

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

FABIO SESTER RETORTA

METODOLOGIA MULTICRITÉRIO ESPACIAL PARA ELETRIFICAÇÃO RURAL
COM SISTEMAS OFF-GRID

CURITIBA

2017

FÁBIO SESTER RETORTA

METODOLOGIA MULTICRITÉRIO ESPACIAL PARA ELETRIFICAÇÃO RURAL
COM SISTEMAS *OFF-GRID*

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Área de Concentração Sistemas de Energia, Departamento de Engenharia Elétrica, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como parte das exigências para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Rasi Aoki
Coorientador: Dr. Cresencio Silvio Segura Salas

CURITIBA

2017

Catalogação na Fonte: Sistema de Bibliotecas, UFPR
Biblioteca de Ciência e Tecnologia

R438m

Retorta, Fábio Sester

Metodologia multicritério espacial para eletrificação rural com sistemas off-grid / Fábio Sester Retorta. – Curitiba, 2017.
189 p. : il. color. ; 30 cm.

Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia,
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, 2017.

Orientador: Alexandre Rasi Aoki – Coorientador: Crescencio Silvio
Segura Salas..
Bibliografia: p. 152-165.

1. Eletrificação rural – Pantanal Mato-grossense (MT e MS). 2. Sistemas
de energia elétrica. 3. Energia elétrica – Distribuição. 4. Metodologia
multicritério. I. Universidade Federal do Paraná. II. Aoki, Alexandre Rasi . III.
Segura Salas, Crescencio Silvio. IV. Título.

CDD: 363.6208171

Bibliotecário: Elias Barbosa da Silva CRB-9/1894



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
Setor TECNOLOGIA
Programa de Pós-Graduação ENGENHARIA ELÉTRICA

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ENGENHARIA ELÉTRICA da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de FÁBIO SESTER RETORTA intitulada: **METODOLOGIA MULTICRITÉRIO ESPACIAL PARA ELETRIFICAÇÃO RURAL COM SISTEMAS OFF-GRID**, após terem inquirido o aluno e realizado a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

Curitiba, 21 de Setembro de 2017.

A blue ink signature of Alexandre Rasi Aoki, followed by his name in capital letters.

ALEXANDRE RASI AOKI

Presidente da Banca Examinadora (UFPR)

A blue ink signature of Dorel Soares Ramos, followed by his name in capital letters.

DOREL SOARES RAMOS

Avaliador Externo (USP)

A blue ink signature of Roman Kuiava, followed by his name in capital letters.

ROMAN KUIAVA

Avaliador Interno (UFPR)

AGRADECIMENTOS

À minha mãe Miriam Sester Retorta por todo carinho, amor e incentivo na vida acadêmica, ao meu pai e ídolo José Retorta Garcia, pelos valores e princípios que me ensinou e por todo apoio na minha capacitação e ao meu irmão André Sester Retorta, um grande amigo. A minha família em São Paulo por todo apoio que tenho na minha vida com meu avô Edgard Sester, minha avó Marli de Barros Sester, minha tia Ivete Sester, minha tia Rita de Cassia Sester e meu Primo Eros Sester Prado Guimaraes. Muito grato também pelos meus grandes mentores Padre Emerson e Pastor Samuel Scheffler.

Ao meu orientador e grande amigo Prof. Dr. Alexandre Aoki por ter me dado uma chance de evoluir profissionalmente e pessoalmente e confiando em meu trabalho ao longo desses três anos de parceria. Ao meu coorientador Prof. Dr. Cresencio Silvio Segura Salas por acreditar no meu trabalho e por todo apoio ao longo do projeto. A engenheira Letícia Helena Souza da Silveira por ter me dado a oportunidade de ter participado do projeto P&D 0404-1502/2015 com a Energisa, conforme Programa de P&D regulado pela ANEEL.

Aos meus amigos Giuliano Dedini, Oliver Hoffman, Rafael Schulz, Davi Fluke, Gabriel Milanez, Henrique Santos, Lucas Baumeier, Fred Scripinic, Ahmad Massmar, Annelise Farina, Rebecca Breus, Liana Stimamiglio, Paula Kopruszinski pelo apoio nos dias difíceis e de cansaço.

Agradeço também aos colegas e ex-colegas de trabalho do Lactec, Pedro Block, Eduardo Yamakawa, Luciano Cavalcante Siebert, Mateus Duarte Teixeira, Tui Alexandre Ono Baraniuk, Alexandre Fonseca, Lucas Ferreira, Felipe José Lachovicz (parceiro do terceiro turno), Lúcio de Medeiros, Henry Salamanca, Diogo Dahlke, Otavio Shiono, José Francisco Bianchi, Kristie Kaminski Kuster, Carol Durce, Géssica Michelle dos Santos Pereira, Gleiciane Fernanda de Carvalho Blanc, Ellen Christine Prestes Ferronato, Gheysa do Rocio Morais Pires, Martin Hajek, Thais Marzalek Blasi, Allana de Moura Neto e Alan Naoto Tabata.

Aos professores Dr. Roman Kuiava, Dra. Thelma Fernandes e Dr. Dorel Soares Ramos pelas valiosas contribuições fornecidas na banca de qualificação e defesa. Ao Thomas Saaty pelas trocas de e-mail e pelo material valioso.

Ao grande arquiteto do universo, Deus, pelo dom da vida, pela minha família, pelos meus amigos e pela evolução da sociedade.

RESUMO

O acesso à energia elétrica é considerado um direito humano no Brasil, pois a utilização de eletricidade promove o crescimento econômico, auxilia no setor da saúde, além de ser imprescindível nas atividades humanas diárias. O Brasil possui programas como o Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL), Programa de Desenvolvimento Energético dos Estados e Municípios (PRODEEM) que contribuem com o avanço do planejamento energético do país, assim como foi o Programa de Incentivo a Fontes Alternativas (PROINFA). Mesmo assim, há uma parcela da população que ainda não tem acesso à energia elétrica, sendo que, a maioria destas pessoas está em regiões rurais, normalmente em lugares remotos. O programa Luz para Todos foi implementado com o objetivo de alcançar a universalização do acesso à energia em domínio nacional. Em 2012 a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) instaurou a resolução normativa 488/2012, a qual estabelece a revisão dos planos de universalização de energia elétrica em áreas rurais. Este trabalho tem como objetivo apresentar a metodologia multicritério espacial para eletrificação rural com sistemas *off-grid*. A metodologia foi desenvolvida utilizando o método *Analytic Hierarchy Process* (AHP), processando dados obtidos em trabalhos de campo e com dados provenientes de sistema de informação geográfica. Neste modelo foram utilizados critérios ambientais, tecnológicos, regulatórios e econômicos para avaliar as alternativas de sistemas de geração de energia elétrica. Para cada propriedade a metodologia avalia, através de cinco critérios, os possíveis sistemas de geração de energia elétrica e indica qual destes sistemas é a melhor opção. Os sistemas de geração de energia foram dimensionados levando em conta as premissas adotadas pela resolução normativa 493/2012 da ANEEL. Para avaliar o modelo foram realizadas simulações com sistemas isolados e com microrredes. Os resultados mostram como varia a melhor alternativa para o fornecimento de energia em função das tecnologias: fotovoltaica com armazenamento de energia, sistema híbrido e sistema com gerador a diesel. A metodologia também funciona para indicar ao tomador de decisão qual o melhor sistema de geração de energia para uma microrrede isolada da rede elétrica de distribuição. Este trabalho também apresenta resultados de microrredes com mais de uma fonte de energia elétrica com sistema *off-grid*.

Palavras-chave: Eletrificação rural. Sistemas *off-grid*. Método multicritério. Pantanal Sul-Mato-Grossense. Sistema de apoio a decisão.

ABSTRACT

The access to electricity is considered a human right in Brazil, since the use of electricity promotes economic growth, assists in the health sector, and is essential in daily human activities. Brazil has programs such as the National Energy Conservation Program (in Portuguese, PROCEL), the State and Municipal Energy Development Program (in Portuguese, PRODEEM) which contribute to the country's energy planning, just as it was the Alternative Energy Incentive Program (in Portuguese, PROINFA). Even so, there is a portion of the population that still does not have access to electricity, and most of these people are in rural areas, usually in remote places. The "Luz para Todos" program was implemented with the objective of achieving universal access to energy in the national domain. In 2012, the Brazilian Regulatory Electricity Agency (in Portuguese, ANEEL) introduced normative resolution 488/2012, which establishes the revision of plans for the universalization of electric energy access in rural areas. This thesis aims to present the multicriteria spatial methodology for rural electrification with off-grid systems. The methodology was developed using the Analytic Hierarchy Process (AHP) method, processing data obtained in field work and data from the geographic information system. In this model, environmental, technological, regulatory and economic criteria were used to evaluate the alternatives of electric power generation systems. For each property, the methodology evaluates, through five criteria, the possible electric power generation systems and indicates which of these systems is the best option. The energy generation systems were designed considering the premises adopted by ANEEL's normative resolution 493/2012. To evaluate the model, it was performed simulations of islanded systems and microgrids. The results show how the best alternative varies depending on the technology: photovoltaic options with energy storage, hybrid system and diesel generator system. The methodology also works to indicate to the decision maker which is the best power generation system for an isolated microgrid. This work also presents results of microgrids with more than one electric power source with off-grid system.

Keywords: Rural electrification. Off-grid systems. Multicriteria method. Pantanal Sul-Mato-Grossense. Decision support system.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Resoluções normativas relacionadas a universalização de energia elétrica.....	33
Figura 2 - Classificação das tecnologias de sistemas de geração de energia elétrica.....	40
Figura 3 - Conexões das instituições e diretrizes para eletrificação rural.....	41
Figura 4 - Classificação dos problemas de decisão	47
Figura 5 - Classificação dos Métodos de Tomada de Decisão.....	49
Figura 6 - Composição dos materiais utilizados na modelagem do método multicritério espacial	66
Figura 7 - Curva de carga da faixa de 0-80 kWh/mês	72
Figura 8 - Curva de carga da faixa de 81-160 kWh/mês	72
Figura 9 - Curva de carga da faixa de 161-300 kWh/mês	72
Figura 10 - Curva de carga da faixa de 301-600 kWh/mês	72
Figura 11 - Curva de carga da faixa de 601-1.000 kWh/mês	72
Figura 12 - Curva de carga da faixa de 1.001-5.000 kWh/mês	72
Figura 13 - Grupos de propriedades baseados na distância à Corumbá	75
Figura 14 - Estações da rede SONDA	76
Figura 15 – Dados georreferenciados para a irradiação solar global (a), direta (b) e difusa (c). Mapas temáticos baseado na irradiação média anual em W/m ²	77
Figura 16 – Dados georreferenciados para o potencial eólico para as alturas de 50m (a), 30m (b), 20m (c) e 10m (d). Mapa temático baseado em velocidade média anual em m/s	78
Figura 17 – Topologias dos projetos de referência (a) solar + baterias e (b) eólico + baterias para sistemas SIGFI até 80 kWh/mês	80
Figura 18 – Topologia do projeto de referência MIGDI solar + eólico + baterias	81
Figura 19 - Topologia dos projetos de referência MIGDI (a) solar + baterias + diesel otimizado e (b) solar + baterias + diesel do proprietário.....	81
Figura 20 - Processo MCDA de sistemas de energia sustentáveis.....	95
Figura 21 - Distribuição dos pesos dos subcritérios Tecnológico.....	98
Figura 22 - - Distribuição dos pesos dos subcritérios Regulatório.....	101
Figura 23 – Espacialização do ISA para os sistemas solar e eólico.....	107
Figura 24 – Esquema gráfico das combinações entre mapas.....	108

Figura 25 – Método de classificação por desvio padrão no ArcGis 10.2.....	109
Figura 26 – Mapa de regiões de acesso	111
Figura 27 - Estrutura hierárquica genérica	113
Figura 28 - A escala e sua descrição	114
Figura 29 - Estrutura hierárquica de tomada de decisão para o problema de seleção de projeto de referência para uma propriedade	120
Figura 30 - Fluxograma da metodologia multicritério espacial para sistema isolado	121
Figura 31 - Cenários simulados no método multicritério espacial para sistemas ff-grid	130
Figura 32 - Variação do LCOE das fontes SOL+BAT e GMG em função da distância terrestre da propriedade A em relação a Corumbá	136
Figura 33 - Fluxograma da metodologia multicritério espacial para microrrede	140

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Investimento global anual em bilhões de dólares.....	29
Tabela 2 - Matriz de sistemas off-grid para eletrificação rural em países em desenvolvimento	39
Tabela 3 - - Principais diferenças entre os métodos MADM e MODM	50
Tabela 4 - Tabela de decisão nos métodos MADM.....	51
Tabela 5 - Diferentes métodos ELECTRE.....	54
Tabela 6 – Palavras-chave conforme os eixos de pesquisa	57
Tabela 7 - Combinação das palavras-chave para pesquisa na literatura científica... <td>57</td>	57
Tabela 8 - Base de dados dos artigos selecionados	58
Tabela 9 - Dados de potência dos equipamentos	68
Tabela 10 - Fator de simultaneidade em relação ao número de equipamentos.....	71
Tabela 11 - Custos por cada tipo de transporte utilizado na região do Pantanal Sul Mato-Grossense.....	74
Tabela 12 – Projetos de referência determinados.....	79
Tabela 13 - Especialistas que participaram do Método Delphi.....	97
Tabela 14 - Matriz de julgamento dos quatro subcritérios Tecnológico.....	98
Tabela 15 – Avaliação do Subcritério Amadurecimento Tecnológico para a alternativa solar fotovoltaica	98
Tabela 16 – Avaliação do Subcritério Disponibilidade do Suporte Pós-venda para a alternativa solar fotovoltaica	99
Tabela 17 – Avaliação do Subcritério Mão de obra Qualificada para a alternativa solar fotovoltaica	99
Tabela 18 – Avaliação do Subcritério Experiências anteriores para a alternativa solar fotovoltaica	100
Tabela 19 - Matriz de julgamento dos subcritérios Regulatório.....	100
Tabela 20 - Avaliação do subcritério Potencialidade de subsídio.....	101
Tabela 21 - Avaliação dos subcritérios Experiência regulatória no Brasil	102
Tabela 22 - Avaliação do subcritério Necessidade de medição para faturamento ..	102
Tabela 23 - Divisão adotada entre os sistemas de suprimento segundo o potencial de impacto ambiental de cada fonte.....	104
Tabela 24 – Matriz de aspectos ambientais e alternativas de suprimento	105

Tabela 25 - Matriz de uso e ocupação do solo em relação as alternativas de suprimento.....	106
Tabela 26 - Ponderação do ISA em relação as fontes	106
Tabela 27 – Restrições ambientais por alternativas de suprimento	110
Tabela 28 – Acessibilidade por alternativas de suprimento	112
Tabela 29 - Matriz de comparação paritária genérica	114
Tabela 30 - Matriz de comparação dos critérios.....	115
Tabela 31 - Soma das colunas na matriz de comparação dos critérios	116
Tabela 32 - Matriz de comparação dos critérios a ser normalizada	116
Tabela 33 - Matriz de julgamentos normalizada com seus respectivos pesos	116
Tabela 34 - Valores para o índice randômico.....	117
Tabela 35 - Dados brutos dos projetos de referência em relação ao critério RSA..	122
Tabela 36 - Matriz de julgamento dos projetos de referência em relação ao critério RSA.....	123
Tabela 37 - Dados brutos dos projetos de referência em relação ao critério ISA....	123
Tabela 38 - Matriz de julgamento dos projetos de referência em relação ao critério ISA.....	124
Tabela 39 – Valores presente de OPEX, CAPEX e resultado do LCOE dos três projetos de referência.....	124
Tabela 40 - Matriz de julgamento dos projetos de referência em relação ao critério LCOE	125
Tabela 41 - Dados brutos dos projetos de referência em relação aos subcritérios Tecnológico	125
Tabela 42 - Matriz de julgamento dos projetos de referência em relação ao subcritério Amadurecimento Tecnológico (T1)	126
Tabela 43 - Matriz de julgamento dos projetos de referência em relação ao subcritério Disponibilidade de suporte pós venda (T2)	126
Tabela 44 - Matriz de julgamento dos projetos de referência em relação ao subcritério Mão de obra qualificada (T3).....	126
Tabela 45 - Matriz de julgamento dos projetos de referência em relação ao subcritério Experiência anteriores (T4)	127
Tabela 46 - Dados brutos dos projetos de referência em relação aos subcritérios Regulatório	128

Tabela 47 - Matriz de julgamento dos projetos de referência em relação ao subcritério Potencialidade de Subsídio (R1)	128
Tabela 48 - Matriz de julgamento dos projetos de referência em relação ao subcritério Experiências regulatórias no Brasil (R2)	128
Tabela 49 - Matriz de julgamento dos projetos de referência em relação ao subcritério Necessidade de Medição para faturamento (R3)	129
Tabela 50 - Vetor de prioridade global da propriedade A.....	131
Tabela 51 - Vetor de prioridade global da propriedade B	132
Tabela 52 - Vetor de prioridade global da propriedade C.....	132
Tabela 53 - Dados brutos do critério RSA pertencentes as propriedades A, B e C	132
Tabela 54 - Vetor de prioridade das alternativas em função do critério RSA pertencente as propriedades A, B e C	133
Tabela 55 - Dados brutos do critério ISA pertencentes a propriedade A e C	133
Tabela 56 - Dados brutos do critério ISA pertencentes a propriedade B	134
Tabela 57 - Vetor de prioridade das alternativas em função do critério ISA pertencente a propriedade A e C	134
Tabela 58 - Vetor de prioridade das alternativas em função do critério ISA pertencente a propriedade B	134
Tabela 59 - Dados brutos do critério LCOE pertencentes as propriedades	135
Tabela 60 - Vetor de prioridade das alternativas em função do critério LCOE pertencente a propriedade A	135
Tabela 61 - Vetor de prioridade das alternativas em função do critério LCOE pertencente a propriedade C.....	135
Tabela 62 - Vetor de prioridade das alternativas em função do critério LCOE pertencente a propriedade B	135
Tabela 63 - Dados brutos dos subcritérios Tecnológico pertencentes a propriedade A, B e C	137
Tabela 64 - Vetores de prioridade das alternativas em função dos subcritérios Tecnológico pertencente a propriedade A, B e C	137
Tabela 65 - Vetor de prioridade das alternativas em função do critério Tecnológico pertencente a propriedade A, B e C	137
Tabela 66 - Dados brutos dos subcritérios Regulatório pertencentes a propriedade A, B e C	138

Tabela 67 - Vetores de prioridade das alternativas em função dos subcritérios Regulatório pertencente a propriedade A, B e C	138
Tabela 68 - Vetor de prioridade das alternativas em função do critério Regulatório pertencente a propriedade A, B e C	139
Tabela 69 - Dados das propriedades pertencentes a Micro1	141
Tabela 70 - Dados das propriedades pertencentes a Micro2	141
Tabela 71 - Dados brutos do critério RSA do primeiro centro de geração da Micro1 e Micro2	141
Tabela 72 - Vetor de prioridade das fontes do projeto de referência MIGDI 1000 do primeiro centro de geração da Micro1	142
Tabela 73 - Vetor de prioridade das fontes do projeto de referência MIGDI 1000 do primeiro centro de geração da Micro2	142
Tabela 74 - Dados brutos do critério ISA pertencentes ao CG1 da Micro1 e Micro2	142
Tabela 75 - Vetor de prioridade das fontes do projeto de referência do CG1 em relação ao critério ISA da Micro1	142
Tabela 76 - Vetor de prioridade das fontes do projeto de referência do CG1 em relação ao critério ISA da Micro2	142
Tabela 77 - Custos de CAPEX para a estrutura de uma microrrede	143
Tabela 78 - Custos de CAPEX detalhado dos materiais	143
Tabela 79 - Valor do LCOE dos projetos de referência do CG1 para a Micro1 e Micro2	144
Tabela 80 - Vetor de prioridade das fontes do projeto de referência do CG1 em relação ao critério LCOE da Micro1	144
Tabela 81 - Vetor de prioridade das fontes do projeto de referência do CG1 em relação ao critério LCOE da Micro2	144
Tabela 82 - Vetor de prioridade das alternativas do projeto de referência do CG1 em função do critério Tecnológico para Micro 1 e Micro 2	144
Tabela 83 - Vetor de prioridade das alternativas do projeto de referência do CG1 em função do critério Regulatório para Micro 1 e Micro 2	145
Tabela 84 - Vetores de prioridade global do CG1 da Micro1 e Micro2	145
Tabela 85 - Dados brutos do critério RSA do segundo centro de geração da Micro1 e Micro2	146

Tabela 86 - Vetores de prioridade das fontes dos projetos de referência MIGDI 600 e 160 respectivamente do CG2 da Micro1 e Micro2 em relação ao RSA	146
Tabela 87 - Dados brutos do critério ISA pertencentes ao CG2 da Micro1 e Micro2	146
Tabela 88 - Vetores de prioridade das fontes dos projetos de referência MIGDI 600 e 160 respectivamente do CG2 da Micro1 e Micro2 em relação ao ISA	147
Tabela 89 - Valor do LCOE dos projetos de referência MIGDI 600 e 160 respectivamente do CG2 da Micro1 e Micro2	147
Tabela 90 - Vetores de prioridade das fontes dos projetos de referência MIGDI 600 e 160 respectivamente do CG2 da Micro1 e Micro2 em relação ao LCOE	147
Tabela 91 - Vetores de prioridade das fontes dos projetos de referência MIGDI 600 e 160 respectivamente do CG2 da Micro1 e Micro2 em relação ao TCNL	148
Tabela 92 - Vetores de prioridade das fontes dos projetos de referência MIGDI 600 e 160 respectivamente do CG2 da Micro1 e Micro2 em relação ao RGLT	148
Tabela 93 - Vetores de prioridade global do CG2 da Micro1 e Micro2.....	149
Tabela 94 – Avaliação do Subcritério Amadurecimento Tecnológico para a alternativa eólica	166
Tabela 95 – Avaliação do Subcritério Disponibilidade do Suporte Pós-venda para a alternativa eólica	166
Tabela 96 – Avaliação do Subcritério Mão de obra Qualificada para a alternativa eólica	166
Tabela 97 – Avaliação do Subcritério Experiências anteriores para a alternativa eólica	167
Tabela 98 – Avaliação do Subcritério Amadurecimento Tecnológico para a alternativa solar mais eólica com baterias	167
Tabela 99 – Avaliação do Subcritério Disponibilidade do Suporte Pós-venda para a alternativa solar mais eólica com baterias.....	167
Tabela 100 – Avaliação do Subcritério Mão de obra Qualificada para a alternativa solar mais eólica com baterias	168
Tabela 101 – Avaliação do Subcritério Experiências anteriores para a alternativa solar mais eólica com baterias	168
Tabela 102 – Avaliação do Subcritério Amadurecimento Tecnológico para a alternativa gerador a diesel.....	168

Tabela 103 – Avaliação do Subcritério Disponibilidade do Suporte Pós-venda para a alternativa gerador a diesel	169
Tabela 104 – Avaliação do Subcritério Mão de obra Qualificada para a alternativa gerador a diesel.....	169
Tabela 105 – Avaliação do Subcritério Experiências anteriores para a alternativa gerador a diesel.....	169
Tabela 106 – Avaliação do Subcritério Amadurecimento Tecnológico para a alternativa solar mais gerador a diesel	170
Tabela 107 – Avaliação do Subcritério Disponibilidade do Suporte Pós-venda para a alternativa solar mais gerador a diesel.....	170
Tabela 108 – Avaliação do Subcritério Mão de obra Qualificada para a alternativa solar mais gerador a diesel	170
Tabela 109 – Avaliação do Subcritério Experiências anteriores para a alternativa solar mais gerador a diesel	171
Tabela 110 - - - Equipamentos dos sistemas isolados para as unidades consumidoras	174
Tabela 111 - - Modelos de equipamentos dos sistemas isolados para as unidades consumidoras	175
Tabela 112 – Projetos de Referência SOL +BAT	176
Tabela 113 – Projetos de Referência EOL +BAT	177
Tabela 114 – Projetos de Referência SOL+ EOL +BAT	178
Tabela 115 – Projetos de Referência GMG.....	179
Tabela 116 – Projetos de Referência SOL+GMGotm+BAT	180
Tabela 117 – Projetos de Referência SOL+GMGpro+BAT	181

LISTA DE SIGLAS

AHP	<i>Analytic Hierarchy Process</i>
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ANP	<i>Analytic Network Process</i>
BNDES	Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico Social
CAPEX	<i>Capital Expenditure</i>
CCC	Conta de Consumos e Combustíveis
CDE	Conta de Desenvolvimento Energético
DIC	Duração de Interrupção por Unidade Consumidora
DNDE	Departamento Nacional de Desenvolvimento Energético
DSS	<i>Decision Support Systems</i>
ELECTRE	<i>Elimination Et Choix Traduisant la Réalité</i>
FIC	Freqüência de interrupção individual por unidade consumidora
HOLGA	<i>Hybrid Optimization Genetic Algorithm</i>
IDH	Índice de Desenvolvimento Humano
IEA	<i>International Energy Agency</i>
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
ISA	índice Socioambiental
LCOE	<i>Levelized Cost of Energy</i>
LPT	Luz para Todos
MACBETH	<i>Measuring Attractiveness by a Categorical Based Evaluation Technique</i>
MADM	<i>Multiple Attribute Decision Making</i>
MAUT	<i>Multiattribute Utility Theory</i>
MCDA	<i>Multiple Criteria Desicion Analysis</i>
MCDA	<i>Multiple Criteria Decision Aiding</i>
MCDM	<i>Multi-criteria Decision Making</i>
MIGDI	Microssistema Isolado de Geração e Distribuição de Energia Elétrica
MODM	<i>Multiple Objective Decision Making</i>
MME	Ministério de Minais e Energia
MRT	Monofilar com retorno por terra
NPV	<i>Net Present Value</i>

NREL	<i>National Renewable Energy Laboratory</i>
O&M	Operação e Manutenção
OMS	Organização Mundial de Saúde
OPEX	<i>Operational Expenditure</i>
P&D	Pesquisa e Desenvolvimento
PCH	Pequena Central Hidrelétrica
PROCEL	Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica
PRODEEM	Programa de Desenvolvimento Energético dos Estados e Municípios
PROINFA	Programa de Incentivo a Fontes Alternativas
PROMETHEE	<i>Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations</i>
REN	Resolução Normativa
RESURL	<i>Renewable Energy for Sustainable Rural Livelihoods</i>
RGR	Reserva Global de Reversão
SAW	<i>Simple Additive Weighting</i>
SEBA	Associació de Serveis Energètics Bàsics Autònoms
SHS	<i>Solar Home System</i>
SIGFI	Sistema Individual de Geração de Energia Elétrica com Fonte Intermittente
SIN	Sistema Interligado Nacional
SIG	Sistema de Informação Geográfica
SMART	<i>Simple Multi Attribute Rating Technique</i>
SMAA2	<i>Stochastic Multicriteria Acceptability Analysis</i>
SoC	<i>State of Charge</i>
SODM	<i>Simple Objective Decision Making</i>
SONDA	Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais
RGLT	Regulatório
RSA	Restrição Ambiental
SURE DSS	<i>Sustainable Rural Energy Decision Support System</i>
SWERA	<i>Solar and Wind Energy Resource Assessment</i>
TCNL	Tecnológico
TODIM	Tomada de Decisão Interativa Multicritério – <i>Interactive and Multicriteria Decision Making</i>
TOPSIS	<i>Technique for order of preference by similarity to na ideal solution</i>
UC	Unidade Consumidora

WACC

Weighted Average Cost of Capital

LISTA DE SÍMBOLOS

E	Energia em quilowatt hora [kWh]
P	Potência em watts [W]
H	Número de horas por dia
D	Número de dias no mês
qm	Quantidade de moradores
qe	Quantidade de equipamentos
fs	Fator Simultaneidade
E_{BAT}	Energia total do banco de baterias
CDR	Consumo diário de referência, expresso em kWh/dia
DoD	Profundidade de descarga, do inglês, <i>Depth of Discharge</i> . Percentagem da capacidade total de energia da bateria utilizada em operações de descarga. É conceitualmente o inverso do estado de carga (<i>State of Charge – SoC</i>)
η_{inv}	Eficiência de conversão de energia do inversor de frequência, expresso em percentual;
η_{cc}	Eficiência de conversão de energia dos controladores de carga. Já contempla a eficiência de conversão de energia da própria bateria, expresso em percentual
C_{nom}	Capacidade nominal de uma bateria constituinte do banco (quando consideradas todas iguais). Expressa em Ampères-hora. Como padrão, é utilizada para este e os demais cálculos a capacidade de descarga em 20 horas (C20)
V_{nom}	Tensão nominal de uma bateria constituinte do banco (V)

n_{par}	Número de baterias em paralelo
n_{serie}	Número de baterias em série
n_{BAT}	Número total de baterias do banco
P_{GMG}	Potência instalada do gerador em kVA
fp_{GMG}	Fator de potência do gerador (valor utilizado 0,8)
C_{anual}	Consumo anual, sendo $12 \times CMR$
CMR	Consumo mensal de referência. Igual à disponibilidade mensal garantida definida conforme a REN 493/2012 para sistemas até 80 kWh/mês/UC. Considerada igual para todos os meses do ano
G_{anual}	Geração de energia anual provinda da(s) fonte(s) de energia do sistema isolado
G_{mensal}	Geração de energia mensal provinda da(s) fonte(s) de energia do sistema isolado
i	Mês do ano ($1 \leq i \leq 12$)
n_{par}^{PV}	Número de painéis fotovoltaicos (ou <i>strings</i> série) conectadas por controlador de carga
I_{sc}^{PV}	Corrente de curto-circuito do painel fotovoltaico
n_{cc}	Número de controladores de carga do sistema
d_n	Taxa de desconto nominal
d_r	Taxa de desconto real
F_t	Fluxos de caixa
k	Somatória da média dos custos dos modais utilizados (avião, lancha, carro alugado, etc) em R\$/km, obtidos a partir das campanhas

x	Distância em km entre a localidade de referência para os custos de manutenção e a localidade desejada
α	Número de vezes ao ano necessário para realizar as atividades O&M
$t_{nj}^{(norm)}$	Elemento de uma matriz normalizada
N_{lin}	Número de linhas
w_i	Peso da alternativa da linha i
n_{alt}	Número de alternativas
w	Vetor de pesos
n_{pes}	Número de pesos
MW	Multiplicação da matriz pelo vetor de pesos

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	24
1.1	CONTEXTO.....	24
1.2	OBJETIVOS	25
1.3	JUSTIFICATIVA.....	26
1.4	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	26
2	ELETRIFICAÇÃO RURAL	28
2.1	CENÁRIO MUNDIAL DA ELETRIFICAÇÃO RURAL.....	28
2.2	CENÁRIO NACIONAL DA ELETRIFICAÇÃO RURAL.....	29
2.2.1	Rede Convencional	33
2.2.2	Sistemas Isolados.....	34
2.3	TIPOS E TECNOLOGIAS DE SISTEMAS OFF-GRID	38
2.4	POLÍTICAS PARA ELETRIFICAÇÃO RURAL.....	41
3	ANÁLISE MULTICRITÉRIO PARA TOMADA DE DECISÃO	46
3.1	TEORIA DA DECISÃO	46
3.2	MÉTODOS DE TOMADA DE DECISÃO MULTICRITÉRIOS	50
3.2.1	Escola Americana.....	52
3.2.2	Escola Europeia.....	53
3.2.3	Métodos Híbridos.....	55
4	REVISÃO DA LITERATURA	57
4.1	APLICAÇÕES COM MÉTODOS DA ESCOLA EUROPEIA	59
4.2	APLICAÇÕES COM MÉTODOS DA ESCOLA AMERICANDA	60
4.3	APLICAÇÕES COM OUTROS MÉTODOS	61
4.4	METODOLOGIA PROPOSTA - DIFERENCIAL DO ESTADO DA ARTE	64
5	INSUMOS DA MODELAGEM COMPUTACIONAL	65
5.1	FORMULÁRIO DE PESQUISA DE POSSES E HÁBITOS.....	67
5.2	MÉTODO PARA ESTIMAR CONSUMO DE ENERGIA.....	68

5.3	LEVANTAMENTO DA LOGÍSTICA PARA SUPRIMENTO.....	73
5.4	LEVANTAMENTO DO POTENCIAL ENERGÉTICO DA REGIÃO	75
5.5	DIMENSIONAMENTO DOS PROJETOS DE REFERÊNCIA.....	78
5.5.1	Sistema de armazenamento de energia.....	82
5.5.2	Sistema de geração de energia.....	84
5.5.3	Conversores	85
5.6	METODOLOGIA DE CÁLCULO DE CAPEX E OPEX.....	86
5.6.1	CAPEX	87
5.6.2	OPEX.....	88
5.7	ANÁLISE ESPACIAL DE DADOS AMBIENTAIS.....	92
6	METODOLOGIA MULTICRITÉRIO.....	94
6.1	MÉTODO DE SELEÇÃO DOS CRITÉRIOS	96
6.1.1	Critério Tecnológico	97
6.1.2	Critério Regulatório.....	100
6.1.3	Critério Custo Nivelado de Energia.....	103
6.1.4	Critério Índices Socioambientais	103
6.1.5	Critério Restrições Ambientais	107
6.2	O MÉTODO AHP.....	112
6.2.1	Método para estimar prioridade entre valores (método de ponderação)	115
6.2.2	Razão de Consistência da matriz	117
6.2.3	Normalização de dados quantitativos para a escala de Saaty	118
6.3	METODOLOGIA MULTICRITÉRIO ESPACIAL PARA SISTEMAS ISOLADOS	119
6.3.1	Exemplo do funcionamento do método multicritério espacial para sistemas isolados	121
7	ANÁLISE DOS RESULTADOS E DISCUSSÃO	130
7.1	CENÁRIO 1	131

7.2	CENÁRIO 2	139
8	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	150
	REFERÊNCIAS.....	153
	APÊNDICE A – AVALIAÇÃO DAS TECNOLOGIAS DOS PROJETOS DE REFERÊNCIA EM RELAÇÃO AOS SUBCRITÉRIO TECNOLÓGICO	166
	ANEXO A – PERGUNTAS DO FORMULÁRIO DE ENTREVISTAS REFERENTE A LOGÍSTICA DE SUPRIMENTOS.....	172
	ANEXO B – ESPECIFICAÇÃO TÉCNICA DOS PROJETOS DE REFERÊNCIA ..	174
	ANEXO C – CUSTOS DE CAPEX DOS PROJETOS DE REFERÊNCIA.....	182

1 INTRODUÇÃO

O acesso à energia elétrica é indispensável para a execução da maioria das atividades humanas como cozinhar, aquecer água, iluminação e refrigeração e, por esse motivo, contribui para o desenvolvimento da qualidade de vida (DOMÍNGUEZ; PINEDO-PASCUA, 2009). Em 2013, cerca de 1,2 bilhões de pessoas no mundo (17% da população global) não tinham acesso à energia elétrica e ainda 2,7 bilhões de pessoas (38% da população global) colocaram a saúde em risco por causa da dependência do uso de energia gerada através da biomassa para cozinhar (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2015).

A maioria das pessoas com acesso restrito a energia, normalmente em comunidades isoladas e dispersas com infraestrutura miserável, vive em países em desenvolvimento (MANDELLI *et al.*, 2016). Mundialmente, o acesso à energia elétrica melhorou com a iniciativa “Energia Sustentável para Todos” (do inglês, *Sustainable Energy for All*) lançada em 2011 com o objetivo de se alcançar a eletrificação universal até 2030. Estima-se atender 40% das áreas rurais não eletrificadas através da extensão da rede e 60% através de sistemas isolados e microrredes (BHATTACHARYYA; PALIT, 2016).

Segundo Rojas-Zerpa e Yusta (2015) o planejamento de sistemas de fornecimento de energia apresenta problemas com multidimensões, e sua expressão matemática mais realista tem natureza de multicritério e/ou multi-objetivo. A relação entre as dimensões técnicas, econômicas, sociais e ambientais motivam a utilização de metodologias de tomada de decisões multicritério (do inglês, *Multi-criteria Decision Making - MCDM*), as quais favorecem resultados mais robustos e coerentes pelo fato de serem baseadas na variabilidade espacial e temporal, conforme o local onde o sistema de fornecimento de energia estiver instalado.

1.1 CONTEXTO

No Brasil, em 2003, o acesso à eletricidade foi considerado um direito humano básico. No mesmo ano, o Governo Federal criou o programa “Luz para Todos” (LPT) a fim de se alcançar a universalização da eletricidade em todo o país (SLOUGH; UPERLAINEN; YANG, 2015). Em dezembro de 2012, aproximadamente 14,7 milhões de pessoas conseguiram ter acesso à eletricidade (NERINI *et al.*, 2014). Para atingir

este resultado o Governo Federal investiu aproximadamente 16 bilhões de reais em contratos para viabilizar o acesso à energia elétrica (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2016).

Na região amazônica, onde a maioria das conexões é solicitada pelo LPT, a extensão da rede, em muitos casos, não é uma opção economicamente viável e, nesses casos, os sistemas isolados (*off-grid*) são verificados como uma solução para as políticas de eletrificação rural no Brasil. Tecnologias em pequena escala como biomassa, energia eólica, energia fotovoltaica e sistemas híbridos são consideradas potentes soluções para alcançar os objetivos da eletrificação universal (NERINI *et al.*, 2014), portanto, a geração de eletricidade por sistemas *off-grid* representam opções apropriadas de sistemas de fornecimento de energia para eletrificação rural.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo geral do trabalho é o desenvolver um método com análise multicritério espacial para eletrificação rural. Este método indicará para um consumidor rural o sistema isolado mais apropriado em relação aos critérios estabelecidos no método.

Para conseguir realizar o objetivo geral deste trabalho é necessário estruturar a pesquisa em objetivos específicos. Com a consolidação destes objetivos atinge-se a proposta do objetivo geral. Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Determinar o modelo de avaliação espacial;
 - Determinar o local para realizar a avaliação espacial;
- Determinar os projetos de referência de suprimento de energia;
 - Determinar a ordem de prioridades das alternativas;
- Determinar o perfil dos consumidores;
- Determinar o modelo de decisão multicritérios;
 - Identificar e determinar os critérios para a análise;
 - Determinar os pesos subjetivos e objetivos dos critérios;
 - Determinar o modelo de ponderação dos critérios;
 - Determinar o número de decisores.
- Implementar em MATLAB o método matemático desenvolvido.

- Validar e testar com resultados obtidos em projeto de pesquisa e desenvolvimento (P&D) em execução pelos Institutos Lactec.

1.3 JUSTIFICATIVA

O assunto sobre eletrificação rural é um tema muito importante para a área de planejamento energético. Desde 2004 o governo federal vem através de iniciativas e programas subsidiados, como o Luz para Todos, buscando fornecer energia elétrica para comunidades que se encontram em regiões remotas e/ou isoladas. Portanto, este trabalho se justifica por se tratar da área de planejamento de energia e pelo fato de que hoje em dia as concessionárias de energia elétrica estão interessadas em saber qual é a melhor forma de suprir energeticamente uma residência em regiões remotas e/ou isoladas.

1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Conforme a estrutura de um documento científico, a parte textual desta dissertação está organizada em oito capítulos.

No primeiro capítulo é apresentado uma introdução com o contexto da problematização, os objetivos deste trabalho, a justificativa e a estrutura da dissertação.

O capítulo dois é a fundamentação teórica sobre eletrificação rural. Desta forma neste capítulo é apresentado o cenário da eletrificação rural em nível mundial e nacional, os tipos de tecnologia de sistemas *off-grid* e políticas para eletrificação rural.

No capítulo três é explicada a fundamentação teórica sobre teoria da decisão e sobre os métodos de tomada de decisão, estes sendo divididos por suas escolas.

O capítulo quatro é o estado da arte do trabalho. Apresenta o método utilizado para pesquisar sobre os temas de eletrificação rural e métodos multicritério, além de apresentar aplicações de métodos da escola Francesa e Americana (além de outros métodos) para solucionar problemas energéticos com sistemas *off-grid*.

O capítulo cinco explica quais são os materiais utilizados no método multicritério espacial. Ao todo são oito materiais: formulário de pesquisa de posses e hábitos, método para estimar consumo de energia, levantamento da logística para suprimento, levantamento do potencial energético da região, dimensionamento dos projetos de referência, metodologia de cálculo de custos envolvidos (CAPEX, OPEX e LCOE),

análise espacial de dados ambientais, índices socioambientais e restrições ambientais.

No capítulo seis é apresentado o método AHP com seus respectivos parâmetros e o método multicritério espacial desenvolvido com o AHP, apresentando os critérios Tecnológico e Regulatório, e um exemplo de aplicação.

O capítulo sete traz os resultados, os quais são exibidos através de três cenários de simulação do método multicritério espacial desenvolvido. O primeiro cenário mostra o resultado do método multicritério espacial para sistemas isolados através de um estudo de aplicação com três propriedades. O segundo cenário demonstra o resultado do método multicritério espacial para microrredes através de um estudo de aplicação com duas microrredes distintas. E o terceiro cenário apresenta o resultado do método multicritério espacial para 1975 propriedades que foram cadastradas através da pesquisa de posses e hábitos.

O último capítulo disserta sobre as conclusões deste trabalho em relação ao método multicritério espacial desenvolvido e apresenta sugestões sobre trabalhos futuros em relação a problematização da eletrificação rural e sobre a aplicação de outros métodos como solução do problema.

2 ELETRIFICAÇÃO RURAL

2.1 CENÁRIO MUNDIAL DA ELETRIFICAÇÃO RURAL

A possibilidade de acessar uma energia limpa e sustentável é essencial para promover a saúde e meios de subsistência para as pessoas em todo o mundo. Existem evidências comprovando benefícios socioeconômicos com a confiabilidade e acessibilidade de suprimento da eletricidade. Esses benefícios podem ser verificados no período noturno como a iluminação que viabiliza a leitura e estudo das crianças, substituindo as lâmpadas de querosene que poluem e prejudicam a saúde das pessoas. A possibilidade da família ouvir rádio, ver televisão ou até mesmo produzir algo como fonte de renda também são exemplos de outros benefícios (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY; WORLD BANK, 2015). A disponibilidade de energia é de fundamental importância para incorporar valor aos produtos rurais, impactando no aumento dos salários das famílias produtoras e estabilizando o trabalhador do campo na área rural (FILHO VIEIRA;DUTRA, 1997).

A oportunidade de cozinhar em um ambiente limpo e seguro pode favorecer na saúde e bem-estar de qualquer ser humano. O ar poluído gerado em residências por fontes de energia inefficientes é o principal motivo de risco a saúde e mortalidade prematura. A quantidade de pequenas partículas em combustíveis sólidos utilizados para cozinhar são superiores do que a quantidade orientada pela Organização Mundial de Saúde (OMS). Desta forma, a concentração destas partículas é um grande risco para o desenvolvimento de doenças como pneumonia infantil, câncer, doenças cardíacas e respiratórias em populações onde carece um sistema de saúde (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY; WORLD BANK, 2015). Segundo a Organização Mundial de Saúde (2016), aproximadamente 4,3 milhões de pessoas morrem prematuramente a cada ano por causa de doenças causadas pela poluição do ar nas residências, em função de combustíveis sólidos utilizados para cozinhar.

Uma das maiores iniciativas de eletrificação rural é o programa *Sustainable Energy for All*, o qual foi lançada por Ban Ki-moon, secretário geral da Organização das Nações Unidas, com três metas globais. A primeira meta é garantir acesso universal de serviços modernos de energia. A segunda e a terceira são respectivamente, dobrar a taxa global do aumento em eficiência energética e dobrar a porcentagem de energia renovável no consumo global. Para alcançar estas três

metas será necessário um investimento de aproximadamente 1.250 bilhões de dólares em áreas correlatas (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY; WORLD BANK, 2015). A Tabela 1 mostra o investimento atual e requerido para atingir os objetivos em serviços modernos de energia (eletrificação e cozimento), eficiência energética e energias renováveis.

Tabela 1 - Investimento global anual em bilhões de dólares

Investimento Anual	Acesso universal de serviços modernos de energia		Dobrando a taxa global de avanço em eficiência energética	Dobrando o compartilhamento de energias renováveis no consumo global	
Fonte	Eletrificação	Cozimento	Eficiência Energética	Energia Renovável	TOTAL
2012	9	0,1	130	258	397
2030 (requerido)	45	4,4	560	442-650	1.051-1.259
Diferença	36	4,3	430	184-392	654-862

FONTE: adequado da International Energy Agency e World Bank (2015)

Para alcançar o objetivo de acesso universal é necessário que mais de 135 milhões de pessoas obtenham acesso à energia elétrica por ano entre 2012 e 2030. As regiões que têm os maiores déficits de energia se concentram na África Sub-Sahariana e sul da Ásia. A população não eletrificada na Índia corresponde a 263 milhões, na Nigéria são 75 milhões e na Etiópia são 67 milhões. (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY; WORLD BANK, 2015).

2.2 CENÁRIO NACIONAL DA ELETRIFICAÇÃO RURAL

Segundo Gómez e Silveira (2015) o reconhecimento do acesso a eletricidade como um direito humano, definiu a base das metas de eletrificação no Brasil. O país entre os anos de 1991 a 2000 elevou a taxa de eletrificação de 86,9% para 93%, da mesma forma com a taxa de eletrificação rural de 49,4% para 70,6% (PANTANALI; BENAVIDES, 2006). Em janeiro de 1991 foi sancionada a lei nº 8.171 que dispõe sobre a política agrícola e entre suas ações consta a eletrificação rural. No artigo 94 desta lei consta que o Poder Público incentivará atividades de eletrificação rural através de

financiamentos, assistência técnica na implantação de projetos, tarifas de compra e venda de energia elétrica, construção de PCHs e termoelétricas (aproveitamento de resíduos agrícolas), programas de florestamento energético, manejo florestal e estabelecimento de tarifas diferenciadas horossazonais (COLOR, 1991).

Em meados nos anos 90 foi criado o Programa de Desenvolvimento Energético dos Estados e Municípios (PRODEEM), uma iniciativa do Departamento Nacional de Desenvolvimento Energético (DNDE), através do Decreto Presidencial de 22/12/94. O principal objetivo deste programa era atender as demandas de populações que vivem em área isoladas e rurais que não estão conectadas à rede elétrica utilizando sistemas descentralizados de fontes de energias renováveis. A implementação destes sistemas depende da factibilidade técnica, viabilidade econômica e ambiental (FILHO;DUTRA, 1997). Alguns sistemas isolados não funcionam com fontes renováveis, portanto, operam através de geradores a diesel. Estes sistemas a diesel contam com o fundo Conta de Consumo de Combustíveis (CCC), o qual foi criado pela Lei 5.899/1973 com o objetivo de ratear os custos com combustíveis utilizados em sistemas de geração de energia elétrica no Sistema Interligado Nacional (SIN) (MÉDICI; BAPTISTA, 1973). Em 1992, este fundo passou a ser utilizado também para os sistemas isolados (sistemas que não estão conectados no SIN) (ELETROBRÁS, 2010).

Depois de dois anos do PRODEEM, foi outorgada a lei 9.427/1996 que institui a Agência Nacional de Energia Elétrica que tem como objetivo fiscalizar a geração, transmissão, distribuição e comercialização de energia elétrica em concordância com as políticas do governo federal (CARDOSO;BRITO, 1996). Esta lei determina que no mínimo 50% dos recursos da Reserva Global de Reversão (RGR), administrada pela Eletrobrás, sejam destinados em investimentos nas regiões Norte, Nordeste e Centro-Oeste para programas de eletrificação rural, gerenciamento racional de energia e atendimento de comunidades de baixa renda.

No ano de 1999 através de um decreto, o governo federal instituiu o Programa Nacional de Eletrificação Rural “Luz no Campo” coordenado pelo Ministério de Minas e Energia, por intermédio da Eletrobrás. Este programa funciona vinculado com o Programa de Desenvolvimento Energético dos Estados e Municípios (PRODEEM), Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL) e o Programa Comunidade Solidária (CARDOSO;NETO, 1999). Este programa presumia otimizar as distâncias das redes elétricas em relação as cargas, utilizar sistemas elétricos

monofásicos (monofilar com retorno por terra – MRT), em áreas pobres incentivar a mão de obra não qualificada, financiamento ou não de sistemas descentralizados com fontes alternativas (sistemas fotovoltaicos) por meio de uma avaliação técnica e econômica (STRAZZI, 2009). A meta deste programa era eletrificar um milhão de propriedades rurais entre os anos de 2000-2003 com uma previsão de um bilhão de dólares (PEREIRA, 2011).

Em 2002, Fernando Henrique Cardoso decretou a lei nº 10.438/2002, a qual foi de grande importância para a política energética no Brasil, pois estabeleceu diretrizes para promover a universalização da energia elétrica em todo território nacional, criação do Programa de Incentivo a Fontes Alternativas (PROINFA), criação da Conta de Desenvolvimento Energético (CDE), com um objetivo de garantir recursos para modicidade tarifária de fornecimento de energia elétrica para consumidores integrantes da subclasse residencial baixa renda, além de outros objetivos (CARDOSO et al., 2002).

Em 2003 a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) estabeleceu a responsabilidade das concessionárias de atenderem novas ligações para unidades consumidoras (UCs), com carga instalada menor ou igual a 50 kW pertencente ao grupo B, através da extensão de rede (tensão inferior a 2,3 kV) (ANEEL, 2003). No mesmo ano, o Governo Federal instaurou o Programa Nacional de Universalização do Acesso e Uso de Energia Elétrica “Luz para Todos” (LPT) a fim de se alcançar a universalização da eletricidade em todo o país até o ano de 2008 (SILVA; ROUSEFF, 2003). A ANEEL estabeleceu a resolução normativa nº 175/2005 para realizar a eletrificação rural através de recursos dos governos Federal, Estadual e da concessionária (ANEEL, 2005). Esta resolução foi modificada pela resolução normativa nº 365/2009 alterando o ano de universalização rural do programa “Luz para Todos” de 2008 para 2010 (ANEEL, 2009) em conformidade com o decreto nº 6.442 / 2008 (SILVA; LOBÃO, 2008). De 2010 até os dias de hoje, o prazo do “Luz para todos” foi prorrogado mais três vezes: de 2010 a 2011 pelo decreto nº 7.324 (SILVA; ZIMMERMANN, 2010), de 2012 a 2014 pelo decreto 7.520 destinado a população do meio rural que não tinha acesso à energia elétrica (ROUSSEFF; LOBÃO, 2011) e o decreto nº 8.387 o prorrogando até 2018 com o objetivo de atender a população rural que não possui acesso a eletricidade (ROUSSEFF; LOBÃO, 2014).

No tocante a regulamentação, a ANEEL estabeleceu as diretrizes técnicas para os planos de universalização da energia elétrica na área rural pela resolução

normativa N°488/2012 (ANEEL, 2012). A partir desta resolução, houveram desdobramentos para outras resoluções e manuais, além de atualizações específicas, adotadas por conta de decretos presidenciais (visto no parágrafo acima) com relação direta ao programa Luz Para Todos (LPT).

As especificações da REN 488/2012 variam principalmente em relação ao enquadramento de atendimento, que pode ser por recursos próprios da concessionária, ou através do Programa LPT. Em ambas as situações o atendimento pode ser realizado por extensão de rede (REN 414/2012) ou por sistemas isolados (REN 493/2012).

Enquanto a REN 488/2012 cobre as diretrizes para uso de recursos próprios, as regras para utilização dos recursos Federais são apresentadas no Manual de Operacionalização do LPT (MME, 2015). Desde o Decreto 8493/2015 o atendimento de áreas remotas de sistemas isolados são feitos pelo LPT com tanto que o consumidor seja elegível para o programa. O manual de Especificações Técnicas dos Programas para Atendimento às Regiões Remotas dos Sistemas Isolados (MME, 2015) no âmbito do Programa LPT e o Manual de Operacionalização do Programa Luz para Todos (MME, 2015b) ditam as regras para a eletrificação rural através de sistemas de suprimento de energia elétrica.

De acordo com o Decreto 7.520/2008 (citado no parágrafo acima) e a REN 488/2012, são elegíveis para receber atendimento pelo LPT os domicílios que:

- Estejam em áreas de concessão cujo atendimento tem alto impacto tarifário;
- Residentes cadastrados no programa Brasil sem Miséria ou Territórios da Cidadania
- Assentamentos rurais, comunidades indígenas ou quilombolas;
- Escolas, postos de saúdes e poços comunitários

Caso a unidade consumidora (UC) não contenha nenhuma demanda elétrica, a Distribuidora deve fornecer e instalar um kit de instalação interna, contendo um ponto de iluminação por cômodo, com no máximo de três, mais duas tomadas. Para as UCs que não são contempladas pelo LPT, a instalação do ramal de conexão, do padrão de entrada sem o medidor e, se for o caso, do kit de instalação interna deve ser realizada sem ônus ao interessado, com recursos da CDE, a título de subvenção econômica, contanto que um dos integrantes da família cadastrado no Cadastro Único e siga outras condições dadas pela REN 488/2012.

Os domicílios que forem universalizados por extensão de rede passam a ter as condições gerais de fornecimento de energia elétrica regradas pela REN 414/2010 (ANEEL, 2010). Se o suprimento de energia elétrica for por sistema isolado, vale as regras da REN 493/2012 (ANEEL, 2012). A Figura 1 mostra as diretrizes regulatórias para projetos de eletrificação em regiões remotas.

Figura 1 - Resoluções normativas relacionadas a universalização de energia elétrica



Fonte: O autor (2017).

2.2.1 Rede Convencional

A Resolução Normativa (REN) 488/2012 explicita que as obras que compreendam exclusivamente a extensão, reforço ou melhoramento de rede com tensão inferior a 2,3 kV para o atendimento de solicitações não devem fazer parte do plano de universalização, sendo, portanto, enquadradas nas condições gerais de fornecimento da REN 414/2010. O plano de universalização por extensão de rede deve conter os custos, os equipamentos e os segmentos de origem de investimentos. Os equipamentos compreendem o número de transformadores e sua especificação em kVA, mais a extensão em quilômetros da rede inferior à 2,3 kV, maior ou igual a 2,3 kV e menor ou igual a 138 kV.

O atendimento por extensão de rede é compulsório se o domicílio estiver a uma distância de até 5 km da rede de distribuição, a não ser que se enquadre nas seguintes exceções:

- Necessidade de cabos isolados ou subaquáticos
- Limitações técnicas ou ambientais
- Necessidade de complementação de fase

Os critérios técnicos para a extensão de rede com recurso do programa LPT levam em conta o atendimento fornecido em kVA, a extensão da rede em quilômetros,

os custos da opção tecnológica e a comparação da opção com as redes decentralizadas. O seu detalhamento é dado pelo Manual de Operacionalização do Programa LPT Período 2015-2018 e, em linhas gerais, determina:

1. Os materiais utilizados;
2. O número de fases e as providências em caso de recondutoramento;
3. A extensão máxima em quilômetros da rede primária trifásica, que não deve exceder 30% da já existente;
4. As extensões máximas das redes primárias trifásicas e bifásicas, que, somadas, não devem exceder 40% da já existente;
5. As extensões de sistemas elétricos monofásicos multi-aterrados (F-N), bifásico sem neutro ou monofilares com retorno por terra (MRT), devem ter no mínimo 60% do comprimento da rede primária;
6. Obras com cabos de bitola acima de 4/0 AWG precisam ter aprovação da Eletrobras;
7. Obras de reforço (novas subestações ou recondutoramento) não podem exceder 10% do programa de obras
8. A potência máxima por unidade consumidora é 15 KVA, exceto em casos de poços de d'água para atendimento comunitário, centros comunitários de produção, escolas ou postos de saúde;
9. A tensão máxima das redes de distribuição rurais é 34,5 kV;
10. O agente executor deve arcar com a instalação do padrão de entrada que deverá incluir: ramal de ligação, poste auxiliar, ramal de entrada, caixa de medição, medidor, disjuntor de entrada, aterramento, ramal de conexão, disjuntor do quadro de distribuição interna do domicílio e kit de instalação interna, quando for o caso.

2.2.2 Sistemas Isolados

Conforme o MME (2015) a adoção de sistemas isolados fica a critério dos recursos energéticos disponíveis, logística envolvida, restrições ambientais, sustentabilidade dos usuários e a viabilidade técnico-econômica. Os sistemas de geração decentralizados ou sistemas isolados de geração podem compreender as tecnologias de fonte hídrica (micro e minicentrais hidrelétricas), pequenas usinas térmicas a biocombustíveis ou gás natural, fonte

solar para geração de energia solar fotovoltaica, fonte eólica (turbina de eixo horizontal ou vertical) e sistemas híbridos (resultante da combinação de duas ou mais fontes).

Os critérios técnicos para dimensionamento e projeto de sistemas isolados são apresentados na REN 493/2012 (ANEEL, 2012), uma evolução da antiga REN 083/2004 (ANEEL, 2004). Nesta nova resolução, é acrescentado o conceito de microssistema isolado de geração e distribuição de energia elétrica, além de outras restrições técnicas de projeto adquiridas a partir de experiências prévias com sistemas isolados. Abaixo, são citados os principais artigos desta resolução, que delimitam os projetos para sistemas isolados e, portanto, se tornam importantes referências para os projetos de suprimento de energia, denominados pela resolução de projetos de referência. Das definições da REN 493/2012, o conceito de projeto de referência:

“Art. 1º IX – projeto de referência: descrição de solução de suprimento de energia elétrica proposta pela distribuidora para atendimento aos consumidores dos Sistemas Isolados, a ser elaborada conforme diretrizes do Ministério de Minas e Energia – MME.”

Estes projetos de referência podem ser então classificados como individuais (SIGFI), ou microrredes (MIGDI). Da REN 493/2012, define-se SIGFI:

“Art. 1º XIII – sistema individual de geração de energia elétrica com fonte intermitente – SIGFI: sistema de geração de energia elétrica, utilizado para o atendimento de uma única unidade consumidora, cujo fornecimento se dê exclusivamente por meio de fonte de energia intermitente.”

A fonte intermitente de energia é definida da seguinte forma:

“Art. 1º IV – fonte de energia intermitente: recurso energético renovável que, para fins de conversão em energia elétrica pelo sistema de geração, não pode ser armazenado em sua forma original.”

Assim, entende-se que os sistemas caracterizados como SIGFI se conecta a uma única unidade consumidora e diesel não é aplicável como fonte de armazenamento de energia elétrica. A REN 493/2012 define MIGDI:

“Art. 1º VI – microssistema isolado de geração e distribuição de energia elétrica – MIGDI: sistema isolado de geração e distribuição de energia elétrica com potência instalada total de até 100 kW.”

Recomenda-se em (MME, 2015) o uso de MIGDI em comunidades com consumo maior que 900 kWh/mês e distância máxima dos vãos de 1,5 km. As UCs são classificadas na norma de acordo com sua disponibilidade mensal garantida:

“Art. 5º As unidades consumidoras atendidas por meio de MIGDI ou SIGFI devem ser enquadradas conforme as disponibilidades mensais de energia explicitadas na tabela a seguir:”

<i>Disponibilidade mensal garantida (kWh/mês/UC)</i>	<i>Consumo de referência (Wh/dia/UC)</i>	<i>Autonomia mínima (horas)</i>	<i>Potência mínima (W/UC)</i>
13	435	48	250
20	670	48	250
30	1.000	48	500
45	1.500	48	700
60	2.000	48	1.000
80	2.650	48	1.250

À vista do Art. 5º, a resolução já tipifica os consumidores e dá as diretrizes de energia por dia e por mês, além da potência mínima que deve ser disponibilizada, sendo esta então a potência mínima de projeto para inversores de frequência ou geradores diesel, no caso de microssistemas isolados.

O Art. 5º também deixa clara a autonomia compulsória de 48 horas para todas as classificações da tabela. Também é importante ressaltar que é interpretado que um microssistema isolado atenderá a um conjunto de UCs classificadas conforme a tabela, ou seja, os critérios de projeto para MIGDIs devem levar em consideração a agregação dos consumidores da tabela do Art. 5º. A disponibilidade de energia deve ser acima de 45 kWh para suprir as necessidades básicas de iluminação, comunicação e refrigeração para UC's residenciais e de no mínimo 45 kWh/UC para uso coletivo ou de processo produtivo (posto de saúde, igrejas, escolas e outras unidades consumidoras comunitárias), de acordo com as discretizações do artigo 5º da REN 493 e recomendações do Manual Para Atendimento às Regiões Remotas Dos Sistemas Isolados do Programa LPT (MME, 2015).

No caso de unidades consumidoras com necessidades de consumo maiores a 80 kWh/mês, a resolução apresenta duas alternativas:

“Art. 6º – A distribuidora pode fornecer, a seu critério, disponibilidade mensal garantida superior a 80 kWh/UC, desde que garantida uma autonomia mínima de 48 horas.”

“Art. 7º – A distribuidora pode adotar mecanismo que limite o consumo de energia elétrica e a demanda de potência, de acordo com os valores projetados para cada unidade consumidora.”

A partir dos Arts. 6º e 7º, há a possibilidade de projetos que atendam a consumos maiores a 80 kWh/mês, ao mesmo tempo em que é possível também limitar o consumo das UCs para que os projetos sejam padronizados dentro da tabela do Art. 5º. Esta padronização é reiterada no Art. 30º:

"Art. 30º – A distribuidora deve atender sem ônus à solicitação de aumento de carga que possa ser efetivada com a utilização de sistemas de disponibilidade mensal de até 80 kWh/UC, desde que decorrido, no mínimo, um ano desde a data da ligação inicial ou desde o último aumento de carga."

Para os sistemas SIGFI, a disponibilidade de energia deve ser de 24 horas por dia, limitada ou não pela disponibilidade mensal garantida. Interpretando a tabela do Art. 5º, pode-se extrapolar os mesmos limites para UCs conectadas aos sistemas MIGDI. Contudo, excepcionalmente para os sistemas MIGDI, é possível adotar um período diário reduzido de fornecimento, mediante justificação de inviabilidade técnico-econômica. Entende-se que esta possibilidade se faz presente para sistemas MIGDI pelo fato deste aceitar diesel como insumo para geração de energia elétrica, encarecendo os custos de operação por dificuldades logísticas e de armazenagem.

"Art. 17º – Faculta-se a distribuidora implantar o período diário reduzido de fornecimento em localidade atendida por meio de MIGDI

Parágrafo único. Na situação prevista no caput, além dos procedimentos e disposições definidos em resolução específica, o registro do MIGDI como central geradora com capacidade instalada reduzida deve ser acompanhado das seguintes informações:

...
VII – detalhamento dos motivos técnicos e econômico-financeiros que inviabilizam o atendimento da localidade 24 horas por dia, por sistema de geração, anexando-se memorial de cálculo dos custos variáveis e fixos evitados;"

"Art. 18º – O fornecimento de energia elétrica, com período diário reduzido, deve observar um total mínimo de 8 (oito) horas diárias consecutivas ou divididas, no máximo, em dois períodos diários."

Com relação à continuidade do serviço, são determinados limites de duração de interrupção por unidade consumidora (DIC) aos sistemas isolados, não havendo a mesma imposição de limites para a frequência de interrupções (FIC). Como neste caso não há o conceito de "conjuntos elétricos", o limite definido pelo Art. 24º da REN 493/2012 vale para todos os sistemas. Esta informação é um relevante parâmetro de projeto para justificar faltas de energia pela intermitência das fontes renováveis (longos períodos de estiagem) e paradas para manutenção preventiva e corretiva.

"Art. 24º – A distribuidora deve observar para todas as unidades consumidoras, atendidas nos termos desta Resolução, os seguintes padrões de referência DIC:"

Indicador	Limite (horas)
DIC mensal	216
DIC anual	648

Já com relação à tensão de fornecimento e sua qualidade, são considerados valores inadequados de tensão aqueles situados nas faixas precária ou crítica segundo o Módulo 8 do PRODIST (MME, 2007) ou limites definidos em normas ABNT aplicáveis à corrente contínua (Art. 22º).

Para caracterizar o atendimento por meio de sistemas MIGDI ou SIGFI, deve ser levado em consideração o espaçamento entre as unidades consumidoras e a premissa da queda de tensão na rede de distribuição não ser maior que o definido pelo Módulo 8 do PRODIST ANEEL (2010). Deverá também existir ganho econômico, operacional ou social para a escolha do MIGDI. Caso esses requisitos não sejam atendidos, deverão ser implementados sistemas SIGFI, segundo o Manual de Operacionalização de Sistemas Isolados do Programa LPT (MME, 2015).

O dimensionamento dos sistemas SIGFI e MIGDI deverá sempre ter por base o atendimento às unidades consumidoras, a redução dos custos de investimento e os custos de operação e manutenção (O&M), sem afetar a qualidade e confiabilidade do suprimento de energia dos sistemas. Os planos de universalização por sistemas isolados devem conter, além dos custos de instalação, os custos de operação e manutenção de cinco anos.

2.3 TIPOS E TECNOLOGIAS DE SISTEMAS OFF-GRID

Conforme Mandelli *et al.* (2016) a estratégia baseada em sistemas de geração de energia em pequena escala está relacionada em cinco dimensões: ambiental, econômica, técnica, social e política. Outras causas podem estar associadas nas áreas rurais em países em desenvolvimento como: acessibilidade, demanda da carga e combate à pobreza. A acessibilidade está relacionada a inviabilidade de estender a rede de distribuição para áreas remotas e, portanto, os sistemas de geração de pequeno porte baseados em fontes alternativas são preferenciais. A demanda da carga é muito baixa em áreas rurais não eletrificadas, por isso, sistemas de geração de pequeno porte são apropriados para atender esta demanda. Os sistemas de geração de pequeno porte também contribuem para combater a pobreza, pois o acesso à energia elétrica melhora as condições do meio de vida através da assistência às necessidades básicas.

Os sistemas centralizados normalmente não representam uma opção apropriada em áreas rurais e, portanto, os sistemas separados da rede são os mais apropriados, conhecidos como sistemas *off-grid*. Mandelli *et al.* (2016) propôs uma taxonomia para classificar os sistemas de geração de pequeno porte *off-grid* para

eletrificação rural em países em desenvolvimento, conhecido como Matriz de Sistemas *Off-grid*, a qual pode ser observada na Tabela 2.

Tabela 2 - Matriz de sistemas off-grid para eletrificação rural em países em desenvolvimento

MATRIZ DE SISTEMAS OFF-GRID		Descentralizado		Distribuído
Uso da energia Rural		Sistemas Isolados	Sistemas Microgrid	Sistemas Microgrid Híbridos
Necessidades domésticas básicas	Sistemas baseados nas necessidades domésticas básicas	Sistemas incluindo uma rede de distribuição de energia elétrica	Sistemas incluindo uma rede de distribuição de energia elétrica	Sistemas incluindo uma rede de distribuição de energia elétrica
Serviços da comunidade	Sistemas baseados na comunidade			
Usos produtivos	Sistemas baseados na produtividade			
Número de Clientes	Uma	Múltiplas	Uma ou Múltiplas	Múltiplas
Fonte de Energia	Uma		Múltiplas	

FONTE: Mandelli et. al (2016, tradução nossa)

Conforme a Tabela 2, os sistemas de geração de pequeno porte *off-grid* são classificados como decentralizados e distribuídos e o uso da energia é dividida em três categorias. As necessidades domésticas básicas estão relacionadas com o uso da energia para cozinhar, aquecer água, iluminação e alguns eletrodomésticos (TV, rádio, liquidificador, etc).

Em relação a serviços da comunidade destaca-se o acesso à energia para a educação (escolas) e para a saúde (hospitais, clínicas). Os usos produtivos referem-se a atividades produtivas e especificamente inclui as necessidades da agricultura, pecuária e indústrias rurais.

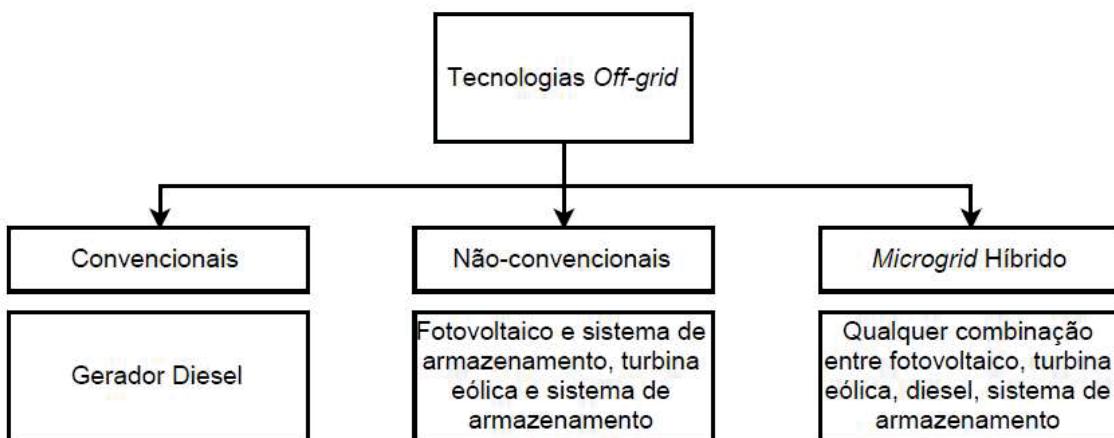
Os sistemas descentralizados são compostos por unidades autônomas onde a conversão e distribuição de energia não interagem com outra unidade, normalmente são projetados para uma necessidade de energia local e por fontes locais de energia (renováveis). Estes sistemas podem fornecer energia para um consumidor, modo *stand-alone* (sistema isolado), ou para alguns consumidores, modo *microgrid*.

Os sistemas *stand-alone* se referem a sistemas que fornecem energia perto de um consumidor individual, como: escola, quiosque, casa, indústria rural, etc. A

microgrid pode fornecer energia para vários consumidores (similares ou diferentes), como: um grupo de casas em um vilarejo.

Os sistemas distribuídos são compostos por mais de um sistema de conversão descentralizado, o qual está conectado e interagindo com a outra fonte de energia através de uma rede de distribuição. A Tabela 2 não apresenta nenhuma dependência de tecnologias de geração de energia, por este motivo, a Figura 2 mostra uma classificação de tecnologias de geração de sistema *off-grid* (MANDELLI et al., 2016).

Figura 2 - Classificação das tecnologias de sistemas de geração de energia elétrica



FONTE: traduzido de Mandelli et. al (2016)

As tecnologias *off-grid* são classificadas como convencionais, não convencionais e híbridos em relação a fonte de energia utilizada. As fontes convencionais funcionam totalmente através de combustíveis fósseis (usualmente o diesel), as tecnologias não convencionais operam exclusivamente com fontes de energias renováveis e as *microgrids* híbridas produzem energia elétricas através da junção de fontes de energia convencionais e não convencionais (exemplo, fotovoltaico com gerador a diesel).

Segundo Slough et al. (2015) a abordagem mais comum para a eletrificação rural em todo o mundo tem sido a extensão da rede. Porém há também exemplos históricos de geração de energia distribuída para a eletrificação rural e de fato no Brasil ambas abordagens são relevantes. Conforme Pereira et al. (2010) a eletrificação rural no Brasil produziu uma mudança rápida no perfil de consumo de energia e na redução da pobreza energética.

Na região amazônica a eletricidade é principalmente fornecida a partir de sistemas isolados, e esta é produzida em sua grande maioria através de sistemas a diesel (GÓMEZ; SILVEIRA, 2010). Os sistemas isolados a diesel são escolhidos devido ao baixo custo de aquisição e pelo fornecimento deste combustível estar consolidado nesta região. Porém, o custo para operar o sistema a diesel é caro para as concessionárias em função do custo final do combustível ser elevado. Isto ocorre pelo fato do diesel ser transportado por barco para as comunidades isoladas e, portanto, o custo final do diesel é acrescentado pelo custo de transporte.

2.4 POLÍTICAS PARA ELETRIFICAÇÃO RURAL

Conforme Haanyika (2006), existe a necessidade de papéis e responsabilidades claras em políticas de desenvolvimento e implantação para que o governo, as concessionárias de energia elétrica e os órgãos reguladores operem de forma efetiva no acesso a eletrificação rural. A Figura 3 mostra a relação entre os principais *stakeholders* para eletrificação rural.

Figura 3 - Conexões das instituições e diretrizes para eletrificação rural



FONTE: Haanyika (2006, tradução nossa)

A responsabilidade dos governos é garantir que a estrutura de eletrificação rural possibilite para concessionárias públicas e privadas expandir os serviços para as áreas rurais enquanto fornece uma qualidade de serviço. A política governamental e a estrutura jurídica e regulamentar devem assegurar que os organismos reguladores sejam independentes, aumentando a objetividade das decisões regulamentares. A

independência é fundamental em um ambiente onde há concessionárias privadas e públicas. Os governos devem estar envolvidos em financiamentos e subsídios em atividades de eletrificação rural, além de facilitar a demanda de eletricidade que possibilita realizar atividades do agronegócio e outros negócios em pequena escala.

A autoridade ou agentes de eletrificação rural tem a principal função em atuar em nome do governo no planejamento, organização e financiamento de atividades de eletrificação rural. Estes agentes devem gerenciar recursos, ajudar a construir competências para eletrificação rural e preparar planos nacionais de eletrificação rural em conjunto com comunidades rurais. As autoridades de eletrificação rural devem ser guiadas pelas políticas do governo enquanto trabalha em estreita ligação com as concessionárias e órgãos reguladores. O relacionamento das autoridades com os órgãos reguladores serve para projetar estruturas tarifárias e a aplicação de subsídios nas áreas rurais, sendo o grande desafio destas autoridades promover financiamentos para eletrificação rural.

As concessionárias de energia elétrica desempenham um papel importante na eletrificação rural através do desenvolvimento, investimento e operações dos sistemas de fornecimento de eletricidade ou através da transmissão de eletricidade para as áreas rurais. As responsabilidades chaves das concessionárias (públicas e privadas) para eletrificação rural são: geração, transmissão, distribuição, fornecimento de eletricidade para os consumidores rurais, investimentos em atividades de fornecimento de eletricidade a qual facilita a eletrificação rural, capacitar pessoas (desenvolvendo habilidades técnicas) para gerenciar sistemas de fornecimento de eletricidade em áreas rurais, além de coletar e enviar impostos para o governo da eletrificação rural.

O órgão regulador deve equilibrar as necessidades das concessionárias com as da eletrificação rural garantindo um sistema regulatório transparente, aprovando tarifas e taxas para novos serviços e reforçando a execução de normas. Os reguladores precisam desenvolver sistemas regulatórios que promovem aumento em investimentos na geração de eletricidade e sistemas de distribuição, além disso, é importante estimular o desenvolvimento de sistemas descentralizados, os quais podem ser gerenciados por comunidades locais. Os órgãos reguladores têm a obrigação de proteger os consumidores respondendo aos interesses destes e assegurando os consumidores a participar dos processos regulatórios.

As características singulares das regiões onde se encontram comunidades remotas esclarece a utilização de sistemas *off-grid* por fontes renováveis de energia focado nas necessidades e potencial energético local. As comunidades remotas são classificadas (pela perspectiva do acesso à energia) como comunidades sem conexão ao sistema elétrico centralizado, comunidades escassamente povoadas e com um Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) significativamente abaixo da média nacional.

Conforme as previsões estabelecidas pela Agência Internacional de Energia os sistemas *off-grid* são praticamente necessários para a eletrificação rural e aproximadamente 90 % destes sistemas devem ser baseados em fontes renováveis (Mandelli et al. 2016 apud International Energy Agency, 2010, 2011). Segundo Gómez e Silveira (2011) as soluções *off-grid* são percebidos como uma parte integral da política de eletrificação rural no Brasil, mas grandes desafios surgem de acordo com a realidade das áreas de baixa densidade demográfica e comunidades remotas. O sucesso de políticas para acesso a eletricidade não pode ser exclusivamente medida em quantidade de conexões, sendo o IDH outro parâmetro que desempenha um papel importante no planejamento da eletrificação rural (SLOUGH et al., 2015). De acordo com as experiências obtidas pelo projeto OASYS South Asia, Bhattacharyya e Palit (2016) recomendam 10 políticas para propor a eletrificação através de sistemas *off-grid*:

1. Não dimensionar um tamanho único: variando o contexto local como condição socioeconômica, potencial de recursos e acordos institucionais necessita-se uma solução local que maximize os resultados.

Segundo Zerriffi (2008) o PRODEEM apresentou alguns problemas nos sistemas para eletrificação rural, como o subdimensionamento de inversores comprometendo a operação do sistema.

2. Estrutura de governança robusta: o ambiente para uma intervenção na eletrificação *off-grid* é influenciado por doações e acordos institucionais globais, nacionais. Por isso é essencial um arranjo institucional consistente que conecte adequadamente esses diferentes níveis.

A Comissão Nacional de Universalização é formada pelos ministros federais brasileiros, Ministérios de Minas e Energia, Banco Nacional de Desenvolvimento

Econômico Social (BNDES) e a ANEEL estabelecendo políticas para a utilização da eletricidade para promover o desenvolvimento rural.

3. Regulamentações claras: o ambiente regulatório e político não pode evoluir em um ambiente fraco caracterizado por regras ambíguas e sistemas de tomada de decisão não transparentes. Uma abordagem regulatória que obrigue uma supervisão mínima, mas que permita clareza no escopo de serviço e tarifas.
4. Suporte estratégico e localmente adaptado à eletrificação *off-grid*: é necessário um sistema inovador para oferecer apoio estratégico, garantir um valor melhor para o dinheiro e fornecer benefícios a longo prazo. Os subsídios aos custos de capital poderiam ser substituídos por um sistema flexível a diferentes níveis da cadeia de abastecimento que atenda a demanda, garantir viabilidade de financiamento e captação de recursos a partir do mercado.
5. Ambiente político favorável: uma complexa rede de interações políticas influencia os resultados da eletrificação *off-grid* em qualquer país. Um setor bem-sucedido exige que todas as políticas relevantes se reforcem mutuamente, removendo barreiras e desafios políticos. Por exemplo, subsídios aos combustíveis fósseis que distorcem os preços afetam negativamente os sistemas não convencionais.

O Programa Bolsa Família e o Programa Territórios da Cidadania são exemplos de políticas que atingem o mesmo público alvo do Programa LPT, reforçando o desenvolvimento nas áreas rurais.

6. Desenvolvimento de capacidades: disponibilidade de mão-de-obra qualificada para toda a cadeia de abastecimento é essencial para a implantação de um sistema *off-grid*.

O envolvimento da sociedade é fundamental para a eletrificação rural, isto beneficia o processo de planejamento e implantação e entrega para a comunidade a sensação de domínio do processo de eletrificação rural (IEA, 2010)

7. Atividades de desenvolvimento rural: a eletrificação quando incorporada no programa de desenvolvimento rural é suscetível de gerar oportunidades para melhorar a economia local. A eletrificação ajuda a família a gerar renda através da agricultura, pecuária ou de

outra forma aumentando a capacidade do poder de compra da família, possibilitando até compra de eletricidade.

De acordo com MME (2009) o faturamento de energia elétrica pode ser através do sistema pré-pago, ou seja, os consumidores pagam antecipadamente pela eletricidade que esperam utilizar conforme a disponibilidade financeira do consumidor.

8. Ecossistema de soluções de eletrificação *off-grid*: a fim de garantir a sustentabilidade das soluções *off-grid* a longo prazo, toda a cadeia de abastecimento tem de ser desenvolvida e devidamente sustentada. Em um ecossistema local tem que ser desenvolvido a fabricação local dos equipamentos, capacidade de montagem dos sistemas, serviços pós-venda e grupo de profissionais técnicos.
9. Agrupamento de sistemas *off-grid* isolados: os sistemas *off-grid* isolados poderiam ser identificados dependendo da disponibilidade de recursos energéticos locais e agrupados, para garantir economias de escala e escopo, e entregue às concessionárias.

O agrupamento de sistemas *off-grid* isolados constitui uma microrrede. O fornecimento de energia através microrredes pode ser mais viável caso o custo levelizado de energia (LCOE – *Levelized Cost of Energy*) da microrrede for menor que o somatório do LCOE de cada propriedade distinta. Além do LCOE deve ser também analisado o impacto ambiental da rede de distribuição de energia da microrrede e o impacto ambiental de cada fonte de energia em cada propriedade distinta.

10. Organização da concessionária para replicação de projetos *off-grid*: A eletrificação em massa para projetos-piloto exige uma abordagem organizada por meio de padronização e gerenciamento pela concessionária. Isso requer atenção à capacidade de absorção organizacional, bem como à capacidade e organização financeira e técnica. Além disso existe a possibilidade de a concessionária iniciar uma subsidiária que possa intervir em sistemas *off-grid* como parte de seu negócio.

3 ANÁLISE MULTICRITÉRIO PARA TOMADA DE DECISÃO

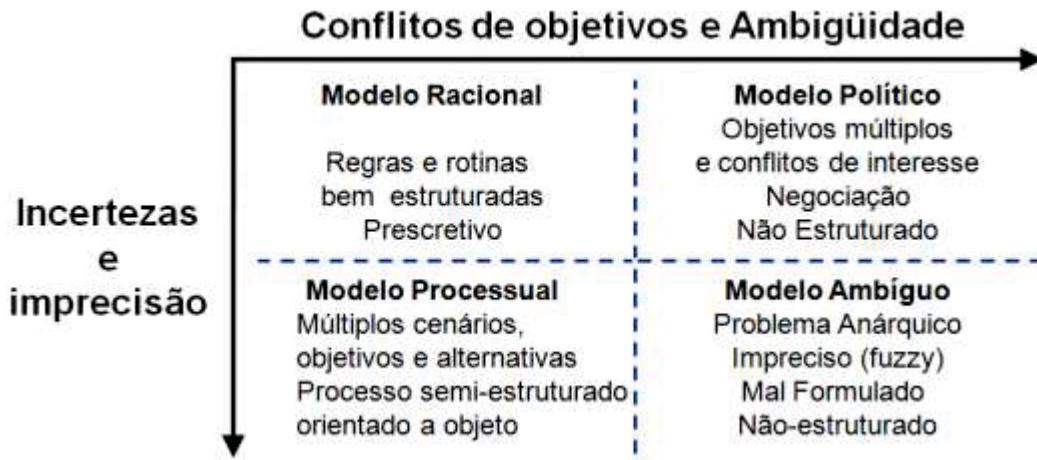
3.1 TEORIA DA DECISÃO

Todos os dias as pessoas tomam diversas decisões em função de possíveis opções, e estas decisões estão relacionadas com as oportunidades e competências que cada indivíduo tem para resolver um problema. A Teoria da Decisão é o resultado de estudos de economistas, matemáticos, filósofos, cientistas sociais e estatísticos para explicar em como indivíduos e grupos de pessoas realizam ou deveriam realizar decisões (RESNIK, 1987). A teoria de decisão pode ser conceituada como um conjunto de técnicas que auxiliam o(s) tomador(es) de decisão (indivíduo ou grupo) a reconhecer as particularidades de um problema e estrutura-lo (MOREIRA, 2008). Segundo Turban e Aronson (1998) os problemas devem ser classificados em três categorias:

- a) Estruturados: um problema é considerado estruturado se suas fases de operação para chegar aos resultados desejados são claros e se a repetição de sua execução for sempre possível.
- b) Semi-estruturados: um problema é considerado semi-estruturado se é conhecido a maior parte das operações, contém variável(is) não conhecida(s) que pode(m) influenciar no resultado.
- c) Não estruturados: um problema é considerado não estruturado quando não são conhecidas as operações para chegar aos resultados.

De acordo com Ferreira et al. (2012 apud Shimizu 2006) os problemas de decisão podem ser classificados em quatro modelos conforme conflitos de objetivos/ambiguidade e incertezas/precisão. A Figura 4 mostra a figura desta classificação.

Figura 4 - Classificação dos problemas de decisão



FONTE: Ferreira et al. (2012 apud Shimizu 2006)

Um modelo é racional quando a decisão é com certeza, decisão com otimização, decisão que usa heurísticas e meta-heurísticas. Um modelo processual é quando a decisão está em situação de incerteza ou risco, decisão que usa processos estocásticos. Um modelo é político quando a decisão é com incerteza, múltiplos objetivos e múltiplos cenários e decisão por grupos. E um modelo é ambíguo quando a decisão usa sistemas especialistas difusos, decisão por negociação (FERREIRA et al., 2012).

De acordo com os autores Luce e Raiffa (1957) os problemas de tomada de decisão podem ser classificados em três condições:

- Decisão tomada sobre segurança: a tomada de decisão é precisa pois o resultado de cada alternativa é conhecido, portanto, o(s) tomador(es) de decisão podem decidir de forma segura.
- Decisão tomada sobre risco: cada tomada de decisão conduz a um resultado específico, porém os resultados das alternativas não podem ser avaliados. A capacidade de determinar o resultado da tomada de decisão depende de experiências anteriores ou informações secundárias.
- Decisão tomada sobre insegurança: as tomadas de decisões conduzem a um grupo de consequências, mas a probabilidade do resultado é totalmente desconhecida.

Segundo Monks (1985) a estrutura do processo de decisão é composta pelos seguintes passos:

- I. Definição do problema e suas variáveis relevantes;

- II. Estabelecer os critérios ou objetivos de decisão;
- III. Relacionar as variáveis relevantes do problema com os critérios ou objetivos;
- IV. Elaborar as alternativas dos possíveis cenários e as alternativas de decisão em função do problema;
- V. Avaliar as alternativas e escolher ou ranquear a que melhor satisfaça os objetivos ou critérios (métodos de otimização, métodos multicritérios ou outro método de decisão)
- VI. Implementar a decisão escolhida e realizar análise dos resultados através da análise de sensibilidade e/ou aprendizagem, pela retroalimentação dos resultados (aprimorar o modelo)

Depois de 30 anos do trabalho de Monks (1985), Dervishi e Kadriu (2014) estabeleceram um processo de tomada de decisão por critérios constituído por oito etapas, sendo que este processo é muito similar com as seis etapas do processo de decisão proposto por Monks (1985).

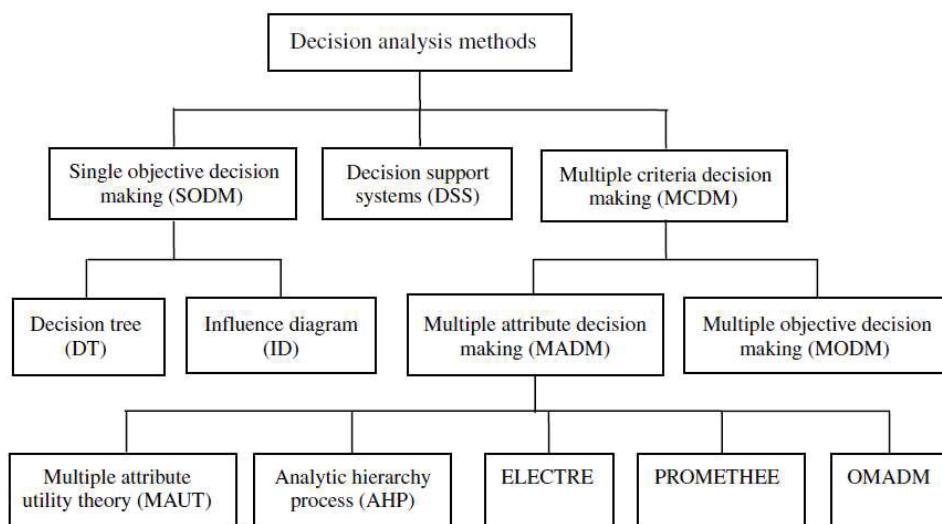
- 1) Identificação do problema: esta etapa começa com a existência de um problema.
- 2) Identificação de critério para tomada de decisão: depois da identificação do problema é necessário identificar os critérios para a solução do problema.
- 3) Distribuição da importância/peso de critério: o tomador de decisão deve ponderar a importância dos critérios e classificá-los dando prioridade de acordo com sua importância.
- 4) Desenvolver alternativas: o(s) tomador(es) de decisão devem criar um conjunto de alternativas baseadas na solução do problema.
- 5) Análise das alternativas: através do conjunto de alternativas deve-se selecionar aquelas que realmente podem ser solução para o problema. Estas alternativas selecionadas devem ser analisadas com o intuito de identificar suas propriedades e fraquezas em relação aos critérios.
- 6) Seleção da alternativa: depois da análise as alternativas são ponderadas, nesta etapa escolhe-se a melhor alternativa. A

melhor alternativa é aquela que gera o melhor resultado em relação aos critérios.

- 7) Efetuar a decisão: nesta etapa é realizada a ação de tomar decisão. A decisão tem que ser seguida para as pessoas de interesse bem como a participação destas pessoas na implementação desta decisão.
- 8) Avaliação da eficácia da decisão: nesta etapa é avaliado se o resultado solucionou o problema. Caso o problema se perpetue então as etapas antecedentes devem ser realizadas novamente.

Zhou, Ang e Poh. (2006) classificam os métodos relacionados a tomada de decisão em três grupos principais: Tomada de Decisão com Objetivo Único (*Simple Objective Decision Making - SODM*), Sistema de Suporte a Decisão (*Decision Support Systems - DSS*) e Tomada de Decisão por Múltiplos Atributos (*Multiple Attribute Decision Making –MADM*). Os métodos MADM são também conhecidos como Análise de Decisão de Múltiplos Critérios (*Multiple Criteria Desicion Analysis - MCDA*), Auxílio à Decisão com Múltiplos Critérios (*Multiple Criteria Decision Aid - MCDA*), Tomada de Decisão por Múltiplos Critérios (*Multiple Criteria Decision Making - MCDM*) (GYORI, 2012; SALOMON, 2010). A Figura 5 mostra os principais métodos relacionados a Tomada de Decisão. O método proposto neste trabalho é o AHP, o qual pertence a família dos métodos MADM.

Figura 5 - Classificação dos Métodos de Tomada de Decisão



Autor: Zhou, Ang e Poh. (2006)

3.2 MÉTODOS DE TOMADA DE DECISÃO MULTICRITÉRIOS

Tomada de decisão multicritério (*Multicriteria Decision Manking -MCDM*) refere-se a fazer decisões em relação a múltiplos critérios e na maioria das vezes estes critérios são conflitantes (ZANAKIS *et al.*, 1998). Em Lima et al. (2013) mostra que a literatura científica aborda os MCDM (ou MCDA – *Multicriteria Decision Analysis*) em duas categorias: *Multiple Attribute Decision Making*(MADM) e *Multiple Objective Decision Making* (MODM).

Na abordagem MADM a seleção das alternativas (que são predeterminadas) está relacionada aos múltiplos atributos (critérios), sendo que a quantidade de alternativas é limitada (conhecida), as alternativas estão representadas através de seus atributos, requer comparações entre critérios e possibilidade de classificação das alternativas. O MDAM é um ramo de uma classe geral da Pesquisa Operacional que trabalham com problemas de decisão sob a influência de critérios (Triantaphyllou *et al.*, 1998). Na abordagem MODM os valores das variáveis de decisão a serem determinados estão em um domínio contínuo ou inteiro, a quantidade de alternativas é grande ou até mesmo infinito, necessidade de uma, ou múltiplas, função(ões) objetivo e restrições. As principais diferenças entre os métodos MADM e MODM podem ser verificados na Tabela 3.

Tabela 3 - - Principais diferenças entre os métodos MADM e MODM

	MADM	MODM
Critério (definido como)	Atributo	Objetivo
Objetivo	Implícito	Explicito
Atributo	Explicito	Implícito
Restrições	Inativo	Ativo
Alternativas	Número finito	Infinito
Interação com os tomador(es) de decisão	Não muito	Maioria das vezes
Uso	Seleção / Avaliação	designar

Autor: Hwang e Yoon (1981, tradução nossa)

De acordo com Rao (2007) cada tabela de decisão (matriz de decisão) nos métodos MADM possui quatro partes principais: alternativas, atributos (critério), peso

(importância) de cada atributo e medidas de performance das alternativas em relação aos atributos. A tabela de decisão pode ser vista na Tabela 4.

Tabela 4 - Tabela de decisão nos métodos MADM

Alternativas	Atributos					
	B_1 (w_1)	B_2 (w_2)	B_3 (w_3)	- (-)	- (-)	B_M (w_M)
A_1	m_{11}	m_{12}	m_{13}	-	-	m_{1M}
A_2	m_{21}	m_{22}	m_{23}	-	-	m_{2M}
A_3	m_{31}	m_{32}	m_{33}	-	-	m_{3M}
-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-
A_N	m_{N1}	m_{N2}	m_{N3}	-	-	m_{NM}

FONTE: Rao (2007, tradução nossa)

A tabela de decisão mostra as alternativas A_i ($i = 1, \dots, n$), os atributos B_j ($j=1, \dots, M$), os pesos dos atributos w_j (de $j = 1, \dots, M$) e a medida de performance das alternativas m_{ij} (de $i=1, \dots, N$ e $j=1, \dots, M$). Com a tabela de decisão e um método de tomada de decisão, o tomador de decisão consegue achar a melhor alternativa e/ou ranquear todo o conjunto de alternativas. É importante salientar que todos os elementos da tabela de decisão devem ser normalizados para a mesma unidade, de forma que todos os atributos no problema de decisão possam ser considerados (Rao, 2007).

Ishizaka e Nemery (2013) apresentam uma classificação das abordagens dos MCDA em três grupos: *full aggregation approach* (Escola Americana), *outranking approach* (Escola Européia ou Escola Francesa) e *goal, aspiration or reference level approach*. A origem das técnicas das escolas Americana e Francesa estão relacionadas com as primeiras obras cientificamente publicadas. As técnicas e as ações que são utilizadas durante o processo de tomada de decisão em cada escola são distintas (Rangel et al., 2009).

3.2.1 Escola Americana

Escola Americana constrói funções com valores parciais do conjunto de alternativas assim como uma função de valor global (LOOTSMA, 1990). A abordagem desta escola consiste em sintetizar as diferentes dimensões (diferentes critérios) de um problema e realizar comparações entre alternativas em função de cada dimensão. Através do escore numérico do desempenho global de cada alternativa em relação a todos os critérios é possível ordenar (ranquear) as alternativas (DE MONTIS *et al.*, 2000). A agregação do desempenho das alternativas são compensatórias, ou seja, uma alternativa que possuir um bom desempenho em um critério pode compensar para a mesma alternativa um ruim desempenho em outro critério (CAETANI, 2014). Os principais métodos da Escola Americana são:

- AHP (*Analytic Hierarchy Process*): método de tomada de decisão multicritério desenvolvido nos anos 70 com a utilização de critérios quantitativos e qualitativos, criado pelo matemático Thomas L. Saaty (SAATY, 1977;1980). Este método funciona com a estrutura do problema por níveis hierárquicos através dos julgamentos do(s) tomador(es) de decisão dos critérios e comparação paritária entre as alternativas, obtendo o desempenho global da alternativa.
- SAW (*Simple Additive Weighting*): neste método o tomador de decisão atribui pesos para cada atributo (critério), os quais viram coeficientes para as variáveis (o somatório dos pesos tem que ser menor que 1). Para cada critério o tomador de decisão normaliza os valores das alternativas em função da alternativa com maior valor. Para calcular a nota final de cada alternativa basta multiplicar o valor normalizado de cada critério pelo seu peso e somar estes produtos. A alternativa determinada pelo tomador de decisão é a cuja obter a maior pontuação (HWANG; YOON, 1981).
- MAUT (*Multiattribute Utility Theory*): o método é uma extensão da Teoria da Utilidade para um contexto de multi atributo (critério). A preferência do tomador de decisão pode ser representada pela função Utilidade (FIGUEIRA *et al.*, 2005 apud KEENEY e Raiffa 1976), de modo a medir a conveniência ou a preferência das alternativas. Segundo Araújo *et al.* (2010) este método é adequado quando os critérios estão associados a

incertezas e seus fundamentos são inquestionáveis para realizar escolhas em função de múltiplos critérios.

- ANP (*Analytic Network Process*): este método é considerado uma generalização do AHP e também foi desenvolvido por Thomas L. Saaty. O ANP não funciona por níveis hierárquicos como o AHP, mas sim por uma estrutura de rede sem a necessidade de especificar níveis e permitindo relacionar dependência entre seus conjuntos de elementos e os elementos (NASCIMENTO *et al.*, 2008)
- TOPSIS (*Technique for order of preference by similarity to na ideal solution*): esta técnica funciona a partir do princípio que a melhor alternativa seria aquela com menor distância da solução positiva ideal e a mais longe da solução negativa ideal (KROHLING; PACHECO, 2015). A solução ideal é composta por todos os valores atingidos dos melhores atributos e a solução “negativa ideal” é composta pelos valores atingidos dos piores atributos (critérios)(HWANG; YOON, 1981).
- SMART (*Simple Multi Attribute Rating Technique*): técnica que fornece um caminho mais simples de implementar os princípios da Teoria de Utilidade Multiatributo. Esta técnica não requer julgamentos de preferências entre as hipotéticas alternativas, diferentemente da maioria dos métodos MAUT (OLSON, 1995).

3.2.2 Escola Europeia

Segundo Gomes, Araya e Carignano (2004) os métodos desenvolvidos na Europa foram denominados por Escola Francesa de Apoio à Decisão com Múltiplos Critérios, conhecido como MCDA (*Multiple Criteria Decision Aid*). A Escola Francesa tem um propósito, em contraste com a Escola Americana, que admite um modelo mais flexível, baseado em uma modelagem de preferências, não prevendo comparabilidade entre as alternativas (utilizando conceitos de transitividade e independência entre as alternativas) e sem a necessidade de estruturar os critérios de forma hierárquica (RANGEL;.GOMES; MOREIRA, 2005). A análise do conjunto de critérios conduz ou a uma desclassificação (*outranking*) da alternativa perdedora, ou a uma promoção (*surclassment*) da alternativa ganhadora (EHRLICH, 1996). Os métodos mais conhecidos desta escola são:

- ELECTRE (*Elimination Et Choix Traduisant la Réalité*): Bernard Roy desenvolveu em 1968 a primeira série de métodos da escola francesa chamada ELECTRE, sendo o primeiro método o ELECTRE I (LOOTSMA, 1990). Os métodos ELECTRE tem a característica e vantagem de não haver compensação entre critérios e nenhum processo de normalização, o qual distorce o dado original (ISHIZAKA; NEMERY, 2013). O métodos ELECTRE funcionam com o conceito de superação: uma alternativa x supera uma y se o desempenho da alternativa x for no mínimo tão bom quanto o desempenho da alternativa y. Para analisar se é aceitável considerar uma alternativa tão boa quanto outra, dois índices são utilizados: concordância e discordância (SALOMON, 2004). A família ELECTRE possui alguns métodos, os quais se diferenciam no objetivo do resultado do problema de decisão. Estes métodos podem ser verificados na Tabela 5.

Tabela 5 - Diferentes métodos ELECTRE

Problema de Decisão	Método	Software
Problema de escolha	ELECTRE I ELECTRE IV ELECTRE Is	- - <i>Electre Is</i>
Problema de ranqueamento	ELECTRE II ELECTRE III ELECTRE IV	- <i>Electre III – Electre IV</i> <i>Electre III – Electre IV</i>
Problema de classificação	ELECTRE-Tri-B ELECTRE-Tri-C	<i>Electre-Tri</i> <i>IRIS</i>
Problema de elicitação	Elicitation of weights in ELECTRE Elicitation for ELECTRE-Tri: • Método IRIS • Outros métodos de elicitação	<i>SRF</i> <i>IRIS</i> <i>Electre Tri Assistant</i>

Autor: Ishizaka; Nemery (2013)

- PROMETHEE (*Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations*): Brans (1982) desenvolveu os métodos PROMETHEE I (ranqueamento parcial) e PROMETHEE II (ranqueamento total) e apresentou em uma conferência em Québec (FIGUEIRA et al., 2005). O método PROMETHEE fornece para o tomador de decisão o *ranking* das alternativas

baseadas nos graus de preferência. O método é composto por três principais passos: cálculo dos graus de preferência para todo par de alternativas para cada critério, cálculo dos números em cada critério e cálculo dos números globais (ISHIZAKA; NEMERY, 2013). Em Brans et al. (1986) é apresentado o PROMETHE III (*ranking* baseado em intervalos) e o PROMETHEE IV (subconjuntos compactos). Em 1988 os mesmos autores propuseram um módulo interativo visual chamado GAIA, a qual fornece uma representação gráfica da metodologia PROMETHEE. Na década seguinte foi desenvolvido o PROMETHEE V (MCDA com restrições de segmentação) e o PROMETHEE VI (representação do cérebro humano) (SMET, 2016 *apud* BRANS; MARESCHAL, 1992; 1995).

- REGIME: este método foi desenvolvido por Hinloopen et al. (1983). Regime é um método qualitativo multicritério o qual fornece uma ferramenta para analisar situações complexas, as quais são impossíveis de serem modeladas através de informações quantitativas. Neste método a tabela de avaliação pode conter dados cardinais ou ordinais, diferentemente do método ELECTRE que requer ranqueamento com dados cardiais (De Montis et al., 2000).

3.2.3 Métodos Híbridos

Alguns métodos multicritério de tomada de decisão não pertencem a Escola Americana nem a Escola Europeia, pois utilizam elementos técnicos das ambas Escolas. Estes métodos são chamados de “métodos híbridos” (RANGEL;GOMES;MOREIRA, 2009). Fazem parte dos métodos híbridos:

- TODIM (Tomada de Decisão Interativa Multicritério – *Interactive and Multicriteria Decision Making*): o método foi concebido, em sua forma atual, no começo nos anos noventa desenvolvido com base na Teoria do Prospecto (KAHNEMAN; TVERSKY, 1979). O método é baseado em uma descrição, comprovada por evidências empíricas, de como as pessoas efetivamente tomam decisões em relação ao risco. O formato da função de avaliação do método TODIM é a mesma da função ganho/perda da Teoria do Prospecto (GOMES; RANGEL, 2009). Segundo Roy e Bouyssou (1993, p. 638) o TODIM combina aspectos dos métodos MAUT, AHP e ELECTRE.

- MACBETH (*Measuring Attractiveness by a Categorical Based Evaluation Technique*): este método requer um julgamento qualitativa sobre as diferenças de valor para ajudar o tomador de decisão a quantificar a atratividade relativa das opções (BANA E COSTA; DE CORTE; VANSNICK, 2003). As comparações entre opções são paritárias (duas a duas) assim como no AHP, mas o MACBETH utiliza uma escala de intervalo enquanto que o AHP adota uma escala de proporção (ambos métodos possuem similaridades). O MACBETH tradicional oferece sete categorias semânticas para avaliar a comparação paritária: *no, very weak, weak, moderate, strong, very strong, extreme* (ISHIZAKA; NEMERY, 2013). O método MACBETH pode ser utilizado apenas através do software *M-MACBETH*.

4 REVISÃO DA LITERATURA

Este capítulo apresenta o estado da arte das publicações relevantes de artigos científicos sobre o tema de eletrificação rural com análise multicritério. O processo realizado para selecionar artigos para formar o portfólio bibliográfico foi conforme ENSSLIN et al. (2010).

A primeira etapa deste processo foi definir os eixos de pesquisa e as palavras-chave para a base bruta de dados. Em relação a eixos de pesquisa foi escolhido dois eixos: eletrificação rural e métodos multicritérios. O primeiro eixo está relacionado com a problemática, enquanto que o segundo eixo está relacionado com a solução para o problema. Para cada eixo foram determinadas palavras-chave, de modo que a pesquisa na literatura científica foi realizada através das combinações destas palavras-chaves. A Tabela 6 mostra as palavras-chaves da primeira fase da construção do portfólio bibliográfico segundo Ensslin et al. (2010) e a Tabela 7 apresenta a quantidade de pesquisa em função das combinações destas palavras-chave.

Tabela 6 – Palavras-chave conforme os eixos de pesquisa

Palavra chave	Eixo 1 – Eletrificação Rural	Palavra chave	Eixo 2 – Métodos Multicritérios
i	Rural electrification	α	Multi Criteria
ii	Renewable Energy	β	Multi-attribute

Tabela 7 - Combinação das palavras-chave para pesquisa na literatura científica

Pesquisa	Combinação das palavras chaves
1	i + α
2	ii + α
3	i + β
4	ii + β

segunda etapa do processo foi definir o banco de dados. A pesquisa dos artigos científicos foi feita pelo software *Publish or Perish*, um programa que recupera e analisa citações acadêmicas. Este programa utiliza o banco de dados do *Google Scholar* e *Microsoft Academic Research* para obter as citações e apresenta as seguintes métricas na pesquisa: número de citações dos artigos, citações por autor, artigos por autor, citações por ano, índice H, etc. Este software tem uma limitação de

1.000 artigos por cada pesquisa de palavras chaves, porém são as mais relevantes na literatura científica.

O resultado das quatro pesquisas resultou em 3543 arquivos (livro, tese, artigo de evento, artigo de revista) referentes aos anos de 1995 a 2017. A análise do Portfólio Bibliográfico foi realizada com artigos publicados nos últimos 10 anos, resultando 3122 arquivos. A terceira etapa do processo foi testar a aderência das palavras chaves com um artigo resultante da pesquisa. A quarta etapa do processo consiste em filtrar os artigos quanto a redundância, ou seja, um artigo no banco de dados repetido. Nesta quarta etapa resultou em 2620 arquivos.

A quinta etapa de Ensslin et al. (2010) consiste em ler apenas os títulos dos arquivos, e excluir aqueles que não contém a combinação das palavras chaves. Esta etapa resultou em 94 documentos, sendo 4 teses, 28 artigos de revistas e 62 artigos de eventos. A sexta etapa do processo resume na leitura do *abstract* dos artigos e verificar se os artigos estão alinhados com o tema de pesquisa da dissertação (pré-leitura). Esta etapa resultou em 16 artigos que falam sobre o problema de eletrificação rural e o método multicritério como solução. A Tabela 8 mostra a relação dos periódicos com a combinação das palavras chaves dos artigos encontrados pelo método de pesquisa de Ensslin et al. (2010).

Tabela 8 - Base de dados dos artigos selecionados

Revista	Ano	Pesquisa			
		i + α	ii + α	i + β	ii + β
Distributed Generation & Alternative Energy Journal	2017		1		
Energy, Sustainable an Society	2016		1		
Renewable and Sustainable Energy Reviews	2015;20013	3			
Journal of Clean Energy Technologies	2015		1		
Energy for Sustainable Development	2014	1			
Journal of Renewable Energy and Environment	2014				1
Energy Policy	2013;2007	2	1		
Renewable Energy	2013	1			
European Journal of Operational Research	2012		1		
International Journal of Renewable Energy Research	2012			1	
Omega	2008	1			
Environment and Planning C: Politics and Space	2008	1			

A partir dos artigos selecionados da Tabela 8, procedeu-se a análise detalhada do material coletado. Esta análise objetivou verificar, através de uma leitura

seletiva dos artigos verificados na pré-leitura, se os mesmos possuem fatos e resultados aplicáveis ao tema pesquisado, através da verificação da parte introdutória e conclusão dos trabalhos. Por fim, foram selecionados 12 artigos com estudos de aplicação para uma análise crítica, as quais estão dispostas a seguir em função das escolas Europeia e Americana.

4.1 APLICAÇÕES COM MÉTODOS DA ESCOLA EUROPEIA

O trabalho de Henao et al. (2012) utilizou a abordagem do pentágono de subsistência sustentável (*Sustainable Livelihoods Pentagon*), aplicado na cidade de Jambaló (sudoeste da Colômbia) como estudo de aplicação. As comunidades La Esperanza, La Marqueza e Loma Larga possuíam apenas um gerador a diesel que atendia apenas 21% da demanda. Neste trabalho Henao et al. (2012) utiliza programação de compromisso e o método multicritério PROMETHEE. As alternativas de geração de energia utilizadas neste método multicritério foram o diesel, micro hidráulico, fotovoltaico, biomassa e sistemas híbrido, sendo que a melhor opção segundo o método foi a tecnologia de biomassa.

Mourmouris, Potolias e Fantidis. (2012) desenvolveram com a técnica Regime um modelo multicritério para eletrificar a ilha Samothrace, na Grécia. Este modelo multicritério utiliza um sistema de informação georreferenciado (SIG) o qual utiliza dados ambientais de mapas que foram elaborados com dados espaciais integrados através do AHP. Para realizar o dimensionamento dos sistemas de geração foi usado o software HOMER, os quais são alternativas para o método multicritério. Na modelagem do método foi empregado cinco critérios, dois quantitativos (econômico e técnico) e três qualitativos (ambiental, social e outros). No critério econômico foi utilizado três subcritérios: custo de investimento, valor presente líquido, custos de O&M. Nos critérios ambientais e sociais foram utilizados três subcritérios cada: redução dos gases de efeito estufa, uso da terra, impacto visual, aceitação social, geração de emprego e benefícios sociais. O critério técnico foi modelado com os subcritérios eficiência e disponibilidade. E no critério outros foi aplicado os subcritérios segurança e confiabilidade. Segundo este modelo multicritério o sistema híbrido com tecnologia eólica mais fotovoltaica com baterias é a melhor opção para atender 90% da demanda anual da ilha de Samothrace.

Em outro trabalho de Mourmouris e Potolias (2013) foi desenvolvido um método multicritério, utilizando a técnica Regime com um SIG, com o objetivo de indicar a melhor tecnologia de geração de energia para atender a demanda da Ilha de Thassos (Grécia). O método foi modelado com os quatro critérios quase igual em Mourmouris, Potolias e Fantidis. (2012), com a diferença da exclusão do critério outros. No critério econômico foi utilizado três subcritérios a mais do que em Mourmouris, Potolias e Fantidis. (2012): payback, custo de combustível e vida útil do sistema. Nos critérios ambientais e sociais foram utilizados os mesmo subcritérios do que no outro trabalho. O critério técnico foi modelado com os critérios técnico e outros do trabalho de Mourmouris, Potolias e Fantidis. (2012). O método apresentou como o melhor resultado para uma fonte o sistema de tecnologia eólica e para sistemas híbridos a solução eólica mais biomassa.

Papadopoulos e Karagiannidis (2008) utilizaram as ilhas de Karpathos e Kassos como estudo de aplicação de um método multicritério com a técnica ELECTRE III. Este modelo opera com cinco critérios: valor presente líquido do sistema, período de payback, custo do ciclo de vida, redução de emissão de CO₂ e custos de *black-out*. Em relação as alternativas, o modelo trabalha com oito opções, sendo uma delas um usina térmica, duas alternativas diferentes com tecnologia eólica, duas alternativas de sistemas híbridos com tecnologia eólica e fotovoltaica (a potência de cada alternativa varia), duas alternativas diferentes de sistema híbrido com tecnologia eólica e biomassa e uma alternativa com sistema híbrido com tecnologia eólica, fotovoltaica e biomassa. Neste artigo é realizado uma análise de sensibilidade dos pesos dos critérios. Entre estas alternativas a opção eólica é a melhor alternativa segundo o modelo proposto.

4.2 APLICAÇÕES COM MÉTODOS DA ESCOLA AMERICANDA

O trabalho de Rojas-Zerpa e Yusta (2015) utiliza dois métodos multicritérios (AHP e VIKOR) para eletrificar 35 casas nos andes Venezuelanos. O método AHP utilizou 4 critérios (Técnico, Econômico, Social, Ambiental) e 13 subcritérios (como Energia não atendida, confiabilidade das tecnologias, valor presente líquido, geração de emprego, redução de emissões de dióxido de carbono, dióxido de enxofre, óxido de nitrogênio, etc.). O método VIKOR gerencia o resultado em relação as alternativas,

utilizando três métricas (S = aceitação, R = rejeição e Q = ordenamento das alternativas). Para dimensionar as oito alternativas energéticas foi utilizado o software HOLGA (*Hybrid Optimization Genetic Algorithm*). Como melhor opção o método resultou na alternativa de microrrede, com sistema fotovoltaico, micro hidráulico e baterias.

O artigo de Kulkarni et al. (2017) também utiliza a técnica AHP com a implementação da lógica Fuzzy. A metodologia funciona com três alternativas para eletrificar propriedades rurais remotas na Índia: extensão da rede, sistemas solares para casa (*Solar Home System - SHS*) e microrredes. O modelo foi desenvolvido para funcionar com dois cenários: um com foco na análise de custos e outra ambiental. O método multicritério, nas duas análises, foi concebido com oito critérios (custo de geração, preço da energia para os consumidores, perdas técnicas, confiabilidade, demanda, disponibilidade, restrições e O&M). O resultado para os dois cenários indica a microrrede como a melhor opção para eletrificar as propriedades rurais da Índia.

Ahammed e Azeem (2013) desenvolveram um método multicritério utilizando o AHP para eletrificação rural em Bangladesh. O método utiliza três critérios e três alternativas. Entre os critérios consta o custo do SHS, o atendimento da demanda de energia para necessidade doméstica básica e a disponibilidade do sistema no mercado nacional. Esses critérios avaliam as alternativas de SHS de 30, 50 e 70 Wp. Em função dos critérios deste método multicritério, a melhor alternativa é a opção de 30 Wp (2 lâmpadas e 1 TV preto e branco).

Diemuodeke et al. (2016) utilizou o software HOMER e modelou um método de tomada de decisão multicritério, baseado em TOPSIS, para determinar o melhor sistema híbrido de energia nas comunidades litorâneas em Abonnem, na Nigéria. O modelo é baseado em quatro alternativas e 15 subcritérios, distribuídos nos critérios econômico, social e ambiental. O resultado deste modelo indica o sistema híbrido diesel-fotovoltaico-eólico como melhor opção, com um LCOE inferior ao LCOE de atendimento por rede convencional.

4.3 APLICAÇÕES COM OUTROS MÉTODOS

Em Cherni et al. (2007) foi desenvolvido o projeto RESURL (*Renewable Energy for Sustainable Rural Livelihoods*) com o objetivo de identificar o melhor sistema de energia para a comunidade de San José de Cravo Norte II, no leste da

Colombia. A necessidade de desenvolver este trabalho estava relacionado a disponibilidade de energia desta comunidade que utilizava um gerador diesel de 5 kW, o qual atendia 12% da demanda da comunidade (operava apenas 7 horas/dia devido ao alto custo de operação). Neste projeto foi desenvolvido o software SURE DSS (*Sustainable Rural Energy Decision Support System*), o qual utilizava os recursos de capitais (casa, estrada, salário, poupança, água, terra, organizações locais e educação) como critérios através da abordagem do pentágono de subsistência sustentável (físico, financeiro, recursos naturais, social e educação), sendo que estes dados foram obtidos através de formulários com as famílias. Dentre as sete opções energéticas (micro hidráulico, fotovoltaico, biogás, extensão da rede, diesel-biogás, diesel-fotovoltaico e diesel-hidro) o SURE DSS resultou como melhor opção a solução diesel com micro hidráulico.

Rahman, Paatero e Lahdelma. (2013) modelam o problema de eletrificação para a vila Char-Lokman em Bangladesh através da análise de aceitabilidade multicritério estocática (*Stochastic Multicriteria Acceptability Analysis – SMAA2*). Este modelo determina oito alternativas de sistemas de geração de energia (fotovoltaico, eólico, fotovoltaico com eólico, planta de biogás, mini hidrelétrica, e gerador a diesel) para o local em análise. O método possui 24 subcritérios (10 cardinais e 14 ordinais) distribuídos em cinco subcritérios: técnico, econômico, social, ambiental e regulação/político. Entre os subcritérios avaliados cinco deles não foram estabelecidos em outros artigos, são eles: compatibilidade com futuras instalações, compatibilidade com infraestrutura existente, requerimento e aquisição de terra, oportunidade de participação privada e incentivos tributários. Outro diferencial deste modelo é o vetor de pesos das alternativas em relação aos subcritérios, o qual é calculado através do método centro de gravidade. O resultado deste modelo aponta o sistema fotovoltaico como a melhor alternativa e a tecnologia de biomassa em segundo lugar. Outro resultado interessante deste artigo é a análise gráfica da comparação entre o LCOE das alternativas e o LCOE da rede em função da variação de seu comprimento.

O método de avaliação multicritério social foi desenvolvido por Munda e Russi (2008) para analisar em quais circunstâncias a energia solar é apropriada para prover eletricidade nas fazendas da vila de Tagamanent (Parque Natural de Montseny, perto de Barcelona). O modelo lida com três alternativas para atender o consumo das fazendas, sendo por extensão de rede (utilizando parâmetros da concessionária

Frecsa), extensão da rede com restrições ambientais (utilizando parâmetros da SEBA – Associació de Serveis Energètics Bàsics Autònoms) ou sistemas fotovoltaicos *stand-alone*. O sistema fotovoltaico foi dimensionado com 2,9 kWp para atender um consumo de 192 kWh/mês por propriedade, com 21 anos de vida útil. O método foi modelado com os critérios econômico, ambiental (risco para os pássaros, risco de incêndio, deforestamento) e social (efeito educacional), sendo este último com dados qualitativos. O modelo avalia três matrizes distintas das alternativas com os critérios cada uma em função de três visões, levando em conta o impacto para o parque, para os donos das fazendas e para os moradores. Para ranquear as alternativas foi utilizado um algoritmo com o método de Condorcet. A melhor alternativa considerando a perspectiva do parque foi a tecnologia fotovoltaica, enquanto que na perspectiva dos donos e moradores as três alternativas ficaram empatadas.

O único trabalho desenvolvido com método multicritério para eletrificação rural no Brasil foram Nerini *et al.* (2014) com estudo de aplicação na Amazônia. Neste modelo foram utilizados cinco critérios (técnico, econômico, ambiental, social e institucional) com 16 subcritérios. Entre os subcritérios é importante salientar os subcritérios que até então não tinham sido avaliados em outro trabalho, como a presença de gases nocivos às pessoas, possíveis serviços a serem fornecidos à comunidade (iluminação pública), barreiras institucionais para a tecnologia e benefício econômico Nacional. Neste modelo foram analisados cinco alternativas de geração de energia: geradores a diesel (microrrede), sistemas fotovoltaicos (microrrede ou *stand alone*), sistemas de biomassa (microrrede), micro hidrelétrica (microrrede) ou sistema híbrido com tecnologia fotovoltaica e gerador a diesel (microrrede ou *stand alone*). Para determinar o peso dos critérios um questionário foi feito com vários tomadores de decisão (engenheiros, coordenadores de concessionária de energia, acadêmicos) para expressarem suas preferências. O método *Anchored Rating Scale* foi utilizado para ponderar os critérios por sua simplicidade e por apresentar uma baixa variância. Desta forma as tecnologias de biomassa e fotovoltaica apresentaram as melhores pontuações com 77% e 76% respectivamente e foi constatado que um sistema de 60 kWh/mês é o suficiente para atender as propriedades na Amazônia.

4.4 METODOLOGIA PROPOSTA - DIFERENCIAL DO ESTADO DA ARTE

Com os 12 artigos da revisão da literatura apresentados é possível apontar os diferenciais da metodologia proposta neste trabalho. Nesta dissertação existem dados oriundos de um sistema de informação geográfica (SIG) propiciando uma análise espacial, como os dados ambientais e as distâncias das propriedades para calcular o custo de logística, assim como foi apresentado em apenas dois artigos da revisão da literatura.

Outro diferencial é o dimensionamento de 32 sistemas de geração de energia elétrica através do software HOMER, este foi indicado em dois artigos. Estes sistemas foram dimensionados em função de 11 faixas de consumo de energia, através de cinco fontes distintas (solar, eólica, diesel e sistemas híbridos). Os sistemas foram dimensionados em conformidade com a resolução normativa brasileira vigente de sistemas isolados.

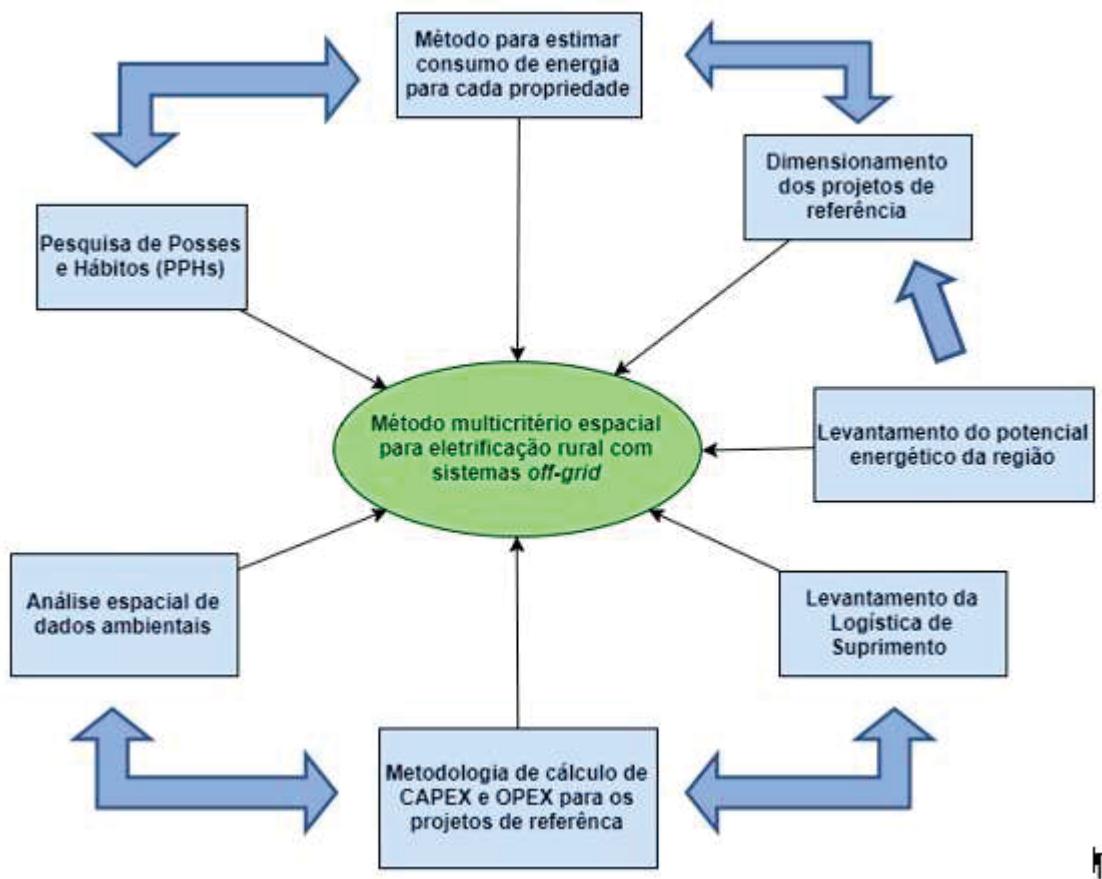
Em relação aos critérios avaliados nos artigos da revisão da literatura, apenas um apresenta a avaliação do critério regulatório, o qual foi modelado na metodologia multicritério espacial proposta. Outro critério relevante na metodologia proposta neste trabalho é o custo nivelado de energia (LCOE), pelo fato de abranger informações de custo de investimento, O&M, custo de combustível, valor presente e vida útil (considerados como critérios nos artigos apresentados) em apenas um parâmetro. Além disso, o critério LCOE deste trabalho é composto pelo custo de logística, o qual complementa os custos de O&M resultando em valores mais concretos.

5 INSUMOS DA MODELAGEM COMPUTACIONAL

Neste capítulo são apresentados os materiais utilizados como *inputs* para o modelo que utiliza a metodologia de análise multicritério espacial para eletrificar propriedades rurais remotas a fim de indicar a melhor opção *off-grid*. No contexto espacial, os critérios de avaliação estão relacionados a informações geográficas, as quais normalmente são representadas sob a forma de mapas. Neste trabalho os materiais “Análise espacial de dados ambientais” e “Levantamento de Logística de Suprimento” da Figura 6 são dados oriundos de SIG, e portanto, propiciam o caráter espacial para o problema da eletrificação rural.

Neste caso os materiais da Figura 6 estão relacionados ao Pantanal Sul-mato-grossense, porém o método funciona para qualquer região, ou seja, o método é genérico sendo que o território analisado deve conter as mesmas escalas de avaliação (a mesma métrica para cada critério) apresentado neste trabalho. Os dados destes materiais são utilizados na avaliação dos critérios da metodologia, estes são definidos no Capítulo 6. A Figura 6 apresenta quais são os materiais (em azul) necessários para este método multicritério espacial (verde). As setas em azul claro indicam que há uma interação (dependência) entre os materiais.

Figura 6 - Composição dos materiais utilizados na modelagem do método multicritério espacial



Pelo fato de ter tantos materiais, como pode ser visto na Figura 6, há uma complexidade em utiliza-los de forma integrada com o método multicritério. Por esse motivo, no capítulo de materiais é explicado cada um dos materiais e suas interações. Em seguida, o capítulo de métodos apresenta como os dados dos materiais são utilizados e calculados no método multicritério espacial. Além disso, no capítulo de métodos é apresentada a técnica multicritério, os critérios e a modelagem de seus parâmetros.

Os materiais apresentados neste trabalho possuem informações referentes aos relatórios técnicos do projeto de P&D -0404-1502/2015, Elaboração de Metodologia de Suprimento de Energia Elétrica a Sistemas Isolados no Pantanal Sul-Matogrossense. Desta forma os materiais Pesquisa de Posses e Hábitos, Método para estimar o consumo de energia para cada propriedade, levantamento logístico de suprimento, Análise espacial de dados ambientais não foram produzidos pelo autor.

5.1 FORMULÁRIO DE PESQUISA DE POSSES E HÁBITOS

O principal objetivo das pesquisas em campo é obter dos residentes ou usuários de uma localidade informações acerca do tipo e quantidade de equipamentos existentes, além dos hábitos de uso desses aparelhos. Em geral, os usos se traduzem nas horas do dia nas quais os equipamentos estão funcionando. Cruzando essas informações com as potências de cada dispositivo, chega-se a uma curva de carga representativa daquela localidade.

No Brasil, essa metodologia de levantamento das informações dos usos da energia através de entrevistas é feita através de um formulário conhecido como Pesquisa de Posses e Hábitos (PPH). Fagundes (2011) fornece um histórico da PPH, afirmando que a primeira pesquisa de grande alcance foi feita em 1988, coordenada pela Eletrobrás no âmbito da PROCEL. Apresenta também uma listagem dos elementos que compõem o formulário, resumidos nos itens a seguir:

- Identificação e caracterização das UCs
- Contabilização dos aparelhos eletrônicos
- Levantamento dos hábitos de consumo
- Caracterização socioeconômicas e comportamentais dos usuários

O autor complementa que, eventualmente, a potência de cada aparelho é coletada no momento da entrevista. Alternativamente, valores padrão são atribuídos, com base em tabelas de instituições como Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO) ou do próprio PROCEL. Por sua vez, Pinho (2013) expõe os resultados esperados da PPH, resumidos abaixo:

- Estratificação do consumo por faixa
- Estratificação do consumo por aparelho
- Representação da curva de carga diária estratificada
- Distribuição da amostra por faixa de consumo

O autor lembra que as PPH devem ser realizadas pelas concessionárias de energia a cada dois ciclos de revisão tarifária, conforme prevê a Resolução ANEEL nº 395/2009.

5.2 MÉTODO PARA ESTIMAR CONSUMO DE ENERGIA

O método para calcular o consumo de energia elétrica de cada propriedade leva em consideração os dados provenientes das campanhas das PPH nas unidades consumidoras. Os parâmetros utilizados das PPH para calcular o consumo de energia são as horas de consumo de cada equipamento e a quantidade de equipamentos que cada UC possui. Os dados de potências dos equipamentos são apresentados na Tabela 9. Os dados dos equipamentos 1 ao 30 foram obtidos da PPH realizada em 2012 (DAIMON, 2012). Os dados de potência dos demais equipamentos foram obtidos através de pesquisa. Nessa pesquisa, cinco equipamentos de modelos semelhantes foram analisados e foi adotada a potência mais comum entre os cinco equipamentos considerados, ou seja, foi feita uma moda desses equipamentos. Vale ressaltar que a potência escolhida é de um equipamento existente no mercado. Os dados de horas/dia e dias/mês dos equipamentos 31 ao 67 foram determinados através de considerações de uso comum de cada equipamento, ou seja, foi feita uma estimativa do tempo de uso de cada equipamento. O número de usuários também foi determinado considerando que apenas os aparelhos micro-ondas, chuveiro elétrico e sanduicheira seriam utilizados pelo número de moradores de cada UC, ficando o restante dos equipamentos com o número de usuários igual a um.

Tabela 9 - Dados de potência dos equipamentos

Ideg	EQUIPAMENTO	POTÊNCIA [W]	HORAS/DIA	DIAS/MÊS	Nº DE USUÁRIOS
1	Aparelho de Som	80	2	20	1
2	Aspirador de pó	100	0,5	15	1
3	DVD/Videocassete	35	2	8	1
4	Ferro de passar roupa	1000	1	12	1
5	Forno Elétrico	1000	0,75	20	1
6	Freezer	130	24	30	1
7	Geladeira	90	24	30	1
8	Lâmpada fluorescente	15	4	30	1
9	Lâmpada Incandescente	100	4	30	1
10	Máquina de lavar louça	500	0,67	15	1
11	Máquina de lavar roupa	500	1,5	8	1
12	Microcomputador	120	4	20	1
13	Micro-ondas	1100	0,083333333	30	0
14	Rádio Elétrico	2,5	10	30	1
15	Torneira Elétrica	100	0,5	30	1
16	TV LCD/LED/Plasma	100	5	30	1
17	TV Normal	100	5	30	1

Ideq	EQUIPAMENTO	POTÊNCIA [W]	HORAS/DIA	DIAS/MÊS	Nº DE USUÁRIOS
18	Ventilador	65	12	30	1
19	Computador	90	4	20	1
20	Torno e aparelho de usinagem	5000	4	20	1
21	Grelha Elétrica	2000	0,5	30	1
22	Carregador de celular	5	0,5	30	1
23	Ar condicionado	1350	8	20	1
24	Bomba de água	750	0,5	30	1
25	Chuveiro Elétrico	3500	0,16666667	30	0
26	Força motriz (benefic., tratamento)	1500	0,5	10	1
27	Força motriz (bombeamento, compressão)	1000	0,17	15	1
28	Força Motriz (transporte, movimento)	1000	0,5	10	1
29	Serra Elétrica	1850	0,25	4	1
30	Máquina de solda	5000	0,25	15	1
31	furadeira	560	0,25	4	1
32	sanduicheira	750	0,03	20	0
33	máquina de fazer gelo	120	4	4	1
34	batedeira	150	0,33	4	1
35	liquidificador	500	0,083	20	1
36	receptor	10	6	30	1
37	cortador de grama	1050	1	2	1
38	tv portátil	18	6	30	1
39	esmeril	370	0,25	4	1
40	climatizador	75	1,5	20	1
41	moedor de carne	1000	1	10	1
42	lixadeira	200	0,25	4	1
43	máquina de jato	1600	1	4	1
44	cortador de cabelo	30	0,5	2	1
45	bebedouro	65	12	30	1
46	impressora	12	0,083	5	1
47	tanquinho	400	1	5	1
48	furadeira industrial	750	0,25	4	1
49	umidificador de ar	35	1,5	20	1
50	roteador	10	24	30	1
51	máquina de cola/ máquina de colar pneu	900	1	15	1
52	Aquecedor a gás	1300	0,25	30	1
53	modem	10	24	30	1
54	policorte	2000	0,25	4	1
55	serra fita	370	0,25	4	1
56	câmara frigorífica	1500	12	30	1
57	roçadeira	1200	1	2	1
58	secador de cabelo	2100	0,250	10	1
59	lanterna carregável	3,2	4	2	1

Ideg	EQUIPAMENTO	POTÊNCIA [W]	HORAS/DIA	DIAS/MÊS	Nº DE USUÁRIOS
60	cafeteira	1300	0,17	20	1
61	panela elétrica	400	0,33	15	1
62	chapinha	30	0,25	5	1
63	esmerilhadeira	820	0,25	4	1
64	caixa de som	620	1	4	1
65	telefone	0,83	24	30	1
66	laminador de massa	184	0,25	8	1
67	Vulcanizador	900	1,5	10	1

O método proposto para calcular o consumo de energia elétrica de cada propriedade é apresentado na equação (1)

$$E = \sum_{i=1}^{67} \frac{P_i \cdot h_i \cdot d_i \cdot qm_i \cdot qe_i \cdot fs}{1000} \quad (1)$$

Sendo,

- E Energia em quilowatt hora [kWh]
- P Potência em watts [W]
- h Número de horas por dia [h]
- d Número de dias por mês
- qm Quantidade de moradores
- qe Quantidade de equipamentos
- fs Fator de simultaneidade

Esse modelo calcula a energia de cada equipamento e faz um somatório dos 67 possíveis equipamentos de uma residência para obter a energia total consumida por cada UC no mês.

O fator de simultaneidade é um número adimensional entre 0 e 1 e é utilizado para melhorar o dimensionamento de determinado sistema. Nesse contexto, o fator de simultaneidade é utilizado nesse modelo, pois é considerado que caso haja mais de uma quantidade de um mesmo equipamento em uma UC, esses provavelmente não estarão consumindo energia elétrica ao mesmo tempo. Portanto, o fator de simultaneidade representa o percentual de equipamentos que estarão ligados ao mesmo tempo em uma determinada UC (ZERBINATTI, 2008). A Tabela 10 mostra os valores dos fatores de simultaneidade utilizados nesse modelo. Os valores desta

tabela foram determinados através da equação 2. Observa-se que a partir de 20 equipamentos o fator de simultaneidade praticamente não se altera.

$$fs(qe) = \frac{e^{\frac{1}{1,5 \cdot qe}}}{e^{\frac{1}{1,5}}} \quad (2)$$

Tabela 10 - Fator de simultaneidade em relação ao número de equipamentos

Número de equipamentos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Fator de simultaneidade	1	0,72	0,64	0,61	0,59	0,57	0,56	0,56	0,55	0,55	0,55	0,54	0,54
Número de equipamentos	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
Fator de simultaneidade	0,54	0,54	0,54	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53
Número de equipamentos	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39
Fator de simultaneidade	0,53	0,53	0,53	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52

Para estimar as curvas de carga, os sete intervalos considerados nas pesquisas, 0:00 às 6:00, 6:00 às 9:00, 9:00 às 12:00, 12:00 às 15:00, 15:00 às 18:00, 18:00 às 21:00 e 21:00 às 24:00, foram discretizados hora a hora, totalizando 24 horas. O tempo de utilização diária da Tabela 9 é dividido pela quantidade de horas do intervalo de utilização declarado. Por exemplo, se o tempo de utilização de determinado equipamento é de 15 minutos e foi declarado que é utilizado no intervalo 15:00 às 18:00, considera-se que o equipamento é utilizado 5 minutos em cada hora desse intervalo. Caso o número de horas/dia da Tabela 9 seja maior que o número de horas declaradas, por exemplo, 4h no período 15:00 18:00, é considerado 1h em cada hora desse intervalo.

Para a obtenção das curvas de carga Salas *et al.* (2017) utilizaram o mesmo modelo apresentado na equação 1, porém sem multiplicar pelo número de dias no mês. Dessa forma foi obtido o perfil de consumo diário para cada uma das faixas de consumo. As curvas de carga mostradas nas Figura 7 a Figura 12 são normalizadas com referência a potência de pico de cada faixa (essas potências de pico são descritas no subcapítulo 5.5.3).

Figura 7 - Curva de carga da faixa de 0-80
kWh/mês

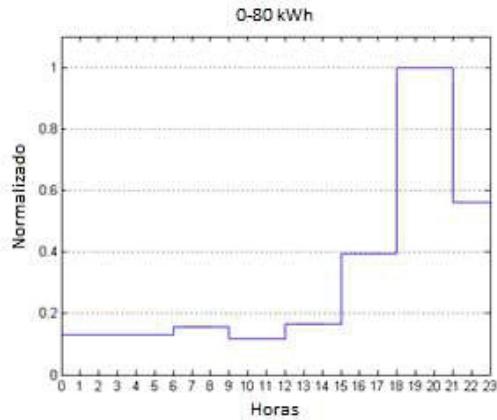


Figura 9 - Curva de carga da faixa de 161-300
kWh/mês

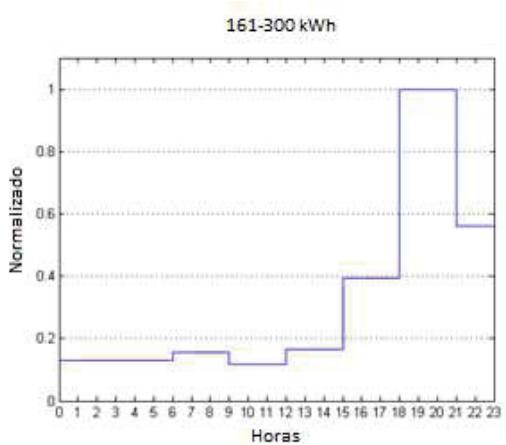


Figura 11 - Curva de carga da faixa de 601-
1.000 kWh/mês

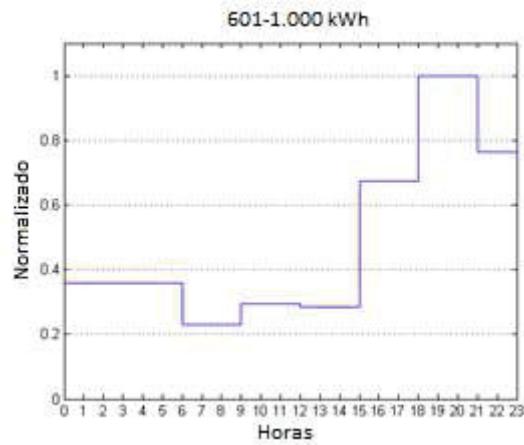


Figura 8 - Curva de carga da faixa de 81-160
kWh/mês

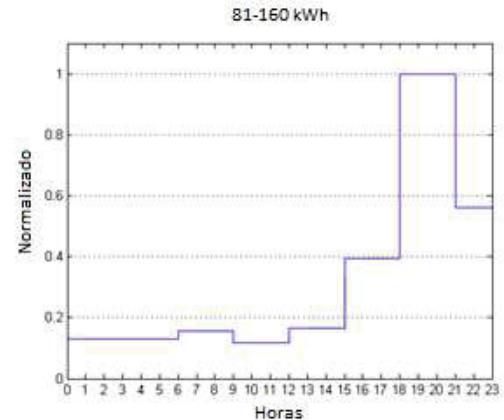


Figura 10 - Curva de carga da faixa de 301-600
kWh/mês

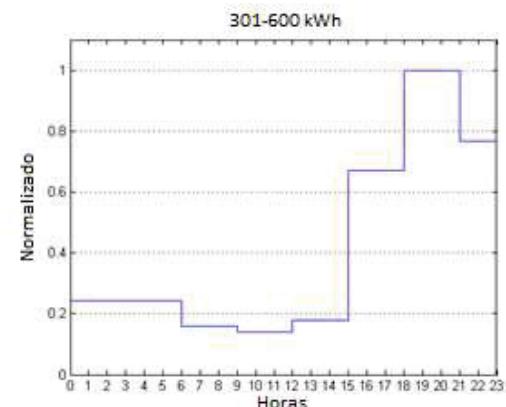
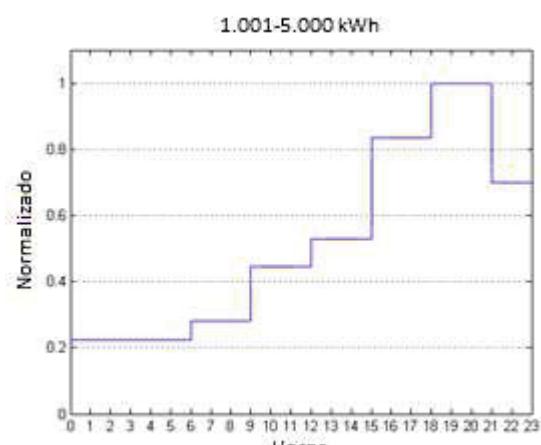


Figura 12 - Curva de carga da faixa de 1.001-
5.000 kWh/mês



FONTE: Salas et al. (2017)

5.3 LEVANTAMENTO DA LOGÍSTICA PARA SUPRIMENTO

A gestão da cadeia de suprimentos dentro da metodologia espacial multicritério contempla dois aspectos: a forma de abastecimento de combustível para as propriedades que possuem geradores a diesel e a logística de instalação e manutenção das tecnologias de fornecimento de energia elétrica mapeadas pelo projeto.

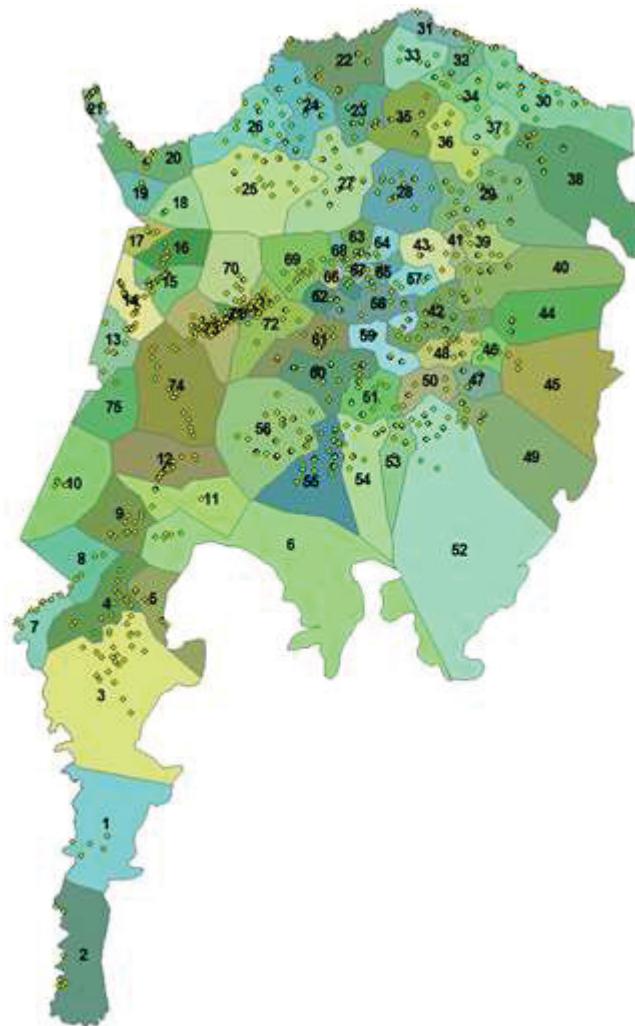
A metodologia para escolha da melhor solução de suprimento de energia elétrica também levará em conta a localização de cada propriedade e a facilidade de acesso. O levantamento da logística de suprimento feito consiste na avaliação das características regionais e um levantamento preliminar da infraestrutura de logística existente. O estudo completo da logística de suprimento se consolida com o resultado das campanhas de coleta de dados em campo através das entrevistas.

O formulário de entrevistas contempla perguntas pontuais sobre como cada propriedade providencia deslocamentos e transporte. As perguntas do formulário podem ser vistas no ANEXO A. Com os dados obtidos em campo no Pantanal Sul-mato-grossense foi calculado os custos por tipo de transporte, os quais podem ser vistos na Tabela 11. Através da utilização de ferramenta de geoprocessamento, Salas *et al.* (2017) dividiram o Pantanal em 75 grupos de modais (cluster), os quais obtém dados de distância e dos tipos de transporte para acessar as propriedades de cada grupo. Esta divisão pode ser vista na Figura 13. A regra para agrupar estas propriedades foi definida de forma que cada propriedade que pertence a um determinado cluster difere das demais no máximo 10 % da distância até Corumbá.

Tabela 11 - Custos por cada tipo de transporte utilizado na região do Pantanal Sul Mato-Grossense

	Diári a (R\$)	Km percorrido s por dia	Litros de combustív el	Preço combustív el	Fato r de carg a	TOTAL transport e equipes (R\$/km)	TOTAL transport e carga (R\$/km)	Velocidad e média (km/h)	Carga Permitid a (kg)
Avião	2160	100	0	3,5	1	21,6000	21,6000	100	1200
Lancha rápida	600	160	100	3,5	1,5	5,9375	7,0312	20	200
Caminhone te	600	250	48	3,5	1,2	3,0720	3,2064	25	300
Trator	200	80	50	3,5	1,2	4,6875	5,1250	15	200
Barco grande	1800	120	0	3,5	1	15,0000	15,0000	10	1000
Lancha freteira de automóveis (preço por automóvel)	1000	120	0	3,5	1	8,3333	8,3333	10	2000

Figura 13 - Grupos de propriedades baseados na distância à Corumbá



FONTE: Salas *et al.* (2017)

5.4 LEVANTAMENTO DO POTENCIAL ENERGÉTICO DA REGIÃO

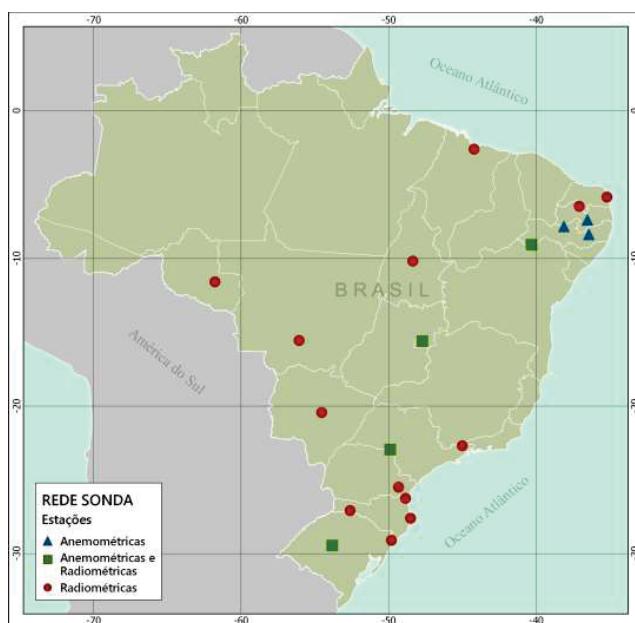
O projeto Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais (SONDA) é uma iniciativa do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) cujo objetivo é implementar uma infraestrutura física e de recursos humanos destinada à elaboração e melhoramento da base de dados de superfície necessária ao levantamento dos recursos de energia solar e eólica no Brasil (SONDA, 2015). Assim, o projeto SONDA tem as seguintes metas:

- Formação de uma base de dados de superfície necessária ao levantamento, avaliação e acompanhamento dos recursos de energia solar e eólica no Brasil;

- Apoio ao projeto *Solar and Wind Energy Resource Assessment* (SWERA) no Brasil de coleta de dados e inter-validação de modelos de potencial solar e eólico no Nordeste;
- Estudar a variabilidade dos recursos de energia solar e eólica no Brasil em função do clima e de mudanças ambientais através de análises estatísticas dos dados de campo em conjunto com dados de modelos e estudo de séries históricas de dados;
- Disponibilizar ao público pela Internet dados de campo, estatísticas sobre a variabilidade climática e outras informações destinadas ao setor de planejamento energético público e privado;

As estações meteorológicas do projeto SONDA podem ser do tipo solarimétrica, anemométrica ou mista. A Figura 14 apresenta a rede de medição implementada pelo projeto.

Figura 14 - Estações da rede SONDA



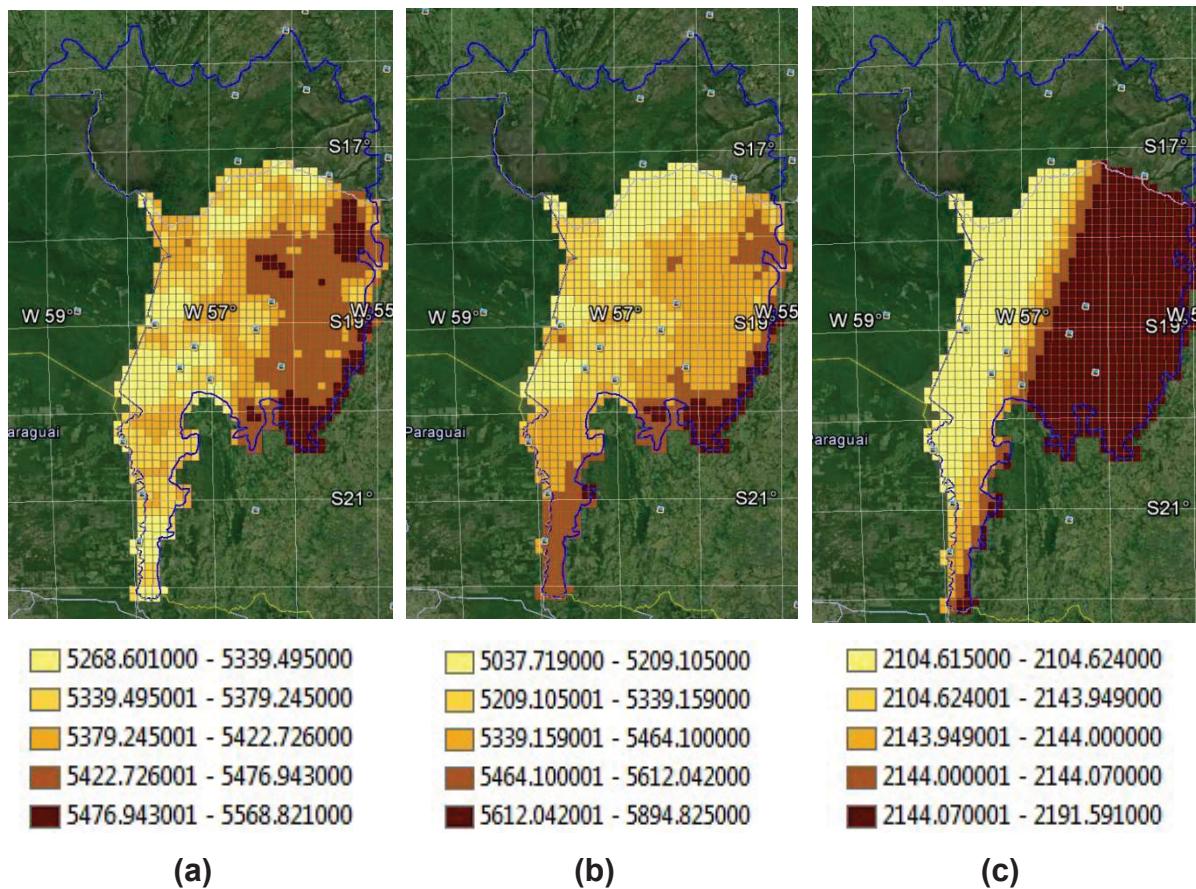
FONTE: SONDA (2016)

O maior repositório de dados de irradiação solar para potencial energético, tanto solar quanto eólico, é a base de dados do Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio Brito (CRESESB, 2017). Os materiais que concentram informações sobre o potencial solar e eólico distribuídos em CRESESB (2015) são: Atlas Solarimétrico do Brasil (2000), Atlas Brasileiro de Energia Solar (2006) e Atlas do Potencial Eólico Brasileiro (Tiba *et al.*, 2000)(Pereira *et al.*, 2006)(Amarante *et al.*, 2001). Os dados do Atlas Brasileiro de Energia Solar são gratuitos e abertos,

disponibilizados pelo *National Renewable Energy Laboratory* (NREL) por meio do SWERA. Os conjuntos de dados, ou datasets para irradiância solar coletados são constituídos de informações satelitais e de tratamentos estatísticos de medições ao longo do território nacional feitas por estações do INPE e de órgãos ligados à aviação civil.

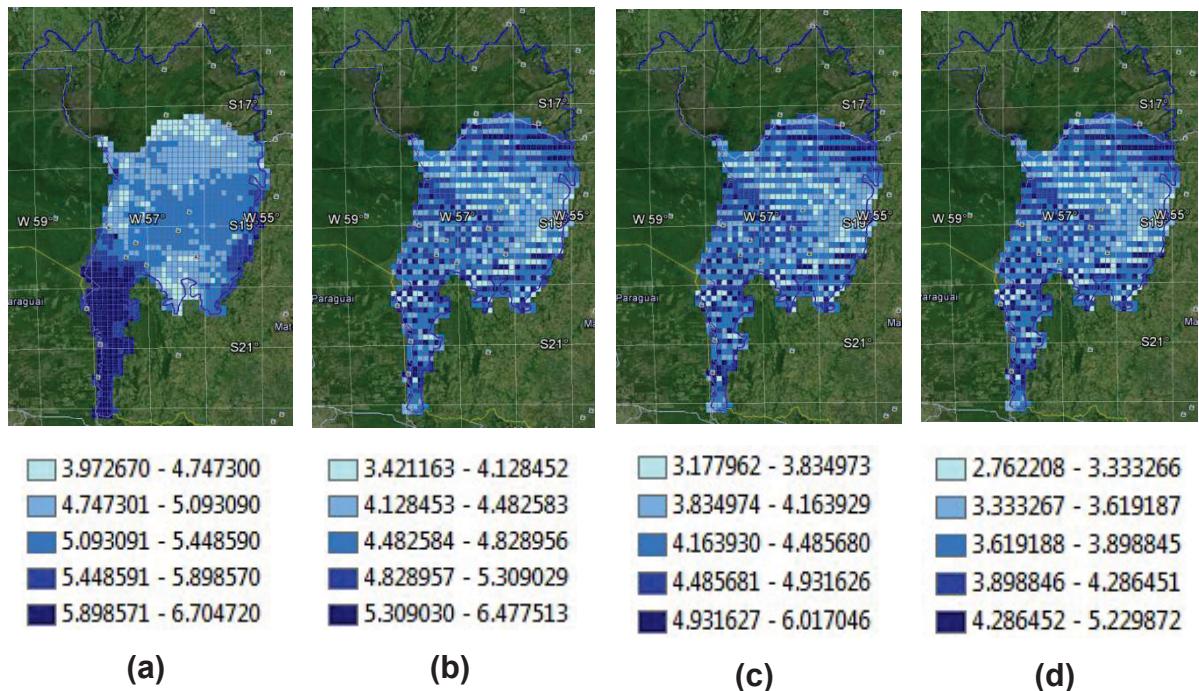
A Figura 15 apresenta três mapas de irradiação de Salas *et al.* (2017) com os dados tratados do Atlas de Energia Solar para a área do estado do pantanal no território do Mato Grosso do Sul. Em azul, é apresentada a área do pantanal. A Figura 16 apresenta quatro mapas temáticos de potencial eólico para a região do Pantanal Sul-mato-grossense de Salas *et al.* (2017). Os valores da Figura 16 são relativamente baixos para a operação de uma turbina eólica.

Figura 15 – Dados georreferenciados para a irradiação solar global (a), direta (b) e difusa (c). Mapas temáticos baseado na irradiação média anual em W/m².



Fonte: Salas *et al.* (2017)

Figura 16 – Dados georreferenciados para o potencial eólico para as alturas de 50m (a), 30m (b), 20m (c) e 10m (d). Mapa temático baseado em velocidade média anual em m/s.



Fonte: Salas *et al.* (2017)

5.5 DIMENSIONAMENTO DOS PROJETOS DE REFERÊNCIA

Os projetos de referência devem ser dimensionados à luz das restrições de projeto da REN 493/2012. Desta forma, seguindo a lógica da REN 493/2012, os projetos de referência são caracterizados por seus consumos mensais, ou “disponibilidade mensal garantida”, conforme termo normativo. Sendo assim caracterizados, a premissa básica para todos os sistemas é o projeto economicamente otimizado para atendimento de sua disponibilidade mensal de energia.

Os projetos de referência devem ser concebidos de forma que os recursos energéticos disponíveis no local de estudo e as soluções tecnológicas comercialmente mais maduras sejam incluídos nas alternativas, ao mesmo tempo em que atendam à demanda especificada. A Tabela 12 apresenta de acordo com Salas *et al.* (2017) as alternativas SIGFI e MIGDI de projetos de referência dimensionadas para o Pantanal Sul-mato-grossense de acordo com a seguinte distribuição:

- SOL + BAT: Instalação fotovoltaica com armazenamento em baterias chumbo ácido seladas reguladas à válvula

- EOL + BAT: Instalação de microturbina eólica aliada a armazenamento com baterias chumbo-ácido seladas reguladas à válvula
- SOL + EOL + BAT: Instalação combinada de painéis fotovoltaicos e microturbina eólica
- GMG: Grupo gerador-motor (operação com diesel)
- SOL + GMGotm + BAT: Instalação fotovoltaica projetada para trabalhar em conjunto com gerador diesel (projeto otimizado) com armazenamento em baterias chumbo-ácido do tipo OPzS próprias para instalações fotovoltaicas
- SOL + GMGpro + BAT: Instalação fotovoltaica (sistema individual) com armazenamento composto por baterias do tipo chumbo-ácido seladas reguladas à válvula e chave reversora de transferência para grupo gerador-motor do proprietário

Tabela 12 – Projetos de referência determinados

Disp. Mensal (kWh/mês) →	13	20	30	45	60	80	160	300	600	1000	5000
Fonte de energia ↓											
SOL+BAT	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
EOL+BAT						X					
SOL+EOL+BAT							X	X	X		
GMG	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
SOL+GMGotm+BAT								X	X	X	X
SOL+GMGpro+BAT								X	X		

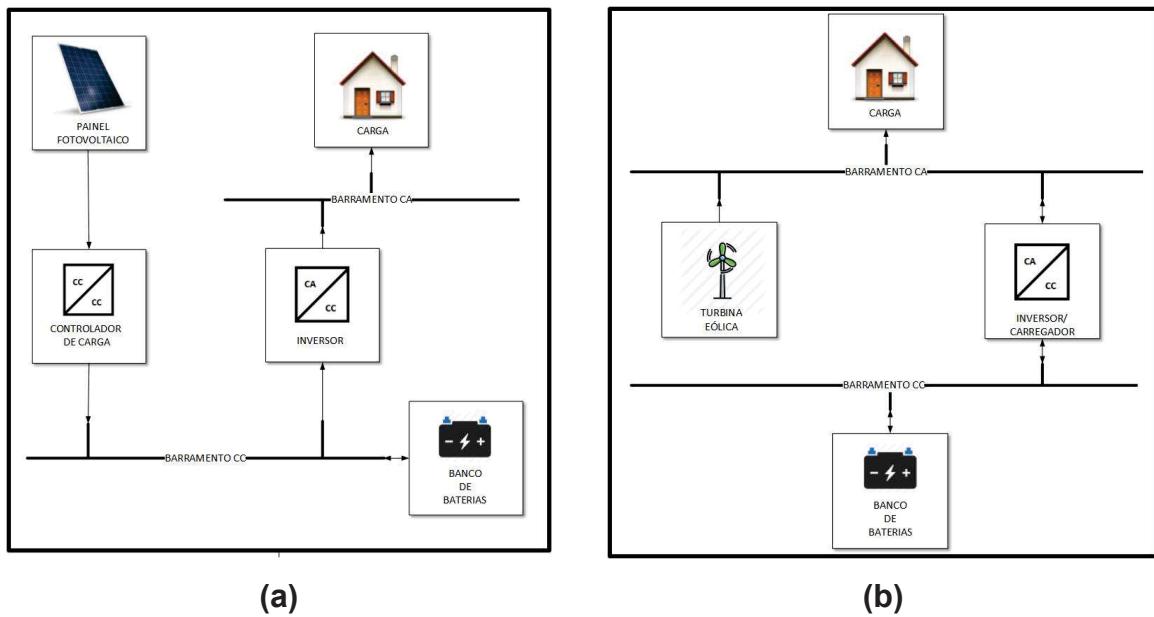
Para cada fonte de energia (primeira coluna da Tabela 12) existe a possibilidade de avaliar determinadas disponibilidades mensais (primeira linha da Tabela 12) dos projetos de referência. Por exemplo, a fonte SOL+BAT tem projetos de referência de 13 kWh/mês até 5.000 kWh/mês (11 possibilidades), enquanto que a fonte SOL+EOL+BAT tem apenas os projetos de 160, 300 e 600 kWh/mês. Estas disponibilidades mensais estão relacionadas com os consumos das propriedades calculadas no subcapítulo 5.2, de forma a atender a carga. Portanto, para uma propriedade com 80 kWh/mês as possíveis fontes dos projetos de referência para atender este consumo são SOL+BAT, EOL+BAT e GMG. No caso de uma propriedade ter um consumo diferente dos valores de disponibilidade mensal, por exemplo 700 kWh/mês os possíveis projetos de referência para atender esta

propriedade são de 1.000 kWh/mês, com as fontes de energia SOL+BAT, GMG e SOL+GMGom+BAT.

As disponibilidades mensais garantidas utilizadas como referência do dimensionamento são tanto dos equipamentos de geração como do sistema de armazenamento (expresso em kWh/mês). As Figura 17, Fonte: Salas et al. (2017)

Figura 18 e Figura 19 apresentam as topologias das alternativas de projetos de referência.

Figura 17 – Topologias dos projetos de referência (a) solar + baterias e (b) eólico + baterias para sistemas SIGFI até 80 kWh/mês



Fonte: Salas et al. (2017)

Figura 18 – Topologia do projeto de referência MIGDI solar + eólico + baterias

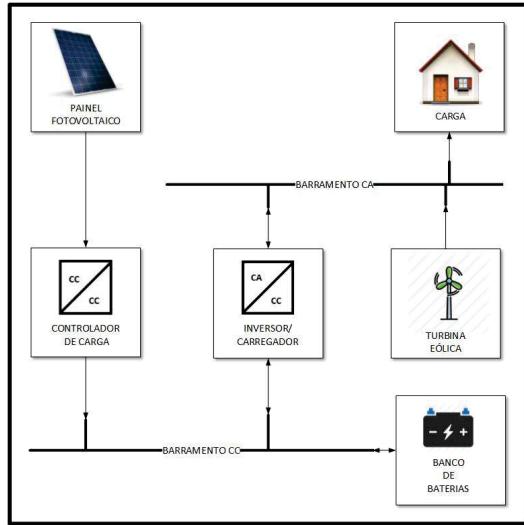
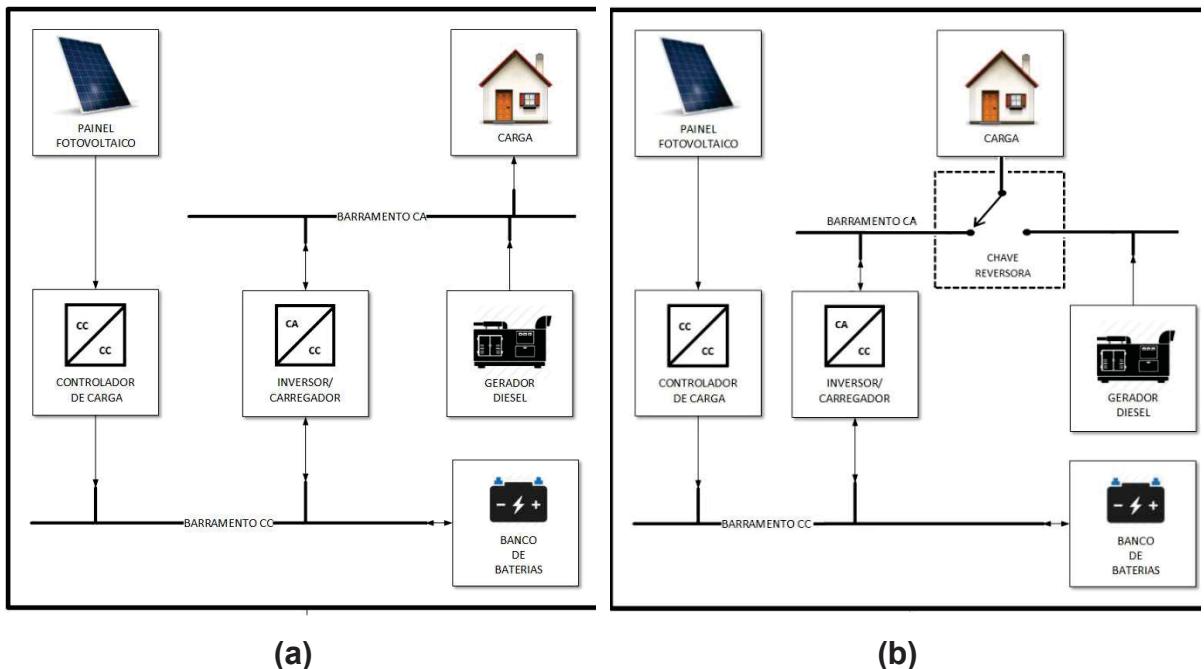


Figura 19 - Topologia dos projetos de referência MIGDI (a) solar + baterias + diesel otimizado e (b) solar + baterias + diesel do proprietário.



Uma questão relevante destes projetos de referência é a modularidade destes sistemas. A atualização do sistema SIGFI 13 para o SIGFI 20 a pedido do consumidor (Art. 30º da RN 493/2012), por exemplo, se daria pelo acréscimo de painéis solares e baterias apenas, o que facilita a instalação e padroniza os equipamentos para atividades de manutenção e reposição. Na elaboração do projeto, opções de disponibilidade mensal garantida podem ser adicionadas para sistemas individuais

maiores que 80 kWh/mês, escolhidas conforme a ocorrência na PPH, atendendo ao Art. 6º da REN 493/2012.

Os sistemas SIGFI e MIGDI são projetados a partir das faixas de consumo (REN 493/2012 ou pelas PPH). Estes sistemas, sejam eles baseados em fontes renováveis de energia ou diesel, podem ser divididos em três componentes básicos:

- Sistema de armazenamento;
- Sistema de geração de energia;
- Conversores.

Desta forma, a especificação de um sistema isolado deve passar pela definição de cada um dos três sistemas, definindo-se sua potência, capacidade e tecnologia. Nesta seção serão apresentados os princípios utilizados no dimensionamento e especificação destas três modalidades. Os equipamentos modelados para os sistemas isolados dimensionados da Tabela 12 podem ser verificados no ANEXO B.

5.5.1 Sistema de armazenamento de energia

A REN 493/2012 prevê autonomia de 48 horas para todos os sistemas isolados, seja pelos consumidores caracterizados por seus respectivos consumos de referência listados no Art 5º, seja para consumidores cuja disponibilidade mensal garantida seja maior a 80 kWh/mês, conforme o Art. 6º. O Art. 1º apresenta as definições de autonomia e sistema de acumulação de energia, expressões utilizadas na norma. Das definições apresentadas na Resolução, tem-se como premissa básica de projeto de sistemas de armazenamento, o dimensionamento a partir do consumo diário de referência, levando em consideração a ausência da fonte primária de energia.

Os sistemas de baterias têm como principal vantagem sua modularidade e facilidade de instalação. Um banco de baterias é a principal alternativa de armazenamento para sistemas baseados em fontes renováveis de energia. Contudo, sua principal desvantagem é o alto custo de aquisição e vida útil reduzida, dependendo da tecnologia e da forma de utilização do acumulador (sua vida útil varia com a corrente de descarga da bateria e a profundidade de descarga na qual o equipamento é submetido).

De acordo com Salas *et al.* (2017) a definição da energia total do banco de baterias (E_{BAT}) necessária para uma autonomia de 48 horas, baseada no consumo diário de referência foi calculada conforme a equação 3:

$$E_{BAT} = \frac{2 \cdot CDR}{DoD \cdot \eta_{inv} \cdot \eta_{cc}} \quad (3)$$

onde:

- CDR Consumo diário de referência, expresso em kWh/dia
- DoD Profundidade de descarga, do inglês *Depth of Discharge*. Percentagem da capacidade total de energia da bateria utilizada em operações de descarga. É conceitualmente o inverso do estado de carga (*State of Charge – SoC*);
- η_{inv} Eficiência de conversão de energia do inversor de frequência, expresso em percentual;
- η_{cc} Eficiência de conversão de energia dos controladores de carga. Já contempla a eficiência de conversão de energia da própria bateria, expresso em percentual.

Salas *et al.* (2017) defini o cálculo de número de baterias em série e paralelo em função do número de baterias (n_{BAT}) necessárias para se obter a energia calculada verificado respectivamente na equação 4 e 5:

$$n_{BAT} = \frac{E_{BAT} \cdot 1000}{C_{nom} \cdot V_{nom}} = n_{par} \cdot n_{serie} \quad (4)$$

$$E_{BAT} = \frac{C_{nom} \cdot n_{par} \cdot V_{nom} \cdot n_{serie}}{1000} \quad (5)$$

onde:

- C_{nom} Capacidade nominal de uma bateria constituinte do banco (quando consideradas todas iguais). Expressa em Ampères-hora. Como padrão, é utilizada para este e os demais cálculos a capacidade de descarga em 20 horas (C_{20});
- V_{nom} Tensão nominal de uma bateria constituinte do banco (V);
- n_{par} Número de baterias em paralelo;
- n_{serie} Número de baterias em série;
- n_{BAT} Número total de baterias do banco.

Visando uma melhor utilização das baterias do ponto de vista técnico e econômico, é possível calcular a profundidade de descarga ideal para minimizar o

LCOE. Em Fonseca *et al.* (2015) apresentam a fórmula do LCOE utilizando a função de expectativa de vida (*life expectancy*) relacionado com uma profundidade de descarga. Foi utilizada os dados da bateria chumbo ácida Moura Clean 12MF220 nesta fórmula e gerada uma curva de LCOE por profundidade de descarga. Esta curva apresenta um ponto mínimo de LCOE com 26% de profundidade de descarga. Fonseca *et al.* (2015) explica que no sistema real a profundidade de descarga foi de 20% devido às restrições da configuração do equipamento (controlador de carga).

Para os projetos de referência SIGFI e MIGDI que possuem grupo motor-gerador (GMG), considera-se que na ausência da fonte primária (geração fotovoltaica), o sistema de acumulação que fornecerá a autonomia especificada de 48h é composta por GMG mais baterias, tomando como pressuposto que há combustível armazenado o suficiente para o atendimento adequado desta especificação.

Neste caso, a demanda exigida das baterias será a demanda diária da carga subtraída da contribuição do gerador., conforme a equação 6 abaixo:

$$E_{BAT} = \frac{2 \cdot (CDR - G_{GMG})}{DoD \cdot \eta_{inv} \cdot \eta_{cc}} \quad (6)$$

G_{GMG} é a energia em kWh gerada pelo GMG em 24h, calculada pela equação 7:

$$G_{GMG} = P_{GMG} \cdot fp_{GMG} \cdot 24 \quad (7)$$

onde:

P_{GMG} potência instalada do gerador em kVA;

fp_{GMG} fator de potência do gerador (valor utilizado 0,8).

5.5.2 Sistema de geração de energia

O dimensionamento dos sistemas de geração de energia (número de painéis solares, número de turbinas eólicas, potência do gerador diesel, etc) foi conduzido pela otimização do custo dos sistemas e atendimento da demanda. A simulação horária e otimização dos sistemas foi feita utilizando-se o software HOMER®. Conforme Salas *et al.* (2017) a função objetivo é minimizar o valor presente sujeito as restrições de DIC anual e mensal conforme a REN 493/2012 (inequação 9 e 10).

$$\text{Min}\{NPV\} \quad (8)$$

sujeito a

$$\frac{C_{anual} - G_{anual}}{C_{anual}} \leq 7,4\% \quad (9)$$

$$\frac{CMR - G_{mensal}}{CMR} \leq 30\% \quad (10)$$

onde:

NPV Valor presente

C_{anual} Consumo anual, sendo $12 \times CMR$;

CMR Consumo mensal de referência. Igual à disponibilidade mensal garantida definida conforme a REN 493/2012 para sistemas até 80 kWh/mês/UC. Considerada igual para todos os meses do ano

G_{anual} Geração de energia anual provinda da(s) fonte(s) de energia do sistema isolado;

G_{mensal} Geração de energia mensal provinda da(s) fonte(s) de energia do sistema isolado;

Neste trabalho, o dimensionamento dos sistemas de geração é então norteado pelo projeto de menor custo, desde que atendendo às restrições dadas pelas inequações 9 e 10, as quais definem que a diferença entre a geração e o consumo anual não pode ser maior que 7,4%, de forma a se emular o limite de duração de interrupção individual (DIC) para o consumo projetado num horizonte de 5 anos. O mesmo é estabelecido para a diferença entre geração e consumo de cada um dos meses, utilizando-se os valores referenciais do Art. 24º da REN 493/2012.

A definição de G_{mensal} e G_{anual} para as fontes renováveis solar e eólica foram calculadas a partir dos modelos de placas fotovoltaicas e microturbinas eólicas inseridas nos softwares HOMER® e PVsyst®.

5.5.3 Conversores

A especificação dos conversores consiste na especificação de controladores de carga para módulos fotovoltaicos, inversores, geradores eólicos e sistemas híbridos. Segundo Soares *et al.* (2010) a corrente dos controladores de carga é calculada conforme a equação 11 :

$$I_{cc} \geq \frac{1,25 \cdot n_{par}^{PV} \cdot I_{sc}^{PV}}{n_{cc}} \quad (11)$$

onde:

n_{par}^{PV}	Número de painéis fotovoltaicos (ou <i>strings</i> série) conectadas por controlador de carga;
I_{sc}^{PV}	Corrente de curto-círcuito do painel fotovoltaico;
n_{cc}	Número de controladores de carga do sistema;
1,25	Fator de segurança admitindo que a radiação solar pode atingir um valor instantâneo de 1,25 kW/m ² .

A potência dos inversores foi definida da seguinte forma:

- Se o projeto de referência for SIGFI de 13 a 80 kWh, $P_{inv} \geq$ Potência mínima Art. 5º REN 493/2012:
 - 13 kWh/mês: $P_{inv} \geq 0,25$ kW
 - 20 kWh/mês: $P_{inv} \geq 0,25$ kW
 - 30 kWh/mês: $P_{inv} \geq 0,5$ kW
 - 45 kWh/mês: $P_{inv} \geq 0,7$ kW
 - 60 kWh/mês: $P_{inv} \geq 1$ kW
 - 80 kWh/mês: $P_{inv} \geq 1,25$ kW
- Se o projeto de referência for SIGFI acima de 80 kWh, é utilizada a potência de pico caracterizada na PPH:
 - 160 kWh/mês: $P_{inv} \geq 2,5$ kW
 - 300 kWh/mês: $P_{inv} \geq 7,5$ kW
 - 600 kWh/mês: $P_{inv} \geq 10$ Kw
 - 1000 kWh/mês: 15,75 kW
 - 5000 kWh/mês: 78,25 kW
- Se o projeto de referência for MIGDI, a potência de pico é caracterizada pela composição do somatório das potências de cada propriedade pertencente a esta microrrede.

5.6 METODOLOGIA DE CÁLCULO DE CAPEX E OPEX

O planejamento de sistema energético incide principalmente no âmbito orçamentário, onde a restrição com gastos é um fator limitador das soluções técnicas e com o custo da mão de obra de profissionais envolvidos na implementação,

operação e manutenção. Em áreas rurais estes custos são os principais limitadores para a eletrificação por rede convencional, além de ser também um desafio destes custos nas tecnologias de sistemas isolados. Nesta seção serão apresentadas as metodologias propostas para cálculo dos custos de despesas de capital (do inglês *Capital Expenditure – CAPEX*) e as despesas operacionais (do inglês *Operational Expenditure – OPEX*).

5.6.1 CAPEX

O capital inicial em um empreendimento/projeto envolve o estudo sobre as aquisições de ativos e pagamento de serviços para a sua construção, além do investimento em bens de capital que trarão retorno financeiro ao investidor. A sigla CAPEX remete ao investimento em bens de produção, e determina o montante de recursos investidos na aquisição ou melhoria de bens (máquinas equipamentos, instalações, terrenos e demais itens de investimento fixo) (LAURÍA, 2013).

A vantagem de se priorizar o CAPEX no planejamento financeiro de um projeto é a aplicação do montante prioritário dos recursos nas operações e equipamentos da empresa, cuja desvalorização se dará pela depreciação do mesmo pela sua previsão de vida útil. Neste caso há o inconveniente dos encargos financeiros e do custo de oportunidade do capital investido. Por outro lado, a vantagem de priorização do OPEX é a economia do capital, aumentando-se por outro lado as despesas administrativas e operacionais.

O exemplo simples desta situação para sistemas isolados é a comparação de um sistema fotovoltaico com baterias e um sistema diesel para atendimento a um mesmo consumo de energia de um determinado consumidor. Ao mesmo tempo em que o capital investido em sistemas solares é maior que o da compra de um gerador diesel equivalente, o custo operacional do diesel sempre existirá, e ao longo do tempo este pode se tornar uma despesa operacional com um valor presente maior que o próprio investimento do sistema solar.

O investimento em bens de capital nos projetos de referência considera as seguintes atividades: construção e implantação do sistema, reposição de peças ao fim da vida útil e atualização dos equipamentos. Na composição dos custos de construção e implantação, são grupos de custos:

- Projeto de engenharia e projeto executivo;

- Obras civis;
- Equipamentos elétricos principais (inversores de frequência, controladores de carga, painéis solares, microturbinas eólicas, geradores diesel, baterias);
- Demais materiais elétricos (caixas de distribuição, fiação, aterramento, disjuntores, fusíveis, botoeiras, etc);
- Demais materiais (perfis metálicos para suporte, torre e estais do aerogerador, etc);
- Serviços especializados de montagem mecânica, elétrica e comissionamento;
- Impostos e taxas sobre produtos e serviços.

Os valores apresentados para o CAPEX de cada projeto de referência devem estar referenciados com uma cidade base. O custo associado à logística da instalação depende do projeto de referência adotado para cada unidade consumidora, com sua respectiva distância da cidade-base e tipo de transporte (modal). Os custos de CAPEX dos projetos de referência pode verificados no ANEXO C.

5.6.2 OPEX

As despesas operacionais, ou OPEX designam o montante de recursos (despesas) necessários ao funcionamento do projeto. Desta forma, o OPEX é o gasto cotidiano realizado constantemente para se manter tanto o funcionamento normal quanto os custos que envolvem manutenções corretivas, além de custos envolvendo empregados, combustível, serviços de terceiros e administração, quando aplicáveis.

No âmbito dos projetos de referência planejados para sistemas isolados, os custos operacionais (OPEX) serão aqueles que envolvem operação e manutenção (O&M), e neste caso particular, os que envolvem as ações de manutenção preventiva e suas respectivas periodicidades e o custo do litro do diesel, quando aplicável. O fator mais agravante para a estimativa destes custos é a logística de acesso a estes projetos de referência, cujo custo deve ser calculado com uma boa precisão, pois em alguns casos os custos logísticos poderão superar o valor de homem-hora e materiais necessários à própria ação de manutenção, e, portanto, será um fator decisivo para a escolha de implementação de uma família de projetos ou outra. A composição dos custos de O&M é realizado comando as seguintes parcelas:

- Custo das manutenções preventivas, observadas conforme diretrizes especializadas para sistemas solares, eólicos, baterias e geradores diesel,

dependendo de qual(is) será(ão) aplicável(is) para cada família de projeto de referência, de ações de manutenção, periodicidade e exigência de tempo e custo de mão-de-obra especializada;

- Custo das manutenções corretivas, estimadas a partir de um modelo simples de distribuição de probabilidade, se aplicável;
- Fator logístico multiplicador, dependente da localidade do projeto de referência em relação à cidade base, e dos custos dos modais necessários para se chegar à localidade.

O cálculo das parcelas de operação e manutenção deve ser realizado dentro de um horizonte de tempo, de forma que seja possível calcular seu custo total de ciclo de vida (custos trazidos ao ano base), e, consequentemente, poder se comparar custos de O&M entre diferentes sistemas (NREL, 1995). Desta forma, o valor presente líquido (inglês, *Net Present Value – NPV*), é a forma de se examinar os custos em forma conjunta (PALM; QAYUM, 1985). Por meio de diferentes fluxos de custos de operação ao longo dos anos, estes custos são corrigidos por uma taxa de desconto (*discount rate*) e uma taxa de inflação estimada. O cálculo do valor presente é dependente então das seguintes variáveis: período de análise (N), período de financiamento (Y) e período de vida útil do investimento (L).

O período de análise é o período em que serão calculados os fluxos de caixa, por exemplo, em 20 anos, sendo que o período mínimo é de 1 ano, teremos o cálculo de 20 custos para cada ano, cada um deles corrigido por sua respectiva inflação no período. O segundo período, de financiamento, é aquele no qual o financiamento é estruturado, ou seja, o período de amortização do saldo devedor do financiamento adquirido. Em relação ao período de vida útil do investimento é o tempo em que o investidor usufruirá de fato dos lucros do projeto, podendo vender o empreendimento no fim do período de vida útil pelo valor da infraestrutura depreciada. Para calcular o fluxo de caixa e valor presente líquido dos custos de operação e manutenção foi utilizado: L=N e Y=0.

Em um fluxo de caixa descontado é importante a escolha de um valor realista para a taxa de desconto nominal (do inglês, *nominal discount rate - d_n*). Este valor é a taxa de juros que o valor investido iria valer sobre um juro de investimento, ou seja, é o ganho de interesse sobre o capital. Desta forma, o fluxo de caixa deve levar em consideração também este valor para corrigir os custos de O&M para o valor presente. Da mesma forma, ao longo do tempo e principalmente no Brasil, a taxa de inflação (e)

afeta os custos produtivos tanto dos serviços, quanto dos produtos. Esta taxa é um resultado da desvalorização da moeda corrente frente ao real valor dos produtos e serviços, de acordo com seus custos de produção ou custos em moeda estrangeira. A taxa de desconto real (d_r) é então a composição da taxa nominal de desconto e da taxa de inflação, conforme a equação 12 a seguir:

$$d_r = \left[\frac{1 + d_n}{1 + e} \right] - 1 \quad (12)$$

Em ANEEL (2015) é utilizado a metodologia do Custo Médio Ponderado de Capital (*Weighted Average Cost of Capital* –WACC) para o cálculo da taxa de desconto real, o qual resultou em 12,26%. Toda a análise financeira foi realizada com moeda constante.

O valor anualizado (*Net Present Value* - NPV) é a transformação de uma sequência de fluxos de caixa (F_t) em um único valor trazido ao ano presente, conforme a equação 13:

$$NPV = \sum_{t=1}^N \frac{F_t}{(1 + d_r)^t} \quad (13)$$

A NREL publicou num trabalho conjunto com a SunSpec Alliance, o qual foi elaborado um modelo de custos de O&M para plantas fotovoltaicas, observando as melhores práticas de manutenção observadas em três tipos de plantas: “Ground Mounted”, “Commercial Rooftop” e “Residential Rooftop”, sendo que o primeiro é aplicável a usinas fotovoltaicas de grande porte, que exigem performance e por isso a manutenção deve ser feita de forma mais sistemática e planejada (NREL, 2015).

Nestes três modelos, já existe uma forma de cálculo do valor presente dos custos de operação e manutenção, bem como uma lista padrão de ações de manutenção para cada um dos tipos de instalação. Este modelo é público e aplicável inicialmente apenas a sistemas “grid-tie” solares, porém, as equações utilizadas são válidas para qualquer equipamento, desde que as ações de manutenção estejam tabuladas com seus respectivos valores de homem-hora, materiais e periodicidade. Além disso, este modelo também possui uma forma de declarar manutenções corretivas por uma probabilidade utilizando a distribuição de Weibull (Weibull, 1955), a probabilidade de falhas aumenta conforme o tempo passa. Neste modelo, os custos de manutenção corretiva são multiplicados pela probabilidade de falha, de acordo com os parâmetros dados para cada linha da tabela de manutenção.

O modelo de cálculo dos custos de O&M para os projetos de referência é uma modificação deste modelo do NREL, adicionando-se os equipamentos aplicáveis para os sistemas isolados do Pantanal (microturbinas, controladores de carga, baterias e geradores diesel), bem como seus custos.

O valor anualizado dos custos de O&M ($ANN_{O\&M}$) é calculado, de acordo com equação 14, neste modelo utilizando-se a taxa real de desconto, baseada numa taxa nominal e numa taxa de inflação que incide anualmente sobre os custos de homem-hora e materiais:

$$ANN_{O\&M} = \frac{NPV_{O\&M}}{\frac{(1+e)}{(d_n - e)} \cdot \left\{ 1 - \left[\frac{(1+e)}{(1+d_n)} \right]^N \right\}} \quad (14)$$

O valor presente ($NPV_{O\&M}$) é calculado, segundo equação 15, a partir da soma dos custos de manutenção de cada um dos meses, baseado na periodicidade declarada na tabela de manutenção e em seus respectivos custos:

$$NPV_{O\&M} = \sum_{m=1}^{MT} \frac{\sum_{t=1}^N C_m^t}{(1+d_n)^N} \quad (15)$$

Em suma os custos de manutenção é o somatório para cada tipo de manutenção ($1 \leq m \leq MT$), ou linha da tabela de práticas de manutenção. Esta soma é feita para todos os tempos t até o horizonte de estudo N e corrigidos pela taxa de desconto nominal d_n . O custo de manutenção C_m^t é calculado para cada ano, como a soma de cada manutenção coincidente para aquele ano, de acordo com seu intervalo declarado (intervalo fixo ou distribuição Weibull).

A partir dos dados disponíveis pelas campanhas de pesquisa a equação (15) é atualizada com um fator modal (k), que representa a soma dos custos dos modais utilizados para se deslocar da localidade de referência para a localidade desejada, e na distância percorrida (x), tomando como ponto inicial de deslocamento a cidade base. Assim, a equação 16 do valor presente líquido adaptada para somar os custos logísticos de ação de manutenção pode ser descrita como:

$$NPV_{O\&M} = \sum_{m=1}^{MT} \frac{\sum_{t=1}^N [C_m^t + \alpha k x (1+e)^t]}{(1+d_n)^t} \quad (16)$$

Onde:

- k é a somatória da média dos custos dos modais utilizados (avião, lancha, carro alugado, etc) em R\$/km, obtidos a partir das campanhas;

- x é a distância em km entre a localidade de referência para os custos de manutenção e a localidade desejada;
- α é o numero de vezes ao ano necessário para realizar as atividades O&M.

5.7 ANÁLISE ESPACIAL DE DADOS AMBIENTAIS

A melhor forma de identificar e definir indicadores ambientais em um território extenso e heterogêneo, é a partir de dados geoespecializados da região de interesse. Mapeamentos são representações, em superfície plana, das porções heterogêneas de um terreno, identificadas e delimitadas. Um mapa permite observar as localizações, as extensões, os padrões de distribuição e as relações entre os componentes distribuídos no espaço, além de representar generalizações e extrações. O mapa proporciona a síntese, a objetividade, a clareza da informação e a sistematização dos elementos a serem representados (SANTOS, 2004).

Conforme Druck *et al.* (2004), a ênfase da análise espacial é mensurar propriedades e relacionamentos, levando em conta a localização espacial do fenômeno em estudo de forma explícita. Em outras palavras, a ideia central é incorporar o espaço à análise que se deseja fazer.

A análise espacial de dados ambientais, cujo produto é apresentado por documentação cartográfica, fundamenta-se na discretização, segmentação e estratificação da região de interesse em unidades territoriais homogêneas. Isso significa realizar uma análise de todos os temas envolvidos em cada ponto do território, agrupar os pontos que têm características e funções comuns, segmentar os agrupamentos em setores e denominar cada setor segundo suas características ou critérios pré-estabelecidos (SANTOS, 2004).

As ferramentas mais utilizadas para análise ambiental são os sistemas de informação geográfica (SIGs). Os SIGs são programas de computador que permitem a guarda, a manipulação, a análise e a exibição de dados espacialmente referenciados, e são a base da cartografia digital. Por exemplo, os SIGs permitem que se faça rapidamente a sobreposição de mapas temáticos, técnica mais básica e usual para integrar dados espaciais multitemáticos. Com cruzamentos sucessivos e binários, constrói-se mapas intermediários até a obtenção de um mapa síntese.

O software utilizado para manipular os dados ambientais do Pantanal neste trabalho foi o ArcGIS Desktop, versão 10.2, ferramenta amplamente utilizada pela

comunidade cartográfica que utiliza modelos de dados de SIG para representar a geografia. Fornece ainda todas as ferramentas necessárias para criar e trabalhar com os dados geográficos, podendo-se realizar tarefas simples ou avançada de SIG, incluindo mapeamento, administração de dados, análise geográfica, edição de dados e geoprocessamento.

Para a modelagem multicritério para sistemas isolados do Pantanal foram utilizadas duas entradas relativas às questões socioambientais. A primeira trata-se dos Índices Socioambientais e a segunda refere-se às Restrições ambientais (RSA) existentes na região do Pantanal Sul-Matogrossense segundo as alternativas de suprimento.

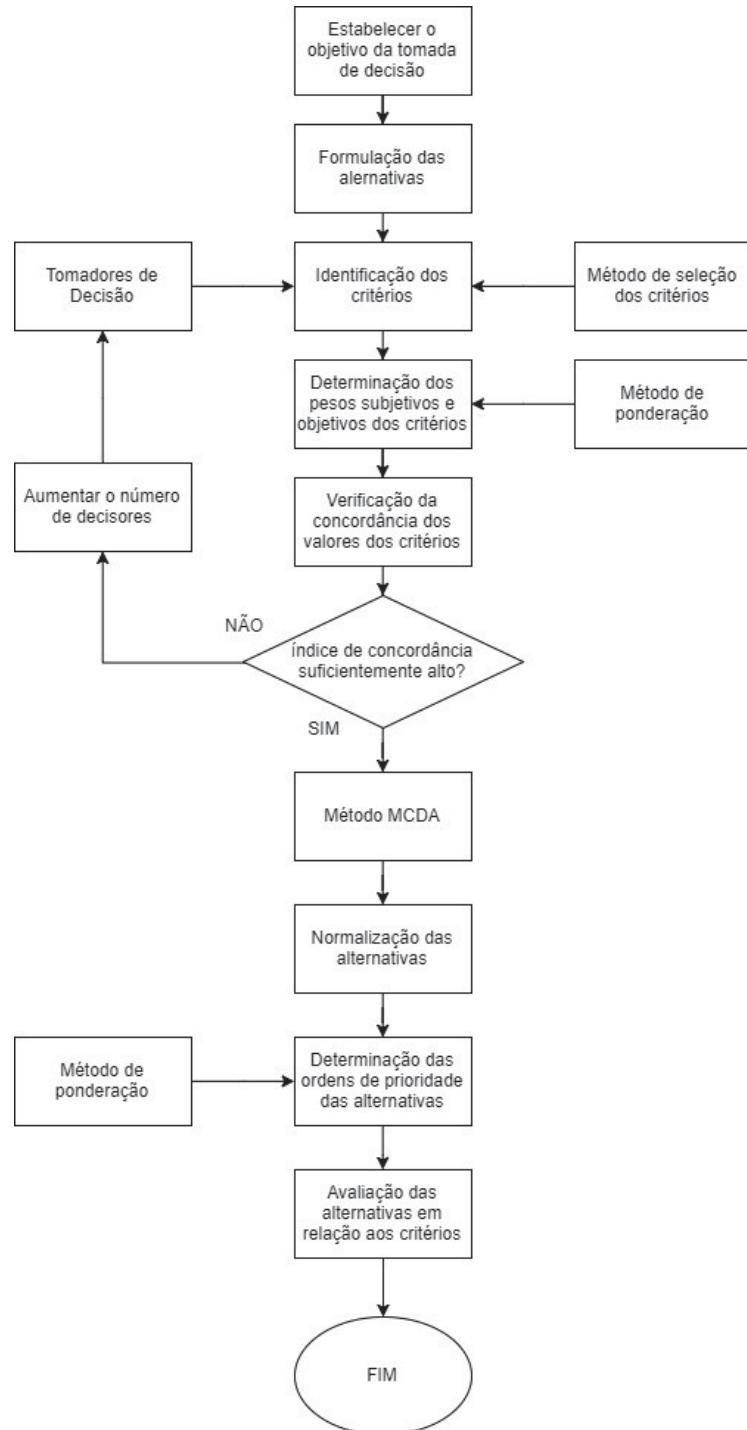
6 METODOLOGIA MULTICRITÉRIO

A complexidade verificada nas últimas décadas decorrente do aumento do número de informações e da necessidade de utilizá-las no processo decisório fez com que surgissem novos métodos para localização de instalações, na tentativa de alcançar maior assertividade nas tomadas de decisão. Os métodos multicritérios surgiram como apoio às ferramentas matemáticas, eficazes para resolução de problemas conflitantes (BRANS; MARESCAL, 2005).

A relação entre as dimensões técnicas, econômicas, sociais e ambientais motivam a utilização de metodologias de tomada de decisões multicritério que favorecem resultados mais robustos e coerentes pelo fato de serem baseados na variabilidade espacial e temporal.

Muitos problemas de tomada de decisão espacial exigem que o tomador de decisão considere os impactos das alternativas escolhidas em relação às múltiplas dimensões, a fim de escolher a melhor alternativa. O processo de decisão que envolve incertezas, prioridades e trade-off utiliza métodos multicritério (TAYLOR;JANKOWSKI, 1995). A Figura 20 exibe o processo para implementar um modelo MCDA de energias sustentáveis, o qual foi utilizado como base para desenvolver o método multicritério espacial.

Figura 20 - Processo MCDA de sistemas de energia sustentáveis



Fonte: Adaptado de (WANG et al., 2009)

Através da Figura 20 é possível verificar que o método MCDA possui processos que necessitam de um método como: a seleção dos critérios, um método multicritério, normalização dos dados dos critérios e a ponderação dos critérios. Desta forma este capítulo apresenta em três seções os seguintes temas:

- Método de seleção dos critérios avaliados no multicritério: apresenta quais critérios foram escolhidos para serem avaliados;
- Método *Analytic Hierarchy Process* (AHP): explica como funciona o método AHP, a escala fundamental de Saaty, matriz de comparação paritária, método de estimativa de prioridade entre alternativas, normalização dos dados de entrada e verificação da consistência;
- Metodologia multicritério espacial para sistema isolado: apresenta a parametrização dos critérios Tecnológico e Regulatório e como foi modelado o algoritmo que utiliza o método AHP com os materiais descritos neste trabalho através de um exemplo.

6.1 MÉTODO DE SELEÇÃO DOS CRITÉRIOS

O método Delphi foi utilizado para escolher e julgar (quantificar) os critérios necessários a serem avaliados na análise multicritério. Este método é sistemático e conta com a participação de especialistas de diferentes áreas. Os especialistas respondem a questionários e/ou perguntas, em duas ou mais rodadas, para a seleção dos critérios. Depois de cada rodada o resultado é apresentado para os especialistas analisarem e reverem suas respostas anteriores e as respostas dos outros especialistas (HSU; SANDFORD, 2007) (OKOLI; PAWLOWSKI, 2004). Este processo foi interrompido com um critério de parada que foi a realização do consenso e estabilidade dos resultados (duas rodadas foram realizadas). Este método é utilizado pois acredita-se que o grupo de especialistas convergirá para os critérios imprescindíveis (WANG *et al.*, 2009). O nome e a formação dos especialistas que realizaram a escolha e o julgamento dos critérios pode ser visto na Tabela 13.

Tabela 13 - Especialistas que participaram do Método Delphi

Profissão	Nome	Empresa
Eng. Eletricista e Mecânico	Crescencio Silvio Segura Salas	Institutos Lactec
Eng. Eletricista	Kristie Kaminski Kuster	Institutos Lactec
Eng. Ambiental	Ellen Christine Prestes Ferronato	Institutos Lactec
Eng. Ambiental	Gleiciane Fernanda de Carvalho Blanc	Institutos Lactec
Eng. Eletricista	Fernando Zaquine Martins	Calden
Eng. Eletricista	Ernesto Esteban Coutsiers	Calden

Através do método Delphi foi escolhido dois critérios ambientais (índice socioambientais e restrição ambientais), um critério econômico utilizando o parâmetro custo nivelado de energia (LCOE), um critério Tecnológico com quatro subcritérios (Amadurecimento tecnológico, Disponibilidade de suporte pós-venda, Mão de obra qualificada e Experiências anteriores) e um critério Regulatório com três subcritérios (Potencialidade de subsídio, Experiências regulatórias no Brasil, Necessidade de faturamento).

6.1.1 Critério Tecnológico

O critério tecnológico foi desdobrado em quatro subcritérios e avaliados por um grupo de profissionais do LACTEC, sendo que para cada subcritério foram avaliados por três quesitos. Os quatro subcritérios avaliados são compostos pelo Amadurecimento Tecnológico (T1), Disponibilidade do suporte pós-venda (T2), Mão de obra qualificada (T3) e Experiências anteriores (T4). Os subcritérios foram avaliados pela matriz de comparação para calcular os pesos de cada subcritério. A matriz de julgamentos pode ser verificada na

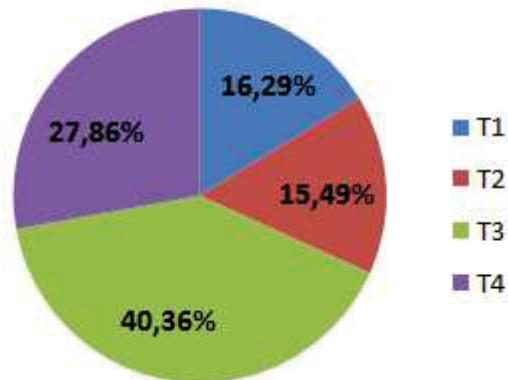
Tabela 14 e os valores dos pesos de cada subcritério Tecnológico pode ser visto na Figura 21.

Tabela 14 - Matriz de julgamento dos quatro subcritérios Tecnológico

	T1	T2	T3	T4
T1	1	1	1/5	1
T2	1	1	1/2	1/2
T3	5	2	1	1
T4	1	2	1	1

Figura 21 - Distribuição dos pesos dos subcritérios Tecnológico

Pesos dos subcritérios Tecnológico



A Tabela 15 apresenta a avaliação do subcritério Amadurecimento Tecnológico para a alternativa solar fotovoltaica com armazenamento.

Tabela 15 – Avaliação do Subcritério Amadurecimento Tecnológico para a alternativa solar fotovoltaica

Amadurecimento Tecnológico						
Indicadores					Peso	Nota segundo a escala de Saaty (Indicador x Peso)
Operação Comercial	Concorrência no mercado (nacional e internacional)		Possibilidade de obsolescência do produto			
Mais de 30 anos	-	Alta	-	Baixa	-	3 0
Entre 15 e 30 anos	X	Média	-	Média	X	2 4
Menos que 15 anos	-	Baixa	X	Grande	-	1 1
Nota da escala de Saaty para o subcritério:						5

Na Tabela 15 é possível verificar que cada linha para os três indicadores tem um peso (3, 2 ou 1). Cada indicador aceita apenas uma opção (adicionando X) na sua

coluna. A nota é calculada por linha, multiplicando o peso da linha pela quantidade de X da própria linha. Com as três linhas calculadas soma-se as notas segundo a escala de Saaty (última coluna da Tabela 15). Caso a alternativa avaliada (no caso, a fotovoltaica) possua toda a primeira linha dos indicadores selecionada, o peso final do critério será 9. Desta forma, a nota da escala de Saaty neste método varia em função da avaliação do tomador de decisão, sendo que a nota mínima é 3 e a máxima é 9.

As Tabela 16, Tabela 17 e Tabela 18 apresentam respectivamente a avaliação dos subcritérios Disponibilidade do suporte pós venda, Mão de obra qualificada e Experiências anteriores.

Tabela 16 – Avaliação do Subcritério Disponibilidade do Suporte Pós-venda para a alternativa solar fotovoltaica

Tabela 17 – Avaliação do Subcritério Mão de obra Qualificada para a alternativa solar fotovoltaica

Tabela 18 – Avaliação do Subcritério Experiências anteriores para a alternativa solar fotovoltaica

Experiências Anteriores							
Indicadores						Peso	Nota segundo a escala de Saaty (Indicador x Peso)
Ótimo	-	Alta	-	Alta	-	3	0
Bom	X	Média	X	Média	X	2	6
lcompleto	-	Baixa	-	Baixa	-	1	0
Nota da escala de Saaty para o subcritério:							6

A avaliação dos quatro subcritérios Tecnológicos para as tecnologias, eólica com armazenamento, gerador a diesel, e sistemas híbridos se encontram no APÊNDICE - A.

6.1.2 Critério Regulatório

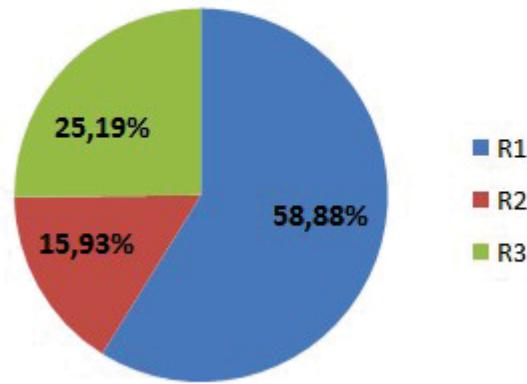
O critério regulatório foi dividido em três subcritérios e avaliados por um grupo de profissionais da Calden Inovação e Conhecimento, sendo que cada subcritério foi avaliado por três opções. Os três subcritérios avaliados são compostos pela Potencialidade de subsídio dos projetos de referência (R1), experiência regulatória no Brasil (eletrificação rural em projetos similares) (R2) e necessidade de medição para faturamento (R3). A Tabela 19 apresenta a avaliação da matriz de comparação paritária dos três subcritérios Regulatório e a Figura 22 apresenta os pesos de cada subcritério Regulatório.

Tabela 19 - Matriz de julgamento dos subcritérios Regulatório

	R1	R2	R3
R1	1	3	3
R2	1/3	1	1/2
R3	1/3	2	1

Figura 22 - Distribuição dos pesos dos subcritérios Regulatório

Pesos dos subcritérios Regulatório



A Tabela 20 apresenta a avaliação do subcritério Potencialidade de subsídio para todos os projetos de referência avaliados neste modelo (definidos no capítulo de Materiais).

Tabela 20 - Avaliação do subcritério Potencialidade de subsídio

Potencialidade de subsidio													
Fonte de energia ↓	Disp. Mensal (kWh/mês) →	13	20	30	45	60	80	160	300	600	1000	5000	10000
	ALTA	ALTA	ALTA	ALTA	ALTA	ALTA	MEDIA	MEDIA	BAIXA	BAIXA	BAIXA	BAIXA	BAIXA
SOL+BAT	ALTA	ALTA	ALTA	ALTA	ALTA	ALTA	MEDIA	MEDIA	BAIXA	BAIXA	BAIXA	BAIXA	BAIXA
EOL+BAT							MEDIA						BAIXA
SOL+EOL+BAT							MEDIA	MEDIA	BAIXA				BAIXA
GMG	BAIXA	BAIXA	BAIXA	BAIXA	BAIXA	BAIXA	BAIXA	BAIXA	BAIXA	BAIXA	BAIXA	BAIXA	BAIXA
SOL+GMGGotm+BAT							BAIXA						
SOL+GMGpro+BAT							BAIXA						

ALTA Projectos com alta probabilidade de receber subsídios
 MEDIA Projectos com media probabilidade de receber subsídios
 BAIXA Projectos com baixa probabilidade de receber subsídios

Através da avaliação qualitativa dos projetos de referência da Tabela 20 foram transformadas as opções “ALTA”, “MEDIA” e “BAIXA” em números da escala de Saaty. Tomando como premissa a lógica de maximização, quanto melhor a opção maior a nota na escala de Saaty, as opções receberam as seguintes notas: ALTA = 7, MEDIA = 5 e BAIXA = 3.

A Tabela 21 apresenta a avaliação do subcritério Experiência regulatória para todos os projetos de referência avaliados neste modelo (definidos no capítulo de Materiais).

Tabela 21 - Avaliação dos subcritérios Experiência regulatória no Brasil

Experiencia regulatoria no Brasil (Eletrificação Rural em projetos similares)												
Disp. Mensal (kWh/mês) →	13	20	30	45	60	80	160	300	600	1000	5000	10000
Fonte de energia ↓												
SOL+BAT	ALTA	ALTA	ALTA	ALTA	ALTA	ALTA	BAIXA	BAIXA	BAIXA	BAIXA	BAIXA	BAIXA
EOL+BAT							MEDIA					BAIXA
SOL+EOL+BAT								BAIXA	BAIXA	BAIXA		BAIXA
GMG	BAIXA											
SOL+GMG _{otm} +BAT								MEDIA	BAIXA	BAIXA	BAIXA	BAIXA
SOL+GMG _{pro} +BAT								MEDIA	BAIXA	BAIXA	BAIXA	BAIXA

ALTA Quantidade relevante de projetos com aplicação regulatoria no Brasil
MEDIA Pouca quantidade de projetos com aplicação regulatoria no Brasil
BAIXA Sem aplicação regulatoria no Brasil

A Tabela 21 também foi avaliada de forma qualitativamente e por este motivo as opções “ALTA”, “MEDIA” e “BAIXA” foram transformadas em números da escala de Saaty. Tomando como premissa a mesma lógica de maximização da Tabela 20, as opções receberam as seguintes notas: ALTA = 7, MEDIA = 5 e BAIXA = 3.

A Tabela 22 apresenta a avaliação do subcritério Necessidade de medição do consumo de energia para faturamento em relação a todos os projetos de referência avaliados neste modelo.

Tabela 22 - Avaliação do subcritério Necessidade de medição para faturamento

Necessidade de Medição para faturamento												
Disp. Mensal (kWh/mês) →	13	20	30	45	60	80	160	300	600	1000	5000	10000
Fonte de energia ↓												
SOL+BAT	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO							
EOL+BAT							NÃO					NÃO
SOL+EOL+BAT								NÃO	NÃO	NÃO		NÃO
GMG	REC	PREC	PREC	PREC	PREC	PREC						
SOL+GMG _{otm} +BAT								PREC	PREC	PREC	PREC	PREC
SOL+GMG _{pro} +BAT								REC	REC			

NÃO Projetos que não precisam medição de consumo
REC Projetos que se recomenda medição de consumo
PREC Projetos que precisam medição de consumo

Com as avaliações qualitativas dos projetos de referência da Tabela 22 as opções “NÃO”, “REC” e “PREC” foram transformadas em números da escala de Saaty. Tomando como premissa a lógica de maximização na Tabela 22 (quanto menor o

custo melhor a alternativa), as opções receberam as seguintes notas: “NÃO” = 7, “REC” = 5 e “PREC” = 3.

6.1.3 Critério Custo Nivelado de Energia

O custo nivelado da energia (do inglês, *Levelized Cost of Electricity/Energy – LCOE*) é um parâmetro utilizado para comparar alternativas de tecnologias com diferentes escalas de operação e investimento (MAINALI; SILVEIRA, 2013). O LCOE é o custo médio descontado de CAPEX mais OPEX (O&M) por kWh de energia elétrica útil produzida pelo sistema ao longo do período de vida da tecnologia, o qual pode ser expresso pela equação 17:

$$LCOE = \frac{CAPEX_{anualizado} + OPEX_{anualizado}}{Energia\ total\ consumida\ pela\ carga} \quad (17)$$

Os projetos de referência foram simulados no software Homer Energy, que realiza uma análise energética horária durante o período de análise especificado. Foram utilizados dados de custos de equipamentos levantados com fabricantes e lojas especializadas, considerando-se então os valores dos equipamentos principais: inversores, controladores de carga, baterias, painéis solares, microturbinas eólicas e geradores diesel.

Para isso, os projetos de referência foram estudados de forma que o projeto fosse aquele que, da forma mais economicamente viável, pudesse atender aos requisitos de disponibilidade mensal e diária de energia da carga, utilizando equipamentos compatíveis. Os projetos foram simulados no Homer com valores de CAPEX orçados.

O OPEX é calculado para cada projeto de referência e unidade consumidora dentro do algoritmo multicritério, já levando em consideração os custos logísticos do atendimento de O&M até a localidade de cada unidade consumidora, tomando como referência a cidade base, neste caso Corumbá.

6.1.4 Critério Índices Socioambientais

Lohani *et al.* (1997) apresenta como avaliar, com uma perspectiva ambiental, diferentes alternativas, através de: levantamento de fatores ambientais a serem considerados; determinação de indicadores de impacto ambiental para cada fator;

determinação dos pesos para cada fator ambiental; e definição do método de agregação dos fatores para a composição dos índices.

A definição de índices socioambientais é um método usual para comparar diferentes alternativas tecnológicas. O objetivo do índice é representar a multidisciplinaridade do problema, portanto, o processo de síntese das informações é importante para formar indicadores que representem o meio ambiente. A composição de índices socioambientais expressa o nível de impacto ambiental em função dos projetos de referência. O método de análise multicriterio é uma forma de sintetizar os dados multidisciplinares em um índice.

O desenvolvimento de índices socioambientais (ISA) é realizado para transformar uma informação (dados) qualitativa em dados quantitativos. Portanto, os índices não têm um sentido físico, são apenas medidas referentes a importância dos impactos ambientais em relação aos projetos de referência. Com as possíveis seis fontes dos projetos de referência Salas *et al.* (2017) realizaram uma subdivisão entre o potencial de impacto ambiental em relação a cada fonte, conforme apresentado na Tabela 23.

Tabela 23 - Divisão adotada entre os sistemas de suprimento segundo o potencial de impacto ambiental de cada fonte.

Sistema	Baixo Porte	Alto Porte
Solar e bateria	Até 1000 kWh/mês	Acima de 5000 kWh/mês
Eólica e bateria	80 kWh/mês	10000 kWh/mês
Solar + Eólica e bateria	Até 600 kWh/mês	10000 kWh/mês
Solar + GMG e bateria	Até 1000 kWh/mês	Acima de 5000 kWh/mês
GMG e bateria	Até 1000 kWh/mês	Acima de 5000 kWh/mês

FONTE: Salas *et al.* (2017)

Para a definição das classes e atribuição das pontuações foi realizada uma reunião com técnicos e consultores nas áreas de biologia e sócio-economia, para que cada um pudesse dar sua contribuição em sua respectiva área de conhecimento. Com a montagem dessa comissão definiu-se 12 aspectos representativos dos possíveis impactos ambientais causados pelos diferentes sistemas de suprimento. Para a pontuação dos aspectos ambientais foi atribuída a escala de Saaty, com os valores 1, 3, 5, 7 e 9. A Tabela 24 mostra a matriz com as pontuações dos aspectos ambientais em relação as alternativas de suprimento.

Tabela 24 – Matriz de aspectos ambientais e alternativas de suprimento

Aspecto Ambiental	SOLAR		EÓLICA		SOLAR + EÓLICA		SOLAR + GMG		GMG	
	Baixo	Alto	Baixo	Alto	Baixo	Alto	Baixo	Alto	Baixo	Alto
Geração de poluentes atmosféricos	1	1	1	1	1	1	5	5	5	9
Emissão de ruídos	1	1	5	9	5	5	3	5	7	9
Alteração da paisagem	1	5	5	9	5	5	1	3	1	3
Risco de contaminação da água e do solo	3	5	3	5	3	5	5	7	7	9
Intervenções no solo	1	3	5	9	5	5	1	3	1	3
Interferência no uso e ocupação do solo										
Geração de resíduos sólidos	5	9	5	9	5	9	7	7	7	9
Supressão de vegetação nativa	1	3	3	7	3	5	1	3	1	1
Interação com a fauna	1	3	5	9	5	7	1	3	1	1
Risco de interferências e acidentes	1	5	3	7	5	5	5	5	9	9
Alteração no sistema viário	9	7	3	1	3	3	7	7	5	5
Aumento na demanda por bens e serviços	3	3	7	9	7	7	5	3	3	5

Através da Tabela 24 verifica-se que o aspecto “interferência no uso e ocupação do solo” não possui uma pontuação. Isto porque este aspecto foi dividido em seis classes distintas: corpos hídricos, áreas antropizadas, áreas urbanas, áreas de vegetação com influência fluvial, áreas florestais e áreas campestres. Este aspecto é espacial, pois depende do local onde a propriedade se encontra. A Tabela 25 apresenta a pontuação das alternativas de suprimento em relação as seis classes do aspecto interferência no uso e ocupação do solo.

Tabela 25 - Matriz de uso e ocupação do solo em relação as alternativas de suprimento

Usos do solo	SOLAR		EÓLICA		SOLAR + EÓLICA		SOLAR + GMG		GMG	
	Baixo	Alto	Baixo	Alto	Baixo	Alto	Baixo	Alto	Baixo	Alto
Corpos hídricos	3	5	7	9	7	7	9	9	9	9
Áreas de vegetação com influência fluvial	3	7	7	9	7	9	9	9	9	9
Áreas campestres	1	3	7	9	7	7	1	3	1	3
Áreas florestais	3	5	9	9	9	9	7	7	3	7
Áreas agropastoris	1	1	5	7	5	5	1	3	1	3
Áreas urbanas	1	1	5	7	5	5	1	1	1	1

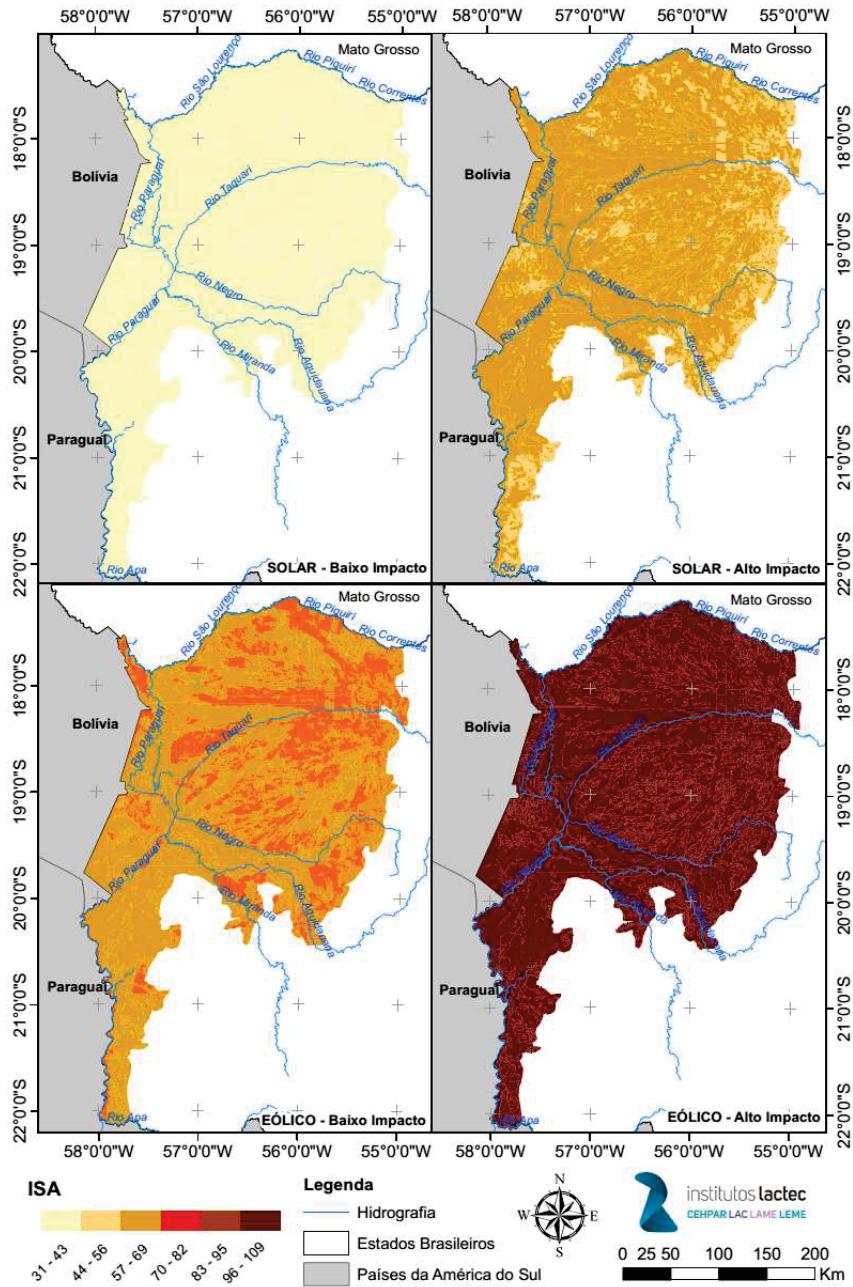
Para o cálculo com ponderação foram considerados os aspectos ambientais interferência no uso e ocupação do solo, supressão de vegetação nativa e interação com a fauna como os mais determinantes no potencial de impacto ambiental causado pelas alternativas. Para o cálculo foi atribuído um peso 2 para esses aspectos, enquanto os outros ficaram com peso 1, ou seja, sem alterar a pontuação dos outros aspectos. Esses pesos foram determinados considerando a contribuição desses aspectos determinantes no resultado do ISA. O resultado ponderado da Tabela 24 pode ser visto na Tabela 26.

Tabela 26 - Ponderação do ISA em relação as fontes

Forma de cálculo do ISA	SOLAR		EÓLICA		SOLAR + EÓLICA		SOLAR + GMG		GMG	
	Baixo	Alto	Baixo	Alto	Baixo	Alto	Baixo	Alto	Baixo	Alto
Soma ponderada	29,0	51,0	53,0	91,0	55,0	69,0	43,0	59,0	49,0	65,0

Com a consolidação dos ISA, este índice foi espacializado de acordo com os sistemas de suprimento estudados. Foi adotada uma escala de cor única com a variação do menor para o maior valor do ISA, conforme classes igualmente divididas. O resultado das fontes solar fotovoltaica e eólica podem ser vistos na Figura 23.

Figura 23 – Espacialização do ISA para os sistemas solar e eólico



6.1.5 Critério Restrições Ambientais

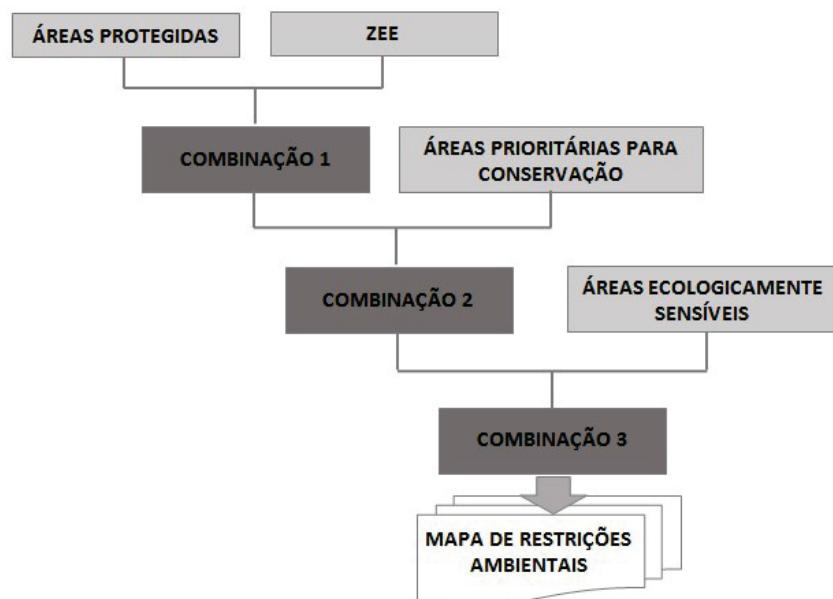
A análise de restrições ambientais é fundamental considerando o cenário ambiental onde se insere a área de estudo. Por ser uma área extensa e com diversos instrumentos de preservação, a análise georreferenciada de diversos temas envolvendo os meios físico, biótico e socioeconômico é capaz de identificar e mensurar a existência e abrangência de possíveis restrições às alternativas de suprimentos estudadas.

A camada de restrições ambientais foi criada a partir da análise espacial e sobreposição de mapas temáticos na área de estudo. Os temas abordados são: Áreas Protegidas, Áreas Prioritárias para Conservação, Zoneamento Ecológico-Econômico do Estado do Mato Grosso do Sul e Áreas Ecologicamente Sensíveis.

O Mapa Temático de Restrições Ambientais foi elaborado por Modelagem Espacial, empregando-se a Metodologia Qualitativa em ferramentas de Geoprocessamento. Na descrição qualitativa, cada uma das circunstâncias ou característica nominal dos fenômenos é classificada segundo um determinado padrão, privilegiando a forma e a cor dos elementos representados, mensurando-se ordinalmente os fenômenos através de unidades de medidas ou percentuais (IBGE, 2017).

Através do ArcGIS foi utilizado um algoritmo matemático visando a combinação das camadas atribuídas com diferentes valores (pesos) de até 5 classes (1/3/5/7/9). A operação matemática aplicada em Salas *et al.* (2017) foi de Lógica Combinatória através do *Combinatorial And* conforme o esquema da Figura 24.

Figura 24 – Esquema gráfico das combinações entre mapas



FONTE: Salas *et al.* (2017)

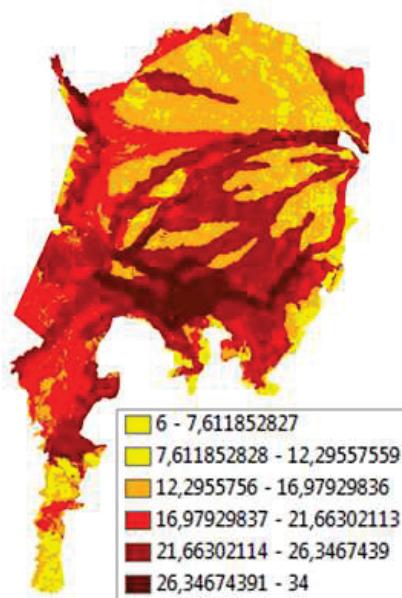
Para a distribuição dos valores da soma dos pesos após todos os cruzamentos de camadas em um novo intervalo de 5 camadas foi aplicado o método de classificação automática por Desvio Padrão (*Standart Deviation*). Os intervalos da

classificação por Desvio Padrão correspondem aos seguintes parâmetros de Restrições Ambientais:

- $6 - 12,29557559 = 1$ = MUITO BAIXA;
- $12,2955756 - 16,9792936 = 3$ = BAIXA;
- $16,9792937 - 21,66302113 = 5$ = MÉDIA;
- $21,66302114 - 26,3467439 = 7$ = ALTA;
- $26,34674391 - 34 = 9$ = MUITO ALTA.

O resultado das restrições ambientais pode ser visto através de um mapa pela Figura 25.

Figura 25 – Método de classificação por desvio padrão no ArcGis 10.2.



Os cadastros coletados em campo, através da PPH, foram materializados e espacializados em relação ao mapa existente e por correlação espacial foi extraído uma nova tabela de informações com as categorias de Restrições ambientais (RSA) correspondentes para cada propriedade.

As classes de restrições ambientais (definidas pelos intervalos) foram então correlacionadas com as alternativas de suprimento considerando as possíveis restrições de cada alternativa, sendo classificado em 1 (um) caso a alternativa fosse recomendada para a classe de restrição, e 0 (zero) caso não seja recomendada para determinada classe de restrição. Essa classificação pode ser vista na Tabela 27.

Tabela 27 – Restrições ambientais por alternativas de suprimento

Restrição Sócioambiental	SOLAR		EÓLICA		SOLAR + EÓLICA		SOLAR + GMG		GMG	
	Baixo	Alto	Baixo	Alto	Baixo	Alto	Baixo	Alto	Baixo	Alto
Muito Baixa	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Baixa	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Média	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0
Alta	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Muito Alta	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Visando agregar dados de campo à análise de restrições ambientais, também foi considerada a acessibilidade às áreas que compõem o Pantanal Sul-Matogrossense, conforme cada sistema de suprimento considerada. Essa análise partiu da divisão da área de estudo em regiões menores que caracterizassem diferentes dificuldades de acesso para cada tecnologia. Para a análise de acessibilidade foram consideradas 17 grandes regiões (Figura 26). A análise de acessibilidade levou em consideração se cada área possui ou não facilidade de acesso para implantação e operação de cada sistema de suprimento. Caso determinado sistema possua maior facilidade de acesso para implantação e operação foi atribuído o valor 1 e caso apresente maior dificuldade, foi atribuído o valor 0 conforme a Tabela 28.

Figura 26 – Mapa de regiões de acesso

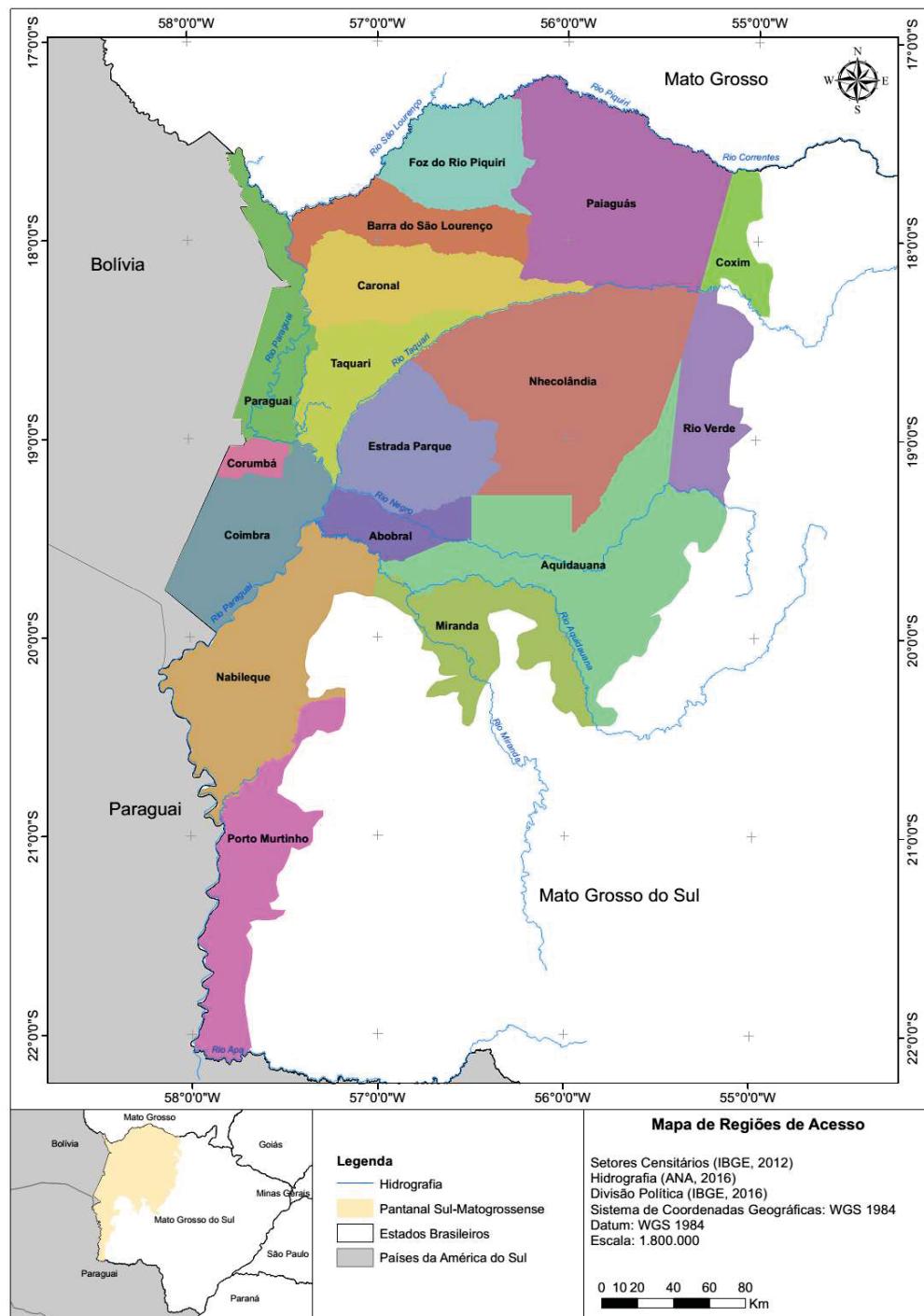


Tabela 28 – Acessibilidade por alternativas de suprimento

Regiões de Acesso	SOLAR		EÓLICA		SOLAR + EÓLICA		SOLAR + GMG		GMG	
	Baixo	Alto	Baixo	Alto	Baixo	Alto	Baixo	Alto	Baixo	Alto
Paraguai	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Corumbá	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Coimbra	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
Nabileque	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
Porto Murtinho	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Taquari	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
Caronal	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Barra do São Lourenço	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0
Foz do Rio Piquiri	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0
Paiaguás	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Coxim	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Abobral	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0
Estrada Parque	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Nhecolândia	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0
Rio Verde	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Aquidauana	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Miranda	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Finalmente, para o resultado das restrições ambientais é realizado o somatório das referidas matrizes (Tabela 27 e Tabela 28) para cada propriedade. Com este resultado é calculado os respectivos valores da Escala de Saaty, dentro das possibilidades de combinações. Dos resultados possíveis, tem-se que quanto maior o valor obtido, maior recomendação da alternativa tecnológica em termos de restrição ambiental e acessibilidade.

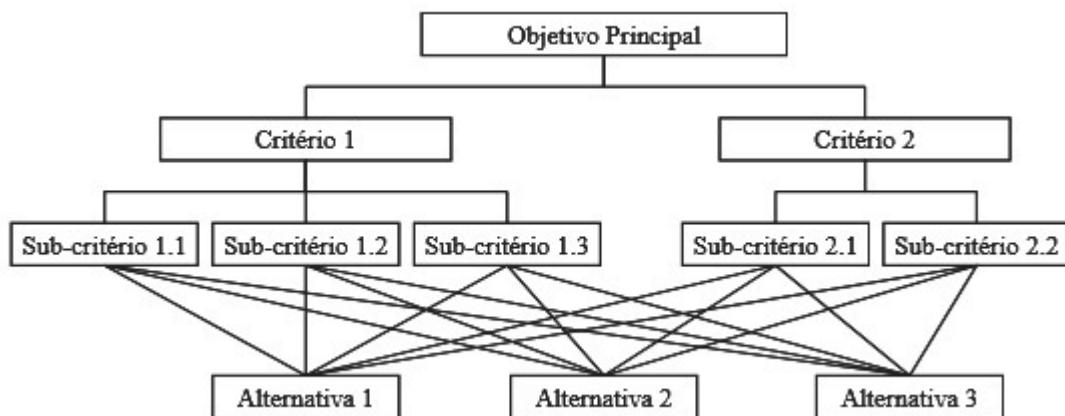
6.2 O MÉTODO AHP

O método *Analytic Hierarchy Process* (AHP) foi desenvolvido com o intuito de existir uma metodologia de fácil compreensão e implementação para tomar decisões complexas. A simplicidade e o poder do AHP levou o seu uso em vários domínios como em negócios, estudo sociais, projetos de pesquisa e desenvolvimento (P&D), ações governamentais, melhoria de infraestrutura e outros domínios envolvendo decisões onde a escolha, priorização ou previsão é necessário (BHUSHAN; RAI, 2004).

Segundo Saaty (2001), para desenvolver um problema de tomada de decisão com o AHP é necessário principalmente três princípios: construir hierarquias

(problemas em níveis hierárquicos), estabelecer prioridades e testar a lógica de consistência. O problema deve ser modelado de forma que nos níveis hierárquicos tenha o objetivo, os critérios e subcritérios e as alternativas. Esta hierarquia mostra a relação entre os elementos de um nível com os demais. A Figura 27 mostra uma estrutura hierárquica genérica.

Figura 27 - Estrutura hierárquica genérica



Fonte: Oliveira e Belderrain (2008)

O processo de estabelecer prioridades no AHP ocorre nas matrizes de comparação paritária (comparação entre duas opções). Estas matrizes existem para comparar os critérios entre si, assim como os subcritérios e comparar as alternativas em função dos critérios e subcritérios. Para construir as matrizes de comparação paritária é necessário definir uma escala de julgamento (comparação). Em Franek e Kresta (2014) é apresentado as escalas mais utilizadas no AHP. Neste trabalho é utilizado a escala conhecida como a escala fundamental de Saaty, a qual pode ser verificada na Figura 28.

Figura 28 - A escala e sua descrição

Intensidade	Definição	Explicação
1	Igual importância.	As duas atividades contribuem igualmente para o objetivo.
3	Importância pequena de uma sobre outra.	A experiência e o juízo favorecem uma atividade em relação à outra.
5	Importância grande ou essencial.	A experiência ou juízo favorece fortemente uma atividade em relação à outra.
7	Importância muito grande ou demonstrada.	Uma atividade é muito fortemente favorecida em relação à outra. Pode ser demonstrada na prática.
9	Importância absoluta.	A evidência favorece uma atividade em relação à outra, com o mais alto grau de segurança.
2,4,6,8	Valores Intermediários.	Quando se procura uma condição de compromisso entre duas definições.

Fonte: Oliveira e Belderrain (2008)

Com a escala definida é possível realizar as comparações nas matrizes de comparações paritárias, conhecidas também como matrizes de julgamentos. As comparações paritárias são realizadas através de matrizes quadráticas recíprocas, com valores unitários na diagonal principal. Os elementos nestas matrizes assumem valores conforme a Figura 28. Quando dois elementos m e n são comparados (qualitativamente ou quantitativamente) o valor 1 significa igual importância (caso da diagonal principal que se compara o elemento com ele mesmo) e o valor 9 é utilizado quando m é muito mais importante que n , de forma recíproca o valor 1/9 de n em relação a m . O formato geral da matriz de comparações pode ser verificado na Tabela 29.

Tabela 29 - Matriz de comparação paritária genérica

	Elemento 1	Elemento 2	...	Elemento D
Elemento 1	1	a_{12}	...	a_{1D}
Elemento 2	$1/a_{12}$	1	...	a_{2D}
:	:	:	:	:
Elemento D	$1/a_{1D}$	$1/a_{2D}$...	1

A Tabela 30 apresenta a matriz de julgamentos dos cinco critérios, definidos na metodologia de seleção dos critérios, utilizando a escala fundamental de Saaty para a metodologia multicritério espacial para sistemas isolados.

Tabela 30 - Matriz de comparação dos critérios

	RSA	ISA	LCOE	TNCL	RGLT
RSA	1	1/3	1/3	2	4
ISA	3	1	1	2	4
LCOE	3	1	1	4	5
TNCL	1/2	1/2	1/4	1	3
RGLT	1/4	1/4	1/5	1/3	1

6.2.1 Método para estimar prioridade entre valores (método de ponderação)

Através da matriz de comparação é possível calcular os pesos (prioridades) respectivos de cada critério (comparação de critérios), os pesos de cada subcritério (comparação de subcritérios) e os pesos de cada alternativa (comparação de alternativas em relação a um critério/subcritério). Em Saaty (1977) mostra o método do autovetor para calcular os pesos das alternativas.

Em Bajwa, Choo e Wedley (2008) é comparado sete métodos diferentes para estimar a proporção dos valores de prioridade dimensionados a partir de matrizes de julgamento. Para este trabalho foi escolhido o método da média da coluna normalizada (*The Normalized Column Mean Method*), o qual é consolidado em aplicações na literatura científica. Este método baseia-se na normalização das colunas de uma matriz de julgamentos através de cada elemento normalizado de uma coluna, conforme a equação 18:

$$t_{nj}^{(norm)} = \frac{t_{nj}}{\sum_{k=1}^{N_{lin}} t_{kj}} \quad (18)$$

Onde:

$t_{nj}^{(norm)}$ = elemento de uma matriz normalizada

N_{lin} = número de linhas

Com a matriz normalizada é possível calcular o peso de cada alternativa avaliada na matriz de julgamentos pela equação 19:

$$w_i = \left(\frac{1}{n_{alt}} \right) * \sum_j \left(\frac{t_{ij}}{\sum_k t_{kj}} \right) \quad (19)$$

Onde:

w_i = peso da alternativa da linha i

$$n_{alt} = \text{número de alternativas}$$

De forma a ilustrar o método de ponderação, a Tabela 30 é utilizada como exemplo para calcular os pesos dos critérios. A Tabela 31 apresenta o somatório de cada coluna (destacado em vermelho). A Tabela 32 apresenta os valores de cada célula de uma coluna dividida pelo somatório de sua coluna, de acordo com a equação 18.

Tabela 31 - Soma das colunas na matriz de comparação dos critérios

	RSA	ISA	LCOE	TNCL	RGLT
RSA	1	1/3	1/3	2	4
ISA	3	1	1	2	4
LCOE	3	1	1	4	5
TCNL	1/2	1/2	1/4	1	3
RGLT	1/4	1/4	1/5	1/3	1
SOMA	31/4	37/12	167/60	28/3	17

Tabela 32 - Matriz de comparação dos critérios a ser normalizada

	RSA	ISA	LCOE	TNCL	RGLT
RSA	1/(31/4)	(1/3)/(37/12)	(1/3)/(167/60)	2/(28/3)	4/17
ISA	3/(31/4)	1/(37/12)	1/(167/60)	2/(28/3)	4/17
LCOE	3/(31/4)	1/(37/12)	1/(167/60)	4/(28/3)	5/17
TCNL	(1/2) /(31/4)	(1/2) /(37/12)	(1/4) /(167/60)	1/(28/3)	3/17
RGLT	(1/4) /(31/4)	(1/4) /(37/12)	(1/5) /(167/60)	(1/3) /(28/3)	1/17
SOMA	31/4	37/12	167/60	28/3	17

A Tabela 33 apresenta a matriz de julgamento normalizada com a última coluna da direita referente ao valor do peso de cada critério calculado conforme a equação 19.

Tabela 33 - Matriz de julgamentos normalizada com seus respectivos pesos

	RSA	ISA	LCOE	TNCL	RGLT	Pesos
RSA	4/31	4/37	20/167	6/28	4/17	0,1613
ISA	12/31	12/37	60/176	6/28	4/17	0,3041
LCOE	12/31	12/37	60/176	12/28	5/17	0,3587
TCNL	2/31	6/37	15/167	3/28	3/17	0,12
RGLT	1/31	3/37	12/167	1/28	1/17	0,0559

De acordo com a Tabela 33 o critério LCOE é o que apresenta o maior peso nesta análise multicritério espacial com 35,87% de prioridade, em seguida o ISA com 30,41%, RSA com 16,13%, TCNL com 12% e o RGLT com 5,59%.

6.2.2 Razão de Consistência da matriz

Para toda matriz de comparação com ordem maior ou igual a três é necessário calcular o índice de consistência (IC) para a matriz de julgamentos, o qual é calculado pela equação 20.

$$IC = (\lambda_{max} - D)/(D - 1) \quad (20)$$

O primeiro passo para obter o IC é normalizando a matriz de comparação (realizado na subseção anterior). De acordo com Oliveira e Belderrain (2008) o segundo passo é calcular o autovalor λ_{max} , associado ao vetor de pesos calculado anteriormente. Os autores apresentam conceitos algébricos do autovalor e dois métodos para calcular um valor aproximado do autovalor. Neste trabalho, o valor aproximado do autovalor foi calculado pelo método da média dos valores normalizados (*The Normalized Column Mean Method*), o qual pode ser visto na equação 21.

$$\lambda_{max} = \frac{1}{n_{pes}} * \sum_{i=1}^n \frac{[MW]_i}{w_i} \quad (21)$$

Onde :

- w Vetor de pesos
- i Ordem da matriz quadrática
- n_{pes} Número de pesos
- MW Multiplicação da matriz pelo vetor de pesos

Depois que o autovalor for calculado e o índice de consistência também, deve-se calcular a razão de consistência (RC) conforme a equação 22. Para calcular a RC é necessário utilizar o índice randômico (IR), o qual varia de valor de acordo com a ordem da matriz ($m \times m$). De acordo com Saaty (1980), os valores dos índices randômico pode ser vistos na Tabela 34.

$$RC = IC/IR \quad (22)$$

Tabela 34 - Valores para o índice randômico

Número	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
IR	0,00	0,00	0,58	0,90	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49	1,51	1,48	1,56	1,57	1,59

O valor de RC deve ser inferior a 0,1. Caso o valor seja superior a 0,1 então existe alguma inconsistência nos julgamentos da matriz de comparação e os tomadores de decisão deverão refazer a avaliação da matriz de julgamentos, e posteriormente calcular novamente a matriz normalizada, os pesos, o autovalor, o índice de consistência e verificar a razão de consistência. Segundo Alonso e Lamata (2006) a razão de consistência tem o objetivo de analisar se os julgamentos da matriz são contraditórios ou consistentes.

Utilizando a matriz de julgamentos da Tabela 30 (M) e os pesos calculados da Tabela 33 (W), o cálculo do autovalor λ_{max} é da seguinte forma:

$$M^*W = \begin{bmatrix} 3 & 1/3 & 1/3 & 2 & 4 \\ 3 & 1 & 1 & 2 & 4 \\ 3 & 1 & 1 & 4 & 5 \\ 1/2 & 1/2 & 1/4 & 1 & 3 \\ 1/4 & 1/4 & 1/5 & 1/3 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 0,1613 \\ 0,3041 \\ 0,3587 \\ 0,1200 \\ 0,0559 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,8460 \\ 1,6105 \\ 1,9065 \\ 0,6102 \\ 0,2840 \end{bmatrix}$$

$$\lambda_{max} = \frac{1}{n} * \sum_{i=1}^n \frac{[MW]_i}{w_i} = \frac{1}{5} * \left(\frac{0,8460}{0,1613} + \frac{1,6105}{0,3041} + \frac{1,9065}{0,3587} + \frac{0,6102}{0,12} + \frac{0,2840}{0,0559} \right)$$

$$\lambda_{max} = 5.2043$$

Utilizando a equação 20 e depois a equação 22 é possível verificar a consistência dos julgamentos da matriz de comparação paritária dos critérios pertencentes a metodologia multicritério espacial para sistemas isolados.

$$IC = \frac{5.2043 - 5}{5 - 1} = 0,0511$$

$$RC = \frac{0,0511}{1,11} = 0,0460$$

6.2.3 Normalização de dados quantitativos para a escala de Saaty

Em algumas matrizes de julgamento os dados são fornecidos por números quantitativos para cada alternativa. Porém, como visto anteriormente, a matriz de comparação admite valores relacionados entre dois tipos de alternativa. Desta forma é necessário utilizar uma fórmula para adquirir os valores entre duas alternativas a

partir dos valores de cada alternativa. O resultado desta equação fornece um número de acordo com a escala de Saaty. A equação necessário para realizar a normalização do dado na escala de Saaty é apresentada em Estrella Maldonado et al. (2012). A equação 23 demonstra a fórmula para efetuar esta transformação.

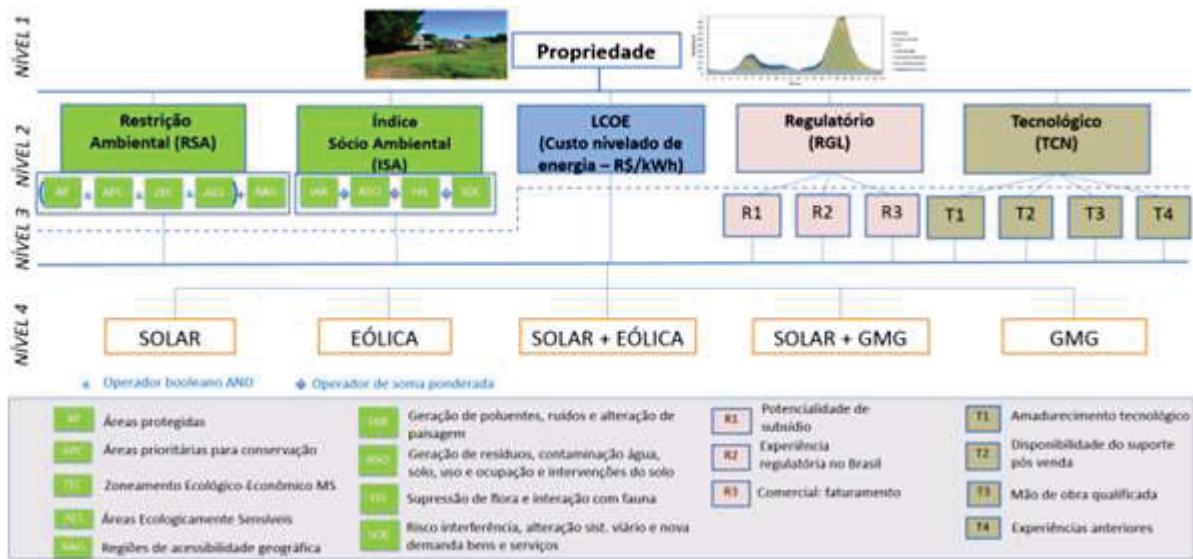
$$b^{(j)}_{ih} = 8 * \frac{I_j^{(i)} - I_j^{(h)}}{I_{j,max} - I_{j,min}} + 1 \quad (23)$$

Considerando “j” como um critério, então $I_{j,max}$ e $I_{j,min}$ são o valor máximo e o valor mínimo respectivamente do critério “j”. O valor $I_j^{(i)}$ e $I_j^{(h)}$ são os valores da alternativa “i” e da alternativa “h” do critério “j”, ou seja o valor de “i” em relação ao “h”. O resultado desta subtração tem que ser positiva, caso não seja, deve-se mudar a ordem do “i” com o “h”. Caso o resultado da multiplicação com as duas subtrações der um número não inteiro, então deve-se arredondar para o próximo número inteiro. O valor de $b^{(j)}_{ih}$ é o resultado do julgamento na escala de Saaty da opção “i” em relação a “h”.

6.3 METODOLOGIA MULTICRITÉRIO ESPACIAL PARA SISTEMAS ISOLADOS

A metodologia desenvolvida considera a aplicação de uma técnica de análise espacial multicritério que engloba os critérios (Restrição Ambiental, Índice de Impacto Socioambiental, Custo nivelado de energia, Tecnológico e Regulatório) para distinguir o projeto de referência mais apropriado para cada propriedade. Esta modelagem do método multicritério espacial considerou conforme Salas et al. (2017) a estrutura hierárquica da Figura 29 com os critérios, subcritérios e alternativas localizadas em níveis.

Figura 29 - Estrutura hierárquica de tomada de decisão para o problema de seleção de projeto de referência para uma propriedade

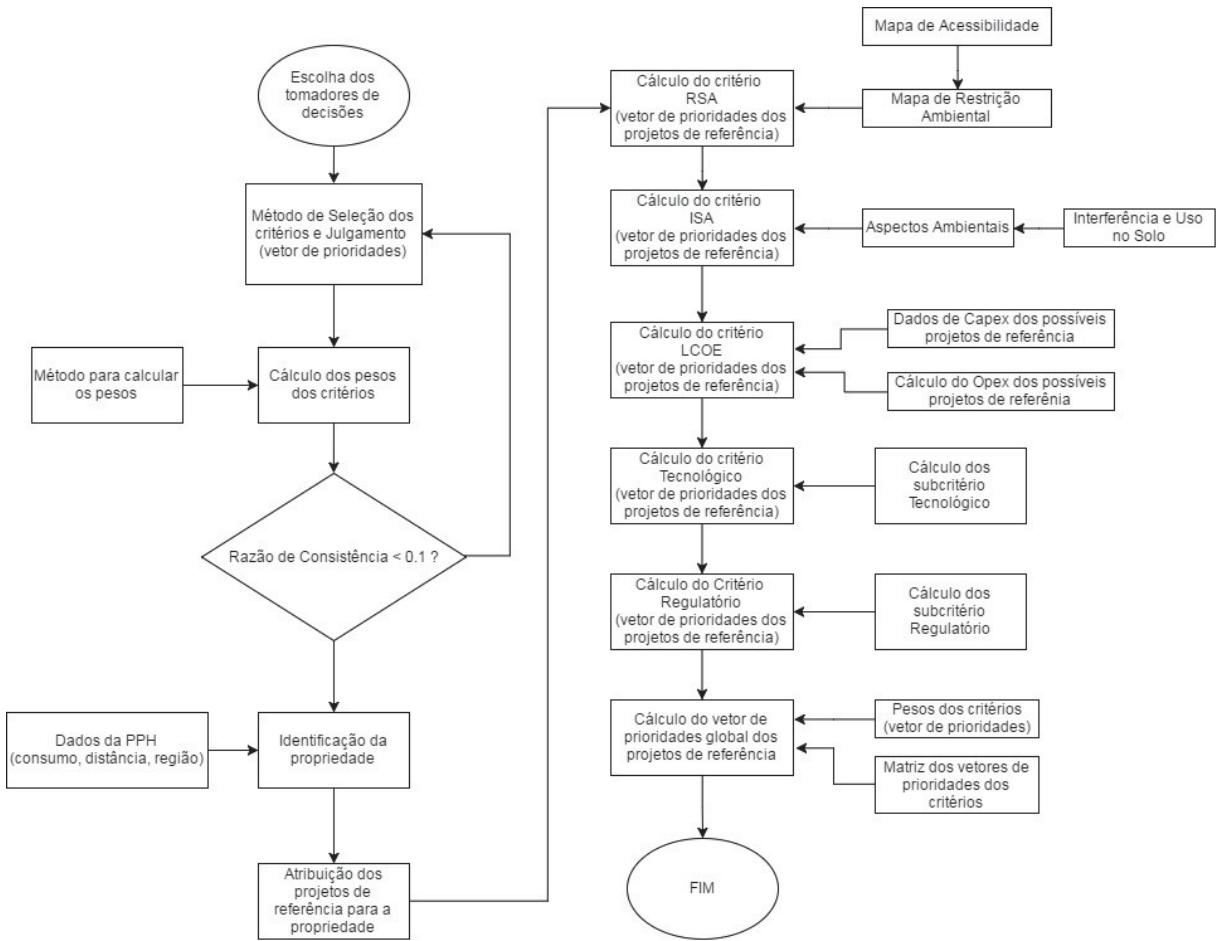


Fonte: Salas *et al.* (2017)

Os níveis da Figura 29 são estruturas do problema e ajudam a fragmentar um problema complexo em partes que podem ser tratadas de forma separada. O nível 1 é o primeiro processo da Figura 20. O nível 2 e 3 são resultados do terceiro processo da Figura 20, assim como o nível 4 é resultado do segundo processo da Figura 20.

A solução para esta estrutura foi implementada em um algoritmo, desenvolvido em MATLAB, o qual utiliza o método AHP. O algoritmo desenvolvido funciona com a lógica de maximização dos vetores de prioridade, ou seja, quanto maior o número do vetor de prioridade melhor é a opção. O fluxograma deste algoritmo pode ser visto na Figura 30.

Figura 30 - Fluxograma da metodologia multicritério espacial para sistema isolado



A Figura 30 mostra quais são os processos que o algoritmo realiza para calcular o ranqueamento dos projetos de referência (prioridade das alternativas) e indicar qual é o melhor projeto para uma determinada região. A seguir é apresentado a definição dos critérios Tecnológico e Regulatório e um exemplo da aplicação da metodologia multicritério espacial para uma propriedade do Pantanal Sul-Mato-Grossense.

6.3.1 Exemplo do funcionamento do método multicritério espacial para sistemas isolados

Com o objetivo de apresentar o funcionamento do algoritmo desenvolvido apresentado na Figura 30, esta seção apresenta como exemplo o resultado de uma propriedade do Pantanal Sul-Mato-Grossense. Como já foi apresentado o método de escolha dos critérios e os seus pesos (razão de consistência verificada) o próximo passo do algoritmo é selecionar os dados de consumo (69,98 kWh/mês), distância

(68,77 km de lancha rápida e 137,54 km de barco grande) e a região do Pantanal (Nabileque) da propriedade exemplo.

O próximo processo do algoritmo é verificar qual a disponibilidade mensal garantida mais próxima do consumo da propriedade. Desta forma o algoritmo atribuiu os projetos de referência disponíveis (SOL+BAT, EOL+BAT e GMG) de acordo com a disponibilidade mensal de 80 kWh/mês.

Depois de verificar os projetos de referência o algoritmo passa para os processos de calcular os cinco critérios em função dos projetos de referência adquiridos. O primeiro critério avaliado é a RSA, a qual através do mapa de restrição ambiental para a propriedade exemplo possui uma alta restrição (nota igual a 7). Com os dados de RSA (igual a 7) e da região da propriedade (Nabileque) através do mapa de acessibilidade, o algoritmo verifica as matrizes das Tabela 27 e Tabela 28 e atribui os valores referentes de RSA e acessibilidade para cada um dos três projetos de referência analisados. Estes valores podem ser verificados na Tabela 35.

Tabela 35 - Dados brutos dos projetos de referência em relação ao critério RSA

RSA	Tabela 14	Tabela 15	TOTAL
SOL+BAT	1	1	2
EOL+BAT	0	0	0
GMG	0	0	0

Com o valor total adquirido por cada projeto de referência, o algoritmo calcula através da matriz de julgamentos a prioridade das alternativas. O algoritmo realiza a comparação paritária através da equação 23 para obter os julgamentos de acordo com a escala de Saaty. A Tabela 36 apresenta a matriz de julgamentos e os pesos calculado pelo algoritmo.

Tabela 36 - Matriz de julgamento dos projetos de referência em relação ao critério RSA

RSA	SOL+BAT	EOL+BAT	GMG	PESOS
SOL+BAT	1	9	9	0,8182
EOL+BAT	1/9	1	1	0,0909
GMG	1/9	1	1	0,0909

De acordo com a Tabela 36 o projeto de referência SOL+BAT é a melhor opção em relação ao critério RSA. As alternativas EOL+BAT e GMG possuem a mesma prioridade para o critério RSA. Este vetor dos pesos é armazenado para ser utilizado posteriormente.

O segundo critério avaliado pelo algoritmo é o ISA. No índice de uso e interferência no solo para a propriedade exemplo o tipo é a opção de áreas florestais. O valor total do ISA para cada projeto de referência pode ser verificado na Tabela 37.

Tabela 37 - Dados brutos dos projetos de referência em relação ao critério ISA

ISA	TOTAL
SOL+BAT	35
EOL+BAT	71
GMG	55

Através da Tabela 37 é possível verificar que a opção com o maior impacto ambiental é o EOL+BAT. Para que este critério possua a mesma lógica de maximização que o critério RSA, o algoritmo utiliza outra lógica na equação 23. Para o critério ISA, quando $I_j^{(i)} - I_j^{(h)} < 0$ o algoritmo vai utilizar o módulo desta diferença e então calcular $b^{(j)}_{ih}$, conforme a equação 24. Se $I_j^{(i)} - I_j^{(h)} > 0$ o algoritmo vai calcular $b^{(j)}_{ih}$ conforme a equação 25. A Tabela 38 apresenta a matriz de comparação das três alternativas em relação ao critério ISA.

$$b^{(j)}_{ih} = 8 * \frac{|I_j^{(i)} - I_j^{(h)}|}{I_{j,max} - I_{j,min}} + 1 \quad (24)$$

$$b^{(j)}_{ih} = \left(8 * \frac{I_j^{(i)} - I_j^{(h)}}{I_{j,max} - I_{j,min}} + 1 \right)^{-1} \quad (25)$$

Tabela 38 - Matriz de julgamento dos projetos de referência em relação ao critério ISA

ISA	SOL+BAT	EOL+BAT	GMG	PESOS
SOL+BAT	1	9	6	0,7386
EOL+BAT	1/9	1	1/5	0,0605
GMG	1/6	5	1	0,2009

De acordo com a Tabela 38 o projeto de referência SOL+BAT é a melhor opção (maior prioridade) em relação ao critério ISA. Em seguida vem a opção GMG e por último a opção EOL+BAT. Este vetor com os pesos dos projetos de referência em relação ao critério ISA é armazenado para ser utilizado posteriormente.

O terceiro critério avaliado pelo algoritmo é o custo nivelado de energia (LCOE). Para calcular o LCOE o algoritmo calcula o CAPEX e o OPEX de cada projeto de referência considerando a distância da propriedade em relação a cidade de Corumbá. Os valores de CAPEX total (instalação e substituição), OPEX_O&M, OPEX logística e o LCOE dos três projetos de referência considerando a distância até Corumbá podem ser verificados na Tabela 39. Os primeiros quatro parâmetros são calculados pelo valor presente e o LCOE é calculado através dos valores anualizados de CAPEX e OPEX pela equação 14 (valor anualizado).

Tabela 39 – Valores presente de OPEX, CAPEX e resultado do LCOE dos três projetos de referência

LCOE	OPEX O&M	OPEX logística	OPEX Combustível	CAPEX instalação	CAPEX substituição	LCOE (R\$/kWh)
SOL+BAT	R\$ 7.072,20	R\$ 108.912,62	R\$ 0,00	R\$ 43.135,74	R\$ 23.136,07	29,55
EOL+BAT	R\$ 5.041,75	R\$ 108.912,62	R\$ 0,00	R\$ 180.813,90	R\$ 26.691,81	52,11
GMG	R\$ 8.349,33	R\$ 108.912,62	R\$ 117.395,41	R\$ 28.809,79	R\$ 1.248,68	42,92

De acordo com a Tabela 39 é possível verificar que a opção com o maior LCOE é o EOL+BAT. Para que o critério LCOE possua a mesma lógica de maximização que os critérios ISA e RSA, o algoritmo utiliza as equações 24 e 25. A Tabela 40 mostra a matriz de julgamento dos três projetos de referência avaliados e seus respectivos pesos.

Tabela 40 - Matriz de julgamento dos projetos de referência em relação ao critério LCOE

LCOE	SOL+BAT	EOL+BAT	GMG	PESOS
SOL+BAT	1	9	6	0,7386
EOL+BAT	1/9	1	1/5	0,0605
GMG	1/6	5	1	0,2009

De acordo com a Tabela 40 o projeto de referência SOL+BAT é a melhor opção (maior prioridade) em relação ao critério LCOE. Em seguida vem a opção GMG e por último a opção EOL+BAT. Este vetor com os pesos dos projetos de referência em relação ao critério LCOE é armazenado para ser utilizado posteriormente.

O quarto critério avaliado pelo algoritmo é o Tecnológico (TCNL). Para avaliar o TCNL o algoritmo calcula os quatro vetores de pesos dos subcritérios Tecnológicos e posteriormente remete os pesos dos quatro subcritérios para o nível de critério. Os valores dos subcritérios Amadurecimento tecnológico (T1), Disponibilidade de suporte pós-venda (T2), Mão de obra qualificada (T3) e Experiências anteriores (T4) dos três projetos de referência podem ser verificados na Tabela 41.

Tabela 41 - Dados brutos dos projetos de referência em relação aos subcritérios Tecnológico

TCNL	T1	T2	T3	T4
SOL+BAT	6	5	6	6
EOL+BAT	5	4	5	3
GMG	9	6	8	7

Com os dados dos projetos de referência por subcritério o algoritmo calcula a matriz de julgamentos para cada subcritério. Neste processo é utilizado a equação 23, pois este critério possui a lógica de maximização. As Tabela 42,Tabela 43,Tabela 44

e Tabela 45 apresentam respectivamente as matrizes de julgamento e os pesos dos subcritérios Amadurecimento Tecnológico (T1), Disponibilidade de suporte pós venda (T2), Mão de obra qualificada (T3) e Experiências anteriores (T4).

Tabela 42 - Matriz de julgamento dos projetos de referência em relação ao subcritério Amadurecimento Tecnológico (T1)

T1	SOL+BAT	EOL+BAT	GMG	PESOS
SOL+BAT	1	3	1/7	0,1549
EOL+BAT	1/3	1	1/9	0,0685
GMG	7	9	1	0,7766

Tabela 43 - Matriz de julgamento dos projetos de referência em relação ao subcritério Disponibilidade de suporte pós venda (T2)

T2	SOL+BAT	EOL+BAT	GMG	PESOS
SOL+BAT	1	5	1/5	0,2157
EOL+BAT	1/5	1	1/9	0,0612
GMG	5	9	1	0,7231

Tabela 44 - Matriz de julgamento dos projetos de referência em relação ao subcritério Mão de obra qualificada (T3)

T3	SOL+BAT	EOL+BAT	GMG	PESOS
SOL+BAT	1	4	1/7	0,1736
EOL+BAT	1/4	1	1/9	0,0634
GMG	7	9	1	0,7629

Tabela 45 - Matriz de julgamento dos projetos de referência em relação ao subcritério Experiência anteriores (T4)

T4	SOL+BAT	EOL+BAT	GMG	PESOS
SOL+BAT	1	7	1/3	0,2946
EOL+BAT	1/7	1	1/9	0,0567
GMG	3	9	1	0,6486

As Tabela 42,Tabela 43,Tabela 44 e Tabela 45 apresentam os vetores dos pesos dos projetos de referência. Com estes vetores e com o vetor dos pesos dos subcritérios Tecnológicos (Figura 21) o algoritmo calcula as prioridades dos projetos de referência em relação ao nível de critério. Para realizar este cálculo o algoritmo multiplica a matriz formada pelos vetores de pesos dos projetos de referência em relação aos subcritérios pelo vetor de pesos dos subcritérios. O resultado é o vetor de pesos dos projetos de referência em relação ao critério Tecnológico. O cálculo da multiplicação da matriz pelo vetor e o resultado dos pesos dos projetos de referência em relação ao critério Tecnológico pode ser observado a seguir.

$$\begin{bmatrix} 0,1549 & 0,2157 & 0,1736 & 0,2946 \\ 0,0685 & 0,0612 & 0,0634 & 0,0567 \\ 0,7766 & 0,7231 & 0,7629 & 0,6486 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 0,1629 \\ 0,1549 \\ 0,4036 \\ 0,2786 \end{bmatrix}$$

$$Pesos\ dos\ projetos\ de\ referência\ (Tecnológico) = \begin{bmatrix} 0,2108 \\ 0,0620 \\ 0,7271 \end{bmatrix}$$

O vetor de pesos dos projetos de referência em relação ao critério Tecnológico mostra que a opção GMG tem a maior prioridade, em seguida a opção SOL+BAT e por último a EOL+BAT. O algoritmo armazena este vetor para calcular o vetor de prioridade global (último processo do algoritmo) dos projetos de referência.

O último critério avaliado pelo algoritmo é o Regulatório (RGLT). Para avaliar o RGLT o algoritmo calcula os três vetores de pesos dos subcritérios Regulatórios e posteriormente remete os pesos dos três subcritérios para o nível de critério (da mesma forma que o critério Tecnológico). Os valores dos subcritérios Potencialidade de Subsídio (R1), Experiência regulatória no Brasil (R2) e Necessidade de Medição

para faturamento (R3) dos três projetos de referência podem ser verificados na Tabela 46.

Tabela 46 - Dados brutos dos projetos de referência em relação aos subcritérios Regulatório

RGLT	R1	R2	R3
SOL+BAT	ALTA	ALTA	NÃO
EOL+BAT	MEDIA	MEDIA	NÃO
GMG	BAIXA	BAIXA	REC

Da mesma forma que no critério Tecnológico, com os dados dos projetos de referência da Tabela 46 por subcritério o algoritmo calcula a matriz de julgamentos para cada subcritério. Neste processo é utilizado a equação 23, pois este critério possui a lógica de maximização. As Tabela 47, Tabela 48 e Tabela 49 apresentam respectivamente as matrizes de julgamento e os pesos dos subcritérios Potencialidade de subsídio (R1), Experiência regulatória no Brasil (R2) e Necessidade de medição para faturamento (R3).

Tabela 47 - Matriz de julgamento dos projetos de referência em relação ao subcritério Potencialidade de Subsídio (R1)

R1	SOL+BAT	EOL+BAT	GMG	PESOS
SOL+BAT	1	5	9	0,7231
EOL+BAT	1/5	1	5	0,2157
GMG	1/9	1/5	1	0,0612

Tabela 48 - Matriz de julgamento dos projetos de referência em relação ao subcritério Experiências regulatórias no Brasil (R2)

R2	SOL+BAT	EOL+BAT	GMG	PESOS
SOL+BAT	1	5	9	0,7231
EOL+BAT	1/5	1	5	0,2157
GMG	1/9	1/5	1	0,0612

Tabela 49 - Matriz de julgamento dos projetos de referência em relação ao subcritério Necessidade de Medição para faturamento (R3)

R3	SOL+BAT	EOL+BAT	GMG	PESOS
SOL+BAT	1	1	9	0,4737
EOL+BAT	1	1	9	0,4737
GMG	1/9	1/9	1	0,0526

$$\begin{bmatrix} 0,7231 & 0,7231 & 0,4737 \\ 0,2157 & 0,2157 & 0,4737 \\ 0,0612 & 0,0612 & 0,0526 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 0,5888 \\ 0,1593 \\ 0,2519 \end{bmatrix}$$

$$Pesos\ dos\ projetos\ de\ referência\ (Regulatório) = \begin{bmatrix} 0,6603 \\ 0,2807 \\ 0,0590 \end{bmatrix}$$

O vetor de pesos dos projetos de referência em relação ao critério Regulatório mostra que a opção SOL+BAT tem a maior prioridade, em seguida a opção EOL+BAT e por último a SOL+BAT. O algoritmo armazena o vetor de pesos do critério Regulatório para utilizar no cálculo de prioridade global dos projetos de referência.

O último processo do algoritmo é a multiplicação de uma matriz, formada pelos vetores de prioridades dos projetos de referência em relação aos critérios, com o vetor de prioridades dos critérios. O resultado desta multiplicação é o vetor de prioridade global dos projetos de referência avaliados. O vetor de prioridades dos pesos dos critérios (definido pelos tomadores de decisão) é um parâmetro muito decisivo no resultado do vetor de prioridade global dos projetos de referência. A multiplicação da matriz pelo vetor do exemplo utilizado nesta seção pode ser visto a seguir.

$$\begin{bmatrix} 0,8182 & 0,7386 & 0,7386 & 0,2108 & 0,6603 \\ 0,0909 & 0,0605 & 0,0605 & 0,0620 & 0,2807 \\ 0,0909 & 0,2009 & 0,2009 & 0,7271 & 0,0590 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 0,1613 \\ 0,3041 \\ 0,3587 \\ 0,1200 \\ 0,0559 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,6837 \\ 0,0779 \\ 0,2384 \end{bmatrix}$$

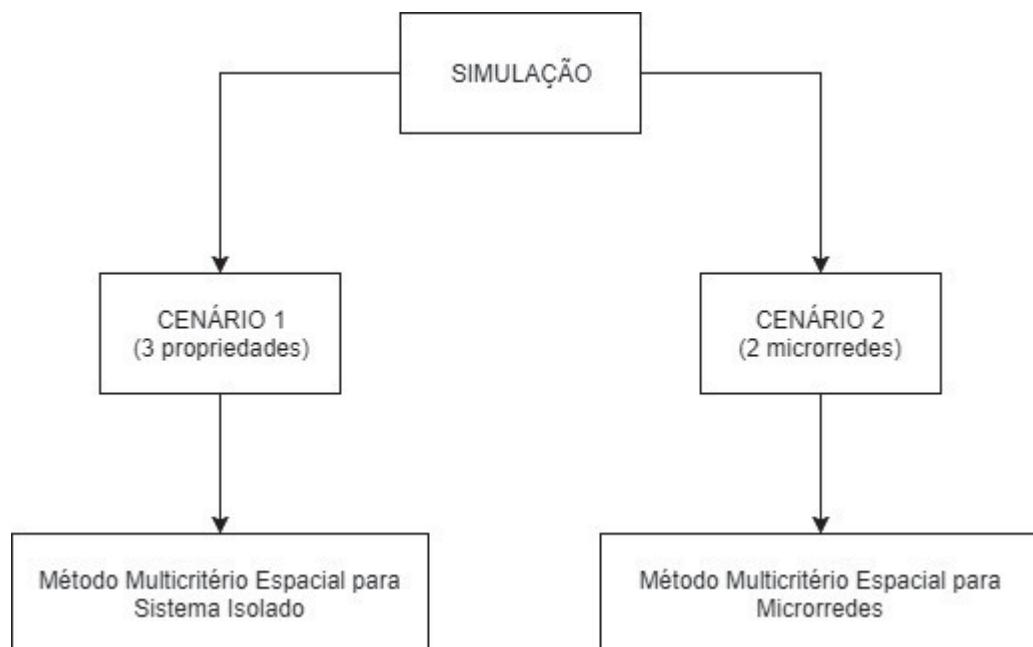
Neste caso, o algoritmo realizou todos os processos da Figura 30 e como resultado o vetor ranqueado apontou como melhor opção o projeto de referência SOL+BAT como alternativa para eletrificar a propriedade exemplo.

7 ANÁLISE DOS RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para implementar computacionalmente o método multicritério espacial para sistemas isolados foi desenvolvido o algoritmo apresentado na Figura 30, o qual utiliza como dados de entrada os materiais descritos no Capítulo 5. Portanto, o algoritmo utiliza dados da PPH para determinar qual a disponibilidade mensal necessária e quais os possíveis projetos de referência para garantir a disponibilidade energética para a propriedade (atribuindo valores de TCNL e RGLT), qual a região em que a propriedade está inserida atribuindo os valores de RSA e ISA (avaliação espacial) para os projetos de referência e ainda define qual a distância e o meio de transporte para acessar a propriedade contribuindo para o cálculo do CAPEX, OPEX e LCOE.

Este capítulo apresenta o resultado da simulação de dois cenários do método desenvolvido e com os materiais apresentados utilizando como estudo de aplicação o Pantanal Sul-Mato-Grossense. No cenário 1 e 2 o consumo das propriedades foi calculado através do método apresentado em 5.1, porém o cenário 2 se difere do primeiro porque a simulação do método multicritério espacial no cenário 2 é determinar projetos de referência para microrredes, enquanto que no cenário 1 é para sistemas isolados. A diferença entre os cenários simulados pode ser vista na Figura 31.

Figura 31 - Cenários simulados no método multicritério espacial para sistemas off-grid



7.1 CENÁRIO 1

Este cenário tem o objetivo de mostrar o resultado de três projetos de referência diferentes ranqueados como melhor opção pelo método multicritério espacial. Entre os três projetos de referência, dois deles resultaram como melhor opção os sistemas híbrido (SOL+GMGotm+BAT) e GMG. Desta forma as três propriedades com sistema SOLBAT, SOL+GMGotm+BAT e GMG são analisadas através dos dados brutos de entrada do algoritmo multicritério espacial para sistema isolado, assim como os vetores de prioridades de cada critério. Portanto, este cenário apresenta e explica os motivos pelos quais as propriedades analisadas A, B e C obtiveram tais resultados.

Para as propriedades A, B e C o algoritmo calcula as estimativas de consumo e resulta nos respectivos valores: 479,5 kWh/mês, 408,7 kWh/mês e 463,1 kWh/mês. Em seguida, o algoritmo verifica a distância em relação a Corumbá das três propriedades e armazena os respectivos valores, 114 km com acesso terrestre, 39,91 km e 104 km com acesso fluvial. O método multicritério espacial classifica as propriedades para os projetos de referência com disponibilidade mensal de 600 kWh/mês. Depois de passar por todas as avaliações das matrizes de comparação dos cinco critérios, o método ranqueou como melhor opção para as propriedades A, B e C respectivamente os projetos de referência SOL+BAT, GMG e SOL+GMGotm+BAT (híbrida). Os vetores de prioridades global dos projetos de referência das respectivas propriedades podem ser vistas nas Tabela 50, Tabela 51 e Tabela 52.

Tabela 50 - Vetor de prioridade global da propriedade A

Fontes dos projetos de referência	Vetor de prioridades global
SOL+BAT	0,3292
SOL+GMGotm+BAT	0,2803
SOL+GMGpro+BAT	0,1437
SOL+EOL+BAT	0,1286
GMG	0,1182

Tabela 51 - Vetor de prioridade global da propriedade B

Fontes dos projetos de referência	Vetor de prioridades global
GMG	0,2786
SOL+BAT	0,2721
SOL+GMGotm+BAT	0,2106
SOL+GMGpro+BAT	0,1531
SOL+EOL+BAT	0,0855

Tabela 52 - Vetor de prioridade global da propriedade C

Fontes dos projetos de referência	Vetor de prioridades global
SOL+GMGotm+BAT	0,3084
SOL+BAT	0,2967
GMG	0,1580
SOL+GMGpro+BAT	0,1506
SOL+EOL+BAT	0,0862

Através das tabelas acima é possível verificar que as opções que resultaram como melhor prioridade possuem uma pequena diferença em relação a segunda melhor opção, principalmente na propriedade B. Desta forma, os dados brutos referentes aos critérios avaliados das propriedades são apresentados para justificar o motivo do resultado do método multicritério espacial.

No critério RSA o algoritmo verifica que as propriedades A e C se encontram situadas em Paiaguás e Paraguai respectivamente, ambas em uma área de muito baixa Restrição Ambiental. A propriedade B se situa em Porto Murtinho em uma área de baixa restrição. Desta forma o algoritmo calcula os dados brutos do RSA através das Tabela 27 Tabela 28, obtendo os mesmos valores brutos para as propriedades A, B e C conforme a Tabela 53. O resultado com o vetor de prioridades das alternativas para as três propriedades se encontra na Tabela 54.

Tabela 53 - Dados brutos do critério RSA pertencentes as propriedades A, B e C

	SOLAR	SOLAR + EÓLICA	SOLAR + GMG	GMG
Restrição Sócioambiental	2	2	2	2

Tabela 54 - Vetor de prioridade das alternativas em função do critério RSA pertencente as propriedades A, B e C

Fontes dos projetos de referência	Vetor de prioridades RSA
SOL+GMGotm+BAT	0,2
SOL+BAT	0,2
SOL+EOL+BAT	0,2
SOL+GMGpro+BAT	0,2
GMG	0,2

Através da Tabela 54 é possível verificar que para o critério RSA as três propriedades analisadas possuem a mesma prioridade. Mesmo que a propriedade B esteja em outra região que as propriedades A e C os vetores de prioridade possuem o mesmo valor. Os dados brutos deste critério são oriundos de resultados de análises em SIG. Através da Tabela 27 é possível verificar que para restrições muito baixa e baixa as avaliações das alternativas são iguais, assim como na Tabela 28 as regiões de Paraguai, Corumbá, Porto Murtinho, Paiaguás, Coxim, Estrada Parque, Rio Verde, Aquidauana e Miranda. Portanto, para a combinação das restrições baixa ou muito baixa com qualquer região mencionada acima, os vetores de prioridades das propriedades localizadas nestas áreas possuem o mesmo peso para qualquer fonte avaliada, ou seja, não existe prioridade para alguma fonte de um projeto de referência.

No critério ISA o algoritmo verifica que as propriedades A e C se encontram através dos resultados do SIG em uma área agropastoril e conforme a classificação da Tabela 25 (as fontes SOL + GMGotm + BAT e SOL + GMGpro + BAT possuem a mesma pontuação) os possíveis projetos de referência recebem os valores brutos de ISA conforme a Tabela 55. A propriedade B está localizada em uma área florestal e os projetos de referência adquirem os dados brutos do critério ISA de acordo com a Tabela 56. O vetor de prioridades em relação aos projetos de referência das propriedades A e C pode ser visto na Tabela 55 e o vetor de prioridades da propriedade B na Tabela 56.

Tabela 55 - Dados brutos do critério ISA pertencentes a propriedade A e C

A/C	SOLAR	SOLAR + EÓLICA	SOLAR + GMG	GMG
Índice Sócioambiental	31	65	45	51

Tabela 56 - Dados brutos do critério ISA pertencentes a propriedade B

B	SOLAR	SOLAR + EÓLICA	SOLAR + GMG	GMG
Índice Sócioambiental	35	73	57	55

Tabela 57 - Vetor de prioridade das alternativas em função do critério ISA pertencente a propriedade A e C

Fonte dos projetos de referência	Vetor de prioridade ISA
SOL+BAT	0,5434
SOL+EOL+BAT	0,0326
GMG	0,0898
SOL+GMGotm+BAT	0,1671
SOL+GMGpro+BAT	0,1671

Tabela 58 - Vetor de prioridade das alternativas em função do critério ISA pertencente a propriedade B

Fonte dos projetos de referência	Vetor de prioridade ISA
SOL+BAT	0,5778
SOL+EOL+BAT	0,0345
GMG	0,1635
SOL+GMGotm+BAT	0,1121
SOL+GMGpro+BAT	0,1121

Com os valores da Tabela 55 e Tabela 56 é evidente que a alternativa SOL+BAT é a melhor para as três propriedades. Com os valores brutos destas tabelas é possível afirmar que mesmo com valores diferentes entre as Tabela 55 e Tabela 56 a preferência entre as alternativas não muda, como consta nas Tabela 57 Tabela 58. Porém a diferença entre as preferências das alternativas nas Tabela 58 não é a mesma (a não ser os sistemas híbridos), o que pode implicar em um resultado diferente para o vetor de prioridade global.

Para o critério LCOE, o algoritmo calcula o OPEX, CAPEX e LCOE, considerando a distância e os tipos de transporte viáveis de cada propriedade, de todos os projetos de referência avaliados. Para construir a matriz de comparação, o algoritmo utiliza os dados de LCOE dos projetos de referência. Os valores de LCOE dos cinco projetos de referência avaliados para as propriedades analisadas podem ser verificados na Tabela 59. Os vetores de prioridades das alternativas em função do LCOE podem ser verificados nas Tabela 60,Tabela 61 e Tabela 62.

Tabela 59 - Dados brutos do critério LCOE pertencentes as propriedades

LCOE (R\$/kWh)	SOL +BAT	SOL+EOL + BAT	GMG	SOL+GMGotm+ + BAT	SOL+GMGpro+ + BAT
A	11,90	13,63	18,52	10,77	15,14
C	11,977	14,032	12,161	10,475	12,296
B	12,432	14,858	9,793	10,058	11,432

Tabela 60 - Vetor de prioridade das alternativas em função do critério LCOE pertencente a propriedade A

Fontes dos projetos de referência	Vetor de prioridades LCOE
SOL+BAT	0,2687
SOL+EOL+BAT	0,1509
GMG	0,0300
SOL+GMGotm+BAT	0,4696
SOL+GMGpro+BAT	0,0809

Tabela 61 - Vetor de prioridade das alternativas em função do critério LCOE pertencente a propriedade C

Fontes dos projetos de referência	Vetor de prioridades LCOE
SOL+BAT	0,1781
SOL+EOL+BAT	0,0327
GMG	0,1410
SOL+GMGotm+BAT	0,5479
SOL+GMGpro+BAT	0,1003

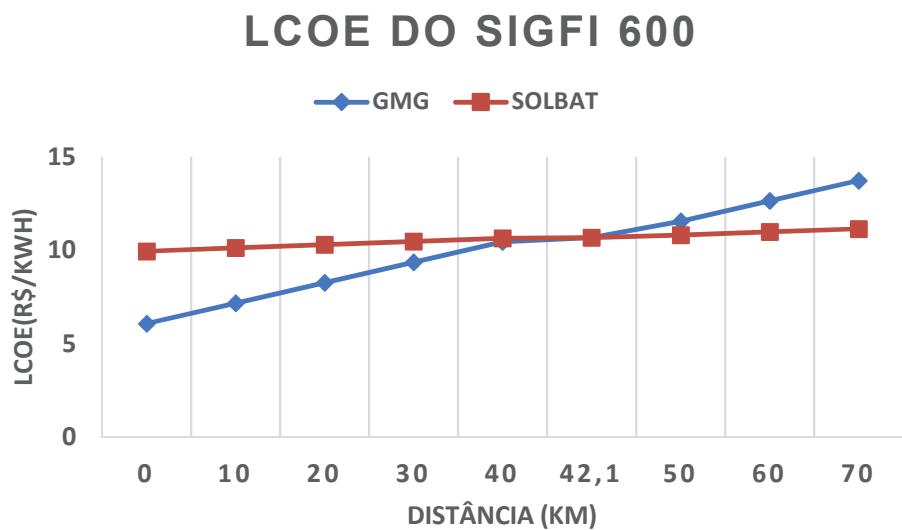
Tabela 62 - Vetor de prioridade das alternativas em função do critério LCOE pertencente a propriedade B

Fontes dos projetos de referência	Vetor de prioridades LCOE
SOL+BAT	0,0803
SOL+EOL+BAT	0,0292
GMG	0,4149
SOL+GMGotm+BAT	0,3218
SOL+GMGpro+BAT	0,1538

Com o resultado da Tabela 60 e Tabela 61 nota-se o mesmo comportamento de prioridade e diferença verificado nos vetores de prioridades do critério ISA. Para as propriedades A e C verifica-se na Tabela 59 que o LCOE aumenta para todas as alternativas conforme a distância. Em relação a Tabela 59, pode-se inferir que quanto mais próximo a propriedade estiver de Corumbá, menor será o valor do LCOE do GMG em relação ao SOL+BAT. Isso pode ser provado pela Figura 32, a qual

apresenta os valores do LCOE (em função do consumo da propriedade A) da alternativa SOL+BAT e GMG em função da distância terrestre (trator e caminhonete). Para uma distância de 42,1 quilômetros da propriedade A à Corumbá o valor do LCOE do SOL+BAT e GMG são iguais a 10,68 R\$/kWh.

Figura 32 - Variação do LCOE das fontes SOL+BAT e GMG em função da distância terrestre da propriedade A em relação a Corumbá



Os valores brutos dos subcritérios tecnológicos são iguais para as três propriedades e são adquiridos pelo algoritmo em relação aos projetos de referência SIGFI 600 kWh/mês, os quais podem ser verificados na Tabela 63. Através destes valores o algoritmo calcula a matriz de julgamentos para cada subcritério obtendo o vetor de prioridades (VP) para cada subcritério, os quais podem ser vistos na Tabela 64. Com estes vetores de prioridades o algoritmo calcula o vetor de prioridade do critério Tecnológico, o qual pode ser analisado na Tabela 65.

Tabela 63 - Dados brutos dos subcritérios Tecnológico pertencentes a propriedade A, B e C

Fontes dos projetos de referência	T1	T2	T3	T4
SOL+BAT	6	5	6	6
SOL+EOL+BAT	6	5	4	5
GMG	9	6	8	7
SOL+GMGotm+BAT	7	5	6	7
SOL+GMGpro+BAT	7	5	6	7

Tabela 64 - Vetores de prioridade das alternativas em função dos subcritérios Tecnológico pertencente a propriedade A, B e C

Fontes dos projetos de referência	VP - T1	VP - T2	VP - T3	VP - T4
SOL+BAT	0,0486	0,0769	0,1365	0,0789
SOL+EOL+BAT	0,0486	0,0769	0,0356	0,0287
GMG	0,6117	0,6923	0,5547	0,2975
SOL+GMGotm+BAT	0,1456	0,0769	0,1365	0,2975
SOL+GMGpro+BAT	0,1456	0,0769	0,1365	0,2975

Tabela 65 - Vetor de prioridade das alternativas em função do critério Tecnológico pertencente a propriedade A, B e C

Fontes dos projetos de referência	VP - TCNL
SOL+BAT	0,0969
SOL+EOL+BAT	0,0422
GMG	0,5137
SOL+GMGotm+BAT	0,1736
SOL+GMGpro+BAT	0,1736

A Tabela 65 apresenta que no critério Tecnológico a fonte GMG possui uma grande prioridade em relação as demais fontes nesta avaliação. Para todos os

sistemas SIGFI 600 o vetor resultante será o da Tabela 65, pelo fato deste critério não ser um parâmetro espacial e, portanto, não varia a avaliação dos projetos de referência dos subcritérios/critério para cada propriedade.

Em relação aos subcritérios Regulatório, os valores brutos das três propriedades possuem os mesmos valores e são adquiridos pelo algoritmo para cada projeto de referência SIGFI 600 kWh/mês, os quais podem ser verificados na Tabela 66. Através destes valores o algoritmo calcula a matriz de julgamentos para cada subcritério Regulatório obtendo o vetor de prioridades (VP) para cada subcritério, os quais podem ser vistos na Tabela 67. Com estes vetores de prioridades o algoritmo calcula o vetor de prioridade do critério Regulatório, o qual pode ser analisado na Tabela 68.

Tabela 66 - Dados brutos dos subcritérios Regulatório pertencentes a propriedade A, B e C

Fontes dos projetos de referência	R1	R2	R3
SOL+BAT	BAIXA	BAIXA	NÃO
SOL+EOL+BAT	BAIXA	BAIXA	NÃO
GMG	BAIXA	BAIXA	PREC
SOL+GMGotm+BAT	BAIXA	BAIXA	PREC
SOL+GMGpro+BAT	BAIXA	BAIXA	REC

Tabela 67 - Vetores de prioridade das alternativas em função dos subcritérios Regulatório pertencente a propriedade A, B e C

Fontes dos projetos de referência	VP – R1	VP – R2	VP – R3
SOL+BAT	0,2	0,2	0,3969
SOL+EOL+BAT	0,2	0,2	0,3969
GMG	0,2	0,2	0,0379
SOL+GMGotm+BAT	0,2	0,2	0,0379
SOL+GMGpro+BAT	0,2	0,2	0,1306

Tabela 68 - Vetor de prioridade das alternativas em função do critério Regulatório pertencente a propriedade A, B e C

Fontes dos projetos de referência	VP - RGLT
SOL+BAT	0,2496
SOL+EOL+BAT	0,2496
GMG	0,1592
SOL+GMGotm+BAT	0,1592
SOL+GMGpro+BAT	0,1825

A Tabela 68 apresenta que no critério Regulatório a fonte SOL+BAT e SOL+EOL+BAT são prioritários, em relação as demais fontes, e possuem o mesmo valor nesta avaliação. Para todos os sistemas SIGFI 600 o vetor resultante será o da Tabela 68, pelo mesmo motivo que o critério Tecnológico.

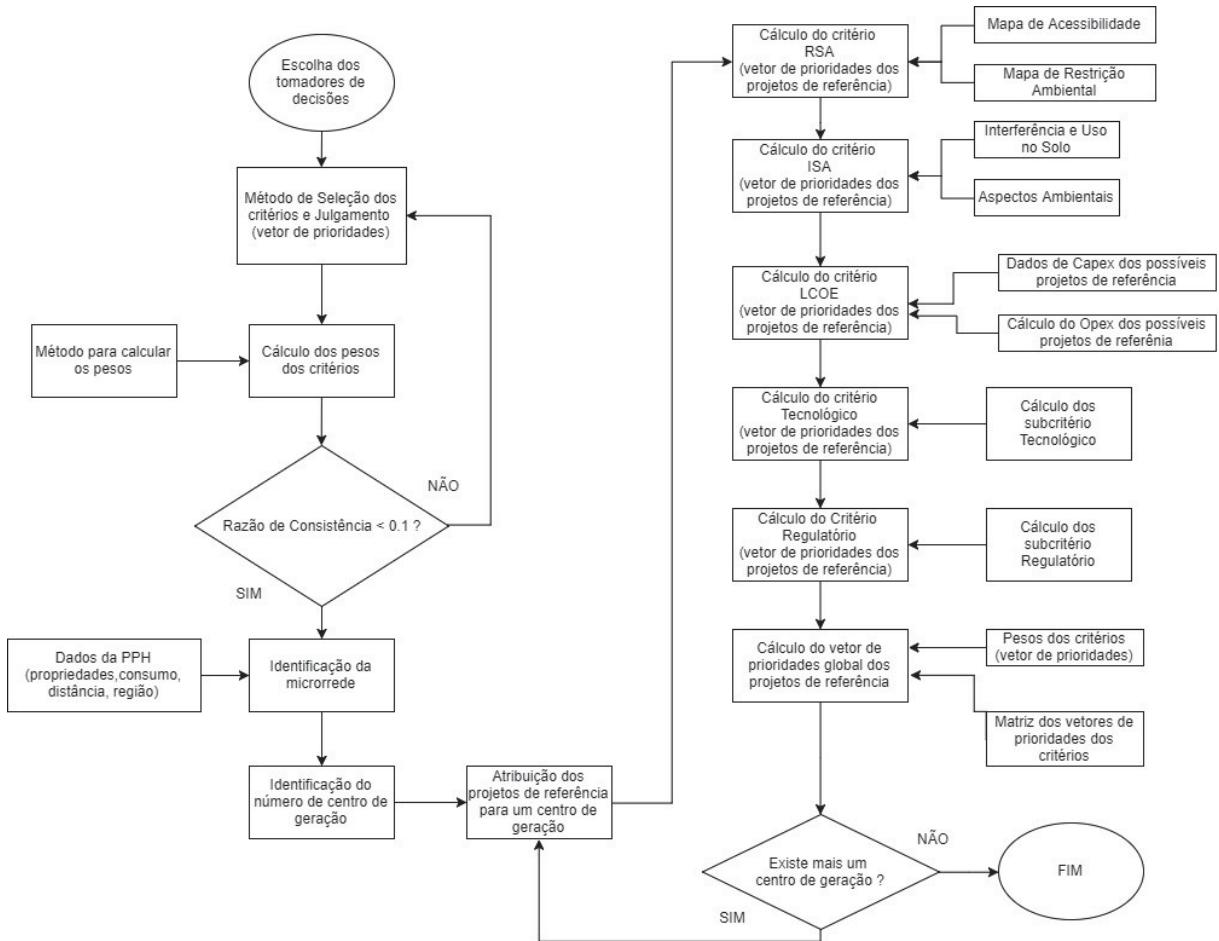
7.2 CENÁRIO 2

A metodologia multicritério espacial também funciona para microrredes, porém o método não constrói as microrredes. Isto é, as microrredes avaliadas já estão estruturadas, a função do algoritmo é indicar a melhor opção de geração energia (as conexões entre as propriedades são definidas antes da simulação, sendo que a microrrede já foi validada eletricamente, passou pela análise elétrica de fluxo de potência - fluxo convergir e níveis de tensão em regime permanente estar em nível adequado). Contudo, este cenário tem o objetivo de mostrar o resultado dos projetos de referência ranqueados como centros de geração pelo método multicritério espacial para duas microrredes (Micro1 e Micro2).

Os centros de geração são os projetos de referência que foram ranqueados como melhor opção para suprir o consumo de uma microrrede. Em relação a Micro1 a metodologia multicritério espacial resultou em dois projetos de referência ambos de fonte SOL+BAT, enquanto que para a Micro2 a metodologia multicritério espacial resultou em dois projetos de referência de fonte GMG e SOL+BAT. Desta forma as duas microrredes são apresentadas através dos seus dados brutos de entrada do algoritmo multicritério espacial para microrrede, assim como os vetores de prioridades

de cada critério. O processo da metodologia multicritério espacial para microrrede é o processo de metodologia multicritério espacial para sistemas isolado com uma pequena modificação, a qual pode ser verificada na Figura 33.

Figura 33 - Fluxograma da metodologia multicritério espacial para microrrede



Como pode ser verificado na Figura 33 a grande diferença da metodologia multicritério espacial para microrrede em relação para sistema isolado é o processo de identificar o número de centros de geração. O centro de geração foi determinado como um projeto de referência de no máximo 1.000 kWh/mês em uma propriedade de uma microrrede, isto porque para sistemas maiores se torna inviável a instalação devida as dificuldades de instalação em campo.

A Micro 1 possui um consumo total de 1.580 kWh/mês composta por nove propriedades e a Micro2 possui um consumo de 1.081 kWh/mês composta por três propriedades. Ambas as microrredes têm dois centros de geração, a Micro1 tem um sistema de 1.000 e 600 kWh/mês e a Micro2 tem um sistema de 1.000 e 160 kWh/mês.

Os dados da Micro1 e Micro2 podem ser vistos respectivamente na Tabela 69 e Tabela 70.

Tabela 69 - Dados das propriedades pertencentes a Micro1

Propriedade	Consumo (kwh/mês)	Tipo de área
01	458,36	Áreas Agropastoris
02	328,59	Áreas Agropastoris
03	194,35	Áreas Agropastoris
04	109,98	Áreas Campestres
05	178,70	Áreas Agropastoris
06	143,80	Áreas Agropastoris
07	50,91	Áreas Campestres
08	18,81	Áreas Agropastoris
09	96,48	Áreas Campestres

Tabela 70 - Dados das propriedades pertencentes a Micro2

Propriedade	Consumo (kwh/mês)	Tipo de área
01	600	Corpos Hídricos
02	300	Corpos Hídricos
03	181,34	Corpos Hídricos

Como verificado na Figura 33, o primeiro critério analisado é o RSA para o primeiro centro de geração (CG1) da Micro1, localizado em uma área média de restrição e na região de Aquidauana. Para o centro de geração da Micro 2 os valores adquiridos são restrição alta e a região Paraguai. Os dados brutos total do RSA para o CG1 da Micro1 e Micro 2 podem ser verificados na Tabela 71, assim como o vetor de prioridades das fontes dos projetos de referência podem ser verificadas na Tabela 72 e Tabela 73.

Tabela 71 - Dados brutos do critério RSA do primeiro centro de geração da Micro1 e Micro2

Restrição Sócioambiental	SOLAR	SOLAR + GMG	GMG
CG1 – Micro1	1	1	1
CG1 – Micro2	1	1	1

Tabela 72 - Vetor de prioridade das fontes do projeto de referência MIGDI 1000 do primeiro centro de geração da Micro1

Fontes dos projetos de referência	Vetor de prioridades
GMG	0,3333
SOL+BAT	0,3333
SOL+GMGotm+BAT	0,3333

Tabela 73 - Vetor de prioridade das fontes do projeto de referência MIGDI 1000 do primeiro centro de geração da Micro2

Fontes dos projetos de referência	Vetor de prioridades
GMG	0,3333
SOL+BAT	0,3333
SOL+GMGotm+BAT	0,3333

O segundo critério analisado para o CG1 das microrredes é o ISA. Com os dados do tipo da área do CG1 de cada microrrede, Tabela 69 e Tabela 70, o algoritmo calcula o valor bruto do ISA. Os dados brutos total do ISA para o CG1 da Micro1 e Micro 2 podem ser verificados na Tabela 74, assim como o vetor de prioridades das fontes dos projetos de referência podem ser verificadas na Tabela 75 e Tabela 76.

Tabela 74 - Dados brutos do critério ISA pertencentes ao CG1 da Micro1 e Micro2

Índice Sócioambiental	SOLAR	SOLAR + GMG	GMG
CG1 da Micro1	31	45	51
CG1 da Micro2	35	61	67

Tabela 75 - Vetor de prioridade das fontes do projeto de referência do CG1 em relação ao critério ISA da Micro1

Fontes dos projetos de referência	Vetor de prioridades
GMG	0,0634
SOL+BAT	0,7629
SOL+GMGotm+BAT	0,1736

Tabela 76 - Vetor de prioridade das fontes do projeto de referência do CG1 em relação ao critério ISA da Micro2

Fontes dos projetos de referência	Vetor de prioridades
GMG	0,0675
SOL+BAT	0,7861
SOL+GMGotm+BAT	0,1463

O LCOE é o terceiro critério analisado para o CG1 das microrredes. A distância entre o CG1 e Corumbá da Micro1 é de 150,3 km com acesso aéreo mais 8,35 km de acesso terrestre e da Micro2 é de 123 km com acesso aquático. Além disso a Micro1 tem um comprimento de cabos de 1,67 km (35 mm^2) e a Micro 2 tem um comprimento de 63 m (35 mm^2). A configuração da microrrede considera que a cada 40 m tem um poste duplo T por R\$ 445,73 (cabo de 35 mm^2) ou R\$ 703,84 (cabo de 70 mm^2). Os custos de CAPEX relacionados a materiais, mão-de-obra e custos administrativos/engenharia para construir uma microrrede pode ser visto na Tabela 77 e Tabela 78.

Tabela 77 - Custos de CAPEX para a estrutura de uma microrrede

Custos de microrrede por km	Custos de CAPEX para microrrede			
	Materiais	Mão-de-obra de terceiros	Custos administrativos e de engenharia	TOTAL
Cabo de 35 mm^2	R\$ 25.366,46	R\$ 16.443,69	R\$ 5.650,93	R\$ 47.461,08
Cabo de 70 mm^2	R\$ 36.092,10	R\$ 22.950,56	R\$ 8.207,27	R\$ 67.249,93

Tabela 78 - Custos de CAPEX detalhado dos materiais

Custos de microrrede por km	Detalhamento para TUC e A1 (Manual MPCSE ANEEL)			
	Poste completo duplo T	Rede secundária condutor fase	Rede secundária condutor neutro	Ferragens, conexões e amarrações
Cabo de 35 mm^2	R\$ 11.143,34	R\$ 7.085,37	R\$ 5.386,90	R\$ 1.750,85
Cabo de 70 mm^2	R\$ 17.596,04	R\$ 11.834,70	R\$ 5.386,90	R\$ 1.274,46

Desta forma o algoritmo calcula o CAPEX da fonte e da microrrede, o OPEX da fonte e o LCOE da microrrede. Os valores de LCOE dos projetos de referência para o CG1 da Micro1 e Micro 2 podem ser verificados na Tabela 79, assim como o vetor de prioridades das fontes dos projetos de referência podem ser verificadas na Tabela 80 e Tabela 81.

Tabela 79 - Valor do LCOE dos projetos de referência do CG1 para a Micro1 e Micro2

LCOE (R\$/kWh)	SOL +BAT	GMG	SOL+GMGotm+ + BAT
CG1 – Micro1	9,86	11,55	10,50
CG1 – Micro2	7,78	6,93	7,53

Tabela 80 - Vetor de prioridade das fontes do projeto de referência do CG1 em relação ao critério LCOE da Micro1

Fontes dos projetos de referência	Vetor de prioridades
GMG	0,0581
SOL+BAT	0,7120
SOL+GMGotm+BAT	0,2299

Tabela 81 - Vetor de prioridade das fontes do projeto de referência do CG1 em relação ao critério LCOE da Micro2

Fontes dos projetos de referência	Vetor de prioridades
GMG	0,7629
SOL+BAT	0,0634
SOL+GMGotm+BAT	0,1736

A próxima avaliação na metodologia é a dos subcritérios tecnológicos para os projetos de referência 1.000 kWh/mês. O algoritmo calcula a matriz de julgamentos para cada subcritério, considerando os dados brutos apresentados na seção Critério Tecnológico, obtendo o vetor de prioridades (VP) para cada subcritério. Com estes vetores de prioridades o algoritmo calcula o vetor de prioridade do critério Tecnológico para o CG1 da Micro1 e Micro2, os quais podem ser analisados na Tabela 65.

Tabela 82 - Vetor de prioridade das alternativas do projeto de referência do CG1 em função do critério Tecnológico para Micro 1 e Micro 2

Fontes dos projetos de referência	VP – TCNL Micro 1	VP – TCNL Micro 2
GMG	0,7127	0,7127
SOL+BAT	0,0761	0,0761
SOL+GMGotm+BAT	0,2112	0,2112

O último critério a ser avaliado na metodologia multicritério espacial é o Regulatório. O algoritmo calcula a matriz de julgamentos para cada subcritério em

relação aos projetos de referência 1.000 kWh/mês, considerando os dados brutos apresentados na seção Critério Regulatório, obtendo o vetor de prioridades (VP) para cada subcritério. Com estes vetores de prioridades o algoritmo calcula o vetor de prioridade do critério Regulatório para o CG1 da Micro1 e Micro2, os quais podem ser analisados na Tabela 83.

Tabela 83 - Vetor de prioridade das alternativas do projeto de referência do critério Regulatório para Micro 1 e Micro 2

Fontes dos projetos de referência	VP – RGLT Micro 1	VP – RGLT Micro 2
GMG	02723	02723
SOL+BAT	0,4554	0,4554
SOL+GMGotm+BAT	0,2723	0,2723

Depois que todos os critérios foram avaliados, o algoritmo calcula o vetor de prioridade global, o qual apresenta a melhor alternativa entre os projetos de referência de diferentes fontes em relação aos cinco critérios analisados. Os vetores de prioridade global para o CG1 da Micro1 e Micro2 podem ser analisados na Tabela 84.

Tabela 84 - Vetores de prioridade global do CG1 da Micro1 e Micro2

Fontes dos projetos de referência	Vetor de prioridades global	
	CG1 - Micro1	CG1 - Micro2
GMG	0,1664	0,4205
SOL+BAT	0,6000	0,3745
SOL+GMGotm+BAT	0,2335	0,2050

O último processo que o algoritmo verifica na metodologia multicritério espacial para microrrede é a verificação de outro centro de geração, conforme a Figura 33. Em ambas microrrede existe outro centro de geração, no caso da Micro1 um sistema de 600 kWh/mês e na Micro2 um sistema de 160 kWh/mês. Desta forma, o segundo centro de geração (CG2) de cada microrrede vai ser instalado na propriedade que possuir o segundo maior consumo. E consequentemente todas as avaliações dos critérios serão realizadas para o CG2 de cada microrrede.

Na avaliação do critério RSA para o CG2 da Micro1 o algoritmo utiliza as informações de restrição média e região Aquidauana, assim como para o CG2 da Micro2 o algoritmo adquirir a informação de restrição alta e região do Paraguai. Os resultados dos valores brutos do CG2 da Micro1 e Micro2 podem ser vistos na Tabela 85. Os vetores de prioridade do CG2 da Micro1 e Micro2 se encontram na Tabela 86.

Tabela 85 - Dados brutos do critério RSA do segundo centro de geração da Micro1 e Micro2

Restrição Sócioambiental	SOLAR	SOLAR + EÓLICA	SOLAR + GMG	GMG
CG2 – Micro1	2	2	1	1
CG2 – Micro2	2	1	-	1

Tabela 86 - Vetores de prioridade das fontes dos projetos de referência MIGDI 600 e 160 respectivamente do CG2 da Micro1 e Micro2 em relação ao RSA

Fontes dos projetos de referência	Vetor de prioridades	
	Micro1	Micro2
SOL+BAT	0,4286	0,8182
SOL+EOL+BAT	0,4286	0,0909
GMG	0,0476	0,0909
SOL+GMGotm+BAT	0,0476	-
SOL+GMGpro+BAT	0,0476	-

Na avaliação do ISA em relação ao CG2 das microrredes, o algoritmo calcula o valor bruto deste critério através do índice uso e interferência no solo e os demais 11 índices. Os dados brutos total do ISA para os projetos de referência na avaliação do CG2 da Micro1 e Micro 2 podem ser verificados na Tabela 87, assim como o vetor de prioridades das fontes dos projetos de referência podem ser verificadas na Tabela 88.

Tabela 87 - Dados brutos do critério ISA pertencentes ao CG2 da Micro1 e Micro2

Índice Sócioambiental	SOLAR	SOLAR + EÓLICA	SOLAR + GMG	GMG
CG2 – Micro1	31	65	45	51
CG2 – Micro2	35	69	-	67

Tabela 88 - Vetores de prioridade das fontes dos projetos de referência MIGDI 600 e 160 respectivamente do CG2 da Micro1 e Micro2 em relação ao ISA

Fontes dos projetos de referência	Vetor de prioridades	
	Micro1	Micro2
SOL+BAT	0,4753	0,8084
SOL+EOL+BAT	0,0600	0,0740
GMG	0,1287	0,1176
SOL+GMGotm+BAT	0,2098	-
SOL+GMGpro+BAT	0,2098	-

Em relação ao critério LCOE, a avaliação do CG2 das microrredes considera apenas o CAPEX, OPEX e LCOE do projeto de referência (os custos da rede da microrrede já foi considerada no CG1). Na avaliação do CG2 também é considerado a distância entre CG2 e Corumbá, pois no custo de logística é considerado a capacidade de massa máxima a ser transportada. Os valores de LCOE dos projetos de referência para o CG2 da Micro1 e Micro 2 podem ser verificados na Tabela 89, assim como os vetores de prioridade das fontes dos projetos de referência MIGDI 600 e MIGDI 160 podem ser verificadas na Tabela 90.

Tabela 89 - Valor do LCOE dos projetos de referência MIGDI 600 e 160 respectivamente do CG2 da Micro1 e Micro2

LCOE (R\$/kWh)	SOL +BAT	SOLAR + EÓLICA	GMG	SOL+GMGotm+ + BAT	SOL+GMGpro+ + BAT
CG2 – Micro1	10,78	10,97	16,28	10,71	12,94
CG2 – Micro2	26,49	42,43	32,62	-	-

Tabela 90 - Vetores de prioridade das fontes dos projetos de referência MIGDI 600 e 160 respectivamente do CG2 da Micro1 e Micro2 em relação ao LCOE

Fontes dos projetos de referência	Vetor de prioridades	
	Micro1	Micro2
SOL+BAT	0,2907	0,7120
SOL+EOL+BAT	0,2140	0,0581
GMG	0,0283	0,2299
SOL+GMGotm+BAT	0,3864	-
SOL+GMGpro+BAT	0,0806	-

A lógica da avaliação do critério Tecnológico do CG2 na metodologia multicritério espacial é a mesma descrita para o CG1, com a única diferença em relação aos projetos de referência avaliados no MIGDI 600 e 160. Os vetores de prioridade do critério Tecnológico para o CG2 da Micro1 e Micro2 podem ser verificados na Tabela 91.

Tabela 91 - Vetores de prioridade das fontes dos projetos de referência MIGDI 600 e 160 respectivamente do CG2 da Micro1 e Micro2 em relação ao TCNL

Fontes do projeto de referência	Vetor de prioridades Micro1	Vetor de prioridades Micro2
SOL+BAT	0,0969	0,1761
SOL+EOL+BAT	0,0422	0,0707
GMG	0,5137	0,7533
SOL+GMGotm+BAT	0,1736	-
SOL+GMGpro+BAT	0,1736	-

A última avaliação do CG2 é em relação ao critério Regulatório, o qual possui a mesma lógica descrita na avaliação deste critério para CG1. Os vetores de prioridade para o CG2 da Micro1 e Micro2 em relação ao critério Regulatório podem ser verificados Tabela 92.

Tabela 92 - Vetores de prioridade das fontes dos projetos de referência MIGDI 600 e 160 respectivamente do CG2 da Micro1 e Micro2 em relação ao RGLT

Fontes dos projetos de referência	Vetor de prioridades Micro1	Vetor de prioridades Micro2
SOL+BAT	0,2496	0,4513
SOL+EOL+BAT	0,2496	0,4513
GMG	0,1592	0,0973
SOL+GMGotm+BAT	0,1592	-
SOL+GMGpro+BAT	0,1825	-

Depois do CG2 da Micro1 e Micro 2 ser avaliado por todos os critérios, o algoritmo sintetiza todas as avaliações através do vetor de prioridade global, considerando os pesos dos critérios atribuídos pelos tomadores de decisão. Os vetores de prioridade global para o CG2 da Micro1 e Micro2 podem ser analisados na Tabela 93.

Tabela 93 - Vetores de prioridade global do CG2 da Micro1 e Micro2

Fontes dos projetos de referência	Vetor de prioridade global CG2 - Micro1	Vetor de prioridade global CG2 - Micro2
SOL+BAT	0,3533	0,6972
SOL+EOL+BAT	0,1965	0,1161
GMG	0,1048	0,1867
SOL+GMGotm+BAT	0,2389	-
SOL+GMGpro+BAT	0,1320	-

Com os valores de LCOE do CG1 e CG2 da Micro1 e Micro2 calcula-se o LCOE total da microrrede. O resultado deste LCOE é através de uma média ponderada. O LCOE da Micro1 pode ser visto na equação 26, assim como o LCOE da Micro2 na equação 27.

$$LCOE_{Micro1} = \frac{LCOE_{CG1} * 1.000 + LCOE_{CG2} * 580}{(1.000 + 580)} = 10,20 \quad (26)$$

$$LCOE_{Micro2} = \frac{LCOE_{CG1} * 1.000 + LCOE_{CG2} * 81}{(1.000 + 81)} = 8,39 \quad (27)$$

8 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

A acessibilidade da eletricidade é de fundamental importância para as atividades socioeconômicas, para a saúde e para o bem-estar do ser humano. No início deste milênio, o Brasil instaurou o maior programa de universalização de energia elétrica em todo o país, o Luz para Todos. O país vem investindo no planejamento energético de forma que os programas estabelecidos reverberaram em toda a nação. O poder público incentiva projetos e programas incumbindo investidores a contribuir no desenvolvimento da eletrificação rural através de financiamentos, assistência técnica e implantação de empreendimentos.

O planejamento de sistemas de suprimento energético para a eletrificação rural expõe problemas de caráter multidimensional. A literatura científica apresenta como soluções matemáticas mais realistas, os métodos multicritério e/ou multiobjetivo. Desta forma, a dificuldade de correlatar os fatores técnico-econômicos e socioambientais motivam a empregar metodologias de tomada de decisões multicritério. Em vista disso, este trabalho teve a finalidade de desenvolver uma metodologia multicritério espacial, fundamentada em cinco critérios, para avaliar os sistemas *off-grid* como alternativas de eletrificação rural.

A metodologia desenvolvida é concebida com o método AHP recorrendo a dados de sistema de informação geográfica. Através desta avaliação espacial foi possível aproveitar os dados adquiridos em trabalhos de campo, contribuindo para uma análise mais robusta e auxiliando de forma holística o entendimento do problema. Esta análise espacial foi realizada na região do Pantanal Sul-Mato-Grossense.

O método proposto mensura as alternativas de sistemas *off-grid* para uma determinada propriedade, por nível hierárquico, através dos critérios: restrição ambiental, impacto socioambiental, custo nivelado de energia (LCOE), tecnológico e regulatório. Esses critérios foram identificados pelos tomadores de decisão através do método Delphi a analisados como dados quantitativos e qualitativos. Entre os tomadores de decisão estão seis profissionais especializados em áreas afins dos critérios. Os pesos subjetivos e objetivos foram determinados com o método de ponderação da média da coluna normalizada aplicando a escala fundamental de Saaty na matriz de julgamentos. Os vetores de prioridade de pesos, dos critérios e das alternativas, nesta metodologia funcionam com lógica de maximização (quanto maior o peso, melhor a alternativa)

A partir das Pesquisas de Posses e Hábito (PPH) foi possível estimar os consumos de energia elétrica das propriedades do Pantanal. Com estes valores e os dados de disponibilidade energética local, com o SIG, foi dimensionado as alternativas *off-grid* tomando em conta as regras da resolução normativa 493/2012 da ANEEL. Os projetos de referência avaliados nesta metodologia são constituídos pelas disponibilidades mensais garantida por norma, além de mais cinco disponibilidades originadas pelos dados da PPH feita no Pantanal Sul-Mato-Grossense.

A metodologia espacial para eletrificação rural de sistemas *off-grid* foi implementada na plataforma MATLAB® em dois algoritmos, um para sistemas isolados e outro para microrredes. As propriedades que resultaram como melhor opção os sistemas com gerador a diesel ou os sistemas híbridos (fotovoltaica com baterias e diesel) estão situadas em regiões próxima a cidade de Corumbá e sua grande são ribeirinhos. Pelo fato destas propriedades ter fácil acessibilidade a Corumbá, o valor de LCOE dos sistemas a diesel diminui em função da redução de custos de OPEX da logística/transporte por causa da distância. Desta forma, os projetos de referência a diesel acabam resultando em valores de LCOE inferiores que os valores de LCOE dos sistemas fotovoltaicos com baterias.

Nos resultados da microrrede é interessante analisar que na metodologia existe a possibilidade da microrrede de possuir mais de um projeto de referência e com diferentes fontes. Tanto em microrrede como em sistema isolado verifica-se que mesmo muitas vezes o projeto de referência a diesel tendo prioridade no critério tecnológico e econômico, a metodologia resulta na solução fotovoltaica como melhor opção contrabalanceando através dos critérios ambientais e regulatórios. Os resultados obtidos são diretamente proporcionais a avaliação dos tomadores de decisão, portanto, uma variação nos pesos dos critérios influência no resultado da metodologia multicritério espacial.

Como trabalhos futuros sugere-se algumas mudanças na metodologia dos critérios. Uma delas é utilizar outra métrica para avaliar os critérios qualitativos, como a Restrição Ambiental e o tecnológico. Além disso, mudar a forma de avaliar a matriz de julgamentos, utilizando outra escala de avaliação e até mesmo outro método de ponderação. Outra sugestão é desenvolver uma metodologia espacial através de um método da escola Europeia ou modelar o problema com uma metodologia multiobjetivo. A metodologia multicritério espacial também pode aderir a novos critérios e novas alternativas de sistema *off-grid*. Realizar um estudo de impacto

tarifário, considerando e desconsiderando o subsídio do LPT, para eletrificar as 1975 propriedade analisadas. Em relação a microrredes é possível em um trabalho futuro otimizar o tamanho dos centros de geração de energia, o qual pode ser feito através de algoritmos genéticos. A metodologia também pode ser modificada e ser utilizada para outro objetivo de planejamento energético, como por exemplo identificar a melhor tecnologia a ser instalada em uma usina heliotérmica, fotovoltaica e/ou eólica.

REFERÊNCIAS

(ANEEL), A. N. D. E. E. RESOLUÇÃO NORMATIVA N° 488, DE 15 DE MAIO DE 2012. 2012.

AGENCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. 10.438, de 26 de abril de 2002, alterada pelas Leis n. 2003.

AGENCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. RESOLUÇÃO NORMATIVA N° 175, DE 28 DE NOVEMBRO DE 2005. , 2005.

AGENCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. RESOLUÇÃO NORMATIVA N° 365 DE 19 DE MAIO DE 2009. 2009.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. RESOLUÇÃO NORMATIVA N° 83, DE 20 DE SETEMBRO DE 2004. 2004.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. RESOLUÇÃO NORMATIVA N° 414, DE 9 DE SETEMBRO DE 2010. 2010.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Resolução Normativa N° 493, De 5 De Junho De 2012. 2012.

AHAMMED, F.; AZEEM, A. Selection of the most appropriate package of Solar Home System using Analytic Hierarchy Process model in rural areas of Bangladesh.

Renewable Energy, 2013. Elsevier. Disponível em:

<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148112007860>>..

ALONSO, J. A.; LAMATA, M. T. Consistency in the analytic hierarchy process: a new approach. **International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems**, v. 14, n. 4, p. 445–459, 2006.

AMARANTE, O. A. C. DO; BROWER, M.; ZACK, J.; SÁ, A. L. DE. ATLAS DO POTENCIAL EÓLICO BRASILEIRO. Disponível em:

<http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/atlas_eolico/Atlas do Potencial Eolico Brasileiro.pdf>..

ANEEL. PRODIST Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica. Brasil, 2010.

- ANEEL, A. N. DE E. E. Submódulo 2.4 Custo de Capital. , 2015.
- ARAÚJO, H. DE A. B. T.; CAVALCANTE, C. A. V.; NASCIMENTO, L. P. N. DO. APLICAÇÃO DE UMA ABORDAGEM MULTICRITÉRIO PARA SUBSTITUIÇÃO DE COMPONENTE DE EQUIPAMENTO MÉDICO:UM ESTUDO DE CASO. , p. 482–491, 2010.
- BAJWA, G.; CHOO, E. U.; WEDLEY, W. C. EFFECTIVENESS ANALYSIS OF DERIVING PRIORITY VECTORS FROM RECIPROCAL PAIRWISE COMPARISON MATRICES. **Asia-Pacific Journal of Operational Research**, v. 25, n. 3, p. 279–299, 2008.
- BANA E COSTA, C. A.; DE CORTE, J.-M.; VANSNICK, J.-C. Macbeth. **Working Paper LSEOR**, p. 1–40, 2003. Disponível em: <<http://eprints.lse.ac.uk/22761>>..
- BHATTACHARYYA, S. C.; PALIT, D. Mini-grid based off-grid electrification to enhance electricity access in developing countries: What policies may be required? **Energy Policy**, v. 94, p. 166–178, 2016. Elsevier. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2016.04.010>>..
- BHUSHAN, N.; RAI, K. **Strategic Decision Making: Applying the Analytic Hierarchy Process**. Springer, 2004.
- BRANS, J. P. “L’ingénierie de la décision. L’élaboration d’instruments d’aide à la décision”. Quebec, 1982.
- BRANS, J. P.; MARESCHAL., B. Promethee V – MCDM problems with segmentation constraints. **INFOR**, v. 30(2), p. 85–96, 1992.
- BRANS, J. P.; MARESCHAL, B. The PROMETHEE VI procedure. How to differentiate hard from soft multicriteria problems. **Journal of Decision Systems**, v. 4, p. 213–223, 1995.
- BRANS, J. P.; MARESCHAL, B. PROMETHEE methods. **Multiple criteria decision analysis: state of the art ...**, 2005. Springer. Disponível em: <http://link.springer.com/chapter/10.1007/0-387-23081-5_5>..
- BRANS, J. P.; VINCKE, P.; MARESCHAL, B. How to select and how to rank projects:

The Promethee method. **European Journal of Operational Research**, v. 24, n. 2, p. 228–238, 1986.

CAETANI, A. P. Uso De Método Multicritério Para Seleção De Estratégia De Reconversão Industrial Em Uma Refinaria De Petróleo, 2014.

CARDOSO, F. H.; BRITO, R. **LEI N° 9.427, DE 26 DE DEZEMBRO DE 1996**. 1996.

CARDOSO, F. H.; MALAN, P.; AMARAL, S. S. DO; GIMODE, F. L. S.; GIANNI, S. **LEI N° 10.438, DE 26 DE ABRIL DE 2002**. 2002.

CARDOSO, F. H.; NETO, R. T. **DECRETO 2 DE DEZEMBRO DE 1999**. 1999.

CHERNI, J. A.; DYNER, I.; HENAO, F.; et al. Energy supply for sustainable rural livelihoods. A multi-criteria decision-support system. **Energy Policy**, 2007. Elsevier. Disponível em:

<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421506001662>>..

COLOR, F. LEI N° 8.171, DE 17 DE JANEIRO DE 1991. 1991.

CRESESB. FONTES DE DADOS EÓLICO E SOLARES. Disponível em:

<http://www.creesesb.cepel.br/index.php?section=com_content&cid=fontes_dados_vento_sol>..

CRESESB. CENTRO DE REFERÊNCIA PARA ENERGIA SOLAR E EÓLICA SÉRGIO BRITO. Disponível em: <<http://www.creesesb.cepel.br/>>..

DAIMON. Pesquisa de posse de equipamentos e hábitos de consumo Enersul. 2012.

DERVISHI, A.; KADRIU, I. Decision Making Under the Conditions of Risk and Uncertainty in Some Enterprises of. , v. 1, n. February, p. 224–228, 2014.

DIEMUODEKE, E. O.; HAMILTON, S.; ... Multi-criteria assessment of hybrid renewable energy systems for Nigeria's coastline communities. **Energy, Sustainable an Society**, 2016. [energsustainsoc.springeropen.com](https://energsustainsoc.springeropen.com/articles/10.1186/s13705-016-0092-x). Disponível em: <<https://energsustainsoc.springeropen.com/articles/10.1186/s13705-016-0092-x>>..

DOMÍNGUEZ, J.; PINEDO-PASCUA, I. GIS tool for rural electrification with

renewable energies in Latin America. **Proceedings of the International Conference on Advanced Geographic Information Systems and Web Services, GEOWS 2009**, p. 171–176, 2009.

DRUCK, S.; CARVALHO, M. S.; CÂMARA, G.; MONTEIRO, A. V. M. **Análise Espacial de Dados Geográficos**. Brasília, 2004.

EHRLICH, P. J. Modelos quantitativos de apoio às decisões - II. **RAE - Revista de Administração de Empresas**, p. 44–52, 1996.

ELETROBRÁS. Conta de Consumo de Combustíveis. Disponível em:
<https://www.eletrobras.com/elb/data/Pages/LUMISBDD9AB86PTBRIE.htm>..

ENSSLIN, L.; ENSSLIN, S. R.; LACERDA, R. T. O.; TASCA, J. E. Processo de Seleção de Portfólio Bibliográfico. , 2010.

ESTRELLA MALDONADO, R.; DELABASTITA, W.; WIJFFELS, A.; VAN ORSHOVEN, J. Comparison of discrete multi-criteria decision making methods for selection of afforestation sites. **Proceedings of the Spatial Analysis and Geomatics 2012 conference, 6-9 Novembe**, p. 182–197, 2012. Disponível em:
http://orbi.ulg.ac.be/bitstream/2268/133126/1/PROCEEDINGS_A4.pdf#page=198.

FAGUNDES, W. DE C. **Estimativa do fator de carga (FC) e fator de demanda (FD) de consumidores de Energia elétrica via medição e pesquisa de posses e hábitos**, 2011. Universidade Católica do Rio de Janeiro. Disponível em:
https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/Busca_etds.php?strSecao=resultado&nrSeq=18618@1..

FERREIRA, L.; MOURA, G. L. DE; BORENSTEIN, D.; FISCHMANN, A. A. the Use of Artificial Neural Networks As a Strategy for Forecasting Prices in the Context of Agribusiness. **Review of Administration and Innovation - RAI**, v. 8, n. 4, 2012. Disponível em: <<http://www.revistas.usp.br/rai/article/view/79235>>..

FIGUEIRA, J.; GRECO, S.; EHRGOTT, M. **MULTIPLE CRITERIA DECISION ANALYSIS: State of the Art Sureys**. 2005.

FILHO, X. V.; DUTRA, R. M. **PRODEEM: PROGRAMA PARA O DESENVOLVIMENTO DA ENERGIA NOS ESTADOS E MUNICÍPIOS.** 1997.

FONSECA, A. G.; LANGNER, A. L.; SALAMANCA, H. L. L.; et al. **Building Integrated Photovoltaics for smart grids.** Montevideo, 2015.

FRANEK, J.; KRESTA, A. Judgment Scales and Consistency Measure in AHP. **Procedia Economics and Finance**, v. 12, n. March, p. 164–173, 2014.

FUSO NERINI, F.; HOWELLS, M.; BAZILIAN, M.; GOMEZ, M. F. Rural electrification options in the Brazilian Amazon. A multi-criteria analysis. **Energy for Sustainable Development**, v. 20, n. 1, p. 36–48, 2014.

GOMES, L. F. A. ; ARAYA, M. C. G.; CARIGNANO, C. **Tomada de decisões em cenários complexos.** São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2004.

GOMES, L. F. A. M.; RANGEL, L. A. D. An application of the TODIM method to the multicriteria rental evaluation of residential properties. **European Journal of Operational Research**, v. 193, n. 1, p. 204–211, 2009.

GÓMEZ, M. F.; SILVEIRA, S. Rural electrification of the Brazilian Amazon - achievements and lessons. **Energy Policy**, v. 38, n. 10, p. 6251–6260, 2010.

GÓMEZ, M. F.; SILVEIRA, S. Increasing human development in isolated communities through electricity access : the case of the Amazon region Maria F . Gómez , Semida Silveira Energy and Climate Studies , ECS. , 2011.

GÓMEZ, M. F.; SILVEIRA, S. The last mile in the Brazilian Amazon - A potential pathway for universal electricity access. **Energy Policy**, v. 82, n. 1, p. 23–37, 2015. Elsevier. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2015.02.018>>..

GYORI, D. F. S. PROPOSTA DE METODOLOGIA DE AUXÍLIO À DECISÃO UTILIZANDO CONJUNTOS FUZZY PARA REPOTENCIACÃO DE PCHS, 2012.

HAANYIKA, C. M. Rural electrification policy and institutional linkages. **Energy Policy**, v. 34, n. 17, p. 2977–2993, 2006.

HENAO, F.; CHERNI, J. A.; JARAMILLO, P.; DYNER, I. A multicriteria approach to

sustainable energy supply for the rural poor. **European Journal of Operational ...**, 2012. Elsevier. Disponível em:
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377221711010423>.. .

HINLOOPEN, E.; NIJKAMP, P.; RIETVELD, P. Qualitative discrete multiple criteria choice models in regional planning. **Regional Science and Urban Economics**, v. 13, n. 1, p. 77–102, 1983.

HSU, C.-C.; SANDFORD, B. A. The Delphi Technique : , v. 12, n. 10, 2007.

HWANG, C.-L.; YOON, K. **Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems: Multiple Attribute Decision Making, Methods and Applications Berlin Heidelberg New York 1981**. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 1981.

HWANG, C.; YOON, K. **Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications, A State of the Art Survey**. 1981.

IBGE, I. B. D. G. E. E. –. Noções Básicas de Cartografia. Disponível em:
http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/cartografia/manual_nocoes/processo_cartografico.html%3E.. .

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. Comparative Study on Rural Electrification Policies in Emerging Economies. Keys to successful policies. , 2010.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, I. World Energy Outlook 2015. **World Energy Outlook 2015**, p. 1–12, 2015.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY; WORLD BANK. **Energy for All 2015- Progress Toward Sustainable Energy**. 2015a.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY; WORLD BANK. **Energy for All 2015- Progress Toward Sustainable Energy**. 2015b.

ISHIZAKA, A.; NEMERY, P. **Multi-Criteria Decision Analysis**. 2013.

KAHNEMAN, D.; TVERSKY, A. ECONOMETRICA. **Prospect Theory: An Analysis of Decision under Risk**. p.263–292, 1979. The Econometric Society. Disponível em:
https://www.jstor.org/stable/1914185?seq=2#page_scan_tab_contents.. .

KROHLING, R. A.; PACHECO, A. G. C. A-TOPSIS - An approach based on TOPSIS for ranking evolutionary algorithms. **Procedia Computer Science**, v. 55, n. Itqm, p. 308–317, 2015. Elsevier Masson SAS. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.procs.2015.07.054>>..

KULKARNI, S. H.; JIRAGE, B. J.; ANIL, T. R. Alternative Energy Options for India—A Multi-criteria Decision Analysis to Rank Energy Alternatives using Analytic Hierarchy Process and Fuzzy Logic with an Emphasis in Distributed Generation. **Distributed Generation & Alternative Energy Journal**, 2017. Taylor & Francis. Disponível em: <<http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/21563306.2017.11869108>>..

LAURÍA, L. C. DECISÕES DE CUSTOS EM ÉPOCAS DE CRISE: aspectos relevantes em orçamentos de investimentos (CAPEX). , 2013. Portugal: XIII Congresso do Instituto Internacional de Custos.

LIMA, F. R. J.; OSIRO, L.; CARPINETTI, L. C. R. Métodos de decisão multicritério para seleção de fornecedores: um panorama do estado da arte. **Gestão & Produção**, v. 20, p. 781–801, 2013. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0104-530X2013000400003&nrm=iso>..

LOHANI, B.; EVANS, J. W.; LUDWIG, H.; et al. **Environmental Impact Assessment for Developing Countries in Asia**. 1997.

LOOTSMA, F. A. The french and the american school inmulti-criteria decision analysis. **Recherche opérationnelle/Operations Research**, v. 24, n. 3, p. 263–285, 1990.

LUCE, R. D.; RAIFFA, H. **GAMES AND DECISIONS: Introduction and Critical Survey**. New York: DOVER PUBLICATIONS, INC., 1957.

MAINALI, B.; SILVEIRA, S. Alternative pathways for providing access to electricity in developing countries. **Renewable Energy**, v. 57, p. 299–310, 2013. Elsevier Ltd. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2013.01.057>>..

MANDELLI, S.; BARBIERI, J.; MEREU, R.; COLOMBO, E. Off-grid systems for rural electrification in developing countries: Definitions, classification and a comprehensive

literature review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 58, p. 1621–1646, 2016.

MÉDICI, E. G.; BAPTISTA, B. M. Lei N° 5.899, DE 5 DE JULHO DE 1973.

Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L5899.htm>..

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. Especificações Técnicas dos Programas para Atendimento às Regiões Remotas dos Sistemas Isolados no âmbito do Programa Luz para Todos. 2015a.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. MANUAL DE OPERACIONALIZAÇÃO PARA O PERÍODO DE 2015 A 2018. , 2015b. Disponível em: <<http://goo.gl/HzEE0r>>..

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. Programa Luz para Todos. Disponível em: <https://www.mme.gov.br/luzparatodos/Asp/o_programa.asp>. Acesso em: 13/6/2016.

MME. Manual de projetos especiais. , v. 2014, 2009.

MONKS, J. G. **Operations Management**. New York: McGraw-Hill, 1985.

DE MONTIS, A.; TORO, P. DE; DROSTE-FRANKE, B.; OMANN, I.; STAGL, S. Assessing the quality of different MCDA methods. **Alternatives for environmental valuation**, , n. January, p. 99–184, 2000. Disponível em: <http://people.unica.it/adm/files/2008/11/05_de_monti_et_al.pdf>..

MOREIRA, D. A. **Administração da Produção e Operações**. São Paulo, 2008.

MOURMOURIS, J. C.; POTOLIAS, C. A multi-criteria methodology for energy planning and developing renewable energy sources at a regional level: A case study Thassos, Greece. **Energy Policy**, 2013. Elsevier. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421512008567>>..

MOURMOURIS, J. C.; POTOLIAS, C.; FANTIDIS, J. G. Evaluation of renewable energy sources exploitation at remote regions, using computing model and multi-criteria analysis: a case-study in Samothrace, Greece. **International Journal of ...**, 2012. ijrer.com. Disponível em: <<http://ijrer.com/index.php/ijrer/article/view/194>>..

MUNDA, G.; RUSSI, D. Social multicriteria evaluation of conflict over rural electrification and solar energy in Spain. **Environment and Planning C: Politics and Space**, 2008. journals.sagepub.com. Disponível em: <<http://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1068/c06105s>>..

NASCIMENTO, L. P. L. DA S.; SILVA, A. C. S. DA; BELDERRAIN, M. C. N. **REVISÃO DA LITERATURA SOBRE A APLICAÇÃO DO MÉTODO ANP AO PROBLEMA DE SELEÇÃO DE FORNECEDORES**. 2008.

NATIONAL RENEWABLE ENERGY LABORATORY, N. **A Manual for the Economic Evaluation of Energy Efficiency and Renewable Energy Technologies**. 1995.

NERINI, F. F.; HOWELLS, M.; BAZILIAN, M.; GOMEZ, M. F. Rural electrification options in the Brazilian Amazon: a multi-criteria analysis. **Energy for Sustainable Development**, 2014. Elsevier. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0973082614000179>>..

NREL. Best Practices in PV System Operations and Maintenance. , v. 1, 2015. Disponível em: <<http://www.nrel.gov/docs/fy15osti/63235.pdf>>..

OKOLI, C.; PAWLOWSKI, S. D. The Delphi method as a research tool: an example, design considerations and applications. **Information & Management**, v. 42, n. 1, p. 15–29, 2004. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378720603001794>>..

OLIVEIRA, C. A. DE; BELDERRAIN, M. C. N. Considerações sobre a obtenção de vetores de prioridades no AHP. **I Erabio Xxi Endio Xix Epio (Sobrapo)**, p. 15, 2008.

OLSON, D. L. **Decision Aids for Selection Problems**. 1995.

PALM, T.; QAYUM, A. **Private and Public investment analysis**. South-Western Pub. Co., 1985.

PANTANALI, C.; BENAVIDES, J. Subsidios eléctricos en América Latina y el Caribe : Análisis comparativo y recomendaciones de política. **Banco Interamericano de Desarrollo**, 2006.

PAPADOPOULOS, A.; KARAGIANNIDIS, A. Application of the multi-criteria analysis method Electre III for the optimisation of decentralised energy systems. **Omega**, 2008. Elsevier. Disponível em:

<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0305048306000302>>..

PEREIRA, E. B.; MARTINS, F. R.; ABREU, S. L. DE; RÜTHER, R. ATLAS BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR. Disponível em:

<http://ftp.cptec.inpe.br/labren/publ/livros/brazil_solar_atlas_R1.pdf>..

PEREIRA, M. G. Políticas Públicas de Eletrificação Rural na Superação da Pobreza Energética Brasileira: Estudo de Caso da Bacia do Rio Acre - Amazônia. , p. 334, 2011.

PEREIRA, M. G.; FREITAS, M. A. V.; DA SILVA, N. F. Rural electrification and energy poverty: Empirical evidences from Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 14, n. 4, p. 1229–1240, 2010.

PINHO, J. A. M. **Calibração de resultados de pesquisas de posses e hábitos pela medição eletrônica José Aguinaldo Mendes Pinho Calibração de resultados de pesquisas de posses e hábitos pela medição eletrônica de consumo de eletrodomésticos**, 2013. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

RAHMAN, M. M.; PAATERO, J. V.; LAHDELMA, R. Evaluation of choices for sustainable rural electrification in developing countries: A multicriteria approach. **Energy Policy**, v. 59, p. 589–599, 2013.

RANGEL, L. A. D.; GOMES, L. F. A. M.; MOREIRA, R. A. DECISION THEORY WITH MULTIPLE CRITERIA: AN APPLICATION OF ELECTRE IV AND TODIM TO SEBRAE/RJ. **Pesquisa Operacional**, v. 26, n. 1, p. 69–90, 2005.

RANGEL, L. A. D.; GOMES, L. F. A. M.; MOREIRA, R. A. Decision Theory With Multiple Criteria: an Application of Electre Iv and Todim To Sebrae/Rj. **Pesquisa Operacional**, v. 29, n. 3, p. 577–590, 2009.

RAO, V. R. Introduction to multiple attribute decision-making (MADM) methods. **Decision Making in the Manufacturing Environment: Using Graph Theory and**

Fuzzy Multiple Attribute Decision Making Methods, 2007. Disponível em:
http://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-1-84628-819-7_3.. .

RESNIK, M. D. **Choices : An Introductiction to Decision Theory**. 1987.

ROJAS-ZERPA, J. C.; YUSTA, J. M. Application of multicriteria decision methods for electric supply planning in rural and remote areas. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 52, p. 557–571, 2014. International Energy Initiative. Published by Elsevier Inc. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.esd.2014.03.003>>.. .

ROJAS-ZERPA, J. C.; YUSTA, J. M. Application of multicriteria decision methods for electric supply planning in rural and remote areas. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 52, p. 557–571, 2015. Elsevier. Disponível em:
<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.139>.. .

ROUSSEFF, D.; LOBÃO, E. **DECRETO Nº 7.520, DE 8 DE JULHO DE 2011**. 2011.

ROUSSEFF, D.; LOBÃO, E. **DECRETO Nº 8.387, DE 30 DE DEZEMBRO DE 2014**. 2014.

ROY, B.; BOUYSSOU, D. **Aide multicritère à la décision: Méthodes et cas**. Paris, 1993.

SAATY, T. L. A Scaling Method for Priorities in Hierarchical Structures. **JOURNAL OF MATHEMETICAL PSYCHOLOGY**, v. 15, p. 234–281, 1977.

SAATY, T. L. **The Analytic Hierarchy Process**. New York: McGraw-Hil, 1980.

SAATY, T. L. **THE ANALYTIC HIEARCHY PROCESS FOR DECISIONS IN A COMPLEX WORLD**. Third Edti ed. Pittsburgh: RWS Publications, 2001.

SALAS, C. S. S.; SILVEIRA, L. H. S. DA; AOKI, A. R.; et al. **ELETRIFICAÇÃO DE REGIÕES REMOTAS: ESTUDO DE ALTERNATIVAS E APLICAÇÃO NO PANTANAL SUL-MATO-GROSSENSE**. 2017.

SALOMON, V. A. P. DESEMPENHO DA MODELAGEM DO AUXÍLIO À DECISÃO POR MÚLTIPLOS CRITÉRIOS NA ANÁLISE DO PLANEJAMENTO E CONTROLE DA PRODUÇÃO. , p. 107, 2004. Disponível em:

<<http://www.feg.unesp.br/~salomon/pesquisa/tese.pdf>>..

SALOMON, V. A. P. **CONTRIBUIÇÕES PARA VALIDAÇÃO DE TOMADA DE DECISÃO COM MÚLTIPLOS CRITÉRIOS**, 2010.

SANTOS, R. F. **Planejamento ambiental:teoria e prática**. São Paulo: Oficina de Textos, 2004.

SILVA, L. I. L. DA; LOBÃO, E. **DECRETO Nº 6.442, DE 25 DE ABRIL DE 2008**. 2008.

SILVA, L. I. L. DA; ROUSSEF, D. V. **DECRETO Nº 4.873, DE 11 DE NOVEMBRO DE 2003**. 2003.

SILVA, L. I. L. DA; ZIMMERMANN, M. P. **DECRETO Nº 7.324, DE 5 DE OUTUBRO DE 2010**. 2010.

SLOUGH, T.; URPELAINEN, J.; YANG, J. Light for all? Evaluating Brazil's rural electrification progress, 2000-2010. **Energy Policy**, v. 86, p. 315–327, 2015. Elsevier. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2015.07.001>>..

SMET, Y. DE. **PROMETHEE méthos**. 2016.

SOARES, G. F. W.; VIEIRA, L. DOS S. R.; GALDINO, M. A. E.; et al. COMPARAÇÃO DE CUSTOS ENTRE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS INDIVIDUAIS E MINICENTRAIS FOTOVOLTAICAS PARA ELETRIFICAÇÃO RURAL. , p. 1–12, 2010.

SONDA. SOBRE O PROJETO SONSA:: Sistem de Organização Nacional de Dados Ambientais. Disponível em: <http://sonda.ccst.inpe.br/infos/sobre_projeto.html>..

SONDA. REDE SONDA. Disponível em: <<http://sonda.ccst.inpe.br/>>..

STRAZZI, P. E. **DESENVOLVIMENTO SOCIAL E PROGRAMAS DE ELETRIFICAÇÃO RURAL DE NÃO ATENDIDOS**, 2009.

TAYLOR, P.; JANKOWSKI, P. Integrating geographical information systems and multiple criteria decision-making methods. **International Journal of Geographical Information Systems**, v. 9, n. 3, p. 251–273, 1995.

- TIBA, C.; MOSZKOWICZ, M.; LYRA, F. J. M.; NOGUEIRA, Â. M. DE B.; GALLEGOS, H. G. *Atlas Solarimétrico do Brasil*. Banco de Dados Terrestres. Disponível em: <http://www.creesesb.cepel.br/publicacoes/download/Atlas_Solarimetrico_do_Brasil_2000.pdf>..
- TRIANTAPHYLLOU, E.; SHU, B. Multi-criteria decision making: an operations research approach. **Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering**, v. 15, p. 175–186, 1998. Disponível em: <<http://univ.nazemi.ir/mcdm/Multi-Criteria Decision Making.pdf>>..
- TURBAN, E.; ARONSON, J. E. **Decision Support Systems and Intelligent Systems**. Prentice-Hall International, 1998.
- WANG, J. J.; JING, Y. Y.; ZHANG, C. F.; ZHAO, J. H. Review on multi-criteria decision analysis aid in sustainable energy decision-making. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 13, n. 9, p. 2263–2278, 2009.
- WEIBULL, W. A Statistical Distribution Function of Wide Applicability. **Transactions of the American Society of Mechanical Engineers - Journal of Applied Mechanics**, p. 293–297, 1955.
- WHO, W. H. O. Household air pollution and health. Disponível em: <<http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs292/en/>>..
- ZANAKIS, S. H.; SOLOMON, A.; WISHART, N.; DUBLISH, S. Multi-attribute decision making: A simulation comparison of select methods. **European Journal of Operational Research**, v. 107, n. 3, p. 507–529, 1998.
- ZERBINATTI, L. . F. M. **Predição de fator de simultaneidade através de modelos de regressão para proporções contínuas**, 2008.
- ZERRIFFI, H. From açaí to access: distributed electrification in rural Brazil. **International Journal of Energy Sector Management**, v. 2, n. 1, p. 90–117, 2008.
- ZHOU, P.; ANG, B. W.; POH, K. L. Decision analysis in energy and environmental modeling: An update. **Energy**, v. 31, n. 14, p. 2604–2622, 2006.

APÊNDICE A – AVALIAÇÃO DAS TECNOLOGIAS DOS PROJETOS DE REFERÊNCIA EM RELAÇÃO AOS SUBCRITÉRIO TECNOLÓGICO

Tabela 94 – Avaliação do Subcritério Amadurecimento Tecnológico para a alternativa eólica

Amadurecimento Tecnológico							
Indicadores						Peso	Nota segundo a escala de Saaty (Indicador x Peso)
Operação Comercial		Concorrência no mercado (nacional e internacional)		Possibilidade de obsolescência do produto			
Mais de 30 anos	-	Alta	-	Baixa	-	3	0
Entre 15 e 30 anos	X	Média	-	Média	X	2	4
Menos que 15 anos	-	Baixa	X	Grande	-	1	1
Nota da escala de Saaty para o subcritério:							5

Tabela 95 – Avaliação do Subcritério Disponibilidade do Suporte Pós-venda para a alternativa eólica

Disponibilidade do suporte pós venda							
Indicadores						Peso	Nota segundo a escala de Saaty (Indicador x Peso)
Entrega de peças sobressalente na região		Assistências técnicas autorizadas		Representação comercial em território nacional			
Pronta entrega	-	Mais de duas	-	Na região	-	3	0
Algumas peças	-	Uma	-	No país	X	2	2
Encomenda	X	Nenhuma	X	Sem representação	-	1	2
Nota da escala de Saaty para o subcritério:							4

Tabela 96 – Avaliação do Subcritério Mão de obra Qualificada para a alternativa eólica

Mão de obra qualificada							
Indicadores						Peso	Nota segundo a escala de Saaty (Indicador x Peso)
Ensino Superior		Ensino Técnico		Profissionais qualificados			
Supre	-	Supre	-	Na Supre	-	3	0
Supre parcialmente	-	Supre parcialmente	X	Supre parcialmente	X	2	4
Não supre	X	Não supre	-	Não supre	-	1	1
Nota da escala de Saaty para o subcritério:							5

Tabela 97 – Avaliação do Subcritério Experiências anteriores para a alternativa eólica

Tabela 98 – Avaliação do Subcritério Amadurecimento Tecnológico para a alternativa solar mais eólica com baterias

Tabela 99 – Avaliação do Subcritério Disponibilidade do Suporte Pós-venda para a alternativa solar mais eólica com baterias

Tabela 100 – Avaliação do Subcritério Mão de obra Qualificada para a alternativa solar mais eólica com baterias

Mão de obra qualificada							
		Indicadores			Peso	Nota segundo a escala de Saaty (Indicador x Peso)	
Ensino Superior		Ensino Técnico		Profissionais qualificados			
Supre	-	Supre	-	Na Supre	-	3	0
Supre parcialmente	-	Supre parcialmente	-	Supre parcialmente	X	2	2
Não supre	X	Não supre	X	Não supre	-	1	2
Nota da escala de Saaty para o subcritério:							4

Tabela 101 – Avaliação do Subcritério Experiências anteriores para a alternativa solar mais eólica com baterias

Experiências Anteriores							
Indicadores						Peso	Nota segundo a escala de Saaty (Indicador x Peso)
Resultados em termos operacionais e desempenho		Satisfação dos Consumidores		Difusão da tecnologia no país			
Ótimo	-	Alta	-	Alta	-	3	0
Bom	X	Média	X	Média	-	2	4
incompleto	-	Baixa	-	Baixa	X	1	1
Nota da escala de Saaty para o subcritério:							5

Tabela 102 – Avaliação do Subcritério Amadurecimento Tecnológico para a alternativa gerador a diesel

Amadurecimento Tecnológico							
Indicadores						Peso	Nota segundo a escala de Saaty (Indicador x Peso)
Operação Comercial		Concorrência no mercado (nacional e internacional)		Possibilidade de obsolescência do produto			
Mais de 30 anos	X	Alta	X	Baixa	X	3	9
Entre 15 e 30 anos	-	Média	-	Média	-	2	0
Menos que 15 anos	-	Baixa	-	Grande	-	1	0
Nota da escala de Saaty para o subcritério:							9

Tabela 103 – Avaliação do Subcritério Disponibilidade do Suporte Pós-venda para a alternativa gerador a diesel

Tabela 104 – Avaliação do Subcritério Mão de obra Qualificada para a alternativa gerador a diesel

Mão de obra qualificada								
Indicadores						Peso	Nota segundo a escala de Saaty (Indicador x Peso)	
Ensino Superior		Ensino Técnico		Profissionais qualificados				
Supre	X	Supre	X	Na Supre	-	3	6	
Supre parcialmente	-	Supre parcialmente	-	Supre parcialmente	X	2	2	
Não supre	-	Não supre	-	Não supre	-	1	0	
Nota da escala de Saaty para o subcritério:							8	

Tabela 105 – Avaliação do Subcritério Experiências anteriores para a alternativa gerador a diesel

Tabela 106 – Avaliação do Subcritério Amadurecimento Tecnológico para a alternativa solar mais gerador a diesel

Amadurecimento Tecnológico						
Indicadores					Peso	Nota segundo a escala de Saaty (Indicador x Peso)
Operação Comercial	Concorrência no mercado (nacional e internacional)		Possibilidade de obsolescência do produto			
Mais de 30 anos	-	Alta	-	Baixa	X	3
Entre 15 e 30 anos	X	Média	X	Média	-	2
Menos que 15 anos	-	Baixa	-	Grande	-	1
Nota da escala de Saaty para o subcritério:						7

Tabela 107 – Avaliação do Subcritério Disponibilidade do Suporte Pós-venda para a alternativa solar mais gerador a diesel

Disponibilidade do suporte pós venda						
Indicadores					Peso	Nota segundo a escala de Saaty (Indicador x Peso)
Entrega de peças sobressalente na região	Assistências técnicas autorizadas	Representação comercial em território nacional				
Pronta entrega	-	Mais de duas	-	Na região	-	3
Algumas peças	X	Uma	-	No país	X	2
Encomenda	-	Nenhuma	X	Sem representação	-	1
Nota da escala de Saaty para o subcritério:						5

Tabela 108 – Avaliação do Subcritério Mão de obra Qualificada para a alternativa solar mais gerador a diesel

Mão de obra qualificada						
Indicadores					Peso	Nota segundo a escala de Saaty (Indicador x Peso)
Ensino Superior	Ensino Técnico	Profissionais qualificados				
Supre	-	Supre	-	Na Supre	-	3
Supre parcialmente	X	Supre parcialmente	X	Supre parcialmente	X	2
Não supre	-	Não supre	-	Não supre	-	1
Nota da escala de Saaty para o subcritério:						6

Tabela 109 – Avaliação do Subcritério Experiências anteriores para a alternativa solar mais gerador a diesel

Experiências Anteriores							
Indicadores						Peso	Nota segundo a escala de Saaty (Indicador x Peso)
Resultados em termos operacionais e desempenho		Satisfação dos Consumidores		Difusão da tecnologia no país			
Ótimo	-	Alta	-	Alta	X	3	3
Bom	X	Média	X	Média	-	2	4
lcompleto	-	Baixa	-	Baixa	-	1	0
Nota da escala de Saaty para o subcritério:						7	

**ANEXO A – PERGUNTAS DO FORMULÁRIO DE ENTREVISTAS
REFERENTE A LOGÍSTICA DE SUPRIMENTOS**

Questão	Resposta
Principal meio de acesso à propriedade em época de seca	Veículo de passeio Veículo 4x4 Trator Barco Motocicleta Cavalo Avião
Principal meio de acesso a propriedade na época de cheia	Veículo de passeio Veículo 4x4 Trator Barco Motocicleta Cavalo Avião
A propriedade possui acesso por estradas?	Sim Não
Em que período estas estradas são transitáveis?	JAN FEV MAR ABR MAI JUN JUL AGO SET OUT NOV DEZ Todos os meses
A propriedade possui acesso por meio aquático?	Sim Não

Posse e Utilização de Meios de Transporte		
TIPO	Tipo	Número de unidades
Veículo terrestre de passageiros		
Veículo terrestre de carga (caminhão, picape)		
Veículo de tração (trator)		
Embarcações		
Avião / taxi aéreo		
Tração animal		
Outros (especificar)		
Outros (especificar)		

Você consegue se lembrar da última vez que você se ausentou da propriedade?			
Há quanto tempo	Por qual motivo	Meio de transporte utilizado na ocasião	Duração da ausência

ANEXO B – ESPECIFICAÇÃO TÉCNICA DOS PROJETOS DE REFERÊNCIA

Tabela 110 - - Equipamentos dos sistemas isolados para as unidades consumidoras

Consumo Mensal (kWh)	13	20	30	45	60	80	160
Tipo de Sistema	SIGFI						
Painéis fotovoltaicos (kWp)	2 x 95	4 x 95	5 x 95	7 x 95	10 X 95	13 X 95	18 X 140
Banco de Baterias (kWh)	5,28	7,92	10,56	18,48	23,76	31,68	63,36
Tipo de Baterias	Bateria regulada a válvula (VRLA)						
Tensão do Barramento CC (Vcc)	12	12	12	12	12	12	24
Inversor (kW)*	1 x 0,4	1 x 0,4	1 x 0,6	1 x 1	1 x 1	1 x 1,5	1 x 2,5

Tabela 111 - - Modelos de equipamentos dos sistemas isolados para as unidades consumidoras

Consumo Mensal (kWh)	13	20	30	45	60	80	160
Tipo de Sistema	SIGFI	SIGFI	SIGFI	SIGFI	SIGFI	SIGFI	SIGFI
Painel fotovoltaico	Yingli 95 W YL095P-17b 2/3	Yingli 95 W YL095P-17b 2/3	Yingli 95 W YL095P-17b 2/3	Yingli 95 W YL095P-17b 2/3	Yingli 95 W YL095P-17b 2/4	Yingli 95 W YL095P-17b 2/5	Yingli 140 W YL140P-17b 2/5
Banco de Baterias	Bateria Estacionária Moura Clean 220 Ah	Bateria Estacionária Moura Clean 220 Ah	Bateria Estacionária Moura Clean 220 Ah	Bateria Estacionária Moura Clean 220 Ah	Bateria Estacionária Moura Clean 220 Ah	Bateria Estacionária Moura Clean 220 Ah	Bateria Estacionária Moura Clean 220 Ah
Inversor	Unitron iVolt – 400W / 12Vcc / 115Vac / 60Hz	Unitron iVolt – 400W / 12Vcc / 115Vac / 60Hz	Inversor Xantrex PROwatt SW 600 (600W / 120Vac / 60Hz)	Inversor Xantrex Xpower100 0 (1000W / 120Vac / 60Hz)	Inversor Xantrex Xpower100 0 (1000W / 120Vac / 60Hz)	Inversor Xantrex Xpower150 0 (1500W / 120Vac / 60Hz)	Inversor Schneider Electric Conext SW-865-2524 (2500W / 120Vac / 60Hz)
Controlador de Carga	Controlador de Carga Unitron TC12/24 20TD (20A)	Controlador de Carga Xantrex C35 35A 12/24V	Controlador de Carga Xantrex C35 35A 12/24V	Controlador de Carga Xantrex C60 60A 12/24V	Controlador de Carga Xantrex C60 60A 12/24V	Controlador de Carga Xantrex C60 60A 12/24V	Controlador de Carga Xantrex C60 60A 12/24V

Tabela 112 – Projetos de Referência SOL +BAT

Disponibilidade Mensal Garantida	300 kWh	600 kWh	1000 kWh	5000 kWh	10000 kWh
Painéis fotovoltaicos (Wp)	14 x 250	24 x 250	42 x 250	196 x 250	420 x 250
Banco de Baterias (kWh)	Yingli 250 W YL250P-29b	Yingli 250 W YL250P-29b	Yingli 250 W YL250P-29b	Yingli 250 W YL250P-29b	Yingli 250 W YL250P-29b
Tipo de bateria	12	48	48	48	48
Tensão do Barramento CC (Vcc)	Bateria Moura Fotovoltaico MFV1000 1000 Ah	Bateria Moura Fotovoltaico MFV1000 1000 Ah	Bateria Moura Fotovoltaico MFV3000 3000 Ah	Bateria Moura Fotovoltaico MFV3000 3000 Ah	Bateria Moura Fotovoltaico MFV3000 3000 Ah
Inversor (kW)	Bateria Estacionária Ventilada padrão dimensional OPzS	Bateria Estacionária Ventilada padrão dimensional OPzS	Bateria Estacionária Ventilada padrão dimensional OPzS	Bateria Estacionária Ventilada padrão dimensional OPzS	Bateria Estacionária Ventilada padrão dimensional OPzS
Controlador de Carga (Acc)	24	48	24	144	168
Custo estimado de implantação* (R\$)	3 x 3,6	4 x 3,6	6 x 3,6	12 x 6,8	8 x 6,8
Energia anual atendida (kWh)	Outback Power Systems VFXR 3648 LA (3600 W/ 120 Vac / 60 Hz)	Outback Power Systems VFXR 3648 LA (3600 W/ 120 Vac / 60 Hz)	Outback Power Systems VFXR 3648 LA (3600 W/ 120 Vac / 60 Hz)	Schneider Electric XW+ 8548 E	Schneider Electric XW+ 8548 E
Carga atendida em relação à demanda (balanço horário) (%)	1 x 60	1 x 60	2 x 60	6 x 80	12 x 80
	Xantrex C60 60A 12/24V	Outback Power Systems FlexMAX MPPT 60	Outback Power Systems FlexMAX MPPT 60	Outback Power Systems FlexMAX MPPT 80	Outback Power Systems FlexMAX MPPT 80
	R\$ 90.603,00	R\$ 129.762,00	R\$ 200.884,00	R\$ 200.884,00	R\$ 200.884,00
	1905	3518	7136	7136	7136
	97,8	96,4	97,7	97,7	97,7

Tabela 113 – Projetos de Referência EOL +BAT

Disponibilidade Mensal Garantida	80 kWh
Aero gerador (W)	1 x 1000 Eletrovento Turbo 1000
Banco de Baterias (kWh)	31,6 Bateria Estacionária Moura Clean 12MF 220 Ah
Tipo de bateria	Bateria regulada a válvula (VRLA)
Tensão do Barramento CC (Vcc)	12
Inversor (kW)	1 x 2,5 Schneider Electric Conext SW-865-2524 (2500 W/ 120 Vac / 60 Hz)
Custo estimado de implantação* (R\$)	63.319,00
Energia anual atendida (kWh)	927,59
Energia anual disponível (kWh)	1759
Carga atendida em relação à demanda (balanço horário) (%)	95,3

Tabela 114 – Projetos de Referência SOL+ EOL +BAT

Disponibilidade Mensal Garantida	160 kWh	300 kWh	600 kWh
Painéis fotovoltaicos (Wp)	2 x 250	6 x 250	17 x 250
	Yingli 250 W YL250P-29b	Yingli 250 W YL250P-29b	Yingli 250 W YL250P-29b
Aerogerador (kW)	1 x 1000	1 x 1000	1 x 1000
	Eletrovento Turbo 1000	Eletrovento Turbo 1000	Eletrovento Turbo 1000
Banco de Baterias (kWh)	12	48	48
	Bateria Moura Fotovoltaico MFV1000 1000 Ah	Bateria Moura Fotovoltaico MFV1000 1000 Ah	Bateria Moura Fotovoltaico MFV1000 1000 Ah
Tipo de bateria	Bateria Estacionária Ventilada padrão dimensional OPzS	Bateria Estacionária Ventilada padrão dimensional OPzS	Bateria Estacionária Ventilada padrão dimensional OPzS
Tensão do Barramento CC (Vcc)	12	48	48
Inversor (kW)	1 x 1,5	3 x 3,6	4 x 3,6
	Xantrex Xpower1500 (1500W / 120Vac / 60Hz)	Outback Power Systems VFXR 3648 LA (3600 W / 120 Vac / 60 Hz)	Outback Power Systems VFXR 3648 LA (3600 W / 120 Vac / 60 Hz)
Controlador de Carga (Acc)	1 x 60	1 x 60	1 x 60
	Xantrex C60 60A 12/24V	Outback Power Systems FlexMAX MPPT 60	Outback Power Systems FlexMAX MPPT 60
Custo estimado de implantação* (R\$)	R\$ 90.603,00	R\$ 129.762,00	R\$ 200.884,00
Energia anual atendida (kWh)	1905	3518	7136
Carga atendida em relação à demanda (balanço horário) (%)	97,8	96,4	97,7

Tabela 115 – Projetos de Referência GMG

Disponibilidade Mensal Garantida	13 kWh	20 kWh	30 kWh	45 kWh	60 kWh	80 kWh	160 kWh
Gerador diesel (VA)	1 x 1200	1 x 1200	1 x 1200	1 x 1200	1 x 1200	1 x 1200	1 x 2500
	Schulz S 1200MG						Schulz S 2500MG
Custo estimado de implantação* (R\$)	1.500,00	1.500,00	1.500,00	1.500,00	1.500,00	1.500,00	2.000,00
Energia anual atendida (kWh)	158	243	365	548	730	975	1949
Carga atendida em relação à demanda (balanço horário) (%)	100	100	100	100	100	100	100
Disponibilidade Mensal Garantida	300 kWh	600 kWh	1000 kWh	5000 kWh			
Gerador diesel (VA)	1 x 8000 ND8000E 8,125 kVA monofásico	1 x 11500 NDE12STA 11,5 kVA monofásico	2 x 8000 ND8000E 8,125 kVA monofásico	2 x 33000 ND33000ES3 33 kVA trifásico			
Custo estimado de implantação* (R\$)	5.500,00	16.500,00	11.000,00	56.000,00			
Energia anual atendida (kWh)	3650	7300	15330	75555			
Carga atendida em relação à demanda (balanço horário) (%)	100	100	100	100			

Tabela 116 – Projetos de Referência SOL+GMGotm+BAT

Disponibilidade Mensal Garantida	300 kWh	600 kWh	1000 kWh	5000 kWh
Painéis fotovoltaicos (Wp)	6 x 250 Yingli 250 W YL250P-29b	18 x 250 Yingli 250 W YL250P-29b	28 x 250 Yingli 250 W YL250P-29b	182 x 250 Yingli 250 W YL250P-29b
Gerador diesel (VA)	1 x 1200 Schulz S 1200MG	1 x 2500 Schulz S 2500MG	1 x 3500 Schulz S 3500MG	1 x 12000 Nagano NDE12STA
Banco de Baterias (kWh)	21,1 Bateria Estacionária Moura Moura Clean 12MF 220 Ah	48 Bateria Fotovoltaico MFV1000 1000 Ah	48 Bateria Fotovoltaico MFV1000 1000 Ah	72 Bateria Fotovoltaico MFV3000 3000 Ah
Tipo de bateria	Bateria regulada a Estacionária válvula (VRLA)	Bateria Ventilada padrão dimensional OPzS	Bateria Ventilada padrão dimensional OPzS	Bateria Estacionária dimensional OPzS
Tensão do Barramento CC (Vcc)	48	48	48	48
Inversor (kW)	3 x 3,6 Outback Power Systems 3648 LA (3600 W/3648 E 120 Vac / 60 Hz)	4 x 3,6 Outback Power Systems VFXR Systems 3648 LA (3600 W/3648 E 120 Vac / 60 Hz)	6 x 3,6 Outback Power Systems VFXR Systems 3648 LA (3600 W/3648 E 120 Vac / 60 Hz)	12 x 6,8 Power Schneider Electric XW+ 8548 E
Controlador de Carga (Acc)	1 x 60 Outback Power Systems FlexMAX MPPT 60	1 x 60 Outback Power Systems FlexMAX MPPT 60	1 x 60 Outback Power Systems FlexMAX MPPT 60	4 x 80 Schneider Electric Conext MPPT 80 600
Custo estimado de implantação* (R\$)	R\$ 49.835,00	R\$ 109.761,00	R\$ 131.888,00	R\$ 578.272,00
Energia anual atendida (kWh)	3684	7540	11823	57819
Fração de energia renovável (%)	67	80	76	78
Carga atendida em relação à demanda (balanço horário) (%)	95,7	98,2	97,4	94,0

Tabela 117 – Projetos de Referência SOL+GMGpro+BAT

Disponibilidade Mensal Garantida	300 kWh (80 kWh + diesel)	600 kWh (80 kWh + diesel)
Painéis fotovoltaicos (Wp)	13 x 95	13 x 95
Yingli 95 W YL095P-17b		
Gerador diesel (VA)	8125	11500
Nagano NDE12STA		
Banco de Baterias (kWh)	31,68	31,68
Bateria Estacionária Moura Clean 12MF 220 Ah		
Tipos de bateria	Bateria regulada a válvula (VRLA)	Bateria regulada a válvula (VRLA)
Tensão do Barramento CC (Vcc)	12	12
Inversor (kW)	1 x 1,5	1 x 1,5
Xantrex Xpower1500 (1500W / 120Vac / 60Hz)	Xantrex Xpower1500 (1500W / 120Vac / 60Hz)	Xantrex Xpower1500 (1500W / 120Vac / 60Hz)
Controlador de Carga (Acc)	2 x 60	2 x 60
Xantrex C60 60A 12/24V		
Custo estimado de implantação* (R\$)	26.541,00	37.541,00
Energia anual atendida (kWh)	3634 (1013 sol+bat e 2621 diesel)	7272 (994 sol+bat e 6278 diesel)
Fração de energia renovável (%)	28	14
Carga atendida em relação à demanda (balanço horário) (%)	99,8	99,8

ANEXO C – CUSTOS DE CAPEX DOS PROJETOS DE REFERÊNCIA

Família de Projeto	Termo de Referência	Potência Painel Solar (Wp)	Bateria OPzS (Ah)	Inversor	Controlador carga	Gerador diesel
SOL+BAT	Sistema 1 - 13kWh	300	100	1500VA	1x20A	
	Sistema 2 - 20kWh	600	100	1500VA	1x20A	
	Sistema 3 - 30kWh	600	150	1500VA	1x20A	
	Sistema 4 - 45kWh	900	250	1500VA	1x40A	
	Sistema 5 - 60kWh	900	400	1500VA	1x40A	
	Sistema 6 - 80kW	1200	490	1500VA	2x20A	ND
	Sistema 7 - 160kWh	2400	980	3000VA	2x20A	
	Sistema 8 - 300kWh	4800	1960	6000VA	4x20A	
	Sistema 9 - 600kWh	9600	3920	12000VA	8x20A	
	Sistema 36 - 1000kWh	15000	2940	12000VA	4x60A	
	Sistema 37 - 5000kWh	75000	15000	24000VA	20x60A	
	Sistema 10 - 10000kWh	150000	30000	48000VA	40x60A	
EOL+BAT	Sistema 11 - 80kWh	ND	220	2500VA	1 x 60A	ND
	Sistema 12 - 10000kWh	ND	30000	54000VA	4 x 80A	
SOL+EOL+BAT	Sistema 13 - 160kWh	500	980	1500VA	1 x 60A	
	Sistema 14 - 300kWh	1500	1960	3600VA	1 x 60A	ND
	Sistema 15 - 600kWh	8400	3920	12000VA	4x20A	
	Sistema 16 - 10000kWh	85000	15000	54000VA	12 x 80A	
GMG						1x1.2kVA
						1x1.2kVA
						1x1.2kVA

Família de Projeto	Termo de Referência	Potência Painel Solar (Wp)	Bateria OPzS (Ah)	Inversor	Controlador carga	Gerador diesel
	Sistema 24 - 45kWh				1x1.2kVA	
	Sistema 24 - 60kWh				1x1.2kVA	
	Sistema 24 - 80kWh				1x1.2kVA	
	Sistema 25 - 160kWh				1x2.5kVA	
	Sistema 26 - 300kWh				1x8kVA	
	Sistema 27 - 600kWh				1x10kVA	
	Sistema 28 - 1000kWh				2x8kVA	
	Sistema 29 - 5000kWh				1x65kVA	
	Sistema 30 - 10000kWh				1x65kVA	
	Sistema 19 - 300kWh	2400	980	6000VA	2x20A	1x10kVA
	Sistema 20 - 600kWh	4800	1960	12000VA	4x20A	1x20kVA
SOL+GM Gotm+BAT	Sistema 21 - 1000kWh	9600	3920	12000VA	8x20A	1x20kVA
	Sistema 22 - 5000kWh	37500	7500	24000VA	10x60A	1x30kVA
	Sistema 23 - 10000kWh	75000	15000	48000VA	20x60A	1x30kVA
	Sistema 17 - 300kWh	2400	980	6000VA	2x20A	1x10kVA
SOL+GM Gpro+BAT	Sistema 18 - 600kWh	4800	1960	12000VA	4x20A	1x10kVA

Família de Projeto	Termo de Referência	Preço Painel Solar	Preço Bateria	Preço Inversor	Preço Controlador	Turbina eólica 1kW com mastro	Gerador Diesel
SOL+BAT	Sistema 1 - 13kWh	R\$ 768,49	R\$ 2.550,00	R\$ 6.927,60	R\$ 966,00		R\$ 0,00
	Sistema 2 - 20kWh	R\$ 1.536,98	R\$ 2.550,00	R\$ 6.927,60	R\$ 966,00		R\$ 0,00
	Sistema 3 - 30kWh	R\$ 1.536,98	R\$ 3.825,00	R\$ 6.927,60	R\$ 966,00		R\$ 0,00
	Sistema 4 - 45kWh	R\$ 2.305,46	R\$ 6.375,00	R\$ 6.927,60	R\$ 1.449,00		R\$ 0,00
	Sistema 5 - 60kWh	R\$ 2.305,46	R\$ 10.200,00	R\$ 6.927,60	R\$ 1.449,00		R\$ 0,00
	Sistema 6 - 80kWh	R\$ 3.073,95	R\$ 12.495,00	R\$ 6.927,60	R\$ 1.932,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00
	Sistema 7 - 160kWh	R\$ 6.147,90	R\$ 24.990,00	R\$ 10.577,70	R\$ 1.932,00		R\$ 0,00
	Sistema 8 - 300kWh	R\$ 12.295,80	R\$ 49.980,00	R\$ 17.891,70	R\$ 3.864,00		R\$ 0,00
	Sistema 9 - 600kWh	R\$ 24.591,60	R\$ 99.960,00	R\$ 35.783,40	R\$ 7.728,00		R\$ 0,00
	Sistema 36 - 1000kWh	R\$ 38.424,38	R\$ 149.940,00	R\$ 35.783,40	R\$ 7.728,00		R\$ 0,00
	Sistema 37 - 5000kWh	R\$ 192.121,88	R\$ 765.000,00	R\$ 71.566,80	R\$ 38.640,00		R\$ 0,00
	Sistema 10 - 10000kWh	R\$ 384.243,75	R\$ 1.530.000,00	R\$ 143.133,60	R\$ 77.280,00		R\$ 0,00
EOL+BAT	Sistema 11 - 80kWh	R\$ 0,00	R\$ 12.000,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 91.809,30	R\$ 0,00
	Sistema 12 - 100000kWh		R\$ 1.297.618,11			R\$ 3.259.008,00	

SOL+EOL+BAT	Sistema 13 - 160kWh	R\$ 1.520,00	R\$ 25.383,25	R\$ 4.290,00	R\$ 4.500,00	R\$ 87.519,00	R\$ 0,00
	Sistema 14 - 300kWh	R\$ 4.560,00	R\$ 50.766,50	R\$ 25.680,00	R\$ 4.500,00	R\$ 87.519,00	R\$ 0,00
	Sistema 15 - 600kWh	R\$ 21.517,65	R\$ 99.960,00	R\$ 35.783,40	R\$ 6.364,00	R\$ 8.000,00	R\$ 0,00
	Sistema 16 - 1000kWh	R\$ 258.400,00	R\$ 648.809,06	R\$ 128.000,00	R\$ 102.840,00	R\$ 391.376,00	R\$ 0,00
	Sistema 24 - 13kWh					R\$ 7.729,00	
	Sistema 24 - 20kWh					R\$ 7.729,00	
	Sistema 24 - 30kWh					R\$ 7.729,00	
	Sistema 24 - 45kWh					R\$ 7.729,00	
	Sistema 24 - 60kWh					R\$ 7.729,00	
	Sistema 24 - 80kWh				0,00	R\$ 7.729,00	
GMG	Sistema 25 - 160kWh					R\$ 9.691,50	
	Sistema 26 - 300kWh					R\$ 24.344,10	
	Sistema 27 - 600kWh					R\$ 31.907,43	
	Sistema 28 - 1000kWh					R\$ 56.262,36	
	Sistema 29 - 5000kWh					R\$ 96.304,20	
	Sistema 30 - 10000kWh				0,00	R\$ 60.000,00	

	Sistema 19 - 300kWh	R\$ 6.147,90	R\$ 24.990,00	R\$ 17.891,70	R\$ 1.932,00	R\$ 18.000,00
	Sistema 20 - 600kWh	R\$ 12.295,80	R\$ 49.980,00	R\$ 35.783,40	R\$ 3.864,00	R\$ 25.000,00
	Sistema 21 - 1000kWh	R\$ 24.591,60	R\$ 99.960,00	R\$ 35.783,40	R\$ 7.728,00	R\$ 25.000,00
	Sistema 22 - 5000kWh	R\$ 96.060,94	R\$ 382.500,00	R\$ 71.566,80	R\$ 19.320,00	R\$ 35.000,00
	Sistema 23 - 10000kWh	R\$ 192.121,88	R\$ 765.000,00	R\$ 143.133,60	R\$ 38.640,00	R\$ 60.000,00
	Sistema 17 - 300kWh	R\$ 6.147,90	R\$ 24.990,00	R\$ 17.891,70	R\$ 1.932,00	R\$ 18.000,00
	Sistema 18 - 600kWh	R\$ 12.295,80	R\$ 49.980,00	R\$ 35.783,40	R\$ 3.864,00	R\$ 18.000,00

Família de Projeto	Termo de Referência	Estrutura Metal	Gabinete	Material elétrico	Medidor	TOTAL MATERIAL	Instalação	TOTAL GERAL*
SOL+BAT	Sistema 1 - 13kWh	R\$ 800,00	R\$ 500,00	R\$ 437,92	R\$ 120,00	R\$ 13.070,01	R\$ 3.006,10	R\$ 16.076,11
	Sistema 2 - 20kWh	R\$ 1.600,00	R\$ 500,00	R\$ 492,82	R\$ 120,00	R\$ 14.693,40	R\$ 3.379,48	R\$ 18.072,88
	Sistema 3 - 30kWh	R\$ 1.600,00	R\$ 800,00	R\$ 547,95	R\$ 120,00	R\$ 16.323,52	R\$ 3.754,41	R\$ 20.077,93
	Sistema 4 - 45kWh	R\$ 2.500,00	R\$ 1.000,00	R\$ 719,50	R\$ 120,00	R\$ 21.396,56	R\$ 4.921,21	R\$ 26.317,77
	Sistema 5 - 60kWh	R\$ 2.500,00	R\$ 1.500,00	R\$ 870,87	R\$ 120,00	R\$ 25.872,93	R\$ 5.950,77	R\$ 31.823,71
	Sistema 6 - 80kWh	R\$ 3.000,00	R\$ 1.500,00	R\$ 1.012,50	R\$ 120,00	R\$ 30.061,05	R\$ 6.914,04	R\$ 36.975,09
	Sistema 7 - 160kWh	R\$ 4.500,00	R\$ 3.000,00	R\$ 1.790,17	R\$ 120,00	R\$ 53.057,77	R\$ 12.203,29	R\$ 65.261,05
	Sistema 8 - 300kWh	R\$ 6.000,00	R\$ 6.000,00	R\$ 3.361,10	R\$ 120,00	R\$ 99.512,60	R\$ 22.887,90	R\$ 122.400,50
	Sistema 9 - 600kWh	R\$ 12.000,00	R\$ 12.000,00	R\$ 6.722,21	R\$ 120,00	R\$ 198.905,21	R\$ 45.748,20	R\$ 244.653,40
	Sistema 36 - 1000kWh	R\$ 15.000,00	R\$ 18.000,00	R\$ 9.270,65	R\$ 120,00	R\$ 274.266,43	R\$ 63.081,28	R\$ 337.347,71
	Sistema 37 - 5000kWh	R\$ 65.000,00	R\$ 35.000,00	R\$ 40.856,50	R\$ 120,00	R\$ 1.208.305,18	R\$ 277.910,19	R\$ 1.486.215,37
EOL+BAT	- 10000kWh	R\$ 125.000,00	R\$ 70.000,00	R\$ 81.538,01	R\$ 120,00	R\$ 2.411.315,36	R\$ 554.602,53	R\$ 2.965.917,89
	Sistema 11 - 80kWh	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 825,40	R\$ 120,00	R\$ 104.754,70	R\$ 69.898,55	R\$ 174.653,25
	Sistema 12 - 10000kWh	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 825,40	R\$ 120,00	R\$ 4.557.571,51	1.232.444,45	R\$ 5.790.015,96

Família de Projeto	Termo de Referência	Estrutura Metal	Gabinete	Material elétrico	Medidor	TOTAL MATERIAL	Instalação	TOTAL GERAL*
SOL+EOL+BAT	Sistema 13 - 160kWh	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 825,40	R\$ 120,00	R\$ 124.157,65	R\$ 61.543,15	R\$ 185.700,80
	Sistema 14 - 300kWh	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 825,40	R\$ 120,00	R\$ 173.970,90	R\$ 66.918,03	R\$ 240.888,93
	Sistema 15 - 600kWh	R\$ 21.000,00	R\$ 12.000,00	R\$ 7.161,88	R\$ 120,00	R\$ 211.906,93	R\$ 48.738,59	R\$ 260.645,52
	Sistema 16 - 1000kWh	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 825,40	R\$ 120,00	R\$ 1.530.370,46	R\$ 395.614,90	R\$ 1.925.985,36
	Sistema 24 - 13kWh	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 825,40	R\$ 120,00	R\$ 8.674,40	R\$ 16.875,98	R\$ 25.550,38
	Sistema 24 - 20kWh	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 825,40	R\$ 120,00	R\$ 8.674,40	R\$ 16.875,98	R\$ 25.550,38
	Sistema 24 - 30kWh	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 825,40	R\$ 120,00	R\$ 8.674,40	R\$ 16.875,98	R\$ 25.550,38
	Sistema 24 - 45kWh	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 825,40	R\$ 120,00	R\$ 8.674,40	R\$ 16.875,98	R\$ 25.550,38
	Sistema 24 - 60kWh	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 825,40	R\$ 120,00	R\$ 8.674,40	R\$ 16.875,98	R\$ 25.550,38
	Sistema 24 - 80kWh	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 825,40	R\$ 120,00	R\$ 8.674,40	R\$ 16.875,98	R\$ 25.550,38
GMG								
Sistema 27 - 600kWh	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 825,40	R\$ 120,00	R\$ 32.852,83	R\$ 22.131,54	R\$ 54.984,37	
	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 825,40	R\$ 120,00	R\$ 57.207,76	R\$ 34.562,53	R\$ 91.770,29	
	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 825,40	R\$ 120,00	R\$ 97.249,60	R\$ 43.110,90	R\$ 140.360,50	
	R\$ 0,00	R\$ 45.000,00	R\$ 3.675,00	R\$ 120,00	R\$ 108.795,00	R\$ 25.022,85	R\$ 133.817,85	

Família de Projeto	Termo de Referência	Estrutura Metal	Gabinete	Material elétrico	Medidor	TOTAL MATERIAL	Instalação	TOTAL GERAL*
Sistema 19 - 300kWh	R\$ 4.500,00	R\$ 3.000,00	R\$ 2.676,16	R\$ 120,00	R\$ 79.257,76	R\$ 18.229,28		R\$ 97.487,04
Sistema 20 - 600kWh	R\$ 6.000,00	R\$ 6.000,00	R\$ 4.862,31	R\$ 120,00	R\$ 143.905,51	R\$ 33.098,27		R\$ 177.003,78
Sistema 21 - 1000kWh	R\$ 12.000,00	R\$ 12.000,00	R\$ 7.597,21	R\$ 120,00	R\$ 224.780,21	R\$ 51.699,45		R\$ 276.479,65
Sistema 22 - 5000kWh	R\$ 32.500,00	R\$ 17.500,00	R\$ 22.905,67	R\$ 120,00	R\$ 677.473,41	R\$ 155.818,88		R\$ 833.292,29
Sistema 23 - 10000kWh	R\$ 62.500,00	R\$ 35.000,00	R\$ 45.373,84	R\$ 120,00	R\$ 1.341.889,32	R\$ 308.634,54		R\$ 1.650.523,86
Sistema 17 - 300kWh	R\$ 4.500,00	R\$ 3.000,00	R\$ 2.676,16	R\$ 120,00	R\$ 79.257,76	R\$ 18.229,28		R\$ 97.487,04
SOL+GMGpro+BAT - 600kWh	R\$ 6.000,00	R\$ 6.000,00	R\$ 4.617,31	R\$ 120,00	R\$ 136.660,51	R\$ 31.431,92		R\$ 168.092,43