, a distância máxima de um centro urbano definida para a construção da usina solar é de 75 quilômetros, distanciamento considerado viável para o deslocamento diário das pessoas que trabalhariam na construção e futuramente na operação da usina solar.

No caso da Irradiância Direta Normal, o cálculo foi definido com base no maior e no menor nível de incidência solar registrado em todo o território brasileiro, 6465 w/m² e 1778 w/m², respectivamente. Assim, quanto maior a incidência solar no terreno, dentro dos valores máximo e mínimo apresentados na tabela 24, melhor seria considerado o local para a construção da planta solar.

A declividade é um fator limitante para a implementação de um projeto, pois terrenos com inclinações elevadas podem inviabilizar a construção. Além disso, existe um limitador ambiental que define todos os terrenos com inclinação maior que 45° são considerados Áreas de Preservação Permanente (APP). Neste trabalho foi empregado um limite de 30° de inclinação, seguindo o mesmo proposto por Carrión et al. (2008) em sua publicação. Para o aspecto (orientação) foi seguida a definição dos mesmos autores, sendo aptos somente terrenos com uma orientação entre Noroeste (NO) e Nordeste (NE).

Em relação às restrições definidas neste trabalho, foi gerado um subcritério para restringir a construção da planta solar nas proximidades de recursos hídricos que também são consideradas áreas de APP, sendo definido o caso mais restritivo, excluindo áreas com distâncias menores de 200 metros de áreas com água. No mesmo subcritério foi estabelecido como área de restrição, regiões próximas de terrenos com reflorestamento, mas devido a criação de locais com sombra que podem prejudicar a geração de energia elétrica.

Além do subcritério de restrição das proximidades de regiões com água e com reflorestamento, todas as áreas urbanas de cidades inseridas dentro das três regiões do Brasil escolhidas para o estudo foram desconsideradas, ou seja, foram definidas como áreas de exclusão para este estudo, pois a incidência de sombras pode ser grande, geradas por edificações dentro das cidades.

No quesito ambiental, a avaliação para definir quais áreas seriam desclassificadas (excluídas) para a construção da usina foi realizada consultando as leis em vigor que são citadas

a seguir. Assim, foram desconsideradas para o estudo de localização todas as Unidades de Conservação (UC), Áreas de Preservação Permanente (APP), além das regiões de Mata Atlântica, Cerrado e Caatinga.

As Unidades de Conservação são divididas em dois grupos, segundo a Lei Federal nº 9.985/2000, de 18 de julho de 2000. No primeiro estão as Unidades de Proteção Integral que são: Estações Ecológicas, Reservas Biológicas, Parques Nacionais, Monumentos Naturais e Refúgios de Vida Silvestre. No segundo grupo, estão as Unidades de Uso Sustentável: Áreas de Proteção Ambiental, Áreas de Relevante Interesse Ecológico, Florestas Nacionais, Reservas Extrativistas e de Fauna, Reservas de Desenvolvimento Sustentável e Reservas Particulares do Patrimônio Natural.

As Áreas de Preservação Permanente e as Reservas Legais foram definidas pela Lei Federal nº 12.651/2012, de 25 de maio de 2012, chamada de Novo Código Florestal. As APP incluem rios e suas margens, nascentes, encostas com inclinação maiores que 45°, topos de morros e manguezais. As Reservas Legais são áreas localizadas no interior de propriedades rurais que devem ser preservadas com cobertura de vegetação nativa, mas devido à grande dificuldade de acesso a informações de localização, pois os locais são definidos pelos proprietários das terras, essas áreas foram desconsideradas do estudo.

As regiões com Mata Atlântica e que foram consideradas zonas de exclusão neste trabalho estão definidas pela Lei Federal nº 11.428/2006, de 22 de dezembro de 2006. Segundo esta lei, as delimitações das formações florestais nativas e dos ecossistemas associados estão definidas em mapa do IBGE. São elas: Mata de Araucárias, Floresta Ombrófila Aberta, Floresta Estacional Semidecidual e Floresta Estacional Decidual. Além disso, estão incluídos os manguezais, as vegetações de restingas, campos de altitude, brejos interioranos e encaves florestais do Nordeste. Os biomas Cerrado e Caatinga ainda não possuem leis federais específicas para a conservação.

3.1.2.3 Execução do estudo de localização na ferramenta GIS

Como o último passo da segunda parte do estudo de localização, se tornou necessário organizar as atividades que deveriam ser realizadas dentro do QGIS 2.18.18, ferramenta GIS utilizada neste trabalho. Antes da execução do estudo propriamente dito, foi elaborado um macroprocesso, mostrado na figura 40, com as principais tarefas para atingir o objetivo final.

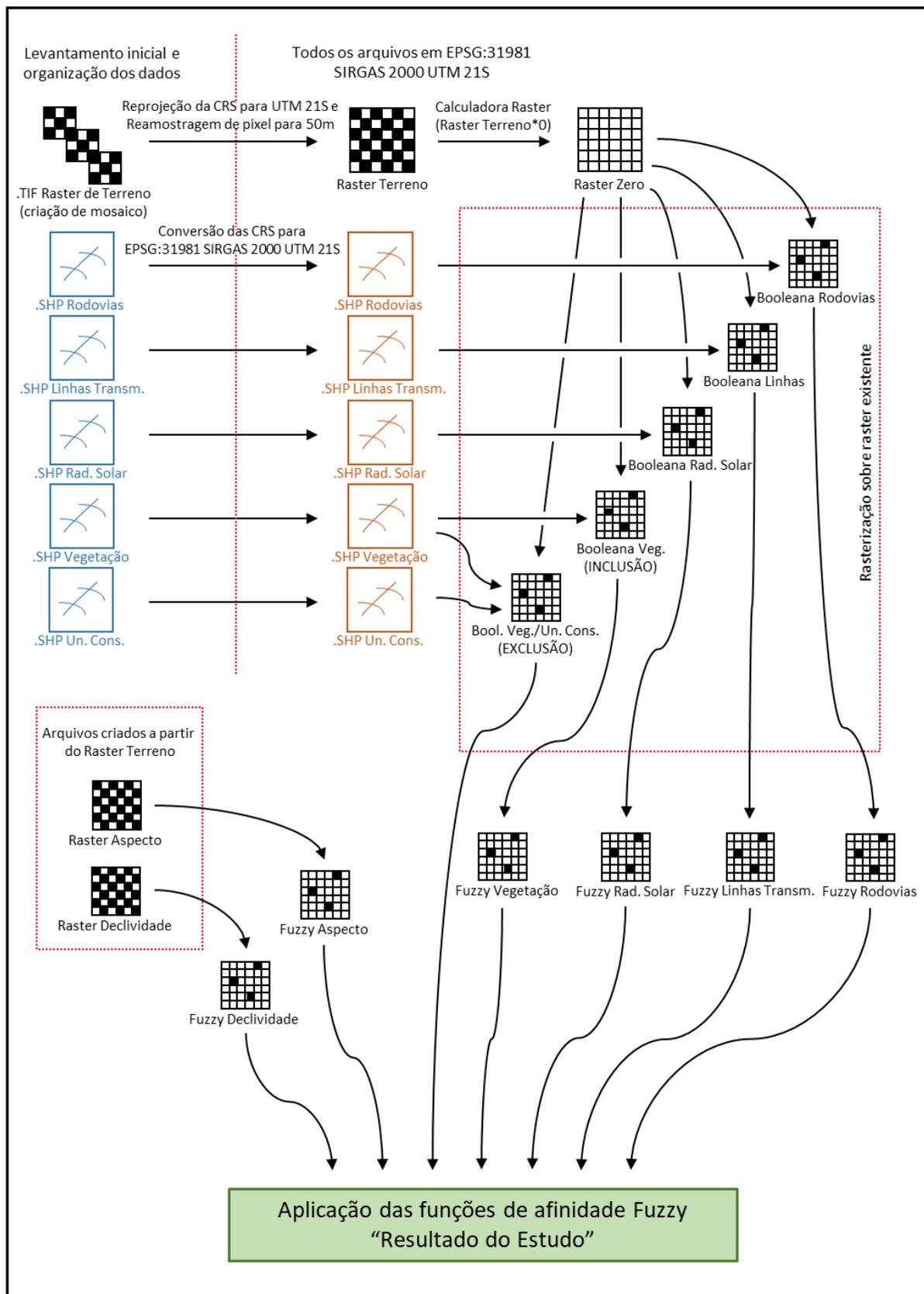


Figura 40 – Macroprocesso da segunda parte do estudo de localização
 Fonte: Elaborada pelo autor (2018).

Primeiramente, todos os arquivos vetoriais passaram por um processo de transformação de um sistema angular de coordenadas geográficas para um projetado. O Sistema de Coordenadas de Referência ou *Coordinate Reference System* (CRS) foi convertido de graus para metros, colocando no fuso UTM (*Universal Transverse Mercator*), SIRGAS 2000.

Os arquivos de elevação obtidos no portal da *United States Geological Survey* em formato GeoTIFF estavam nas coordenadas angulares WGS 84 (*World Geodetic System*) e também foi necessário transformar para o sistema UTM. Além disso, foi criado de um mosaico, processo simples em que todas as imagens são unidas na área de interesse para tornar possível a realização da análise.

Na última atividade executada nos arquivos de elevação, os dados foram reamostrados e o pixel que inicialmente tinha 30 m x 30 m, passou para um tamanho de 50 m x 50 m, sendo escolhido o método de interpolação bilinear. Esta opção escolhida para a reamostragem utiliza uma média ponderada dos pixels originais que se encontram nas proximidades do novo pixel.

A partir do *raster* terreno, foi gerado um novo arquivo chamado de “*raster* zerado”, sem informações, que foi utilizado para a conversão de todos os arquivos em formato vetorial (*shapefile*) para o formato matricial (*raster*). A figura 40, apresentada anteriormente, exibe no retângulo destacado em vermelho o processo em que foi realizada a rasterização dos dados que estavam inicialmente nos arquivos em formato *shapefile* foram inseridos em um arquivo *raster*.

Assim, todos os arquivos vetoriais passaram por um processo de rasterização para o formato booleano. Antes da rasterização, na tabela de atributos de todos os arquivos vetoriais foi criada uma coluna chamada “*raster*” utilizando a Calculadora de Atributo e em todos os campos desta coluna foi preenchido o valor “1”. Desta forma, a lógica booleana pode ser expressa nos arquivos matriciais. Na lógica booleana, por padrão, o QGIS apresenta nos mapas o pixel que possui informação na cor branca e na cor preta o pixel sem informação “0” (zero).

O *shapefile* de Irradiância Direta Normal (DNI) ficou como uma exceção neste procedimento, pois neste caso a coluna de nível médio anual da DNI da tabela de atributos no QGIS foi utilizada para a rasterização. O valor máximo desta coluna para todo o Brasil ficou definido com o “1” e o pixel com a menor média anual de DNI foi utilizado como o “0” (zero) neste processo.

Em seguida, utilizando os arquivos no formato *raster*, foram implementadas funções nas imagens das variáveis espaciais. Nos dados de linhas de transmissão, principais rodovias, de áreas urbanas e áreas com água e com reflorestamento foi aplicada a função *Proximity* (Proximidade), disponível na *Geospatial Data Abstraction Library* (GDAL), dentro da Caixa de Ferramentas do QGIS. Este algoritmo gera um mapa de proximidade indicando a distância do centro de cada pixel para o centro do pixel mais próximo, identificado como o pixel de destino.

Utilizando o *raster* terreno para a criação do indicador de declividade do terreno, a função aplicada é chamada de *Slope* (Declividade), também disponibilizada pela GDAL na caixa de ferramentas do QGIS. O *Slope* cria um mapa com a inclinação em relação à horizontal, não importa a elevação com a opção de especificar o tipo de valor que é apresentado: graus ou percentual.

O último tipo de função utilizada antes da aplicação das lógicas *Fuzzy* foi o algoritmo *Aspect* (Aspecto), processado também a partir do *raster* terreno. O mapa de resultado é uma imagem que apresenta locais no hemisfério Sul que possuem uma inclinação voltada para o norte (terrenos que recebem mais radiação solar) com uma tonalidade mais clara e de forma inversa, locais com declividades voltadas para o sul com uma aparência mais escura.

A próxima tarefa foi implementar a lógica *Fuzzy* em cada arquivo com os indicadores do grau de aptidão por meio da Calculadora Raster, conforme foi descrito na seção anterior. Todas essas lógicas estão apresentadas no Anexo B desta dissertação. Finalmente, na última etapa do estudo de localização dentro do QGIS foi realizada a Combinação Linear Ponderada ou *Weighted Linear Combination* (WLC) entre todos os subcritérios e seus pesos, definidos na seção 3.1.2.1 e também com todas as restrições.

A Combinação Linear Ponderada é utilizada para agrupar um somatório de critérios com determinados pesos, adequada para a aplicação de análises em ferramentas SIG. Quando as restrições são aplicáveis nessas avaliações, elas são multiplicadas pelo resultado do somatório dos subcritérios (DROBNE; LISEC, 2009). Nesta dissertação, o cálculo foi realizado na Calculadora Raster e a equação utilizada no cálculo está definida a seguir. Nesse momento, chamado de “Resultado do Estudo”, apresentado anteriormente na figura 40, os pesos definidos com a aplicação do método AHP foram utilizados para encontrar o local mais indicado para a construção da usina solar.

$$S = \sum w_i x_i \cdot \Pi c_j \quad (13)$$

Onde:

S : é o resultado final (*suitability*);

w_i : é o peso do critério i ;

x_i : é o valor normalizado do critério i ;

c_j : é o critério de exclusão.

3.2 A ANÁLISE FINANCEIRA DE UMA USINA SOLAR COM O SISTEMA *DISH-STIRLING*

Nesta seção é apresentada a metodologia adotada para a análise financeira do empreendimento. Esta análise foi dividida em duas partes: a estimativa de custos e a avaliação econômica. Em relação a estimativa de custos foram utilizados resultados apresentados por Turchi (2010), enquanto, em relação a avaliação econômica foi analisado, principalmente, o Fluxo de Caixa, juntamente com a determinação dos principais índices financeiros para um estudo de viabilidade.

Finalmente, deve ser destacado que nesta análise considerou que a planta possui capacidade máxima de geração de energia elétrica de 100MW, conforme está justificado na seção seguinte.

3.2.1 A Estimativa de custos para a construção e operação da usina solar

A estimativa dos custos para construção, operação e manutenção da planta foi realizada com base no trabalho publicado por Turchi (2010), onde é relatada a contratação, pelo *National Renewable Energy Laboratory* (NREL), órgão de pesquisas dos Estados Unidos, de uma empresa para desenvolver uma estimativa de custos de uma planta solar de referência. O NREL definiu que a capacidade máxima de geração de energia elétrica desta usina seria de 100MW.

Inicialmente, foi estimado o custo total para a construção da usina. Na composição deste valor estão os custos diretos, que incluem, principalmente, investimento com os sistemas *Dish-Stirling*. Além dos custos indiretos, que abrangem gastos com mão de obra de engenharia, construção e montagem e com o gerenciamento do projeto.

Em seguida, foram definidos quais os custos de operação e manutenção (O&M) fixos e variáveis a serem considerados para lançar no Fluxo de Caixa. Também foram discriminados os gastos variáveis para a manutenção dos equipamentos e pesquisadas as taxas aplicáveis a serem pagas pela geração e venda da energia elétrica.

Um custo fixo de 0,1% foi considerado sobre o valor total do investimento referente ao seguro previsto para ser pago anualmente, conforme proposto por Lodi (2011) em sua publicação. Finalmente, foram estimados os custos da mão de obra, incluindo os tributos da força de trabalho, necessária para operar e fazer a manutenção da usina.

3.2.2 A avaliação econômica para a construção da usina solar

O objetivo da avaliação econômica foi a elaboração do Fluxo de Caixa e do cálculo dos índices financeiros. Inicialmente, foi calculada a produção anual de energia elétrica com auxílio do *System Advisor Model* (SAM). Neste cálculo, o *software* leva em consideração, entre outras informações, os dados históricos anuais de hora em hora com níveis de Irradiância Direta Normal (DNI), Irradiância Global Horizontal (GHI) e Irradiância Direta Horizontal (DHI).

Em seguida, a partir do preço de venda de energia praticado pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) para o pagamento da energia elétrica produzida, foi estimada a receita obtida. Dando prosseguimento, foram pesquisadas as condições de financiamento de bancos para viabilizar a possível construção de uma usina solar. Neste caso, foi preciso levantar as informações de taxas de juros, valores financiáveis, prazo máximo de amortização do empréstimo e prazo de carência para iniciar os pagamentos.

Finalmente, foi realizada a análise do fluxo de caixa para as cidades escolhidas no estudo de localização. A partir dos índices financeiros calculados (VPL, TIR, *Payback* descontado e LCOE) e dos resultados encontrados, foi possível realizar uma comparação para definir a viabilidade do projeto e indicar qual seria o local mais apropriado para a construção da usina solar. O fluxo apresentado na figura 41 resume as principais atividades realizadas para a elaboração da análise financeira.

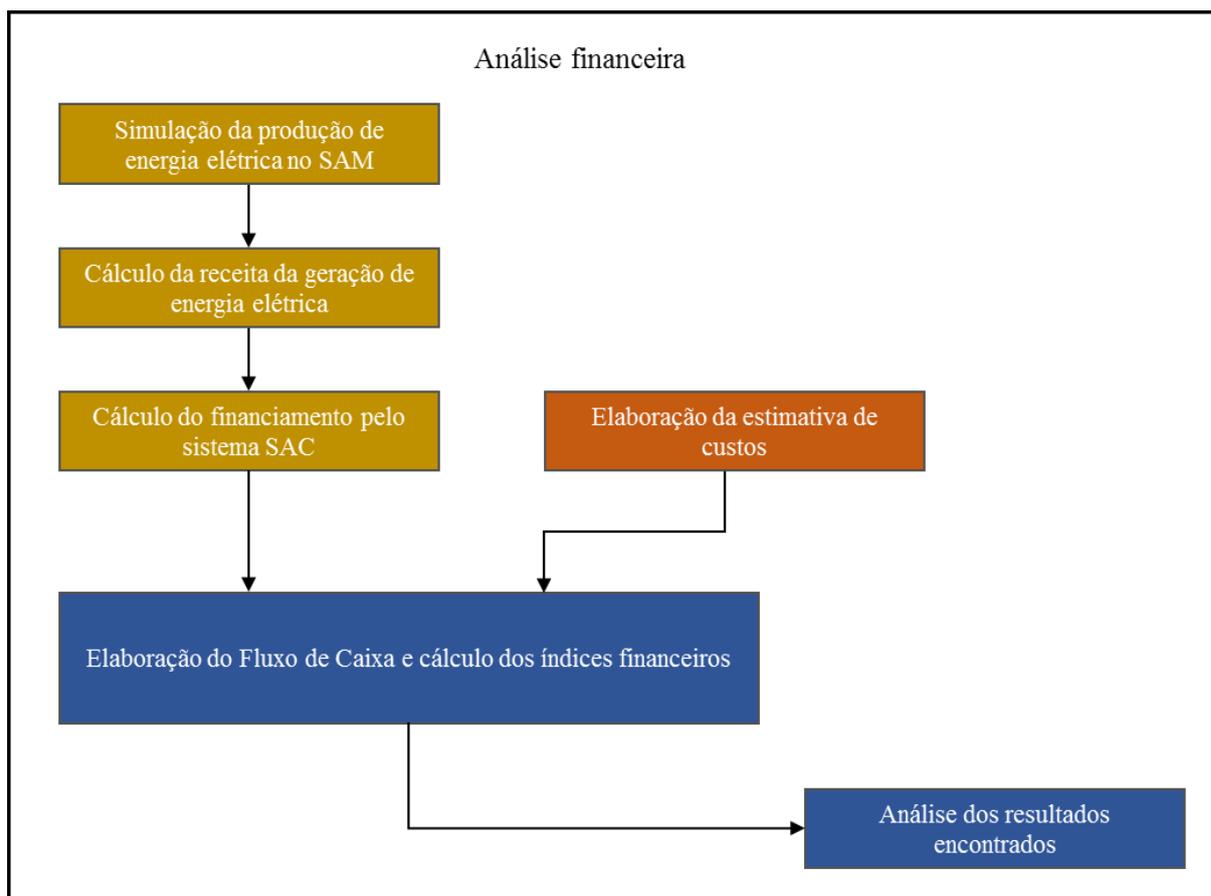


Figura 41 – Fluxo de trabalho da análise financeira

Fonte: Elaborada pelo autor (2018).

4 RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos com a aplicação da metodologia descrita no capítulo anterior. Os resultados estão divididos em duas partes essenciais para o estudo de viabilidade técnica e econômica para a construção de uma usina solar com sistemas *Dish-Stirling*: o item 4.1 que apresenta a realização do estudo de localização e o item 4.2 com os dados encontrados na análise financeira.

4.1 OS RESULTADOS DO ESTUDO DE LOCALIZAÇÃO PARA A IMPLANTAÇÃO DA USINA SOLAR COM O SISTEMA *DISH-STIRLING*

4.1.1 Resultado da etapa 1 - Definição do município onde foi realizado o estudo detalhado

Seguindo a metodologia proposta, inicialmente foram levantados os dados de incidência solar e de população do Brasil. Essas informações conduziram à escolha das cidades nas regiões Sul, Sudeste e Nordeste que receberiam o estudo mais detalhado na segunda etapa.

4.1.1.1 A escolha do município da Região Sul do Brasil

O primeiro passo do estudo de localização consistiu em definir quais as cidades estariam qualificadas para a análise. No mapa da figura 42 é apresentada a distribuição da população na Região Sul do Brasil. A cidade gaúcha de Ijuí é a capital regional com a menor população, 78.920 habitantes, registrada no Censo do IBGE de 2010. As cidades com população menor que a de Ijuí foram desconsideradas e estão representadas em branco no mapa. Assim, somente 62 municípios atenderam o critério inicial de população.

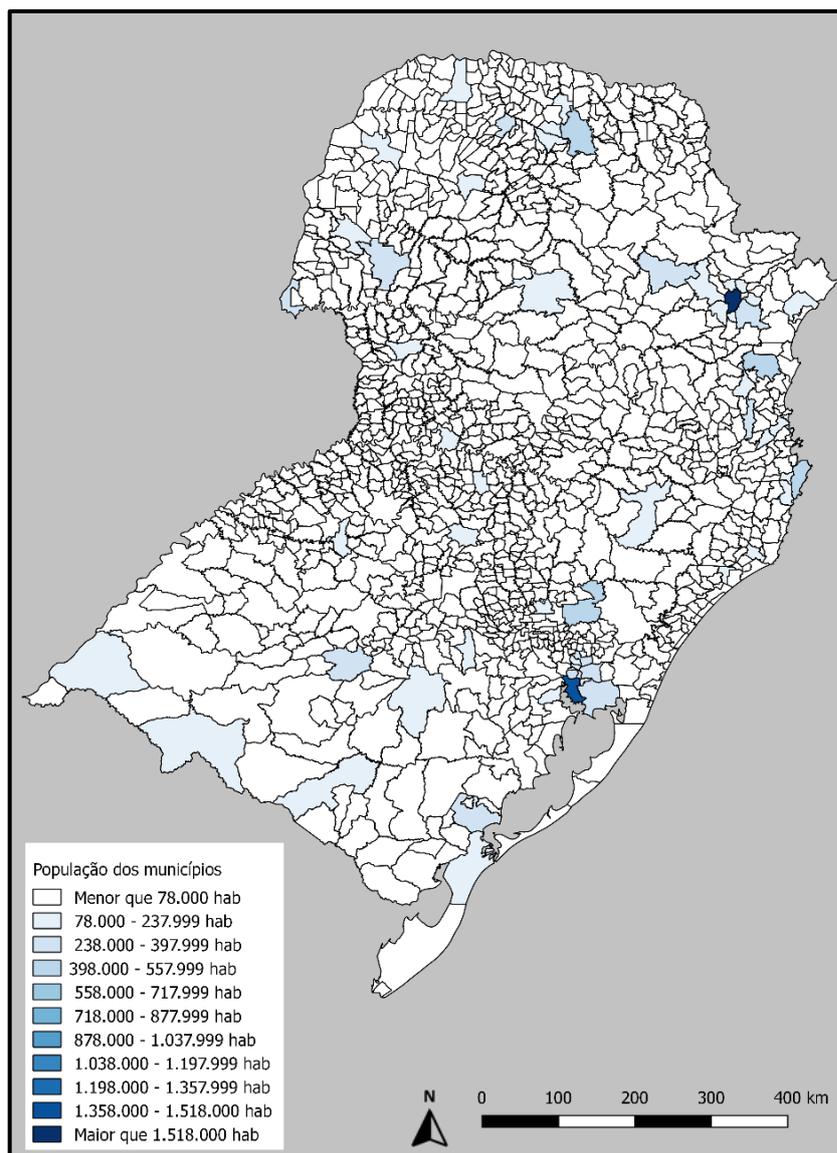


Figura 42 – Mapa de distribuição de população na Região Sul do Brasil

Fonte: Elaborada pelo autor a partir dos dados fornecidos pelo IBGE no Censo 2010 (2018).

A quantidade de classes para o mapa de população da Região Sul, mostrado na figura 42, foi calculada utilizando para a amostra o valor 1188, referente à quantidade total de municípios na região, sendo encontrado um número de 11 classes. Para o cálculo da amplitude das classes, foram utilizadas as populações das cidades de Curitiba, a mais populosa, e André da Rocha que é a menor cidade da Região Sul. A amplitude ficou em 160 mil habitantes.

Em seguida, o arquivo de Irradiância Direta Normal (DNI) foi inserido ao projeto da Região Sul, criado no QGIS para a análise do município com a melhor localização. As tabelas de atributos com as informações de população e de DNI foram exportadas do QGIS e os dados foram cruzados na ferramenta Excel a partir das coordenadas geográficas, presentes em ambas as tabelas de atributos. O arquivo de polígonos de municípios do Brasil com as suas populações

fornecido pelo IBGE apresenta, para cada cidade uma latitude e uma longitude, que foram utilizadas como base para encontrar o respectivo valor de Irradiância Direta Normal (DNI).

Como resultado, a cidade de Uruguaiiana (RS), identificada no mapa apresentado na figura 43, foi escolhida por possuir a maior população no setor com a melhor DNI na Região Sul do país, dentro do grupo de municípios com a população igual ou maior à cidade definida como a menor capital regional. Conforme foi citado na metodologia (seção 3.1.2.3), os arquivos vetoriais foram reprojatados para o fuso UTM (*Universal Transverse Mercator*), SIRGAS 2000 e, no caso da cidade de Uruguaiiana (RS), os arquivos ficaram com o fuso SIRGAS 2000, UTM 21S (EPSG: 31981).

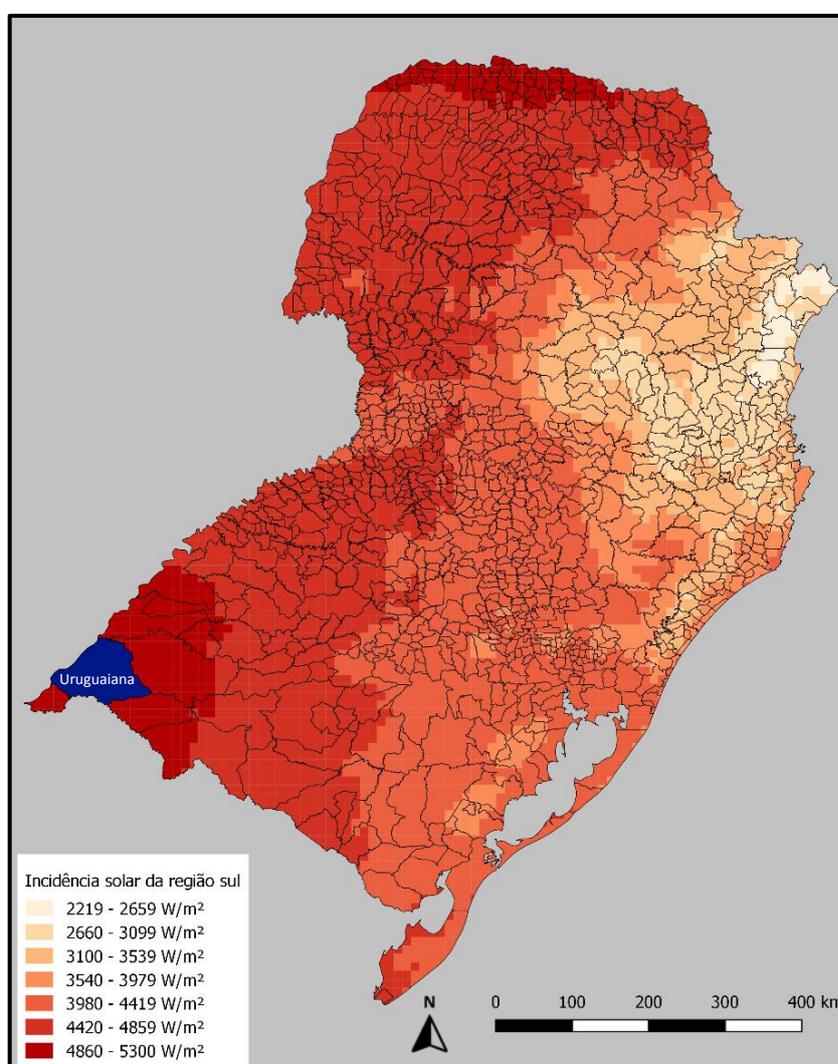


Figura 43 – Mapa de incidência solar e o município de Uruguaiiana (RS)

Fonte: Elaborada pelo autor a partir dos dados fornecidos pelo LABREN/CSST/INPE (2018).

O cálculo de quantidade de classes de incidência solar levou em consideração apenas os 62 municípios dentro da análise, apresentando um resultado de 7 classes. Se o número total de

cidades da Região Sul fosse utilizado para o cálculo, um valor muito grande de classes originaria um mapa de difícil interpretação. Para a amplitude das classes, a cidade que apresentou a melhor incidência solar ficou em 5297 W/m² e o pior em 2219 W/m², sendo que cada amplitude foi definida em 440 W/m².

4.1.1.2 A escolha do município da Região Sudeste do Brasil

Na primeira parte do estudo de localização para a Região Sudeste do Brasil, a cidade que é considerada uma capital regional com a menor população, seguindo o critério do IBGE é Pouso Alegre, no estado de Minas Gerais com 130.586 habitantes, segundo o Censo de 2010. Assim, cidades com menos de 130 mil pessoas estão apresentadas em branco no mapa mostrado na figura 44 e não estão sendo consideradas no estudo. Assim, um total de 99 municípios atenderam ao critério de tamanho da população.

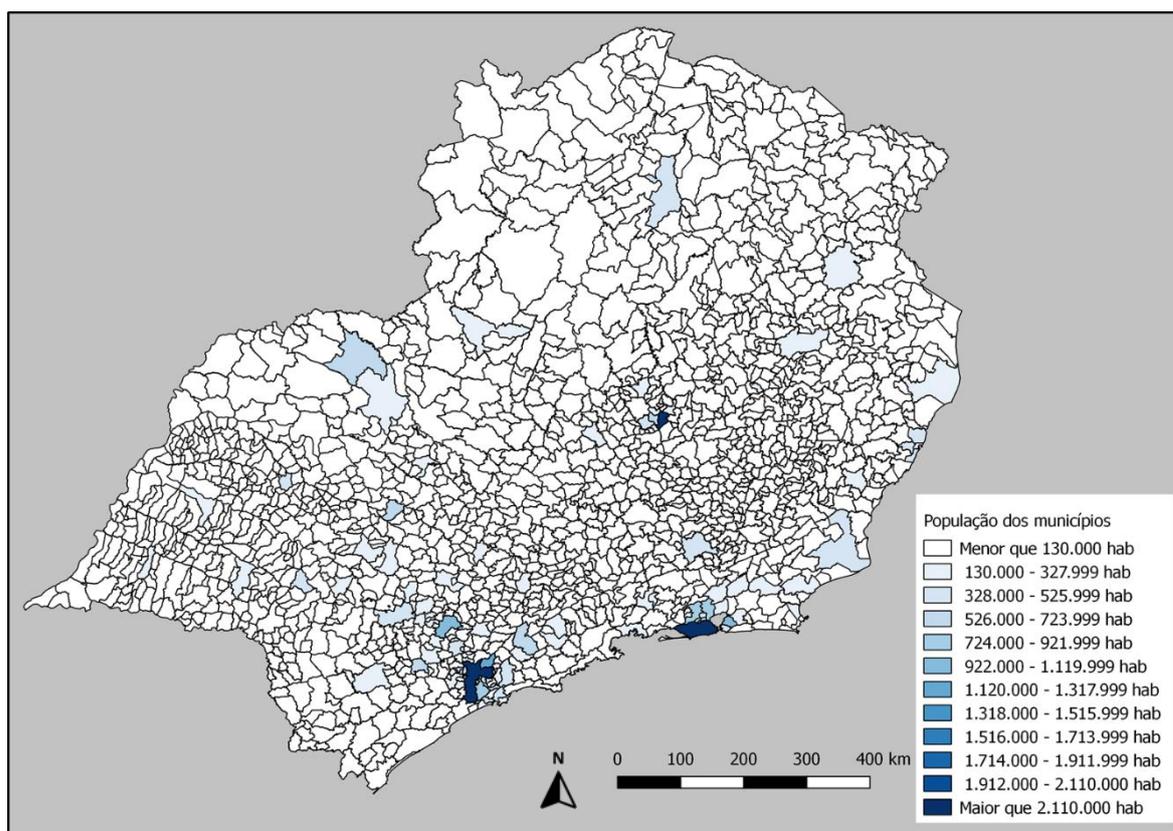


Figura 44 – Mapa de distribuição de população na Região Sudeste do Brasil

Fonte: Elaborada pelo autor a partir dos dados fornecidos pelo IBGE no Censo 2010 (2018).

Para a Região Sudeste, a realização do cálculo do número de classes partiu de um valor amostral de 1667, número total de cidades desta região, achando-se como resultado uma

quantidade de 12 classes. A amplitude das classes foi encontrada utilizando a população de Belo Horizonte, representando a mais populosa, juntamente com Borá (estado de São Paulo), menor município da Região Sudeste, ficando a amplitude em 198 mil habitantes. As capitais dos estados de São Paulo e Rio de Janeiro foram desconsideradas, pois as classes ficariam com amplitudes muito grandes e algumas delas seriam vazias.

No passo seguinte foi adicionado o arquivo de Irradiância Direta Normal (DNI) ao projeto no QGIS da Região Sudeste para encontrar a cidade com a melhor incidência solar. Percorrendo a mesma sequência da etapa 1 para a Região Sul, as duas tabelas de atributos foram extraídas do QGIS e as informações foram cruzados no Excel. As coordenadas geográficas foram utilizadas como referência, pois estão nas duas tabelas de atributos. O município de Montes Claros (MG), exibido no mapa da figura 45, foi eleito para o estudo de localização porque está na parte com a melhor DNI e contém a maior população, conforme o critério definido neste trabalho. No processo de reprojeção dos arquivos vetoriais para o fuso UTM no estudo de localização em Montes Claros ficaram com o fuso SIRGAS 2000, UTM 23S (EPSG: 31983).

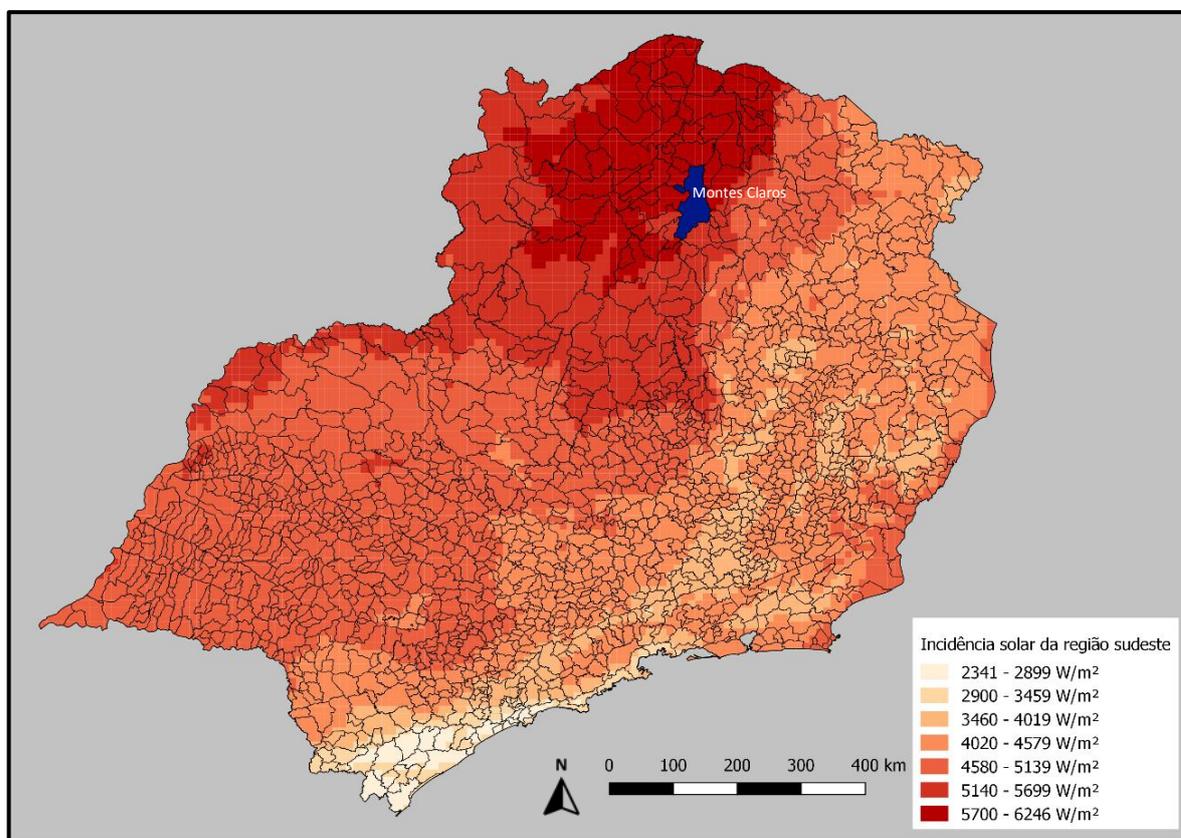


Figura 45 – Mapa de incidência solar e o município de Montes Claros (MG)

Fonte: Elaborada pelo autor a partir dos dados fornecidos pelo LABREN/CSST/INPE (2018).

Somente as 99 cidades ficaram dentro do cálculo para encontrar a quantidade de classes de incidência solar, sendo definido o valor de 7 classes. A amplitude das classes foi estabelecida utilizando o valor de 6246 W/m², local com a melhor radiação solar, além do número de 2341 W/m², encontrado no município com o menor nível solar. Realizando o cálculo, a amplitude ficou em 560 W/m² para cada classe.

4.1.1.3 A escolha do município da Região Nordeste do Brasil

A Região Nordeste recebeu o mesmo estudo preliminar e, segundo o CENSO de 2010 do IBGE, a capital regional menos populosa é Barbalha com 55.373 habitantes, localizada no estado de Ceará. Os municípios com população inferior a 55 mil habitantes não estão sendo incluídas na análise, sendo apresentadas em branco no mapa da figura 46. O critério adotado incluiu 149 cidades dentro da análise da etapa 1 do estudo de localização.

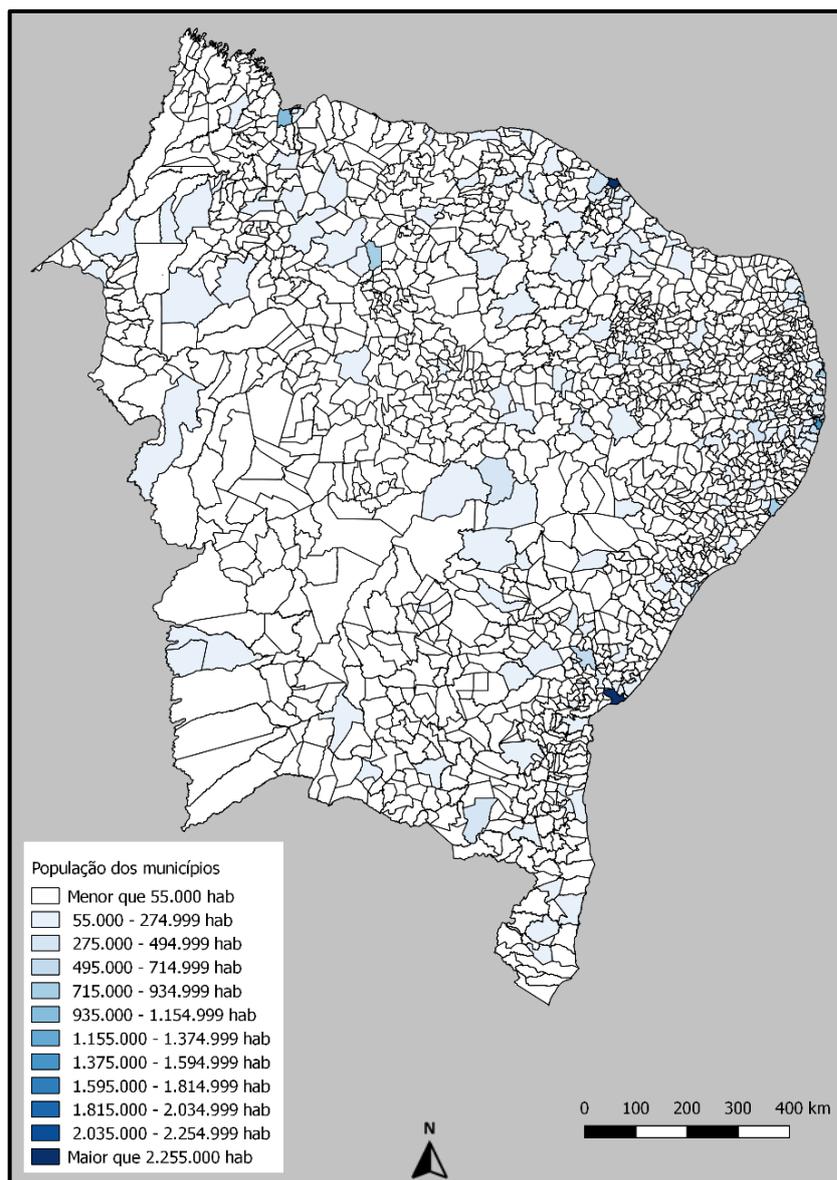


Figura 46 – Mapa de distribuição de população na Região Nordeste do Brasil
 Fonte: Elaborada pelo autor a partir dos dados fornecidos pelo IBGE no Censo 2010 (2018).

O cálculo da quantidade de classes resultou em um número final de 12 classes para o mapa da Região Nordeste, sendo efetuado com o valor de amostra de 1794, representando o total de municípios da Região Nordeste. As populações de Salvador (2.676.606 habitantes) e Miguel Leão, no estado do Piauí, com apenas 1253 pessoas, conforme o Censo 2010, foram utilizadas para encontrar a amplitude das classes. Aplicando mais uma vez a Regra de Sturges, a amplitude ficou em 220 mil habitantes.

Após a definição das 149 cidades que seriam incluídas no estudo de localização, dentro do QGIS, no projeto da Região Nordeste, foi incorporado o arquivo no formato *shapefile* com Irradiância Direta Normal (DNI). A intenção era encontrar o município dentro da área com a

melhor radiação solar e com a maior população. Novamente, os dados de população e também de DNI foram analisados externamente a partir das tabelas de atributos fornecidas pelo arquivo *shapefile* no QGIS, sendo escolhida a cidade de Bom Jesus da Lapa (BA), ver mapa da figura 47, como tendo a melhor condição na Região Nordeste, seguindo o critério adotado neste trabalho. O fuso UTM definido para Bom Jesus da Lapa foi o SIRGAS 2000, UTM 23S (EPSG: 31983).

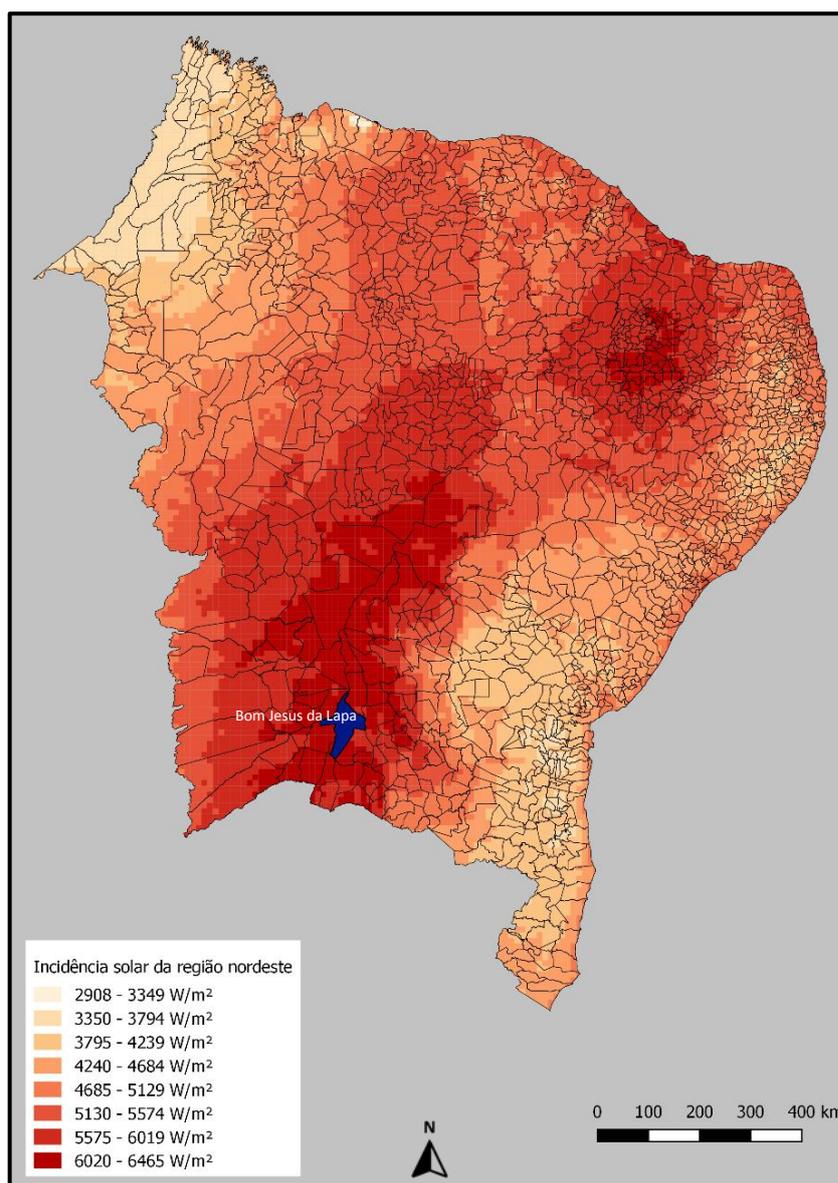


Figura 47 – Mapa de incidência solar e o município de Bom Jesus da Lapa (BA)
Fonte: Elaborada pelo autor a partir dos dados fornecidos pelo LABREN/CSST/INPE (2018).

A definição da quantidade de classes para a Irradiância Direta Normal foi realizada seguindo o mesmo procedimento das demais regiões. Assim, considerando os 149 municípios escolhidos inicialmente, o cálculo encontrou um número de 8 classes. Para encontrar o valor da

amplitude das classes, o maior DNI encontrado foi de 6465 W/m² e o menor foi igual a 2908 W/m². A amplitude de cada classe encontrada para a Região Nordeste apresentou um número de 445 W/m².

4.1.2 Resultado da etapa 2 - Estudo de localização detalhado para a construção da usina solar

Esta seção apresenta os resultados encontrados no estudo de localização, utilizando o método AHP associado ao QGIS para a identificação do ponto mais indicado para a implantação da usina solar. Os itens a seguir exibem os graus de aptidão de cada variável espacial (subcritério) após a aplicação da lógica *Fuzzy* para os municípios de Uruguaiana, Montes Claros e Bom Jesus da Lapa, respectivamente. Na seção seguinte, item 4.1.3, está a conclusão da análise após a execução do cálculo final com a inclusão de todos os subcritérios e a retirada das áreas com restrições.

4.1.2.1 A aplicação da Lógica *Fuzzy* para a proximidade de linhas de transmissão

Por conta de seu elevado custo de construção, a proximidade de linhas de transmissão é um fator fundamental para viabilizar o projeto. A importância deste subcritério está representada pelo peso de 36,58% determinado na metodologia, item 3.1.2.1, pela aplicação do método AHP. Desta forma, na aplicação da lógica *Fuzzy*, foi estabelecido que um local distante até 1km (um quilômetro) de uma linha de transmissão seria plenamente apto, entre 1km (um quilômetro) e 10km (dez quilômetros) o local seria apto e distante mais do que 10km (dez quilômetros), o local seria inapto.

Deve ser destacado que não foram encontradas informações sobre linhas de distribuição dentro dos municípios com tensões mais baixas. Para esta análise foram usados dados fornecidos pela Agencia Nacional de Energia Elétrica (ANEEL).

- *A proximidade de linhas de transmissão em Uruguaiiana (RS)*

A partir do mapa apresentado na figura 48 é possível identificar que as regiões leste e norte de Uruguaiiana possuem o maior grau de aptidão para atender a esta variável, áreas onde há linhas de transmissão.

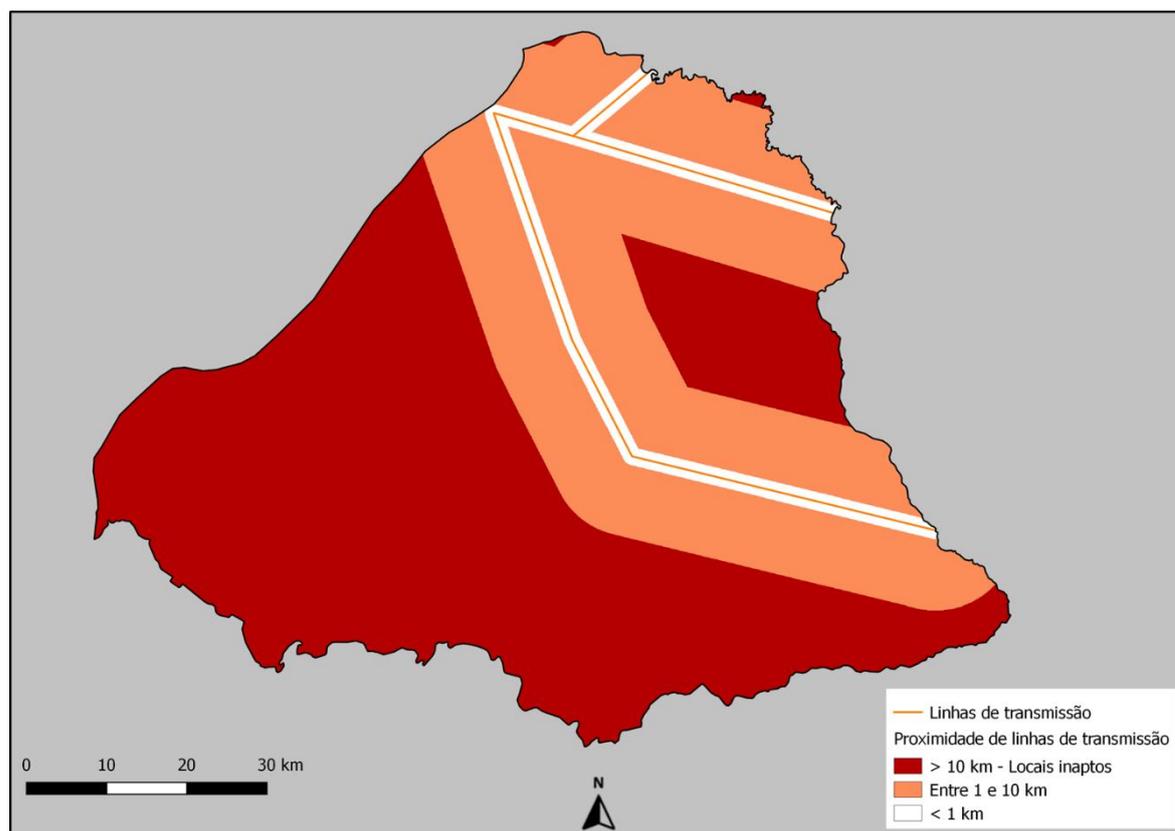


Figura 48 – A proximidade de linhas de transmissão em Uruguaiiana (RS)

Fonte: Elaborada pelo autor (2018).

- *A proximidade de linhas de transmissão em Montes Claros (MG)*

O mapa da figura 49 mostra como o local de maior grau de aptidão uma região entre o centro e o sul do município de Montes Claros. Apenas nesta área da cidade foi possível identificar uma linha de transmissão com os dados disponibilizados pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL).

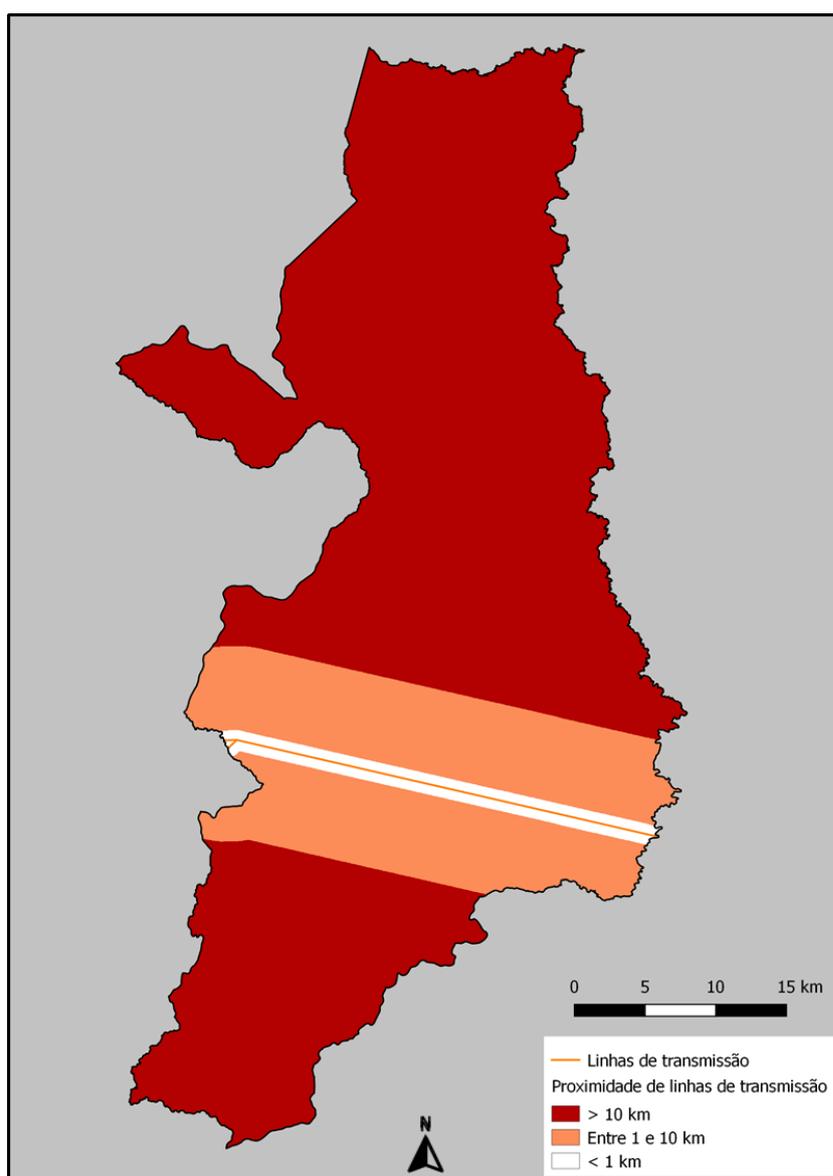


Figura 49 – A proximidade de linhas de transmissão em Montes Claros (MG)
Fonte: Elaborada pelo autor (2018).

- *A proximidade de linhas de transmissão em Bom Jesus da Lapa (BA)*

No caso do município de Bom Jesus da Lapa, a região norte se apresenta como a mais apta para receber a planta solar, pois é o único setor onde há linhas de transmissão disponíveis, conforme mostrado na figura 50.

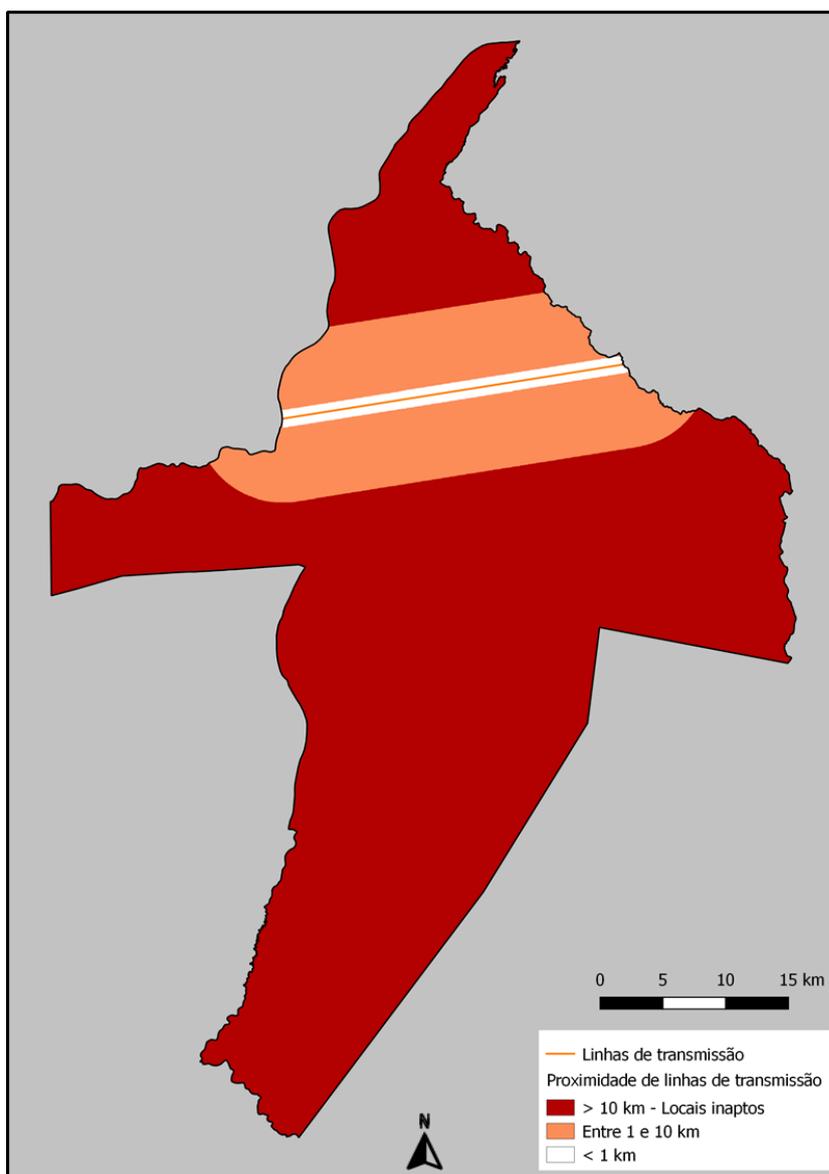


Figura 50 – A proximidade de linhas de transmissão em Bom Jesus da Lapa (BA)
 Fonte: Elaborada pelo autor (2018).

4.1.2.2 A aplicação da Lógica *Fuzzy* para a proximidade de principais rodovias

A necessidade de construir estradas para acesso a usina tem forte impacto nos custos do empreendimento. A importância deste impacto está representada pelo peso relativamente alto,

de 15%, definido pela aplicação do método AHP na metodologia, item 3.1.2.1. Para este subcritério foi estabelecido que uma região seria considerada plenamente apta se estivesse situada a menos de 1 km (um quilômetro) de uma rodovia, parcialmente apta se estivesse entre 1km (um quilômetro) e 3 km (três quilômetros) e acima de 3 km (três quilômetros) a região seria inapta.

Nesta análise foram utilizados dados sobre rodovias disponibilizados pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT).

- *A proximidade de principais rodovias em Uruguaiana (RS)*

O mapa da figura 51 mostra as principais rodovias do município de uma maneira bem distribuída, com a exceção da sua região nordeste, indicando não ser um bom local para a construção da usina solar. Desta forma, neste subcritério existem muitas áreas com potencial para definir a melhor localização, sendo difícil haver um direcionamento somente com este mapa isoladamente.

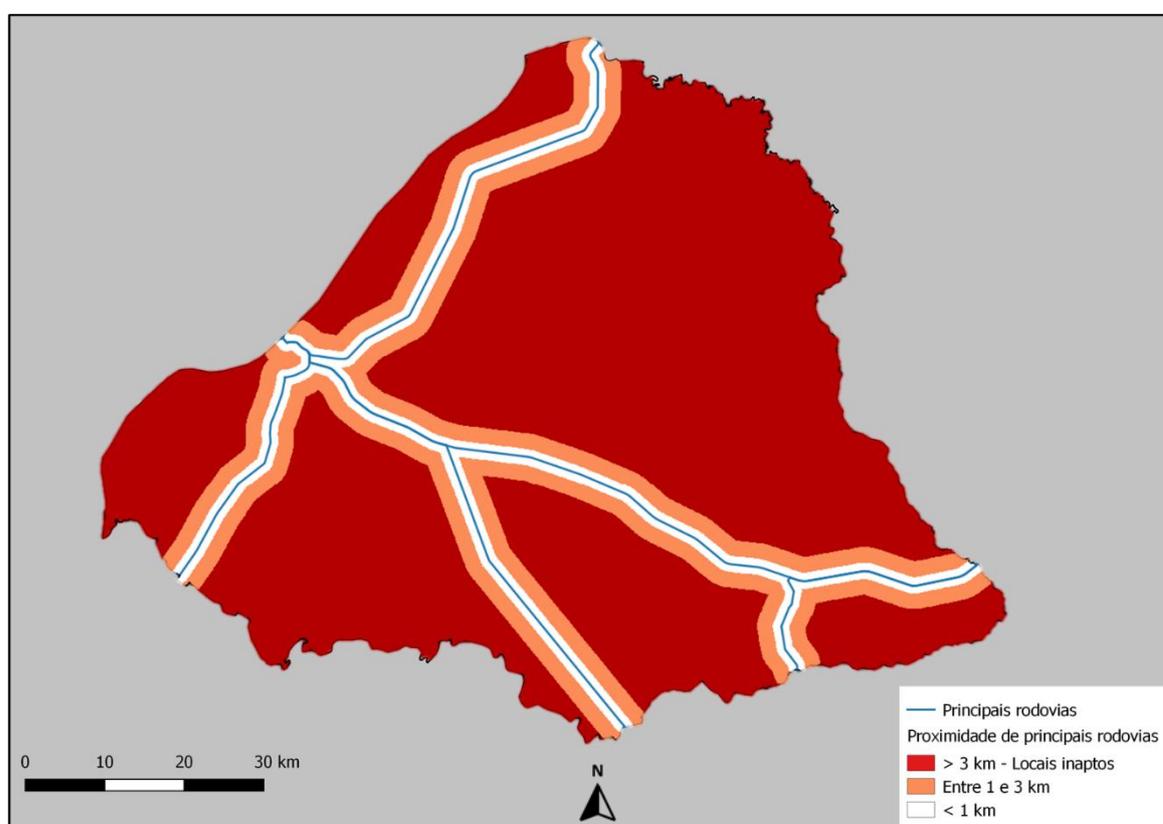


Figura 51 – A proximidade de principais rodovias em Uruguaiana (RS)

Fonte: Elaborada pelo autor (2018).

- *A proximidade de principais rodovias em Montes Claros (MG)*

A cidade de Montes Claros possui as suas principais rodovias concentradas praticamente no centro de seu território. Conforme pode ser observado na figura 52, toda a metade norte de Montes Claros quase não possui estradas, assim como o extremo do município. Assim, chegou-se à conclusão que o centro seria a região mais indicada.

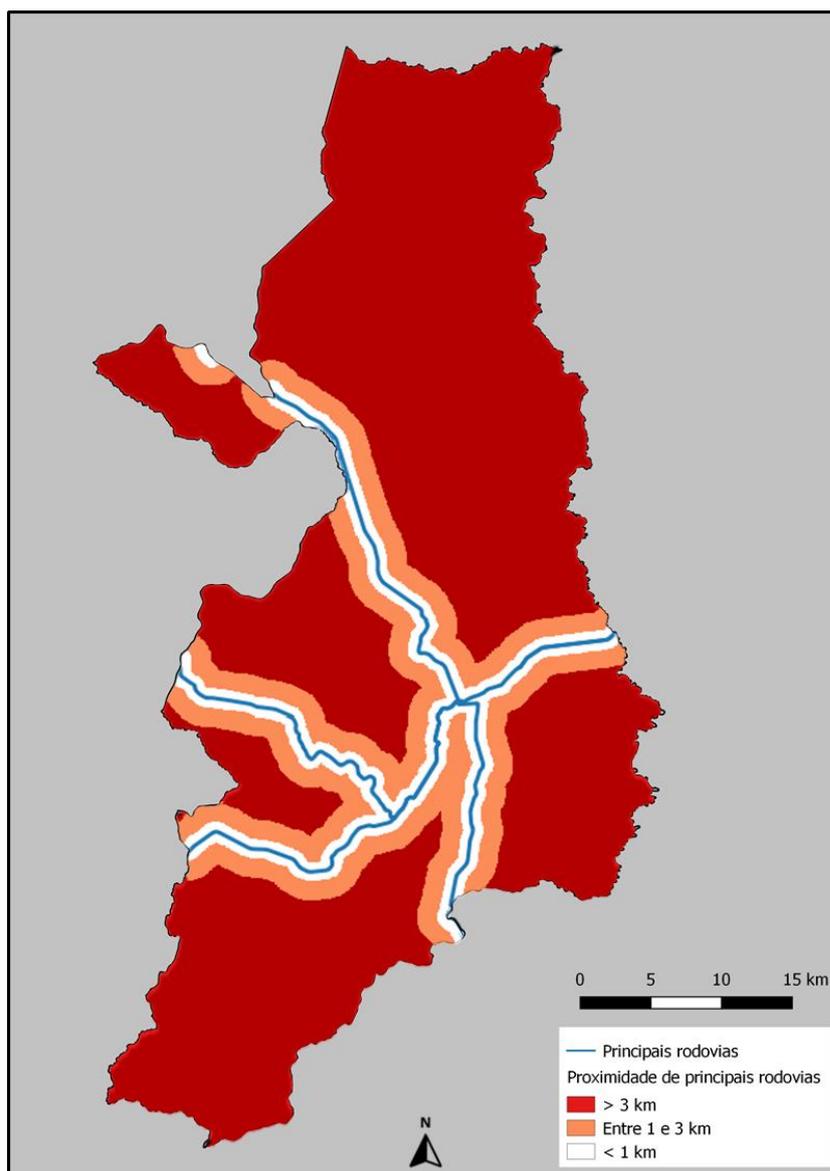


Figura 52 – A proximidade de principais rodovias em Montes Claros (MG)

Fonte: Elaborada pelo autor (2018).

- *A proximidade de principais rodovias em Bom Jesus da Lapa (BA)*

Semelhante à análise realizada anteriormente, Bom Jesus da Lapa apresenta uma concentração das principais rodovias em sua área central, como pode ser observado na figura 53. Então, a melhor localização, segundo este subcritério, está na região central do município.

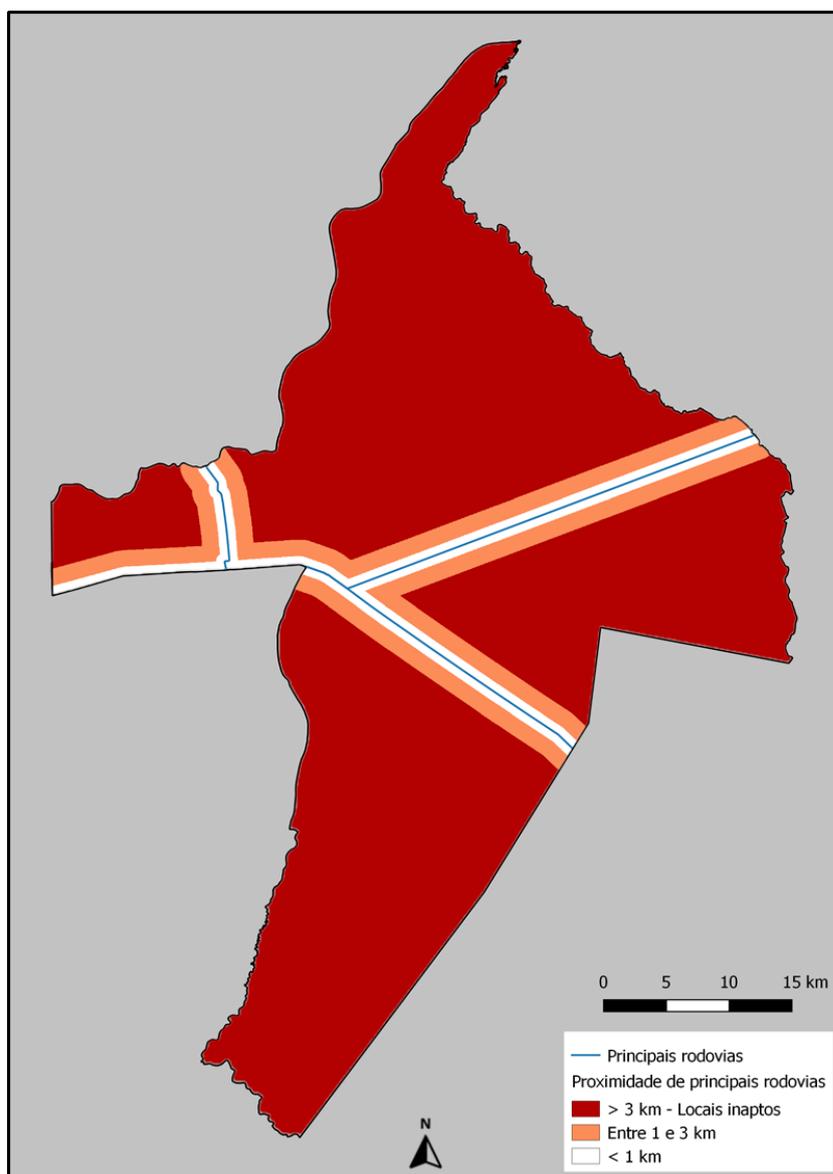


Figura 53 – A proximidade de principais rodovias em Bom Jesus da Lapa (BA)
Fonte: Elaborada pelo autor (2018).

4.1.2.3 A aplicação da Lógica *Fuzzy* para a proximidade de áreas urbanas

A proximidade de áreas urbanas é um subcritério importante na análise de viabilidade do empreendimento, tendo em vista a necessidade do transporte diário de trabalhadores, tanto no período de construção, quanto no período de operação da unidade. A importância deste subcritério está representada no peso de 6,12% estabelecido na metodologia por meio da aplicação do método AHP, exibido no item 3.1.2.1. A partir do estudo publicado por Lameira et al. (2015), foi estabelecido que uma região seria plenamente apta se estivesse a uma distância máxima de 5km (cinco quilômetros) de uma área urbana e inapta se a distância superasse 75Km (setenta e cinco quilômetros).

As informações georreferenciadas utilizadas para esta análise foram extraídas dos arquivos vetoriais dos biomas Pampa, Cerrado e Caatinga, fornecidos pelo Ministério do Meio Ambiente.

- *A proximidade de áreas urbanas em Uruguaiiana (RS)*

A figura 54 apresenta a localização das áreas urbanas em Uruguaiiana. O setor urbano principal pode ser identificado na porção oeste da cidade, mas existem duas pequenas concentrações populacionais nas regiões leste e norte, sendo que nesta última há linhas de transmissão e rodovias nas proximidades. De acordo com este subcritério, as áreas dos extremos sul e sudeste são as menos indicadas.

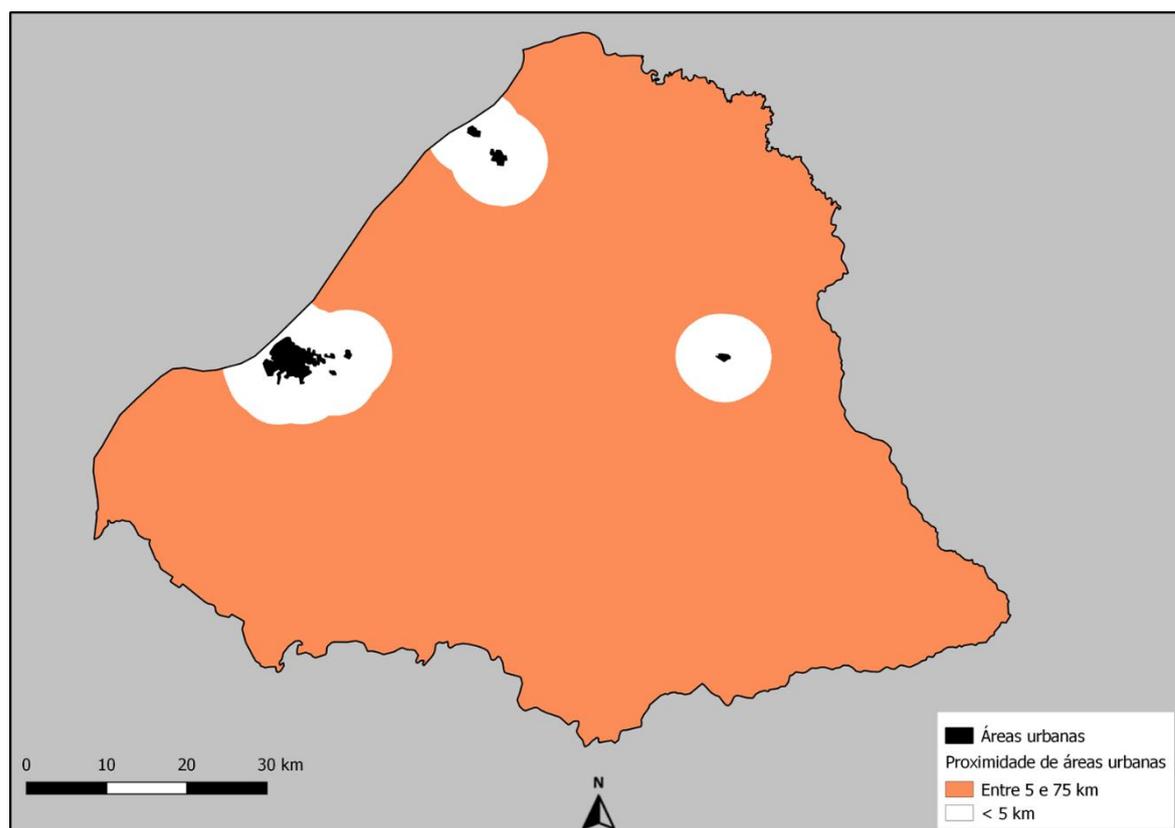


Figura 54 – A proximidade de áreas urbanas em Uruguaiiana (RS)

Fonte: Elaborada pelo autor (2018).

- *A proximidade de áreas urbanas em Montes Claros (MG)*

Em Montes Claros existem pequenas áreas povoadas em sua parte norte e uma grande de concentração urbana na parte central da cidade, ligeiramente ao sul. A região mais afastada no sul do município é a menos indicada para a construção da usina solar, conforme pode ser observado na figura 55.

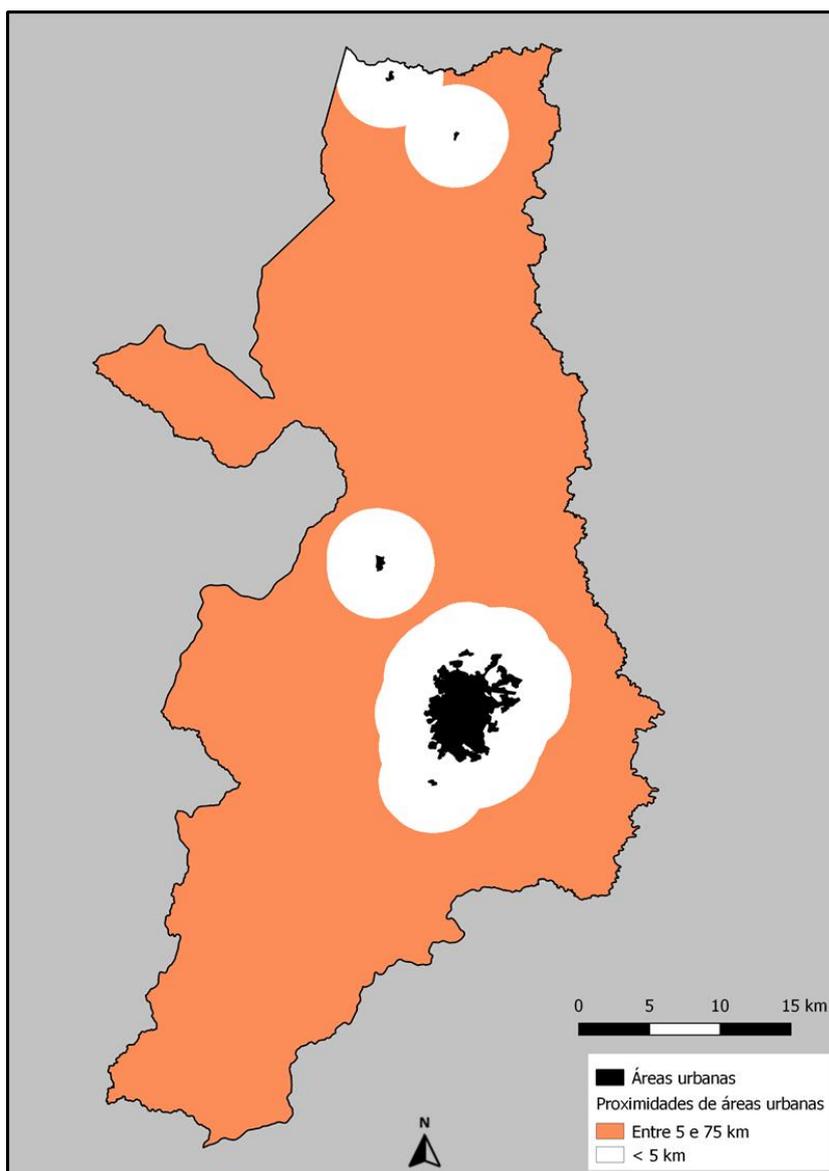


Figura 55 – A proximidade de áreas urbanas em Montes Claros (MG)

Fonte: Elaborada pelo autor (2018).

- *A proximidade de áreas urbanas em Bom Jesus da Lapa (BA)*

A cidade de Bom Jesus da Lapa possui apenas uma área urbanizada, localizada na parte oeste. O mapa da figura 56 indica que o oeste de Bom Jesus da Lapa tem o maior grau de aptidão e que as zonas sul, norte e leste do município são os setores menos indicados para a implantação da usina solar.

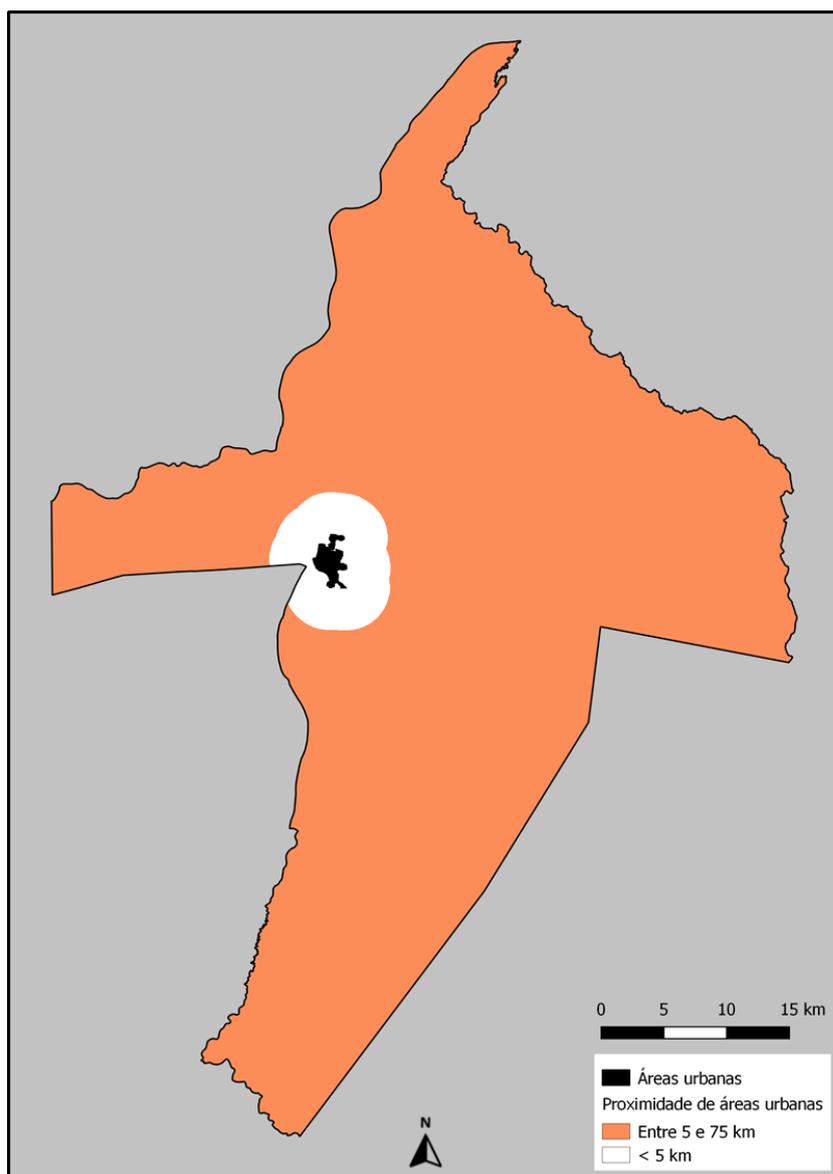


Figura 56 – A proximidade de áreas urbanas em Bom Jesus da Lapa (BA)

Fonte: Elaborada pelo autor (2018).

4.1.2.4 A aplicação da Lógica *Fuzzy* para a Irradiância Direta Normal (DNI)

A radiação solar possui grande peso neste estudo, sendo que o subcritério de Irradiância Direta Normal (DNI) recebeu um peso de 25,53% com a aplicação do método AHP, apresentado no item 3.1.2.1 da metodologia.

- *A Irradiância Direta Normal em Uruguaiana (RS)*

No município de Uruguaiana, RS, as Irradiâncias Diretas Normais máxima e mínima são, respectivamente, 5235 W/m² e 5038 W/m², uma variação de 197 W/m². Aplicando-se a regra de Sturges, esta faixa foi dividida em 5 (cinco) classes com amplitude de 39 W/m². Analisando o mapa da figura 57, verifica-se que a região oeste do município é a que apresenta a maior taxa de Irradiância Direta Normal.

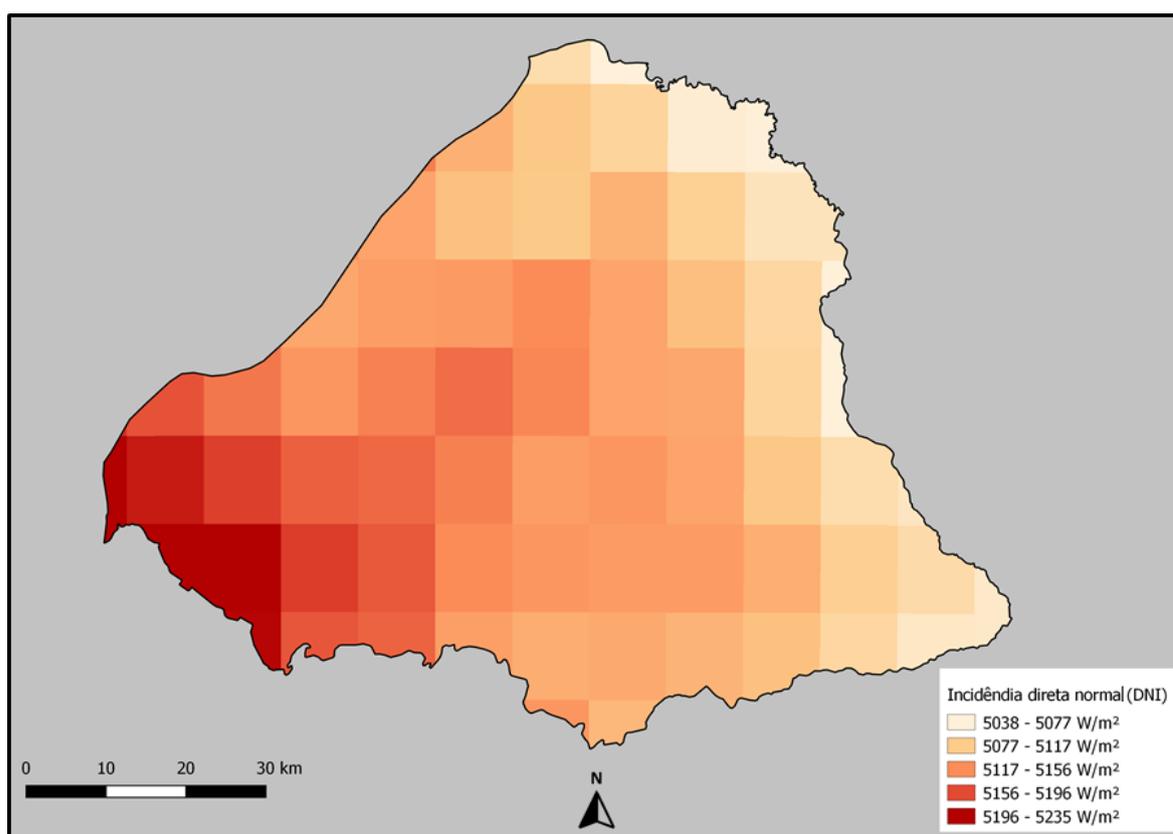


Figura 57 – A Irradiância Direta Normal (DNI) em Uruguaiana (RS)

Fonte: Elaborada pelo autor (2018).

- *A Irradiância Direta Normal em Montes Claros (MG)*

No caso de Montes Claros, MG, as Irradiâncias Diretas Normais máxima e mínima são, respectivamente, 5897 W/m^2 e 5493 W/m^2 , uma variação de 404 W/m^2 . Aplicando-se a regra de Sturges, esta faixa foi dividida em 5 (cinco) classes com amplitude de 86 W/m^2 . Da análise do mapa apresentado na figura 58, verifica-se que a região norte do município é a que apresenta a maior taxa de Irradiância Direta Normal.

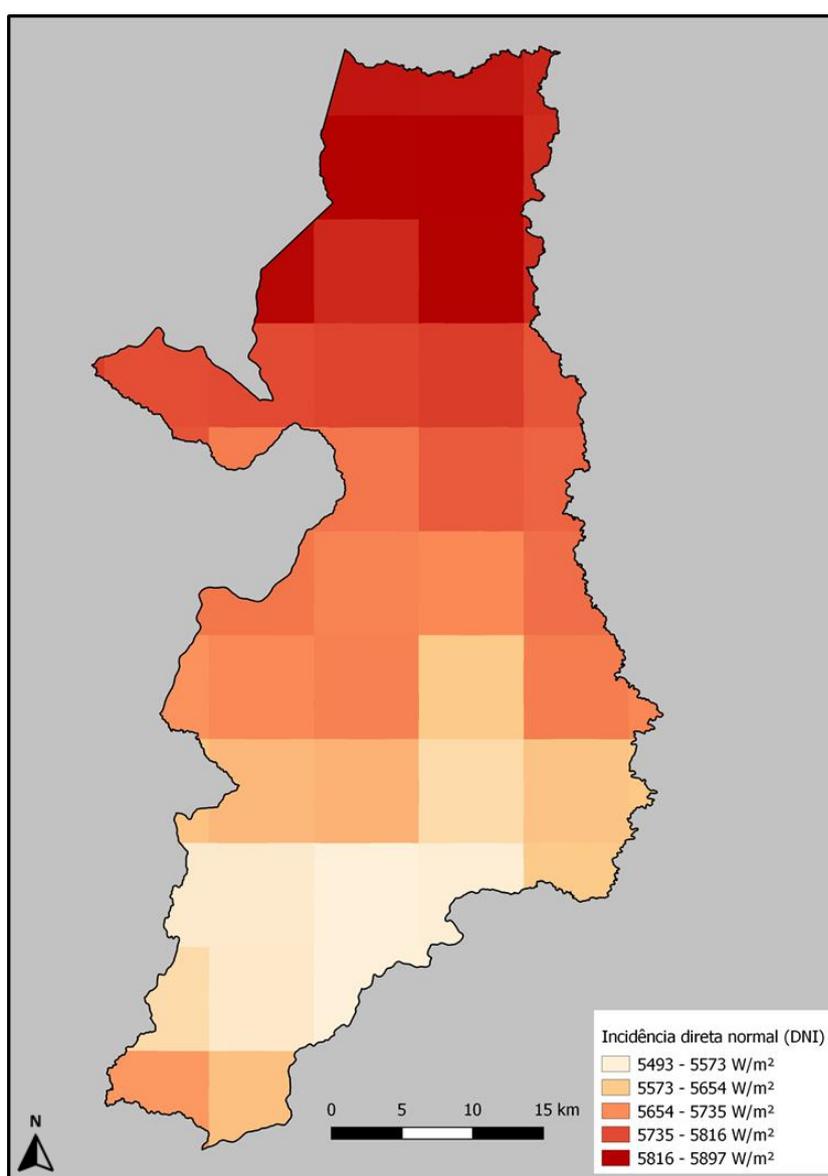


Figura 58 – A Irradiância Direta Normal (DNI) em Montes Claros (MG)

Fonte: Elaborada pelo autor (2018).

- *A Irradiância Direta Normal em Bom Jesus da Lapa (BA)*

Finalmente, para Bom Jesus da Lapa, BA, as Irradiâncias Diretas Normais máxima e mínima são, respectivamente, 6276 W/m^2 e 5946 W/m^2 , uma variação de 330 W/m^2 . Aplicando-se a regra de Sturges, esta faixa foi dividida em 5 (cinco) classes com amplitude de 66 W/m^2 . Da análise do mapa apresentado na figura 59, verifica-se que as regiões do extremo norte e do extremo oeste do município são as que apresentam a maior taxa de Irradiância Direta Normal.

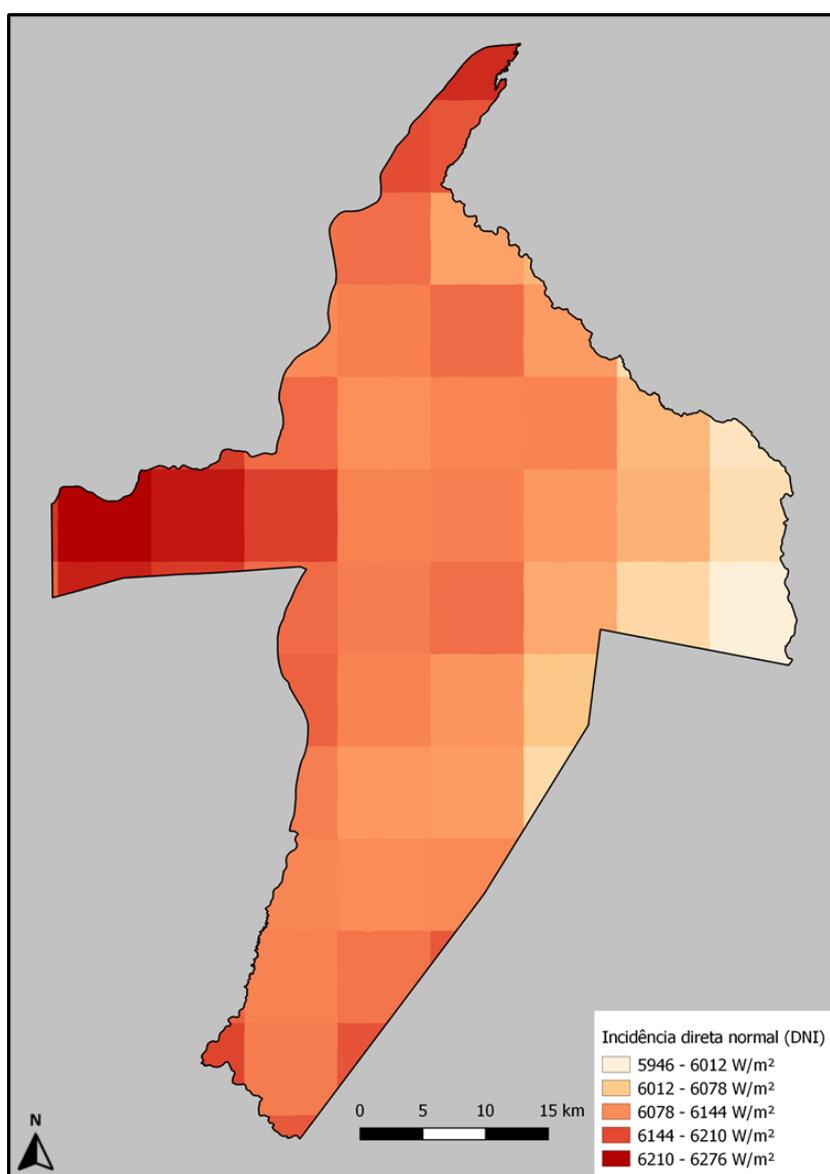


Figura 59 – A Irradiância Direta Normal (DNI) em Bom Jesus da Lapa (BA)
Fonte: Elaborada pelo autor (2018).

4.1.2.5 A aplicação da Lógica *Fuzzy* para a declividade do terreno

A declividade do terreno, critério que recebeu um peso de 7,81% quando da aplicação do método AHP, deve ser analisada com atenção, pois traz implicações técnicas e legais quanto a possibilidade de construção. Como já foi apresentado neste trabalho, qualquer terreno com inclinação superior a 45° é considerado uma Área de Proteção Permanente (APP) e, portanto, protegido por lei. Por outro lado, considerando-se as condições de facilidade em construir, a partir de proposta de Carrion et al. (2008), foi estabelecida como máxima uma inclinação de 30°. Desta forma, terrenos com inclinação de 0° foram considerados plenamente aptos, com inclinação entre 0° e 30° foram considerados aptos e inclinação superior a 30°, inaptos.

- *A declividade do terreno em Uruguaiiana (RS)*

Analisando o mapa apresentado na figura 60, verifica-se que o território de Uruguaiiana é majoritariamente plano ou com pequenas inclinações, o que é uma característica do bioma Pampa. Com exceção de sua região central, onde verificam-se áreas com inclinações maiores, este município possui inúmeras áreas que atendem satisfatoriamente critério de inclinação.

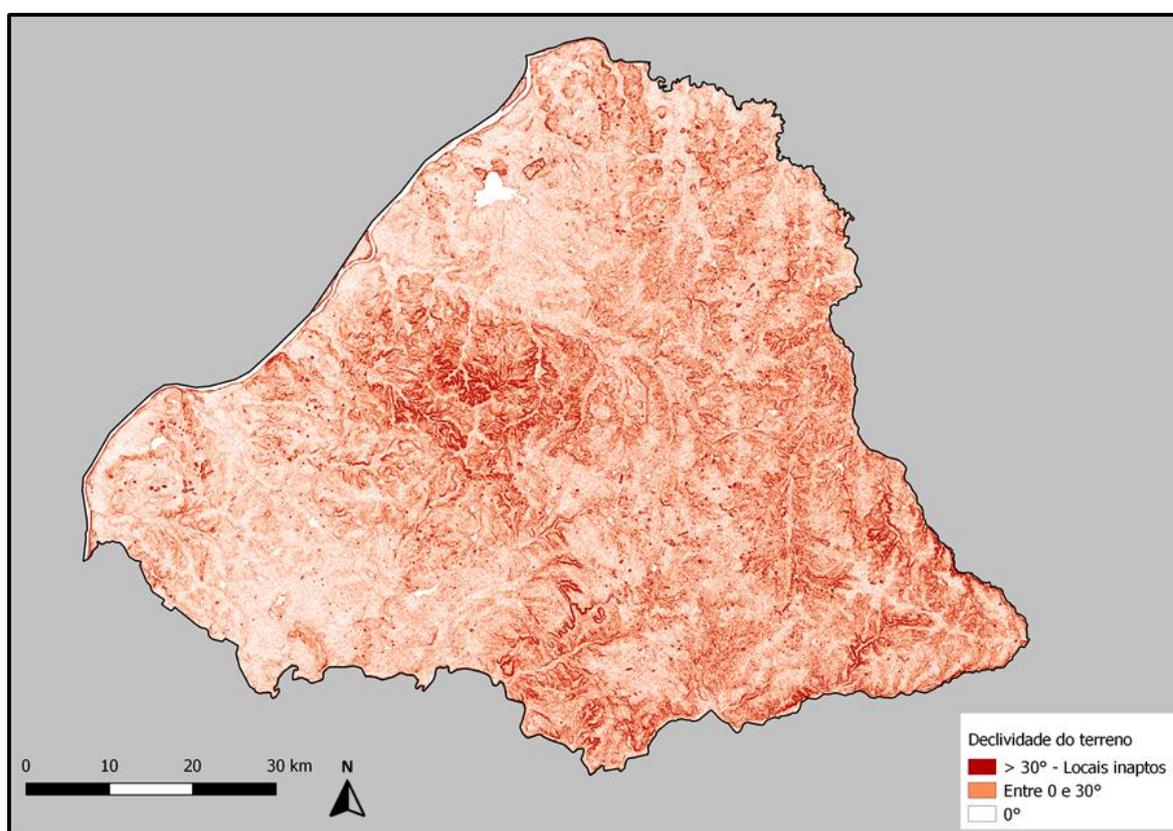


Figura 60 – A declividade do terreno em Uruguaiiana (RS)

Fonte: Elaborada pelo autor (2018).

- *A declividade do terreno em Montes Claros (MG)*

Como pode ser visto no mapa apresentado na figura 61, as regiões norte e central do município de Montes Claros, MG, possuem áreas bastante inclinadas, o que dificulta a identificação, nestas regiões, de áreas adequadas para a construção da usina solar. Entretanto, o município possui algumas áreas isoladas que apresentam pequenas inclinações, adequadas para construção.

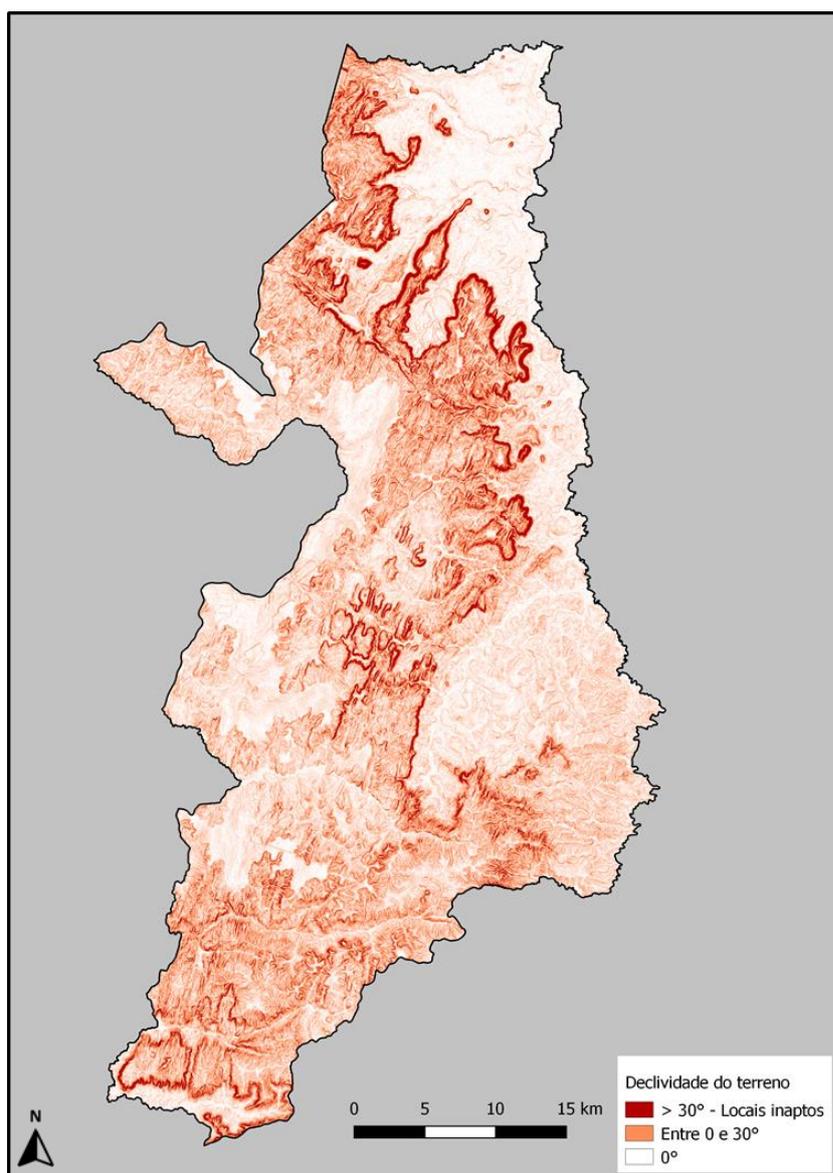


Figura 61 – A declividade do terreno em Montes Claros (MG)

Fonte: Elaborada pelo autor (2018).

- *A declividade do terreno em Bom Jesus da Lapa (BA)*

Uma análise do mapa apresentado na figura 62 mostra que praticamente todo o território do município de Bom Jesus da Lapa, BA, com exceção de sua fronteira leste, atende plenamente este critério.

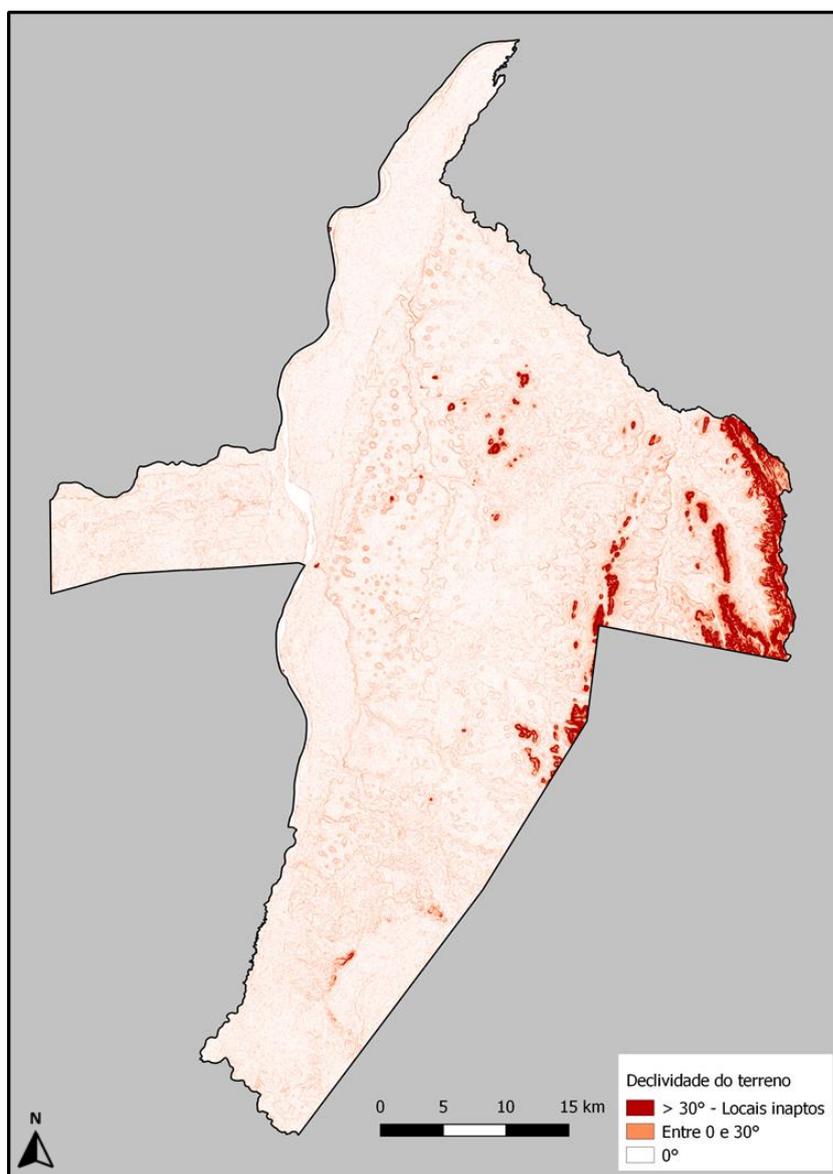


Figura 62 – A declividade do terreno em Bom Jesus da Lapa (BA)

Fonte: Elaborada pelo autor (2018).

4.1.2.6 A aplicação da Lógica *Fuzzy* para o aspecto do terreno

O aspecto do terreno influencia diretamente a eficiência da usina solar na geração de energia elétrica. Este subcritério, após aplicação do método AHP, recebeu peso 3,91%. Segundo publicações acadêmicas, o ideal é que o local seja voltado diretamente para a direção Norte. Neste trabalho, acatando sugestão de Carrión et al. (2008), adotou-se os limites de 45° (NE - Nordeste) e -45° (NO - Noroeste).

- *O aspecto do terreno em Uruguaiana (RS)*

Em geral, a cidade de Uruguaiana apresenta de uma forma bem distribuída pontos com bom grau de aptidão, alternando com pontos com baixa aptidão. Em algumas pequenas regiões é possível identificar tons mais escuros da cor vermelha, representando setores onde não seria recomendado construir a planta solar, conforme apresentado na figura 63.

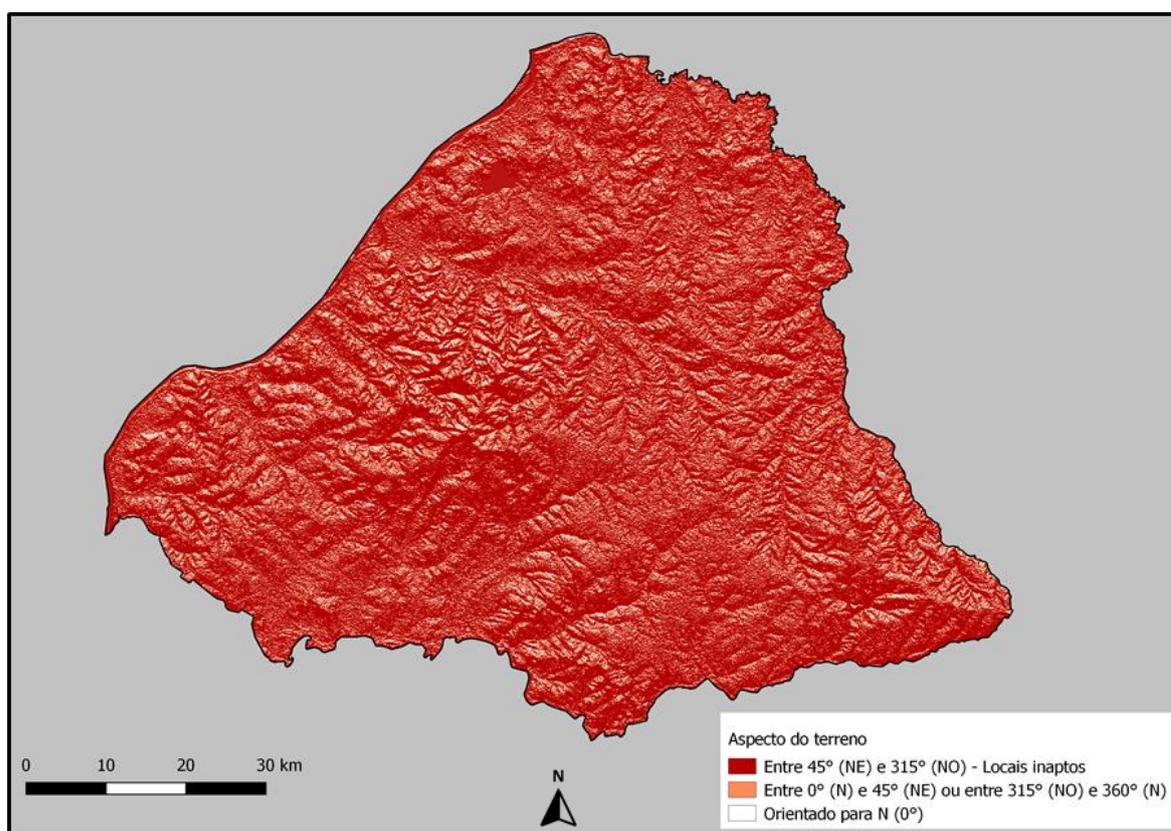


Figura 63 – O aspecto do terreno em Uruguaiana (RS)

Fonte: Elaborada pelo autor (2018).

- *O aspecto do terreno em Montes Claros (MG)*

No caso de Montes Claros, existem algumas regiões mais extensas com uma tonalidade de vermelho mais escuro, zonas consideradas inaptas. Apesar disso, muitos locais apresentam tons mais claros, sendo mais propícios para a implantação da usina solar. O mapa do município com estas informações pode ser visualizado na figura 64.

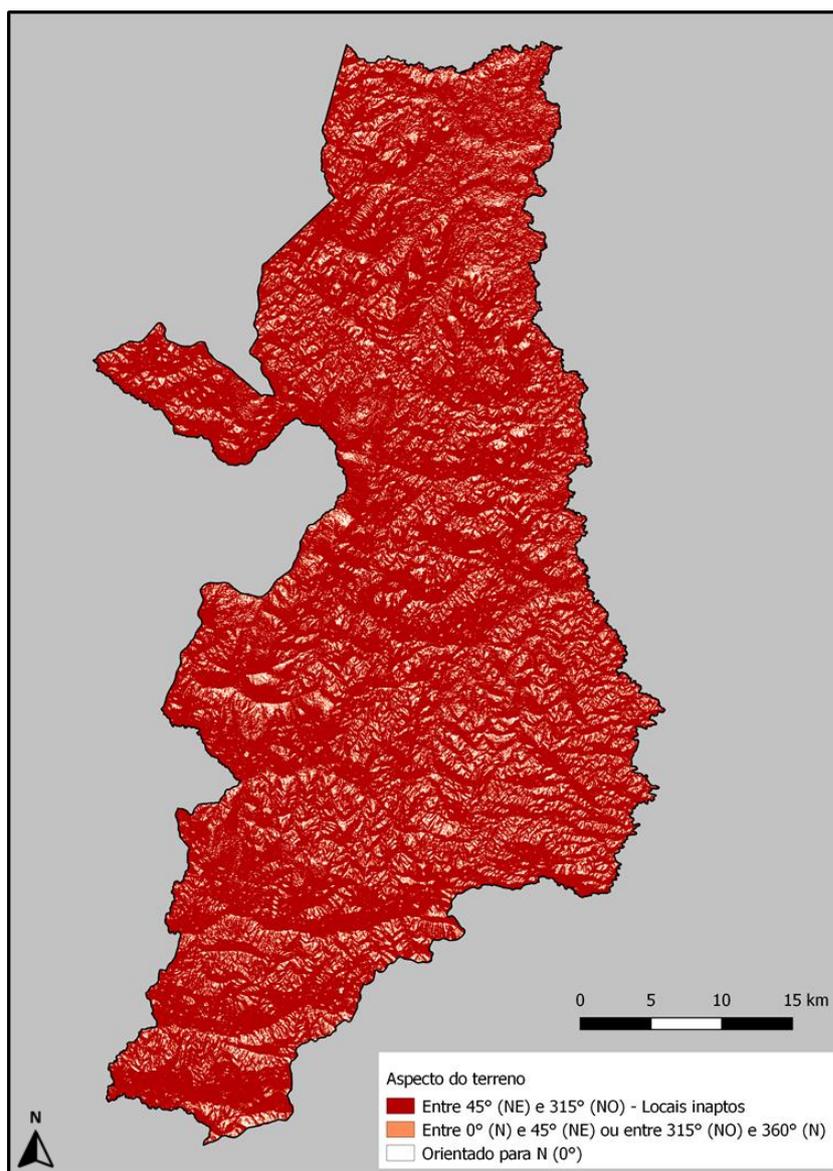


Figura 64 – O aspecto do terreno em Montes Claros (MG)

Fonte: Elaborada pelo autor (2018).

- *O aspecto do terreno em Bom Jesus da Lapa (BA)*

A cidade de Bom Jesus da Lapa possui um terreno quase inteiramente plano como foi possível constatar na análise de declividade. Da mesma forma, é possível verificar no mapa da figura 65 que praticamente não existem locais com baixos graus de aptidão. Somente na zona leste e no centro da cidade possuem pequenas áreas que podem ser consideradas como inaptas.

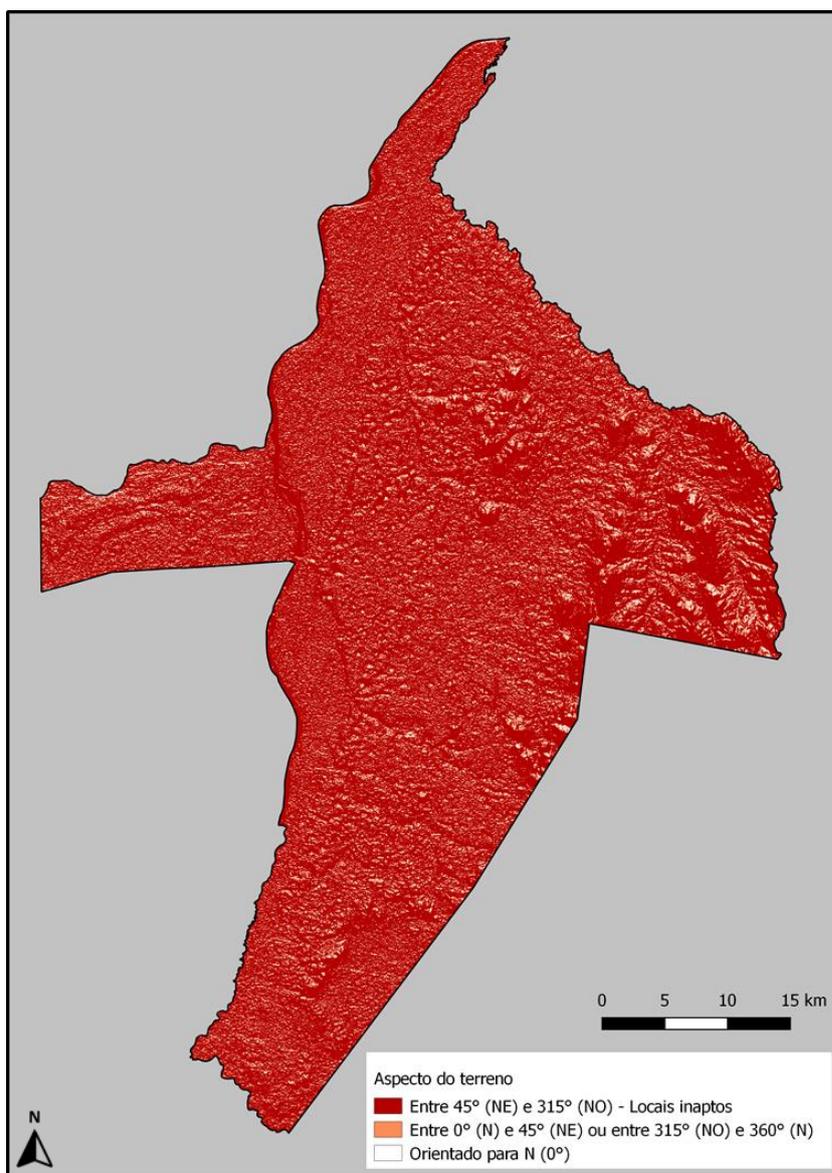


Figura 65 – O aspecto do terreno em Bom Jesus da Lapa (BA)

Fonte: Elaborada pelo autor (2018).

4.1.2.7 As zonas de exclusão para o estudo de localização

As zonas de exclusão do estudo de localização foram definidas a partir de arquivos *shapefile* disponibilizados pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) e também pelo Ministério do Meio Ambiente (MMA). Foram consideradas como inaptas para a construção da usina solar todas as áreas dentro dos biomas Pampa, Cerrado e Caatinga denominadas como floresta estacional decidual, formações pioneiras, savana e vegetação secundária.

As regiões com água e com reflorestamento (para evitar a incidência de sombras) também foram definidas como inaptas. As áreas urbanas mapeadas nos arquivos vetoriais fornecidos pelo IBGE foram incluídas nas zonas de exclusão devido a possíveis formações de sombras formadas por construções prediais. Por último, foi empregado neste estudo mais um arquivo *shapefile*, provido também pelo MMA, com dados de todas as unidades de conservação (UC) municipais, estaduais e federais, sendo essas áreas automaticamente desconsideradas dentro do estudo de localização.

- *As zonas de exclusão em Uruguaiiana (RS)*

O município de Uruguaiiana possui uma rede grande de rios e de pequenas lagoas, um lago relativamente grande na porção norte, além da área urbana na parte oeste de seu território, conforme pode ser observado na figura 66. Nenhuma unidade de conservação foi localizada.

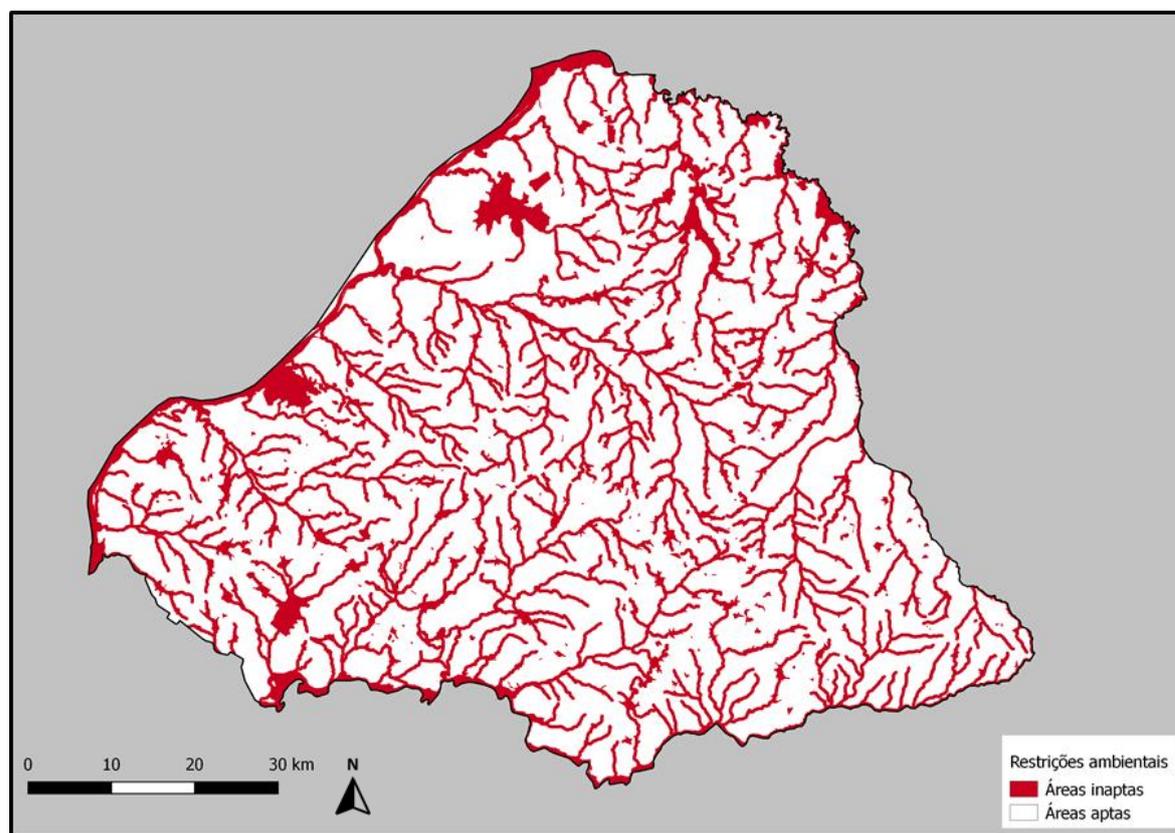


Figura 66 – Zonas de exclusão em Uruguaiiana (RS)

Fonte: Elaborada pelo autor (2018).

- *As zonas de exclusão em Montes Claros (MG)*

Em Montes Claros existem grandes áreas de restrição, principalmente nas áreas do centro e do norte do município. A maior parte das zonas de exclusão estão com a denominação “Floresta Estacional Decidual”. Além disso, há uma unidade de conservação na região central chamada de Parque Estadual da Lapa Grande. O mapa de Montes Claros com todas as suas restrições pode ser observado na figura 67.

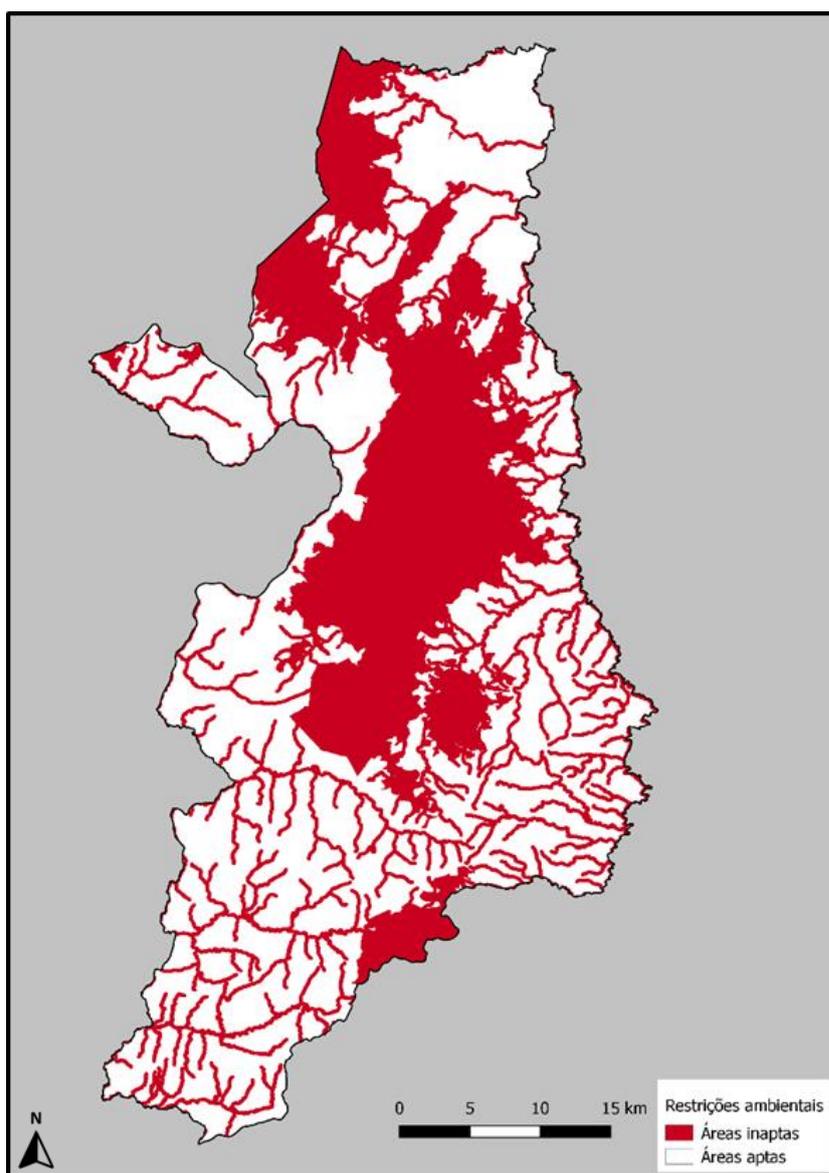


Figura 67 – Zonas de exclusão em Montes Claros (MG)

Fonte: Elaborada pelo autor (2018).

- *As zonas de exclusão em Bom Jesus da Lapa (BA)*

A cidade de Bom Jesus da Lapa possui grandes áreas de restrições por quase todo o território, mas de forma dispersa nas regiões sul, leste e oeste. A porção central possui pequenas zonas de exclusão, como rios delgados e pequenos lagos, sendo uma região mais propícia para a construção da planta solar, principalmente do centro para o norte, o que pode ser constatado na figura 68.

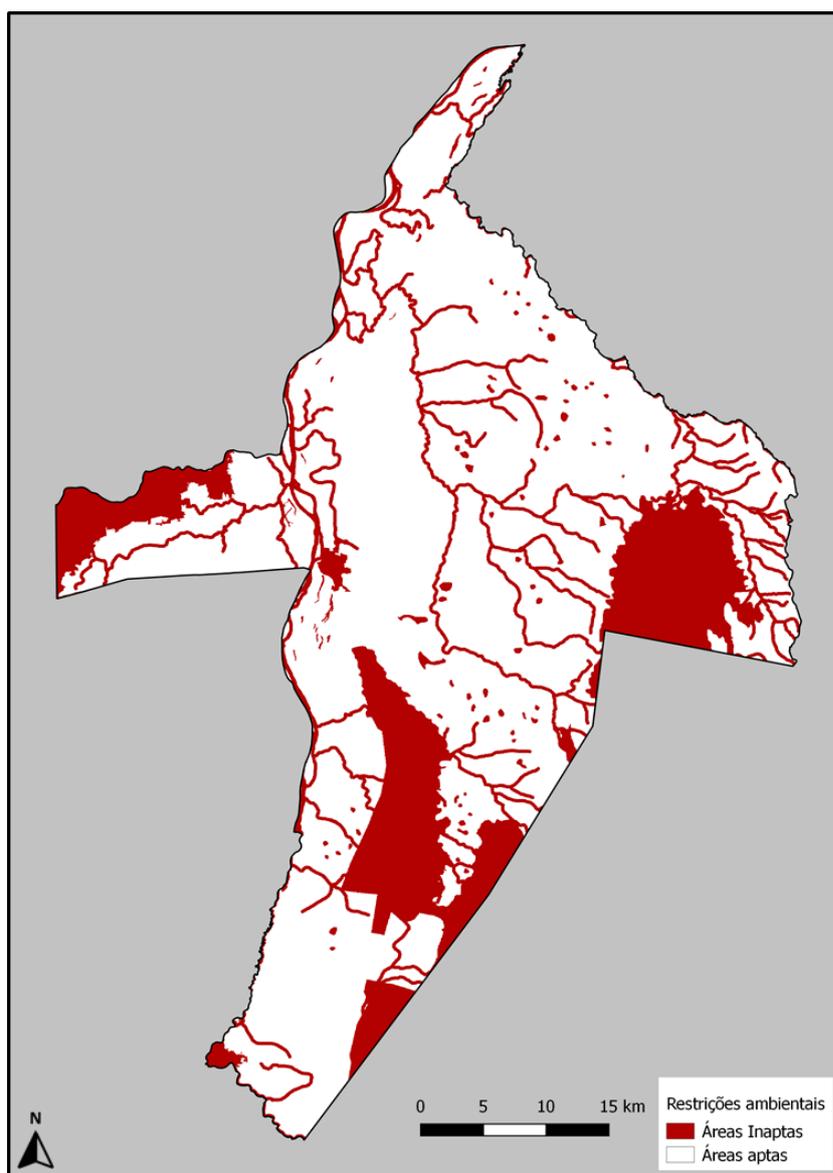


Figura 68 – Zonas de exclusão em Bom Jesus da Lapa (BA)

Fonte: Elaborada pelo autor (2018).

4.1.3 Resultado final do estudo de localização

Finalmente, a partir da análise dos diversos critérios estabelecidos, utilizou-se a lógica *Fuzzy* para definir, dentro de cada um dos três municípios, a área mais indicada para a instalação da planta CSP com o sistema *Dish-Stirling*. Além dos arquivos georreferenciados já apresentados, foram utilizados o Atlas Brasileiro de Energia Solar (2017) e o Atlas Solarimétrico do Brasil (2000).

Na tabela 25 são apresentados dados comparativos entre áreas escolhidas dentro de cada um dos municípios.

Tabela 25 – Comparação entre os estudos de localização dos três municípios

Município	Uruguaiana (RS)	Montes Claros (MG)	Bom Jesus da Lapa (BA)
Temperatura média anual (°C) ²	20	30	32
Precipitação acumulada anual (mm) ²	1450 - 1650	850 - 1050	850 - 1050
Insolação diária, média anual (horas) ³	7	7	7
Radiação solar global diária, média anual (kWh/m ² .dia) ³	4,44	4,44	5,00
Irradiância Direta Normal (DNI), média anual (W/m ²)	5107	5723	6133
Distância de linhas de transmissão (km)	0	0	0
Tensão das linhas de transmissão (kV)	230	345	500
Distância de principais rodovias (km)	0	0	0
Distância de áreas urbanas (km)	0	24	0
Coordenadas utilizadas no estudo	29.5°S, 56.7°W	16.8°S, 44.1°W	13.1°S, 43.3°W
Área total do local mais indicado (km ²)	132	55	388

Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

² Atlas Brasileiro de Energia Solar de 2017

³ Atlas Solarimétrico do Brasil de 2000

- *O resultado final no município de Uruguaiiana (RS)*

Principalmente devido a sua latitude, pois é a cidade mais ao sul na comparação deste estudo de localização, ela possui a menor temperatura média anual. A precipitação anual acumulada, quantidade média de chuvas é a maior entre os três municípios, ficando entre 1450 e 1650 milímetros. O número médio de horas diárias de insolação é o mesmo encontrado nas três localidades deste estudo, ficando com o valor de 7 horas, assim como a radiação solar global diária que é praticamente a mesma, sendo apenas um pouco superior no município do Nordeste do país. A Irradiância Direta Normal (DNI) é a menor entre as três cidades apresentando uma média anual de 5107 W/m^2 no local mais indicado.

A distância entre as linhas de transmissão, entre as principais rodovias e as áreas urbanas é um fator positivo, pois pode ser nula se for escolhido um local no encontro destas variáveis. A tensão da linha de transmissão em Uruguaiiana é de 230 kV, menor valor entre as três cidades. A área que foi considerada como a mais indicada para a construção da usina solar possui um tamanho intermediário desta avaliação, apresentando uma área total de 132 km^2 . A figura 69 está exibindo esta área marcada em verde.

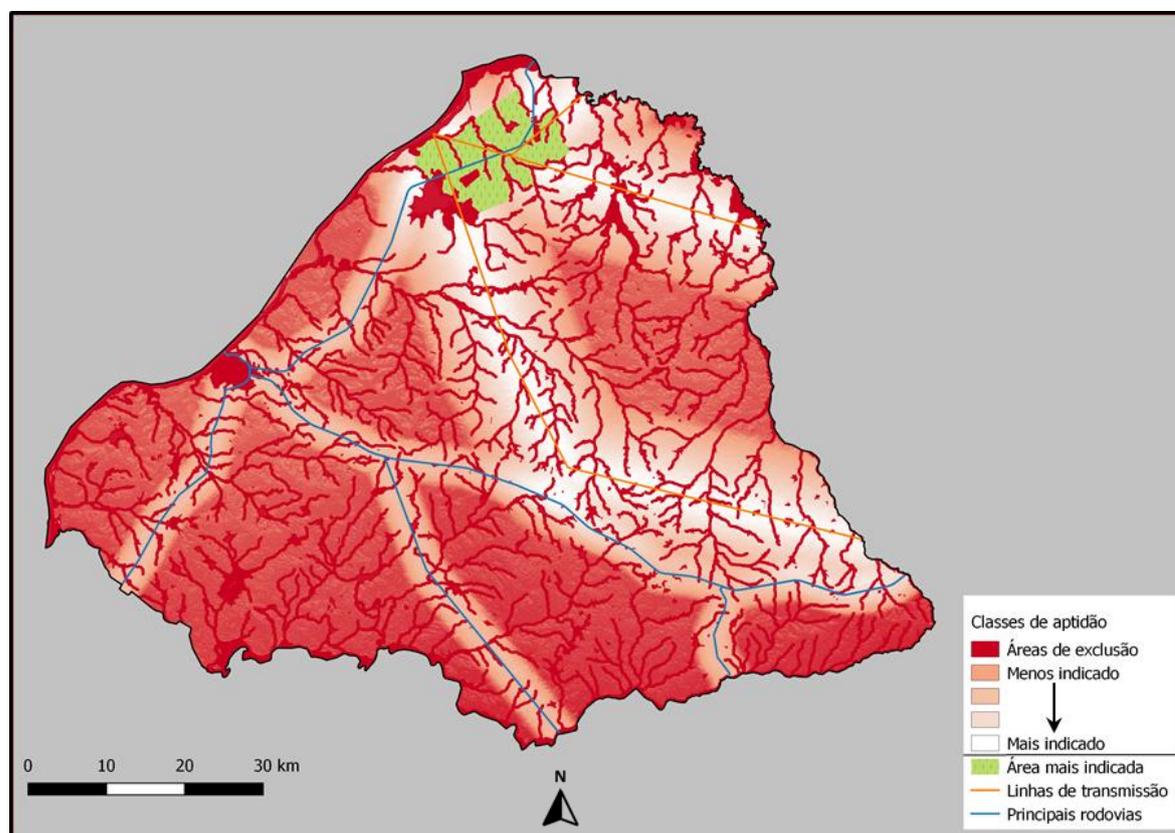


Figura 69 – Área mais indicada em Uruguaiiana (RS)

Fonte: Elaborada pelo autor (2018).

- *O resultado final no município de Montes Claros (MG)*

A cidade de Montes Claros, estabelecida em uma região dentro do bioma Cerrado, possui uma boa localização em relação à incidência solar no Brasil. A temperatura média anual é de 30°C, sendo praticamente a mesma do município nordestino desta comparação. A quantidade média total anual de chuvas encontra-se entre 850 e 1050 milímetros. A radiação solar global diária é igual ao valor medido em Uruguaiana com 4,44 kWh/m² e a Irradiância Direta Normal apresenta uma média anual de 5723 W/m² no local mais indicado, ficando entre os valores encontrados para os outros dois municípios.

O local encontrado no resultado final e apresentado em verde a seguir na figura 70 está adjacente à uma rodovia principal e a linha de transmissão com 345 kV está atravessando a área. Entretanto, a área urbana de Montes Claros tem uma distância de aproximadamente 24 quilômetros, mas é uma distância relativamente curta, possibilitando um transporte diário de trabalhadores para a possível construção e operação de uma usina solar. A área considerada como indicada é a menor entre as três cidades com um valor de 55 km².

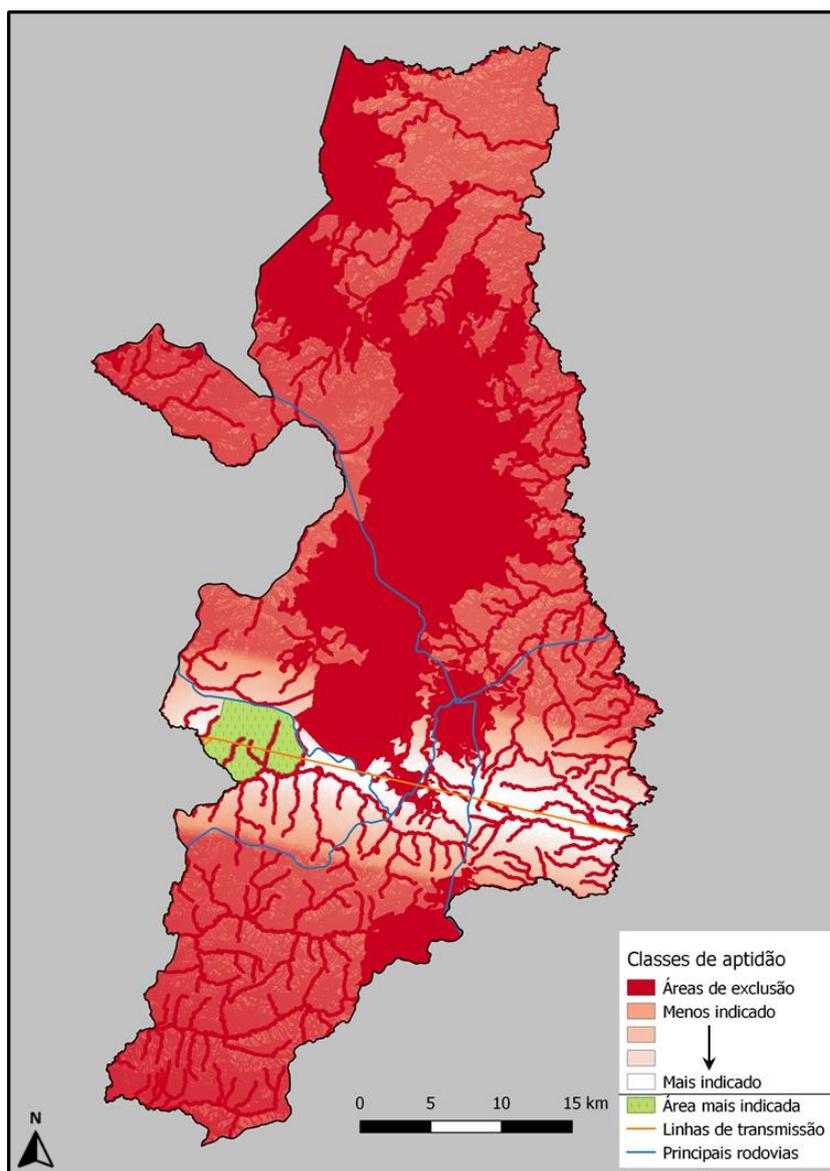


Figura 70 – Área mais indicada em Montes Claros (MG)

Fonte: Elaborada pelo autor (2018).

- *O resultado final no município de Bom Jesus da Lapa (BA)*

O terceiro município da avaliação, Bom Jesus da Lapa, na região da Caatinga, apresenta uma temperatura média anual de 32°C, maior entre as cidades da comparação. A média total anual de chuvas é mesma da cidade de Montes Claros, definida entre 850 e 1050 milímetros. A radiação solar global diária é a maior das três cidades, com 5 kWh/m², assim como a Irradiância Direta Normal que tem uma média anual de 6133 W/m² na área marcada em verde na figura 71.

Ao sul da área indicada está localizada a rodovia que poderia dar acesso à planta solar e a linha de transmissão de 500 kV atravessa esta região, ou seja, estes dois subcritérios poderiam ser atendidos, caso fosse construída uma usina solar neste município. A área urbana também é vizinha ao local e, desta forma, a distância de deslocamento dos trabalhadores pode ser desconsiderada. A área total do local mais indicado é a maior da comparação com de 388 km².

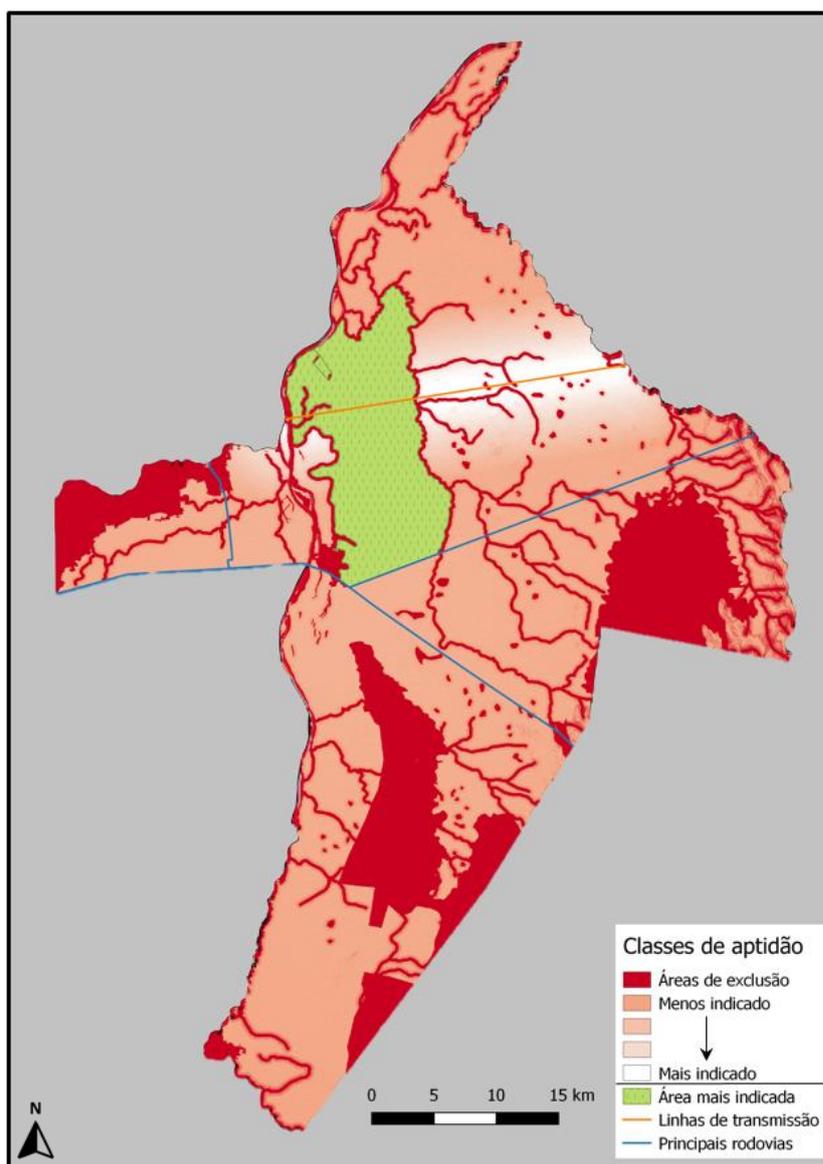


Figura 71 – Área mais indicada em Bom Jesus da Lapa (BA)
Fonte: Elaborada pelo autor (2018).

4.2 OS RESULTADOS DA ANÁLISE FINANCEIRA PARA A IMPLANTAÇÃO DE UMA USINA SOLAR COM O SISTEMA *DISH-STIRLING*

4.2.1 Resultado da estimativa de custos para a construção da usina solar

A estimativa de custos foi realizada com base no material produzido pela empresa Worley Parsons Group Inc. (WPGI), contratada pelo *National Renewable Energy Laboratory* (NREL) e publicado por Turchi (2010). A WPGI ficou responsável por elaborar um projeto conceitual e uma estimativa de custos de uma planta termossolar de referência com capacidade de 100 MW. Ainda, segundo o autor, levantamentos foram efetuados pelo NREL com construtoras e fornecedores de equipamentos de tecnologias CSP para validar este trabalho.

A tabela 26 a seguir apresenta a primeira parte da estimativa de custos que consiste na listagem de todos os custos previstos para utilizar como dados para o cálculo do fluxo de caixa e também para as simulações no *System Advisor Model* (SAM). Turchi (2010) descreve que o intervalo de confiança considerado pela WPGI para esta estimativa foi de $\pm 30\%$ e que os custos foram calculados para a implementação da usina solar com mão de obra local, localizada no sudoeste do Arizona, Estados Unidos.

Tabela 26 – Levantamento de dados para calcular o fluxo de caixa e simulações no SAM

Custos Diretos (CD)	Valores utilizados
Sistemas <i>Dish-Stirling</i>	R\$ 5250,04/kW
Subestação	R\$ 191.524,10
Contingências	10,0% do CD
Custos indiretos (CI)	
Engenharia, Suprimento e Construção (EPC)	15,0% do CD
Gerenciamento do Projeto	3,5% do CD
Custos de Operação e Manutenção (O&M)	
Custos de manutenção variáveis por energia gerada	R\$ 11,10/MWh
Outros Custos	
Disponibilidade dos sistemas <i>Dish-Stirling</i>	96%

Fonte: Adaptado de Turchi (2010).

A definição de custos com os sistemas *Dish-Stirling* foi proposta por Khan et al. (2011). Para esta dissertação, o equipamento ficou com um valor total de R\$ 5250,04, convertido com a cotação do dia 16 de agosto de 2018. O custo com a subestação foi definido a partir de um demonstrativo de formação de preços para a construção de uma subestação no Instituto Federal Sul-Rio-Grandense e corrigido com a inflação até julho de 2018 (IFSul, 2011).

O percentual apresentado na tabela 26, referente ao custo direto com contingências, assim como os custos indiretos com engenharia, suprimento, construção e com o gerenciamento da obra foram definidos na publicação de Turchi (2010). Os custos variáveis de operação e manutenção (O&M) foram definidos com base nas definições de Khan et al. (2011), chegando a um valor de R\$ 11,10 por cada MWh produzido pela planta solar.

A disponibilidade que ficou fixada em 96%, definida por Turchi (2010), considerando que cada equipamento pode parar em uma média de 14 dias por ano também foi aplicada nesta estimativa. A tabela 27 apresenta a composição dos custos e também o valor total estimado para a construção da usina solar, quantia necessária para a composição dos dados que foram utilizados para analisar a viabilidade financeira do projeto.

Tabela 27 – Custos totais de construção da planta solar

Custos Diretos (CD)	Valores unitários	Valores totais
Sistemas <i>Dish-Stirling</i> (Total de 100 MW)	R\$ 5250,04/kW	R\$ 525.004.000,00
Subestação	R\$ 191.524,10	R\$ 191.524,10
Contingências	10,0% do CD	R\$ 52.519.552,41
Total dos custos diretos		R\$ 577.715.076,51
Custos indiretos (CI)		
Engenharia, Suprimento e Construção (EPC)	15,0% do CD	R\$ 86.657.261,48
Gerenciamento do Projeto	3,5% do CD	R\$ 20.220.027,68
Total dos custos indiretos		R\$ 106.877.289,15
Total dos custos (CD+CI)		R\$ 684.592.365,66

Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

O gráfico a seguir (figura 72) apresenta a composição dos custos totais, diretos e indiretos, para a construção da usina solar. Nesta análise é possível identificar claramente que os custos de aquisição dos sistemas *Dish-Stirling* possuem o maior impacto no valor total do empreendimento. Essa tecnologia ainda não possui uma produção em larga escala e, desta forma, tem um preço elevado de aquisição.

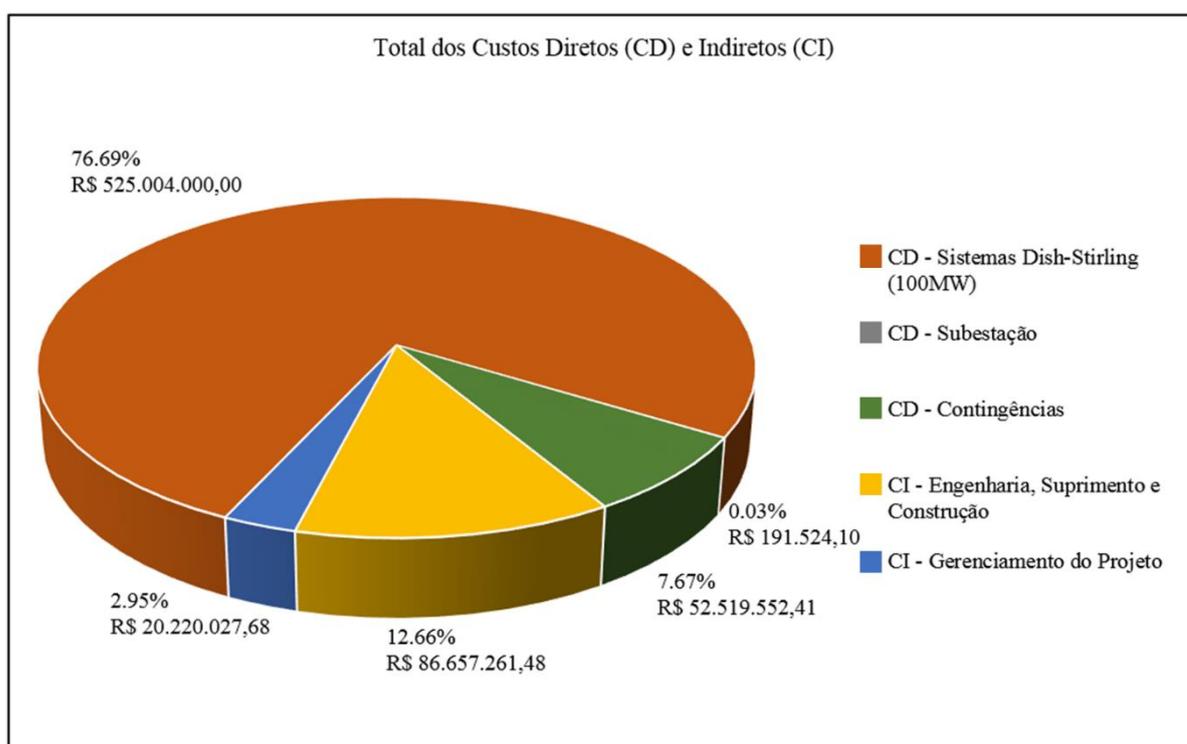


Figura 72 – Composição dos custos diretos e indiretos para a construção da usina solar
Fonte: Elaborada pelo autor (2018).

É importante destacar que esta estimativa dos custos de construção tem fins acadêmicos e que a tabela 27 apresentada anteriormente não inclui os seguintes custos na aplicação da análise financeira:

- Permissões e licenças legais como licença prévia, de instalação e de operação;
- Aquisição de terreno serviços de preparação do solo para a construção da planta;
- Investigações geotécnicas e outras avaliações no terreno;
- Impostos, taxas de importação e qualquer taxa legal;
- Todos os custos de infraestrutura fora dos limites da planta (linhas de transmissão e estradas);
- Habitações e instalações temporárias para as equipes de construção.

Após a definição dos dados da tabela 27, o próximo passo foi definir os custos de operação e manutenção (O&M) da planta. Nas três cidades do estudo de localização, Uruguaiana, Montes Claros e Bom Jesus da Lapa, nas áreas mais indicadas para a construção da usina foi possível identificar locais com linhas de transmissão disponíveis e nas margens de rodovias. Por este motivo, os custos de infraestrutura foram desconsiderados.

O primeiro custo de manutenção contabilizado a seguir na tabela 28 é o custo variável com equipamentos que foi medido por quantidade de energia gerada (R\$/MWh). A partir do valor recebido anualmente com a geração de energia elétrica deve ser paga a Taxa de Fiscalização de Serviços de Energia Elétrica (TFSEE), criada pela Lei nº 9.427/1996 que tem o objetivo remunerar as despesas da ANEEL com fiscalização e regulação econômica. Também foi calculado como custo fixo o percentual de 0,1% sobre o valor total do investimento, referente ao seguro que foi previsto para ser pago anualmente.

Por último, foi incluído um custo de mão de obra com equipes de administração, operação e manutenção da planta solar. As estimativas dos salários das equipes para a realização dos cálculos desses custos foram extraídas do Cadastro Geral de Empregados e Desempregados (CAGED) do Ministério do Trabalho e Emprego (MTE) entre novembro de 2017 e junho de 2018.

Para considerar um gasto com funcionários, a equipe mínima considerada para levantar o valor que seria lançado no fluxo de caixa foi composta de 1 técnico de administração, 8 técnicos em eletrotécnica e 8 técnicos em eletrônica, incluindo as cargas tributárias nos estados das três cidades da análise desta dissertação. A composição de todos os custos previstos neste trabalho com operação e manutenção estão exibidos a seguir na tabela 28.

Tabela 28 – Custos totais anuais de operação e manutenção

Custos totais de Operação e Manutenção (O&M)	Valores
Custos de manutenção variáveis por energia gerada	R\$ 11,10/MWh
TFSEE (Percentual sobre o benefício econômico anual)	0,4% ao ano
Seguro (0,1% sobre o investimento)	R\$ 684.592,37 ao ano
Custos fixos de mão de obra para operação e manutenção (Rio Grande do Sul)	R\$ 834.898,45 ao ano
Custos fixos de mão de obra para operação e manutenção (Minas Gerais)	R\$ 736.619,57 ao ano
Custos fixos de mão de obra para operação e manutenção (Bahia)	R\$ 688.692,69 ao ano

Fonte: Elaborada pelo autor (2018).

4.2.2 Resultado da avaliação econômica para a construção da usina solar

A etapa seguinte da análise financeira para avaliar a viabilidade econômica da construção da planta solar foi a realização da avaliação econômica por meio da elaboração de um fluxo de caixa e os cálculos de VPL, TIR e do *Payback* descontado. Para a elaboração do fluxo de caixa, em primeiro lugar foi calculado com o auxílio do SAM as receitas geradas com a produção de energia elétrica.

Como dados de entrada para encontrar a quantidade de kWh gerados por ano e, conseqüentemente, a receita, foi utilizado um total de 4.000 sistemas *Dish-Stirling* com 25 kW de capacidade. As receitas encontradas no SAM estão demonstradas a seguir na tabela 29, onde foi considerada uma remuneração da energia gerada com base no leilão de geração A-4 da ANEEL realizado em fevereiro de 2018 que considerou um pagamento de R\$ 312,00 por MWh para energia solar.

Tabela 29 – Receitas anuais calculadas no SAM

Municípios	Receitas anuais
Uruguaiana	R\$ 43.183.583,04
Montes Claros	R\$ 63.392.890,08
Bom Jesus da Lapa	R\$ 66.949.677,60

Fonte: Elaborada pelo autor (2018).

O próximo passo da avaliação econômica consistiu em levantar todos os dados necessários para a criação do fluxo de caixa. A usina, conforme foi discutido anteriormente, possui uma capacidade máxima de geração de energia elétrica de 100 MW, distribuídos por 4000 conjuntos motor Stirling-concentrador solar de 25 kW. Além da energia gerada, o SAM também forneceu a informação da área total de 900.000 m² do empreendimento, considerando uma distância de 15 metros entre cada equipamento.

A partir do valor total do investimento estimado foi possível pesquisar linhas de crédito para financiar a construção da usina solar. No Banco Nacional do Desenvolvimento (BNDES) foi encontrada uma linha de crédito para o financiamento de unidades solares de geração de energia elétrica com uma taxa de 0,9% ao ano com uma taxa de carência de 6 meses após a partida da planta. Além disso, existia a definição de que somente 80% do valor total pode ser financiado em até 24 anos.

A partir dessas definições, o valor do empréstimo totalizou R\$ 547.673.892,53, calculado pelo Sistema de Amortização Constante (SAC), praticado normalmente pelo BNDES a ser pago em 240 meses. Foi calculado um prazo total de construção de 24 meses e, desta forma, o financiamento começaria a ser pago no trigésimo mês, aproveitando os 6 meses de carência definidos nas regras do BNDES.

O período da análise ficou determinado em 25 anos, porque Ripasso Energy (2016), Cleanergy (2017) e Williams (2017) descreveram conjuntos motor Stirling-concentrador solar com vida útil iguais ou superiores a este período. A planta começaria a produzir energia elétrica no prazo de 6 meses após o início da obra. A produção de energia aumentaria de forma linear a partir dos 6 meses até atingir o pico de produção a partir do vigésimo quarto mês. Assim, o período máximo de funcionamento da usina solar com a sua capacidade máxima é de 23 anos.

A Taxa Mínima de Atratividade (TMA), segundo Chenço (2016), pode variar de pessoa para pessoa, pois depende da percepção ao risco de quem vai definir este índice, ou seja, não existe uma regra específica para ser aplicada. Nesta dissertação, a TMA foi definida a partir do cálculo do Custo Médio Ponderado de Capital (CMPC). Primeiro, foi levado em consideração o valor de 80% referente ao montante financiado pelo BNDES com juros de 0,9 ao ano. Depois foi empregado o valor de 20% relativo ao capital próprio empregado na planta solar, juntamente com uma *Security Market Line* (SML) de 41,5% para completar o cálculo do CMPC. A taxa

considerada livre de risco que foi utilizada no cálculo foi a SELIC, que em agosto de 2018 estava com um valor anual de 6,5%. Assim, foi encontrada uma TMA de 9%, conforme demonstrado na equação abaixo.

$$CMPC = (0,8 \times 0,9) + (0,2 \times 41,5) = 9\% \quad (14)$$

O *Payback* Descontado aceitável para este projeto não poderia ultrapassar o período de 10 anos, tempo normalmente definido na área de geração de energia elétrica, de acordo com Gorshkov et al. (2018). Todas essas informações podem ser consultadas a seguir na tabela 30.

Tabela 30 – Custos totais anuais de operação e manutenção

Informações da planta solar	Quantidades
Capacidade máxima de geração	100 MW
Número total de sistemas <i>Dish-Stirling</i>	4000 unidades
Área total da planta solar	900.000 m ²
Valor total do investimento	R\$ 684.592.365,66
Valor do capital próprio (20% do investimento total)	R\$ 136.918.473,13
Valor do financiamento (80% do valor do investimento)	R\$ 547.673.892,53
Taxa de juros do empréstimo	0,9% ao ano
Período da análise financeira	25 anos
Período de construção da planta solar	24 meses
Período total de operação da planta solar	24,5 anos
Período total de operação da planta solar com capacidade máxima	23 anos
Taxa mínima de atratividade (TMA)	9,0%
Prazo máximo de retorno do investimento (<i>Payback</i> descontado)	10 anos

Fonte: Elaborada pelo autor (2018).

A próxima seção deste trabalho apresenta os resultados obtidos com a análise financeira das cidades de Uruguaiana, Montes Claros e Bom Jesus da Lapa.

4.2.3 Resultado final da análise financeira

Esta parte da análise financeira apresenta informações sobre a produção de energia elétrica em cada uma das três cidades avaliadas, assim como o resultado do estudo de previsão

do fluxo de caixa. Por último, é apresentada uma comparação para avaliar as diferenças entre os três municípios.

- *A análise financeira no município de Uruguaiana (RS)*

O primeiro município a ser analisado, Uruguaiana tem como desvantagem a localização mais ao sul do Brasil, o que acaba prejudicando a geração de energia elétrica nos meses de inverno. A cidade foi selecionada inicialmente por apresentar a maior incidência solar na Região Sul e, apesar de haver um alto nível de radiação durante o verão, em junho e julho a produção de energia diminui consideravelmente.

A figura 73 a seguir apresenta o gráfico com a produção média mensal de energia em kWh, gerado a partir de informações coletadas entre os anos de 1978 e 2000, disponíveis na biblioteca do SAM. A queda de produção média nos meses de junho e julho que apresentam um nível de 8.675.920 kWh e 8.650.240 kWh, respectivamente, ficaram muito abaixo dos 15.871.800 kWh produzidos em média nos meses de janeiro.

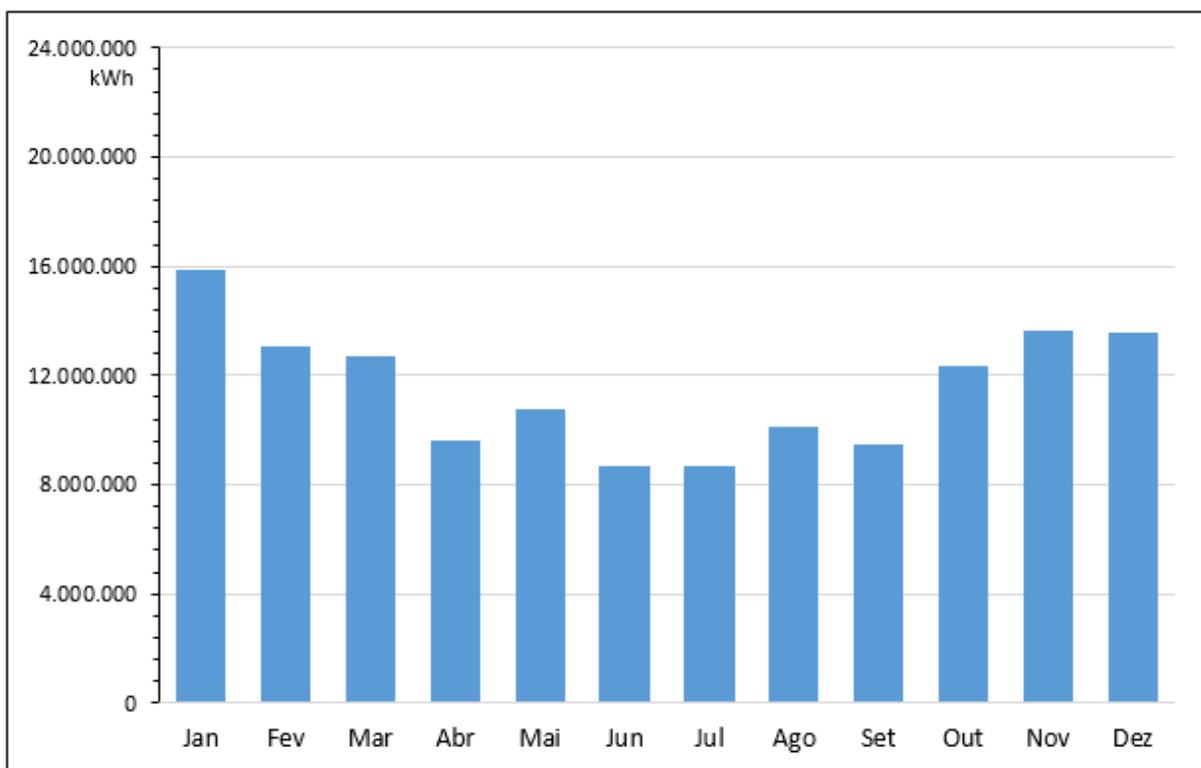


Figura 73 – Produção de energia elétrica em kWh anualmente em Uruguaiana (RS)
Fonte: Elaborada pelo autor (2018).

O Valor Presente Líquido (VPL) apresentou um resultado negativo de 15.764.023,39 reais, a Taxa Interna de Retorno calculada ficou em 7,67%, abaixo da Taxa Mínima de Atratividade (TMA) estipulada para este contrato de 9%. Para corroborar com esta análise, o *Payback* descontado foi avaliado e ficou com resultado maior do que 25 anos, inviabilizando o projeto nesta cidade. A figura 74 a seguir apresenta um gráfico que demonstra a projeção do fluxo de caixa descontado acumulado e que no final do período da análise ainda está negativo.

O Custo Nivelado de Energia (LCOE) que é o cálculo do custo unitário por kWh desta usina foi baseado em uma vida útil de 25 anos, assim como o valor encontrado para as outras duas cidades. Foi encontrado um custo de R\$ 0,2170 por kWh de energia gerada, sendo o valor mais alto encontrado entre os três municípios da comparação deste trabalho.

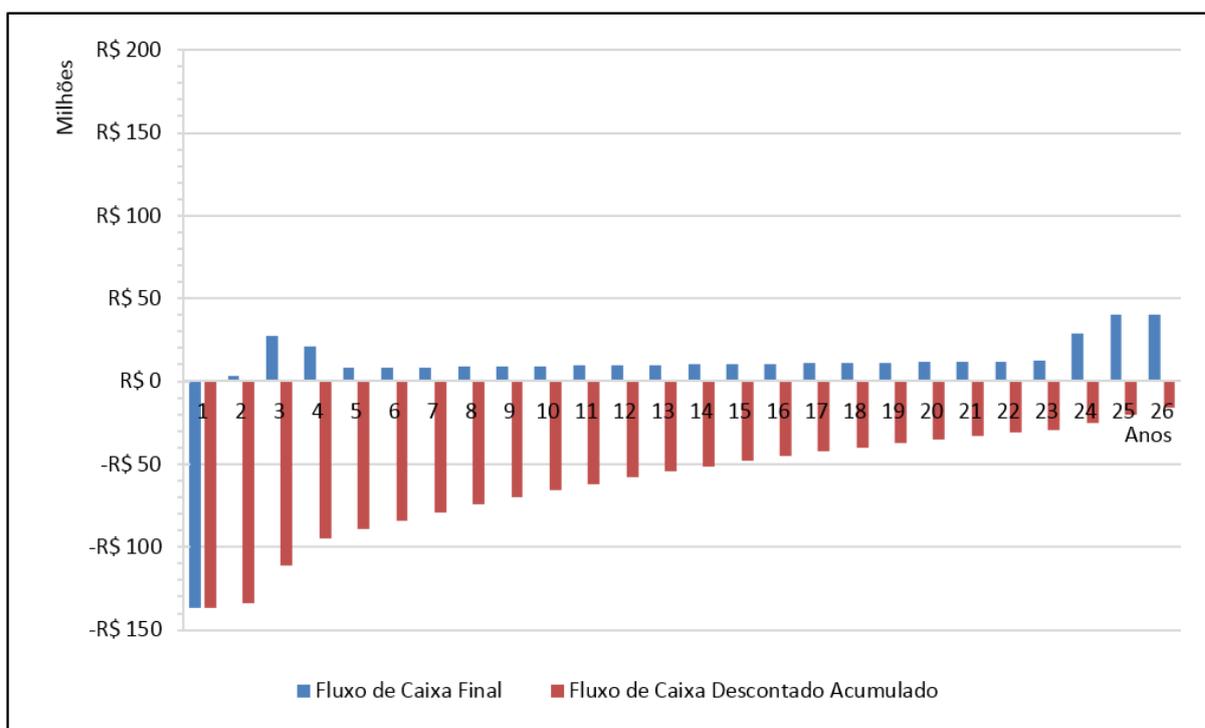


Figura 74 – Análise do fluxo de caixa em Uruguaiana (RS)

Fonte: Elaborada pelo autor (2018).

- *A análise financeira no município de Montes Claros (MG)*

Os dados utilizados a partir da biblioteca do *System Advisor Model* (SAM) para a realização do cálculo da produção média anual de energia elétrica foram coletados entre os anos de 1998 e 2016. Os resultados encontrados demonstraram o grande potencial da cidade de Montes Claros para a geração de energia elétrica a partir da luz solar.

Apesar de apresentar na simulação no SAM uma produção de energia elétrica mais baixa nos meses de novembro a março, os altos níveis nos demais meses compensam essas reduções. Os valores de produção de energia elétrica estão mais próximos de Bom Jesus da Lapa do que Uruguaiana. O gráfico a seguir da figura 75 exibe as médias mensais de kWh gerados, obtidos por meio do cálculo realizado no SAM.

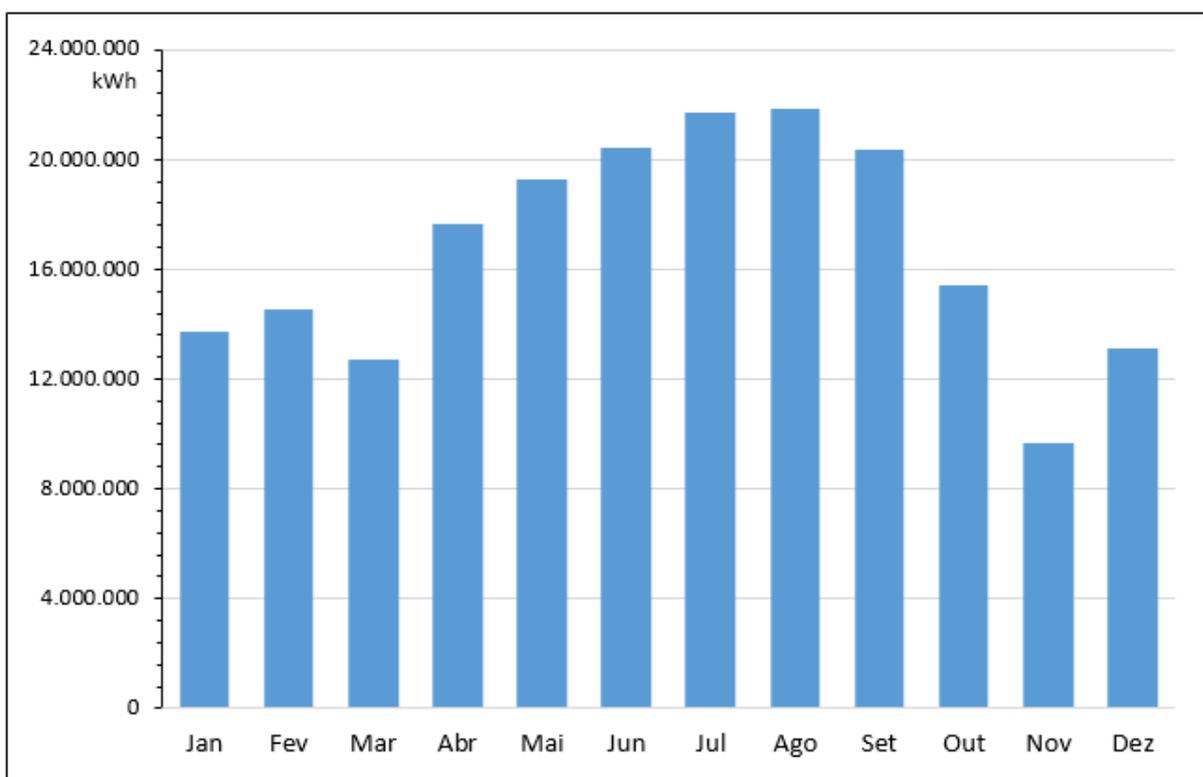


Figura 75 – Produção de energia elétrica em kWh anualmente em Montes Claros (MG)
Fonte: Elaborada pelo autor (2018).

Em Montes Claros foi encontrado um VPL de R\$ 143.363.721,02 e também uma TIR de 19,54%, bem superior ao valor da Taxa Mínima de Atratividade (TMA) que foi definida em 9%. A partir do cálculo de *Payback* descontado foi encontrado um tempo de retorno do capital investido de 7 anos, 1 mês e 11 dias. No caso do LCOE, com o valor de 0,1587/kWh, apresentou um valor mais baixo que Uruguaiana e maior do que Bom Jesus da Lapa. A figura 76 apresenta a análise do fluxo de caixa de Montes Claros.

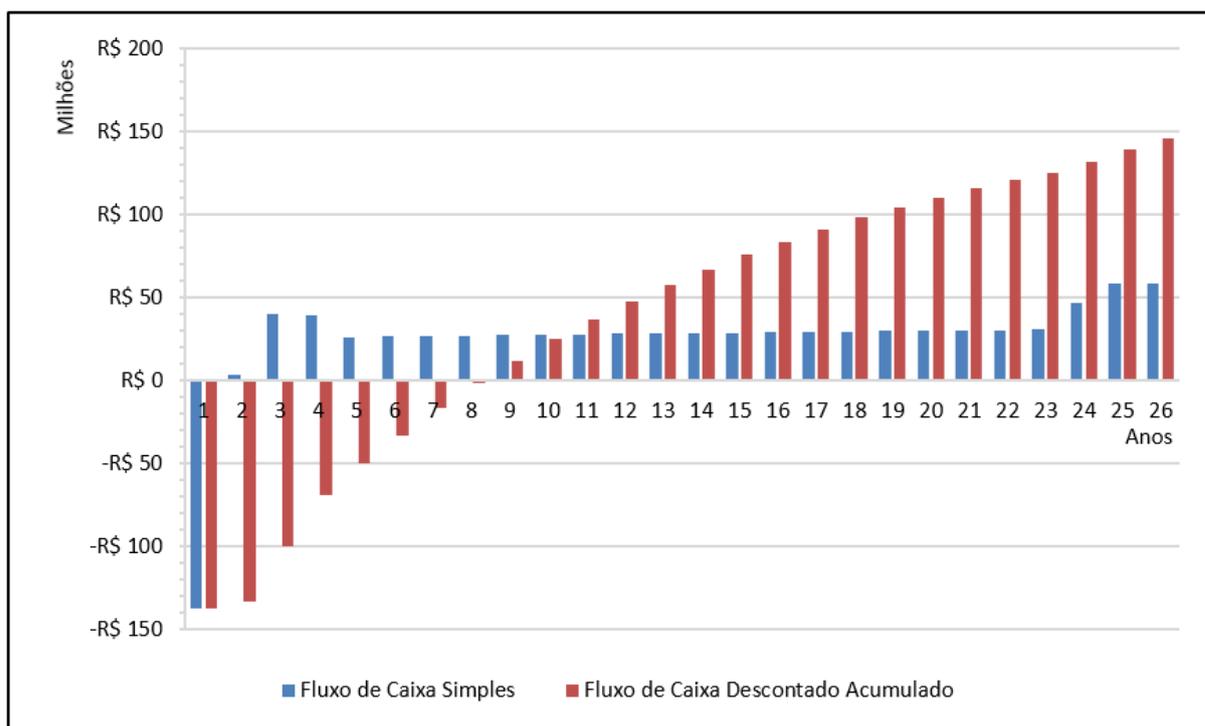


Figura 76 – Análise do fluxo de caixa em Montes Claros (MG)

Fonte: Elaborada pelo autor (2018).

- *A análise financeira no município de Bom Jesus da Lapa (BA)*

A cidade de Bom Jesus da Lapa está localizada na região do Nordeste brasileiro, no bioma Caatinga e, historicamente, esta parte área possui a melhor radiação solar do Brasil, conforme pode ser observado em mapas que avaliam este tipo de característica. Os meses de fevereiro e dezembro possuem as menores médias de geração de energia, mas quando comparados com as médias mensais mais baixas de Uruguaiana, os valores com as menores médias de produção de energia elétrica em Bom Jesus da Lapa ainda são 25% maiores.

Como pode ser observado a seguir no gráfico da figura 77, a produção média mensal de energia em kWh no município de Bom Jesus da Lapa é muito semelhante à cidade mineira, justamente por estarem em uma região muito próxima. As informações foram utilizadas, também da biblioteca do SAM entre os anos de 1998 e 2016. Este gráfico apresenta as maiores médias de energia gerada entre as três cidades, com uma produção média anual de 214.582.464 kWh, valor quase 10% maior que Montes Claros, a cidade com a segunda melhor avaliação desta avaliação que está com uma média por ano de 200.373.616 kWh.

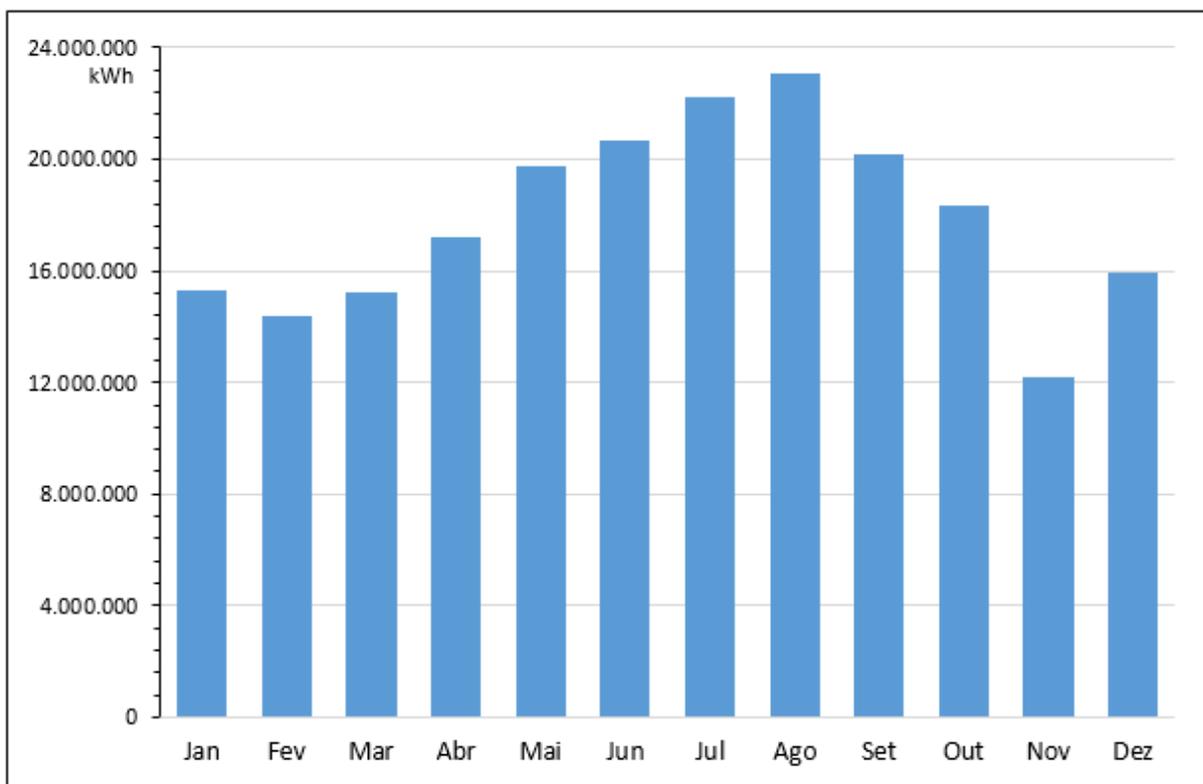


Figura 77 – Produção de energia elétrica em kWh anualmente em Bom Jesus da Lapa (BA)
Fonte: Elaborada pelo autor (2018).

O VPL de Bom Jesus da Lapa é o maior entre as três cidades analisadas com R\$ 185.039.927,20, assim como a TIR encontrada que apresentou um valor de 22,01%. Segundo o *Payback* descontado demonstrado na figura 78, o retorno do investimento é recuperado em 6 anos, 1 mês e 20 dias, sendo o prazo mais curto dos locais estudados e bem abaixo de *Payback* Descontado definido neste trabalho. O LCOE calculado também está coerente com os demais índices encontrados com um custo de R\$ 0,1493 por kWh, sendo o valor mais baixo encontrado nessa análise.

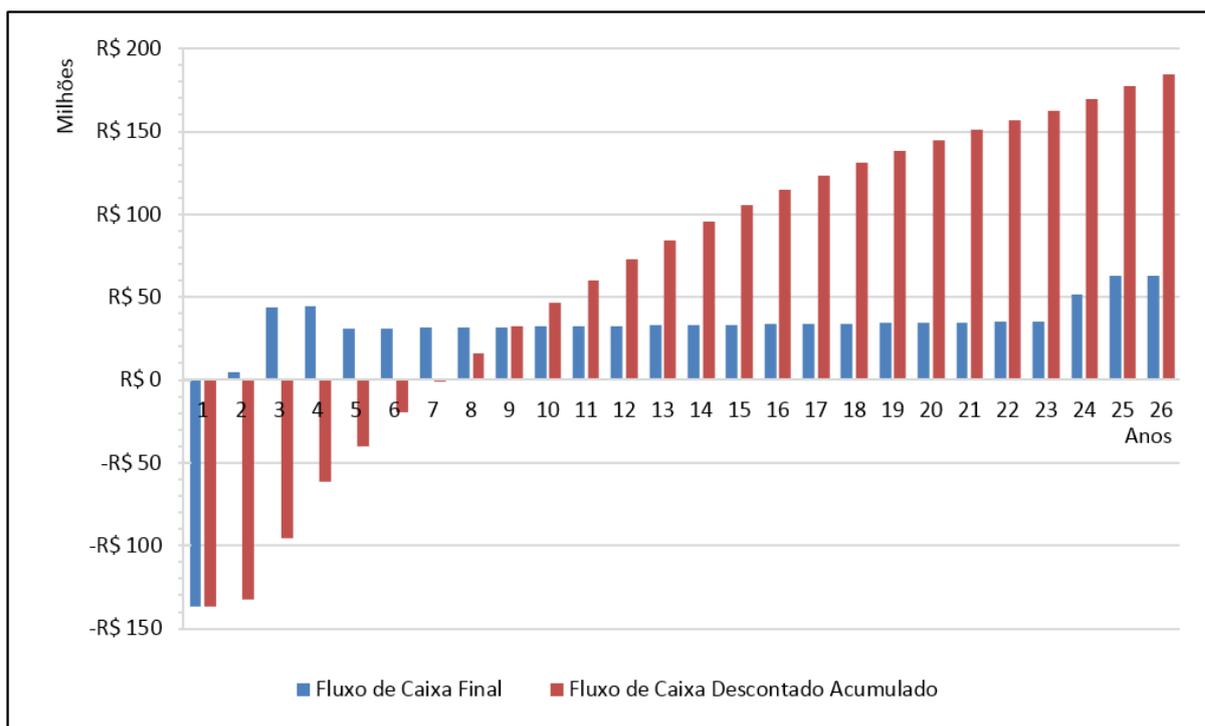


Figura 78 – Análise do fluxo de caixa em Bom Jesus da Lapa (BA)

Fonte: Elaborada pelo autor (2018).

- *Comparação entre as análises financeiras dos três municípios*

A tabela 31 a seguir apresenta a comparação entre os três municípios e claramente é possível identificar que a cidade de Bom Jesus da Lapa apresenta as melhores condições para a construção de uma usina solar. Analisando a tabela abaixo também é possível concluir que Uruguiana é o local menos apropriado para a implementação do empreendimento.

Tabela 31 – Comparação entre as análises financeiras dos três municípios

Município	Uruguiana (RS)	Montes Claros (MG)	Bom Jesus da Lapa (BA)
Energia gerada (ao ano)	138.408.976 kWh	200.373.616 kWh	214.582.464 kWh
Valor Presente Líquido (VPL)	R\$ - 15.764.023,39	R\$ 146.363.721,02	R\$ 185.039.927,20
Taxa Interna de Retorno (TIR)	7,67%	19,54%	22,01%
Payback simples	12 anos, 6 meses e 25 dias	4 anos, 11 meses e 26 dias	4 anos, 5 meses e 6 dias
Payback descontado	> 25 anos	7 anos, 1 mês e 11 dias	6 anos, 1 mês e 20 dias
Custo Nivelado de Energia (LCOE)	R\$ 0,2170/kWh	R\$ 0,1587/kWh	R\$ 0,1493/kWh

Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

5 CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

5.1 CONCLUSÃO

Esta dissertação apresentou um estudo de viabilidade técnica e econômica para a construção de uma planta solar para a geração de energia elétrica com capacidade de 100MW, utilizando motores Stirling e coletores solares, também chamados de sistemas *Dish-Stirling*. A pesquisa foi dividida basicamente em duas partes: o estudo de localização e a análise financeira.

Em relação ao estudo de localização, foi escolhido um município em cada uma das três regiões do Brasil definidas previamente: Sul, Sudeste e Nordeste. Na execução da análise detalhada, a ferramenta SIG demonstrou a sua importância, pois envolveu todos os critérios necessários para encontrar o local mais apropriado como os níveis de radiação solar, proximidades de linhas de transmissão e as restrições ambientais. Foi possível identificar áreas disponíveis nos municípios de Montes Claros (MG) e Bom Jesus da Lapa (BA), atendendo todos os requisitos definidos neste trabalho para receber a planta solar e a cidade de Uruguaiana (RS) apresentou uma condição economicamente desfavorável.

Entretanto, Bom Jesus da Lapa se destacou na comparação com as outras duas cidades do Sul e do Sudeste do Brasil. Primeiro, possui uma baixa precipitação média anual e a maior temperatura média anual. Como vantagens, apresenta também a maior radiação solar global diária em uma média anual de 5 kWh/m² e a maior Irradiância direta normal (DNI) que ficou em 6133 W/m² de média anual. Além disso, o município possui a maior área disponível e sem restrições ambientais, onde poderia ser definido um local com as melhores condições para a construção da usina solar.

A análise financeira iniciou com elaboração de uma estimativa de custos em que todos os gastos diretos e indiretos para a construção da planta CSP foram levantados. Na segunda parte foram estimados todos os custos operacionais, incluindo taxas e seguros. Depois, foi realizado o cálculo das receitas geradas pela produção de energia elétrica com o emprego do *System Advisor Model* (SAM), ferramenta computacional disponibilizada pelo *National Renewable Energy Laboratory* (NREL) para cálculos de custos e de produção de energia elétrica a partir das mais diversas matrizes energéticas.

Após o levantamento de todos os custos e as receitas foi realizado o cálculo do fluxo de caixa e dos índices financeiros: VPL, TIR e *Payback* descontado. Na análise dos resultados

encontrados nas três cidades, Uruguaiana se mostrou como a pior alternativa, principalmente devido às receitas mais baixas, comprometendo o valor da TIR e do prazo *Payback* que foi superior à vida útil do projeto. As cidades de Montes Claros e Bom Jesus da Lapa apresentaram viabilidade, cumprindo todos os requisitos predefinidos, mas a cidade baiana teve um maior grau de atratividade devido ao fato de gerar maiores receitas.

O SAM também forneceu para a análise financeira o *Levelized Cost of Electricity* (LCOE) ou o Custo Nivelado de Energia, sendo o custo unitário de produção de energia elétrica por kWh de uma usina durante toda a sua vida útil. A *International Renewable Energy Agency* (IRENA) na publicação *Renewable Power Generation Costs in 2017* que o LCOE em 2017 para plantas CSP era de 22 centavos de dólar por kWh. Entretanto, a estimativa é que até 2020 este custo caia para uma faixa de 6 e 10 centavos de dólar, o equivalente a um valor entre 22 e 37 centavos de real na cotação de 16 de agosto de 2018.

Os valores previstos encontrados em Uruguaiana, Montes Claros e Bom Jesus da Lapa foram 0,2170; 0,1587 e 0,1493 reais por kWh de energia elétrica produzida em cada local. Apesar da tecnologia estudada neste trabalho ainda estar em um estágio inicial de maturidade e o custo ainda ser alto, o município de Bom Jesus da Lapa neste índice também teve a melhor performance, se tornando assim, o melhor local para a construção de uma planta solar com a tecnologia *Dish-Stirling* no Brasil.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O custo deste tipo de tecnologia ainda é uma grande barreira para a exploração em massa da energia solar. No Brasil, como na maioria dos países que tem incentivado a geração de energia elétrica a partir de fontes renováveis e limpas, os governos fornecem incentivos. A pesquisa e o desenvolvimento desta tecnologia no país seriam fundamentais para reduzir custos de construção de plantas solares.

Atualmente, existem sistemas *Dish-Stirling* híbridos entrando em comercialização, capazes de produzir energia elétrica com gases residuais. Durante o desenvolvimento desta pesquisa, dados georreferenciados de aterros sanitários e de lixões não foram localizados, pois a intenção era incluir estes locais como variáveis no estudo de localização. O mapeamento destas áreas seria essencial para possibilitar o aproveitamento de gases gerados na decomposição de matérias orgânicas e assim aumentar as receitas de uma futura planta solar.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABBAS, M.; BOUMEDDANE, B.; SAID, N.; CHIKOUCHE, A. dish stirling technology: a 100 MW solar power plant using hydrogen for Algeria. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 36, p. 4305-4314, 2011.

ABENSUR, E. O. Um modelo multiobjetivo de otimização aplicado ao processo de orçamento de capital. *Revista Gestão & Produção*, v. 19, n. 4, p. 747-758, 2012.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). Micro e minigeração distribuída: sistema de compensação de energia elétrica. *Cadernos Temáticos ANEEL*, 2. ed. 2016.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). *Matriz de energia elétrica*. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/OperacaoCapacidadeBrasil.cfm>>. Acesso em: 26 abr. 2018.

AKSOY, F.; KARABULUT, H. Performance testing of a Fresnel/Stirling micro solar energy conversion system. *Energy Conversion and Management*, v. 75, p. 629-634, 2013.

ALMEIDA, G. S. M. *Pesquisa e desenvolvimento de um sistema termoelétrico do tipo linear Fresnel reflector*. Lisboa, 2013, 68 p. Dissertação (Pós-Graduação em Energias Renováveis – Conversão Elétrica e Utilização Sustentável) – Faculdade de Ciência e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, 2013.

AMARO, A.; SILVESTRE, C.; FERNANDES, L. *Estatística descritiva: o segredo dos dados*. Londres: Lulu.com, 2009. 114 p.

ANDRAKA, C.E.; ADKINS, D. R.; MOSS, T. A.; COLE, H. M.; ANDREAS, N. H. *Felt-metal-wick heat-pipe solar receiver*. Lahaina: American Society of Mechanical Engineers/Japanese Society of Mechanical Engineers/Japan Solar Energy Society international solar energy Conference, 1995.

AZEVÊDO, V. W. B. *Estudo de localização de usina solar termoelétrica no estado de Pernambuco*. Recife, 2016, 239 p. Tese (Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares) Universidade Federal de Pernambuco, 2016.

BAKOS, G. C.; ANTONIADES, C. Techno-economic appraisal of a dish/stirling solar power plant in Greece based on an innovative solar concentrator formed by elastic film. *Renewable Energy*, v. 60, p. 446-453, 2013.

BARLEV, D.; VIDU, R.; STROEVE, P. Innovation in concentrated solar power. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, v. 95, p. 2703-2725, 2011.

BARRETO, G. R. M. *Modelação de um motor de Stirling com concentração de radiação solar*. Évora, 2015, 134 p. Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia da Energia Solar) Universidade de Évora, 2015.

BARRETO, G.; CANHOTO, P. Modelling of a Stirling engine with parabolic dish for Thermal to electric conversion of solar energy. *Energy Conversion and Management*, v. 132, p. 119-135, 2017.

BARROS R. W.; ARADAS, M. E. C.; COBAS, V. R. M.; LORA, E. E. S. *Uso de biomassa como combustível para acionamento de motores Stirling*. Campinas: Anais do 5º Encontro de Energia no Meio Rural, 2004.

BARROS, R. W. *Avaliação teórica e experimental do motor Stirling modelo solo 161 operando com diferentes combustíveis*. Itajubá, 2005, 164 p. Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia Mecânica) Universidade Federal de Itajubá, Engenharia Mecânica, 2005.

BLAIR, N.; DOBOS, A. P.; FREEMAN, J.; NEISES, T.; WAGNER M.; FERGUSON, T.; GILMAN, P.; JANZOU, S. *System Advisor Model, SAM 2014.1.14: general description*. National Renewable Energy Laboratory, 2014.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. *Brasil lança Programa de Geração Distribuída com destaque para energia solar*. Brasília, 2015. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/>>. Acesso em: 14 jul. 2017.

BURGI, A. S. *Avaliação do potencial técnico de geração elétrica termossolar no Brasil a partir de modelagem em SIG e simulação de plantas virtuais*. Rio de Janeiro, 2013, 141 p. Dissertação (Pós-Graduação em Planejamento Energético) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2013.

CARRIÓN, J. A.; ESTRELLA, A. E.; DOLS, F. A.; TORO, M. Z.; RODRÍGUEZ, M.; RIDAO, A. R. Environmental decision-support systems for evaluating the carrying capacity of land areas: optimal site selection for grid-connected photovoltaic power plants. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, n. 12, p. 2358-2380, 2008.

CASTELHANOS, L. S. M. *Modelagem de sistemas de geração de eletricidade a partir de energia solar utilizando pratos parabólicos e motores Stirling (dish/Stirling)*. Itajubá, 2012, 161 p. Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia de Energia) Universidade Federal de Itajubá, 2012.

CASTRO, G. M. *Avaliação do valor da energia proveniente de usinas heliotérmicas com armazenamento no âmbito do Sistema Interligado Nacional*. Rio de Janeiro, 2015, 101 p. Dissertação (Pós-Graduação em Planejamento Energético) Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2015.

CASTRO, L. C. *Análise comparativa para geração de energia heliotérmica em diferentes regiões brasileiras*. Brasília, 2016, 56 p. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) Universidade de Brasília, 2016.

CEKIRGE, H. M.; ELHASSAN, A. A comparison of solar power systems (CSP): solar tower (ST) systems versus parabolic trough (PT) systems. *American Journal of Energy Engineering*, n. 3, v. 3, p. 29-36, 2015.

CHARABI, Y.; GASTLI, A. PV site suitability analysis using GIS-based spatial fuzzy multi-criteria evaluation. *Renewable Energy*, n. 36, p. 2554-2561, 2011.

CHEN, C. J. *Physics of solar energy*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2011. 312 p.

CHENÇO, E. C. *Fundamentos em finanças*. Curitiba: IESDE Brasil S. A., 2016. 352 p.

CHURCH, R. L. Geographical information systems and location science. *Computers & Operations Research*, n. 29, p. 541-562, 2002.

CIEMAT - CENTRO DE INVESTIGACIONES ENERGÉTICAS, MEDIOAMBIENTALES Y TECNOLÓGICAS. Disponível em: <<http://www.psa.es/en/instalaciones/discos.php>>. Acesso em: 05 jul. 2017.

CLEANERGY. *Middle East's first Stirling solar park unveiled in Dubai by Sweden's minister of enterprise and innovation, Mikael Damberg*, 2015. Disponível em: <<http://cleanergy.com/media-library/news/middle-east-s-first-stirling-solar-park-unveiled-in-dubai-by-swedens-minister-of-enterprise-and-innovation-mikael-damberg/>>. Acesso em: 09 ago. 2017.

CLEANERGY. *CSP solutions*. Disponível em: <<http://cleanergy.com/solutions/#csp-systems>>. Acesso em: 09 ago. 2017.

COELHO, G. B. *Análise e simulação do processo em transformação de chuva em vazão com suporte de Sistemas de Informações Geográficas*. Recife, 2006, 93 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação) Universidade Federal de Pernambuco, 2006.

COVENTRY, J.; ANDRAKA, C. Dish systems for CSP. *Solar Energy*, v. 152, p. 140-170, 2017.

CRESESB - CENTRO DE REFERÊNCIA PARA ENERGIA SOLAR E EÓLICA SÉRGIO BRITO. Disponível em: <http://cresesb.cepel.br/index.php?section=com_content&lang=pt&cid=301>. Acesso em: 18 jun. 2017.

CSP-WORLD. *DEWA signs MoU with Cleanergy and Al-Futtaim Carillion for first CSP Stirling plant in the MENA region*, 2014. Disponível em: <<http://csp-world.com/news/20140124/001301/dewa-signs-mou-cleanergy-and-al-futtaim-carillion-first-csp-stirling-plant-mena>>. Acesso em: 09 ago. 2017.

DASSI, J. A.; ZANIN, A.; BAGATINI, F. M.; TIBOLA, A.; BARICHELO, R.; MOURA, G. D. *Análise da viabilidade econômico-financeira da energia solar fotovoltaica em uma instituição de ensino superior do sul do Brasil*. Foz do Iguaçu: XXII Congresso Brasileiro de Custos, 2015.

DE LAQUIL, P.; KEARNEY, D.; GEYER, M.; DIVER, R. Solar-Thermal Electric Technology. In: _____. *Renewable Energy: Sources for Fuels and Electricity*. Washington D. C.: Island Press, 1993. p. 213-296.

DELGADO, M. G.; SENDRA, J. B. Aplicación de análisis de incertidumbre como método de validación y control del riesgo en la toma de decisiones. *Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica*, n. 4, p. 179-208, 2004.

DINIZ, E. M.; BERMANN, C. Economia verde e sustentabilidade. *Instituto de Estudos Avançados da Universidade de São Paulo*, v. 26, n. 74, p. 323-329, 2012.

DIVER, R. B.; MOSS, T. A.; GOLDBERG, V.; THOMAS, G.; BEAUDET, A. *Rolling Thunder-integration of the solo 161 Stirling engine with CPG-460 solar concentrator at Ft. Huachaca*, 1998. Disponível em: <<https://www.osti.gov/scitech/servlets/purl/654093>>. Acesso em: 01 ago. 2017.

DOMÍNGUEZ, M. M.; ANTONIO, A. J. R. de. *Máquinas térmicas*. Madrid: Universidad Nacional de Educación a Distancia, 2014.

DROBNE, S. LISEC, A. Multi-attribute decision analysis in GIS: weighted linear combination and ordered weighted averaging. *Informatica*, v. 33, p. 459-474, 2009.

ERBS, D. G.; KLEIN, S. A.; DUFFIE, J. A. Estimation of the diffuse radiation fraction for hourly, daily and monthly-average global radiation. *Solar Energy*, v. 28, n. 4, p. 293-302, 1982.

FEARNSIDE, P. M. *Hidrelétricas na Amazônia: impactos ambientais e sociais na tomada de decisões sobre grandes obras*. Manaus: Editora do INPA, 2015. 298 p. v. 2.

FLÓREZ, J. A. A.; AGRAMUNT, I. C.; FARRÚS, S. F.; CARLES, P. R.; GRANDE, D. B.; ROSSEL, J. C.; ODRIOZOLA, T. N.; FREIXA, C. F.; FONTAL, A. G.; LUQUE, A. M.; LLOPIS, F. J. P. *Máquinas térmicas motoras - 2*. Barcelona: Edicions de la Universitat Politècnica de Catalunya, 2002. 533 p.

FORMOSA, F.; DESPESE G. Analytical model for Stirling cycle machine design. *Energy Conversion and Management*, v. 51, p. 1855-1863, 2010.

FRYE, L. *Senior Army officials break ground for Tooele Stirling solar power project*, 2012. Disponível em: <<https://www.army.mil/article/85841/>>. Acesso em: 10 ago. 2017.

FUGIMOTO, S. K. *Estrutura de tarifas de energia elétrica: análise crítica e proposições metodológicas*. São Paulo, 2010, 207 p. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) Universidade de São Paulo, 2010.

GADRÉ, I.; MAIORANA, J. *Price model of the Stirling engine*. Estocolmo, 2014, 42 p. Monografia (Bachelor of Science Thesis) KTH School of Industrial Engineering and Management, 2014.

GIL, A. C. *Como elaborar projetos de pesquisa*. São Paulo: Atlas, 1991.

GORSHKOV, A. S.; VATIN, N. I.; RYMKEVICH, P. P.; KYDREVICH, O. O. Payback period of investments in energy saving. *Magazine of Civil Engineering*, n. 2, p. 65-75, 2018.

GOSWAMI, D. Y. Solar thermal power technology: present status and ideas for the future. *Energy Sources*, n. 20, p. 137-145, 1998.

GRÄTZEL, M. *Light and energy, molecular photovoltaics mimic photosynthesis*. Berna: Balzan Prizewinners' Interdisciplinary Forum 2009, Swiss National Fund for Scientific Research, 2009.

GREYVENSTEIN, G. Introduction to dish Stirling CSP technology, 2011. Disponível em: <<http://www.ennex.co.za/downloads/Dish%20Stirling%20Solar%20South%20Africa%20Conference%2021%20June%202011.pdf>>. Acesso em: 04 ago. 2017.

GUGLIELMETTI, F. R.; MARINS, F. A. S.; SALOMON, V. A. P. *Comparação teórica entre métodos de auxílio à tomada de decisão por múltiplos critérios*. Natal: XXXV Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, 2003.

HO, C. K. *Software and codes for analysis of concentrating solar power technologies*. Sandia National Laboratories. Albuquerque, 2008.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. *Regiões de influência das cidades 2007*. Rio de Janeiro, 2008. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/geociencias-novoportal/cartas-e-mapas/redes-geograficas/15798-regioes-de-influencia-das-cidades.html?=&t=downloads>>. Acesso em: 5 jul. 2018.

IEA - INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. *Technology roadmap: solar thermal electricity*. Paris, 2014. Disponível em: <http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/TechnologyRoadmapSolarThermalElectricity_2014edition.pdf>. Acesso em: 25 mai. 2017.

IEA - INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. *World energy outlook 2016: executive summary*. Paris, 2016. Disponível em: <<https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/WorldEnergyOutlook2016ExecutiveSummaryEnglish.pdf>>. Acesso em: 12 abr. 2017.

IEA & NEA - INTERNATIONAL ENERGY AGENCY & NUCLEAR ENERGY AGENCY. *Projected Costs of Generating Electricity*. Paris, 2015 Disponível em: <<https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/ElecCost2015.pdf>>. Acesso em: 25 fev. 2018.

IFSul - INSTITUTO FEDERAL SUL-RIO-GRANDENSE. Planilha de orçamento – Global, 2011. Disponível em: <http://portal2.ifsul.edu.br/index.php?option=com_docman&task=doc_download&gid=596&Itemid=4>. Acesso em: 09 ago. 2018.

IRENA - INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY. *Renewable Power Generation Costs in 2017*. Disponível em: <<http://irena.org/publications/2018/Jan/Renewable-power-generation-costs-in-2017>>. Acesso em: 22 ago. 2018.

KAINZ, W. Fuzzy logic and GIS. In: POPOVICH, V.; SCHRENK, M.; TILL, J.; CLARAMUNT, C.; WANG, T. (Editores). *Information fusion and intelligent geographic information systems (IF&IGIS'17): new frontiers in information fusion and intelligent GIS: from maritime to land-based research*. Suíça: Springer, 2018. 268 p. Cap. 1, p. 1-21.

KALOGIROU, S. *Solar energy engineering: processes and systems*. 1. ed. Burlington: Elsevier, 2009. 760 p.

KAUSHIKA, N. D.; REDDY, K. S.; KAUSHIK, K. *Sustainable energy and the environment: a clean technology approach*. Springer, 2016. 241 p.

KHAN, K. Y.; IVAN, N. A. S.; AHMED, A. S.; SIDDIQUE, A. H.; DEBNATH, D. Solar dish Stirling system and its economic prospect in Bangladesh. *International Journal of Electrical & Computer Sciences*, v. 11, n. 4, p. 7-13, 2011.

LAMEIRA, V. de C.; GONÇALVES, E.; FREGUGLIA, R. da S. O papel das redes na mobilidade laboral de curta e longa distância: evidências para o Brasil formal. *Revista de Teoria e Pesquisa Econômica*, v. 45, n. 2, p. 401-435, 2015.

LANDEIRA, J. L. F. *Análise técnico-econômica sobre a viabilidade de implantação de sistemas de geração fotovoltaica distribuída no Brasil*. Rio de Janeiro, 2013, 152 p. Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia Elétrica) Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2013.

LAYRARGUES, P. P. Do ecodesenvolvimento ao desenvolvimento sustentável: evolução de um conceito? *Revista Proposta*, v. 25, n. 71, p. 5-10, 1997.

LEMES JÚNIOR, A. B.; CHEROBIM, A. P.; RIGO, C. M. *Administração financeira: princípios, fundamentos e práticas brasileiras*. 3. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2010. 598 p.

LIRA, J. R. V. *Desenvolvimento de um rastreador solar do tipo polar com ajuste do ângulo de inclinação*. Natal, 2014, 82 p. Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Computação) Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2014.

LODI, C. *Perspectivas para a geração de energia elétrica no Brasil utilizando a tecnologia solar térmica concentrada*. Rio de Janeiro, 2011, 127 p. Dissertação (Pós-Graduação em Planejamento Energético) Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2011.

LOPEZ, C. W.; STONE, K. W. *Performance of the southern California Edison Company Stirling dish*. Contractor Report prepared by Sandia National Laboratories for the United States Department of Energy. Albuquerque, 1993.

LOVEGROVE, K.; BURGESS, G.; McCREADY, D.; PYE, J. *ANU's new 500 m² paraboloidal dish solar concentrator*. Melbourne: Light Weight Structures Association of Australia Conference, 2009.

LOVEGROVE, K. *Concentrating solar thermal gathers momentum*. Townsville: 47th Australia New Zealand Solar Energy Society Annual Conference, 2009.

LOVEGROVE, K.; STEIN, W. *Concentrating solar power technology: principles, developments and applications*. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2012. 704 p.

LOZANO, J. M. S.; SOLANO, J. T.; ELVIRA, P. L. S.; CASCALES, M. S. G. Geographical Information Systems (GIS) and Multi-Criteria Decision Making (MCDM) methods for the evaluation of solar farms locations: Case study in south-eastern Spain, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 24, 544-556, 2013.

MACHADO, C. T.; MIRANDA, F. S. Energia solar fotovoltaica: uma breve revisão. *Revista Virtual de Química*, v. 7, n. 1, p. 126-143, 2014.

MALAGUETA, D. C. *Avaliação de alternativas para introdução da geração elétrica termossolar na matriz energética brasileira*. Rio de Janeiro, 2011, 127 p. Dissertação (Pós-Graduação em Planejamento Energético) Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2011.

MANCINI, T. *Solar-electric dish Stirling system development*. Sandia National Laboratories. Albuquerque, 1997.

MANCINI, T.; HELLER, P.; BUTLER, B.; OSBORN, B.; SCHIEL, W.; GOLDBERG, V.; BUCK, R.; DIVER, R.; ANDRAKA, C.; MORENO, J. Dish-Stirling systems: an overview of development and status. *Journal of Solar Energy Engineering*, v. 125, p. 135-151, 2003.

MAPA, S. M. S.; LIMA, R. da S. Uso combinado de sistemas de informações geográficas para transportes e programação linear inteira mista em problemas de localização de instalações. *Revista Gestão e Produção*, v. 19, n. 1, p. 119-136, 2012.

MAXWELL, J. C. A dynamical theory of the electromagnetic field. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, v. 155, p. 459-512, 1865.

MEHOS, M.; TURCHI, C.; VIDAL, J.; WAGNER, M.; MA, Z.; HO, C.; KOLB, W.; ANDRAKA, C.; KRUIZENGA, A. Concentrating solar power Gen3 demonstration roadmap. *National Renewable Energy Laboratory*, 2017.

MELLO, J. C. C. B. S.; GOMES, E. G.; LETA, F. R.; PESSOLANI, R. B. V. Conceitos básicos do apoio multicritério à decisão e a sua aplicação no projeto aerodesign. *Engevista*, v. 5, n. 8, p. 22-35, 2003.

MENEZES, V. P. de. *Linhas de transmissão de energia elétrica: aspectos técnicos, orçamentários e construtivos*. Rio de Janeiro, 2015, 87 p. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica) Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2015.

METTERNICHT, G. Assessing temporal and spatial changes of salinity using fuzzy logic, remote sensing and GIS: Foundations of an expert system. *Ecological Modelling*, v. 144, p. 163-179, 2001.

MORRIS, A.; JANKOWSKI. Spatial decision making using fuzzy GIS. In: PETRY, F.; ROBINSON, V.; COBB, M. (Editores). *Fuzzy modelling with spatial information for geographic problems*. Alemanha: Springer, 2005. 336 p. Cap. 13, p. 275-298.

MOTA, H. de S. *Análise técnico econômica de unidades geradoras de energia distribuída*. São Paulo, 2011, 96 p. Dissertação (Pós-Graduação em Ciências na área de Tecnologia Nuclear) Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - Universidade de São Paulo, 2011.

MOUSAZADEH, H.; KEYHANI, A.; JAVADI, A.; MOBLI, H.; ABRINIA, K.; SHARIFI, A. A review of principle and sun-tracking methods for maximizing solar systems output. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 13, p. 1800-1818, 2009.

MÜLLER-STEINHAGEN, H.; TRIEB, F. Concentrating solar power: a review of the Technology. *Ingenia Magazine*, Institute of Technical Thermodynamics, German Aerospace Centre, Stuttgart, 2004.

REIS, L. B. *Geração de energia elétrica*. 2. ed. Barueri: Manole, 2011. 484 p.

RIPASSO ENERGY. *Information memorandum*, 2016. Disponível em: <<https://ripassoenergy.com/en/press-release/>>. Acesso em: 06 ago. 2017.

RIPASSO ENERGY. *First commercial order in Sicily for Ripasso Energy*, 2017. Disponível em: <<https://ripassoenergy.com/en/press-release/?itemID=FB2C20B49F769304>>. Acesso em: 06 ago. 2017.

RIZZOLI, A. E.; YOUNG, W. J. Delivering environmental decision support systems: software tools and techniques. *Environmental Modelling & Software*, v. 12, n. 2-3, p. 237-249, 1997.

ROMANELLI, A. Alternative thermodynamic cycle for the Stirling machine. *American Journal of Physics*, v. 85, n. 12, 916-929, 2017.

ROMEIRO, A. R. *Desenvolvimento sustentável e mudança institucional: notas preliminares*. Texto para Discussão, Instituto de Economia da UNICAMP, n. 68, Campinas, 1999. Disponível em: <https://www.researchgate.net/profile/Ademar_Romeiro/publication/228885133_Desenvolvimento_sustentavel_e_mudanca_institucional_notas_preliminares/links/575a95ce08ae9a9c95516e5a.pdf>. Acesso em: 21 mai. 2017.

SAATY, T. L. *Método de análise hierárquica*. São Paulo: McGraw-Hull, Makron Books, 1991. 367 p.

SAATY, T. L. Decision making with the analytic hierarchy process. *International Journal of Services Sciences*, v. 1, n. 1, p. 83-98, 2008.

SALIM, M. A. S.; FERREIRA, C. H. T.; LASZKIEWICZ, C. M. S.; ROSA, L. R. de S. *Metodologia de pesquisa em engenharia*. São Paulo: Universidade Nove de Julho, 2009.

SANDIA NATIONAL LABORATORIES. *Sandia labs news releases*. Disponível em: <https://share-ng.sandia.gov/news/resources/news_releases/>. Acesso em: 30 jul. 2017.

SARGENT, E. H. Colloidal quantum dot solar cells. *Nature Photonics*, v. 6, p. 133-135, 2012.

SCHLAICH BERGERMANN PARTNER (SBP). *Projects*. Disponível em: <<http://www.sbp.de/en/projects/>>. Acesso em: 16 jul. 2017.

SCHLIPF, D.; STENGLEIN, M.; SCHNEIDER, G. *CSP in Brazil: perspectives for industrial development*. Projeto Energia Heliotérmica, 2014.

SCOLLO, L.; VALDEZ, P.; BARÓN, J. Design and construction of a Stirling engine prototype. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 33, p. 3506-3510, 2008.

SHENDAGE, D. J.; KEDARE, S. B.; BAPAT, S. L. An analysis of beta type Stirling engine with rhombic drive mechanism. *Renewable Energy*, v. 63, p. 289-297, 2011.

SHORT, W.; PACKKEY, D. J.; HOLT, T. *A manual for the economic evaluation of energy efficiency and renewable energy technologies*. National Renewable Energy Laboratory, 1995.

SILVA, E. L. da; MENEZES, E. M. *Metodologia da pesquisa e elaboração de dissertação*. 4. ed. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2005. 138 p.

SILVA, M. A. P. da. *Central de produção de energia eléctrica a partir de energia solar térmica*. Lisboa, 2013, 80 p. Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia Mecânica) Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, 2013.

SIMAS, M.; PACCA, S. Energia eólica, geração de empregos e desenvolvimento sustentável. *Estudos Avançados*, v. 27, n. 77, p. 99-115, 2013.

SONG, C. F.; KITAMURA, Y.; LI, S. H. Evaluation of Stirling cooler system for cryogenic CO₂ capture. *Applied Energy*, v. 98, p. 491-501, 2012.

SOUSA, F. L. de. *A localização da indústria de transformação brasileira nas últimas três décadas*. Rio de Janeiro, 2002, 130 p. Dissertação (Pós-Graduação em Economia) Escola de Pós-graduação em Economia – Fundação Getúlio Vargas, 2002.

STINE, W. B.; DIVER, R. B. *A compendium of solar dish/Stirling technology*. Technical Report prepared by Sandia National Laboratories for the United States Department of Energy. Albuquerque, 1994.

STIRLING ENERGY SYSTEMS & TESSERA SOLAR. *Concentrated solar power: summit*. 2010.

THOMBARE, D. G.; VERMA, S. K. Technological development in the stirling cycle engines. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 12, p. 1-38, 2008.

THORNTON, S. T.; REX, A. *Modern physics for scientists and engineers*. 4 ed. Boston: Cengage Learning, 2013. 696 p.

TLILI, I. Finite time thermodynamic evaluation of endoreversible Stirling heat engine at maximum power conditions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 16, p. 2234-2241, 2012.

TRIANANTAPHYLLOU, E. Two new cases of rank reversals when the AHP and some of its additive variants are used that do not occur with the Multiplicative AHP. *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*, v. 10, p. 11-25, 2001.

TRIEB, F.; LANGNIß, O.; KLAIB, H. Solar electricity generation: a comparative view of technologies, costs and environmental impact. *Solar Energy*, v. 59, n. 1-3, p. 89-99, 1997.

TURCHI, C. *Parabolic trough reference plant for cost modeling with the Solar Advisor Model (SAM)*. National Renewable Energy Laboratory, Technical Report, 2010.

UCZAI, P.; TAVARES, W. M.; QUEIROZ, A. P. de. Energias renováveis: riqueza sustentável ao alcance da sociedade. *Cadernos de Altos Estudos*, n. 10. Brasília, 2012. 273 p.

URIELI, I. *Stirling cycle machine analysis*. Ohio University, 2017. Disponível em: <<https://www.ohio.edu/mechanical/stirling/>>. Acesso em: 29 jun. 2017.

VAZZOLER, A. *Introdução ao estudo das viabilidades técnica e econômica de processos químicos: estimativas de custos para projetos conceituais e anteprojetos*. Campinas, 2017. 487 p.

WIESE, A.; KLEINEIDAM, P.; SCHALLENBERG, K.; ULRICH, A. J.; KALTSCHMITT, M. *Renewable power generation – a status report*, 2010. Disponível em: <<http://www.renewableenergyfocus.com/view/14432/renewable-power-generation-a-status-report/>>. Acesso em: 01 ago. 2017.

WILLIAMS, J. *Infinia: distributed solar power*. Disponível em: <<http://www.esmap.org/file-download/24863/67932.>>. Acesso em: 04 ago. 2017.

WOOD, J. G.; CHAGNOT, B. J.; PENSWICK, L. B. *Design of a low pressure air engine for third world use*. Los Angeles: 17th Annual Intersociety Energy Conversion Engineering Conference, 1982.

YADAV, R. R.; SINGH, D.; SINGH, S. P.; PANDEY, D. K. *Modern physics for scientists and engineers*. New Delhi: PHI Learning Private Limited, 2014. 527 p.

ZAMBON, K. L.; CARNEIRO, A. A. de F. M.; NEGRI, J. C. Análise de decisão multicritério na localização de usinas termoeletricas utilizando SIG. *Pesquisa operacional*, v. 25, n. 2, p. 183-199, 2005.

ZHANG, H. L.; BAEYENS, J.; DEGRÈVE, J.; CACÈRES, G. Concentrated solar power plants: review and design methodology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 22, p. 466-481, 2013.

ZHANG, J. *XEMC sold dish Stirling solar thermal business*, 2016. Disponível em: <<http://en.cspplaza.com/xemc-sold-dish-stirling-solar-thermal-business.html>>. Acesso em: 30 jul. 2017.

ANEXOS

ANEXO A – EQUAÇÕES APRESENTADAS NA DISSERTAÇÃO

Equação 1: Energia de um fóton

$$E = h.f$$

Onde:

h : é a constante de Planck;
 f : é a frequência da luz.

Equação 2: Conservação de energia no elétron

$$hf = \phi + K.E$$

Onde:

ϕ : é a quantidade de energia cedida pelo elétron;
 K : é a energia cinética do elétron.

Equação 3: Vetor prioridade normalizado

$$W_j = \frac{\sum a_{ij}}{n}$$

Onde:

$\sum a_{ij}$: é o somatório de todos os elementos da linha;
 n : é o número de elementos da linha.

Equação 4: Avaliação da quantidade de julgamentos

$$q = \frac{[n.(n-1)]}{2}$$

Onde:

n : é o número de alternativas comparadas.

Equação 5: Índice de Consistência ou *Consistency Index* (CI)

$$CI = \frac{(\lambda_{\max} - n)}{(n - 1)}$$

Onde:

λ_{\max} : é o Autovalor máximo
 n : é a ordem da matriz.

Equação 6: Razão de Consistência ou *Consistency Ratio* (CR)

$$CR = \frac{CI}{RI}$$

Onde:

CI: é o Índice de Consistência;
RI: é o Índice de Consistência Randômico.

Equação 7: Fator de Recuperação do Capital ou *Capital Recovery Factor* (CFR)

$$CFR = \frac{DR(1+DR)^n}{(1+DR)^n - 1}$$

Onde:

DR (*Discount Rate*): é a taxa de desconto (normalmente uma média ponderada das diferentes taxas de juros pagas para o custo de capital);
n: é o número de anos.

Equação 8: Custo Nivelado de Energia ou *Levelized Cost of Electricity* (LCOE)

$$LCOE = \frac{CI \times CFR}{8760 \times P \times FC} + C_{O\&M}$$

Onde:

CI: é o custo do investimento (R\$);
P: é a capacidade total de geração de energia elétrica da usina solar (kW);
FC: é o fator de carga da usina solar (%);
C_{O&M}: é o custo variável anual de operação e manutenção.

Equação 9: Valor Presente Líquido

$$VPL = (FC_0) + \frac{FC_1}{(1+k)} + \frac{FC_2}{(1+k)^2} + \frac{FC_3}{(1+k)^3} + \frac{FC_4}{(1+k)^4} + \dots + \frac{FC_n}{(1+k)^n}$$

Onde:

FC: é o fluxo líquido de caixa;
k: é o custo de capital;
n: é a vida útil do projeto.

Equação 10: Taxa Interna de Retorno (TIR)

$$(FC_0) = \frac{FC_1}{(1 + TIR)} + \frac{FC_2}{(1 + TIR)^2} + \frac{FC_3}{(1 + TIR)^3} + \frac{FC_4}{(1 + TIR)^4} + \dots + \frac{FC_n}{(1 + TIR)^n} = 0$$

Onde:

FC: é o fluxo líquido de caixa.

Equação 11: Regra de Sturges (número de classes)

$$k = 1 + 3,3 \log n$$

Onde:

k : é a quantidade de classes;

n : é o número da amostra.

Equação 12: Regra de Sturges (amplitude da classe)

$$h = \frac{A}{k}$$

Onde:

h : é a amplitude da classe;

A : é igual a [valor máximo da amostra – valor mínimo da amostra];

k : é a quantidade de classes.

Equação 13: Combinação Linear Ponderada ou *Weighted Linear Combination* (WLC)

$$S = \sum w_i x_i \cdot \prod c_j$$

Onde:

S : é o resultado final (suitability);

w_i : é o peso do critério i ;

x_i : é o valor normalizado do critério i ;

c_j : é o critério de exclusão.

Equação 14: Custo Médio Ponderado de Capital (CMPC)

$$CMPC = (R_T \times CT) + (R_P \times CP) = 9\%$$

Onde:

R_T : é o custo de capital de terceiros;

CT : é o capital de terceiros;

R_P : é o custo de capital próprio;

CP : é o capital próprio.

ANEXO B – LÓGICAS FUZZY UTILIZADAS NO ESTUDO DE LOCALIZAÇÃO

Lógica Fuzzy para o cálculo de proximidade de linhas de transmissão:

$$(("dist_linhas_transm@1">=1000) * ("dist_linhas_transm@1"<=10000) * ((10000 / (10000 - 1000)) - ("dist_linhas_transm@1" / (10000 - 1000)))) + ("dist_linhas_transm@1"<1000)$$

Lógica Fuzzy para o cálculo de proximidade de principais rodovias:

$$(("dist_princ_rod@1">=1000) * ("dist_princ_rod@1"<=3000) * ((3000 / (3000 - 1000)) - ("dist_princ_rod@1" / (3000 - 1000)))) + ("dist_princ_rod@1"<1000)$$

Lógica Fuzzy para o cálculo de proximidade de áreas urbanas:

$$(("dist_areas_urbanas@1">=5000) * ("dist_areas_urbanas@1"<=75000) * ((75000 / (75000 - 5000)) - ("dist_areas_urbanas@1" / (75000 - 5000)))) + ("dist_areas_urbanas@1"<5000)$$

Lógica Fuzzy para cálculo da Irradiância Direta Normal (DNI):

Mínimo no Brasil = 1778 W/m² / Máximo no Brasil = 6465 W/m²

$$(("booleana_dni@1">=1778) * ("booleana_dni@1"<=6465) * (("booleana_dni@1" / (6465 - 1778)) - (1778 / (6465 - 1778)))) + ("booleana_dni@1">6465)$$

Lógica Fuzzy para o cálculo da declividade do terreno:

$$(("declive@1">=0) * ("declive@1"<=30) * ((30 / (30 - 0)) - ("declive@1" / (30 - 0)))) + ("declive@1"<0)$$

Lógica Fuzzy para o cálculo do aspecto do terreno:

$$(("aspecto@1">=0) * ("aspecto@1"<=45) * ((45 / (45 - 0)) - ("aspecto@1" / (45 - 0)))) + ("aspecto@1"<0) + ("aspecto@1">360) + (("aspecto@1">=315) * ("aspecto@1"<=360) * ("aspecto@1" / (360 - 315)) - (315 / (360 - 315)))$$

Lógica Fuzzy para o cálculo de proximidade de áreas com água e com reflorestamento:

$$(("dist_agua_refl@1">=200) * ("dist_agua_refl@1"<=500) * ((("dist_agua_refl@1" / (500 - 200)) - (200 / (500 - 200)))) + ("dist_agua_refl@1">500)$$

Cálculo Final do estudo de localização:

$$(("fuzzy_aspecto@1"*0.0391) + ("fuzzy_dist-linhas_transm@1"*0.3658) + ("fuzzy_dni@1"*0.2553) + ("fuzzy_dist-princ_rod@1"*0.15) + ("fuzzy_dist-areas_urbanas@1"*0.0612) + ("fuzzy_dist-agua_refl@1"*0.0505) + ("fuzzy_declive@1"*0.0781)) * "booleana_exclusao@1"$$