

INSTITUTO DE TECNOLOGIA PARA O DESENVOLVIMENTO

KIANE ALVES E SILVA

**MÉTODO PARA SUPORTE NA IMPLANTAÇÃO DE SISTEMAS
FOTOVOLTAICOS INDIVIDUAIS E ISOLADOS EM REGIÕES REMOTAS**

Curitiba

2021

KIANE ALVES E SILVA

**MÉTODO PARA SUPORTE NA IMPLANTAÇÃO DE SISTEMAS
FOTOVOLTAICOS INDIVIDUAIS E ISOLADOS EM REGIÕES REMOTAS**

Dissertação apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento de Tecnologia, Área de Concentração Sistemas Energéticos – Convencionais e Alternativos (SECA), do Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento, em parceria com o Instituto de Engenharia do Paraná, como parte das exigências para a obtenção do título de Mestre em Desenvolvimento de Tecnologia.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Kazumi
Yamakawa

Curitiba
2021

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

S586m

Silva, Kiane Alves e

Método para suporte na implantação de sistemas fotovoltaicos individuais e isolados em regiões remotas [recurso eletrônico] / Kiane Alves e Silva. – Curitiba, 2021.

Dissertação - Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento em parceria com o Instituto de Engenharia do Paraná, Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento de Tecnologia, 2021.

Orientador: Eduardo Kazumi Yamakawa.

1. Geração de energia fotovoltaica. 2. Energia solar. I. Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento. II. Instituto de Engenharia do Paraná. III. Yamakawa, Eduardo Kazumi. IV. Título.

CDD: 343.0928

Bibliotecária: Vanusa Maciel CRB- 9/1928

TERMO DE APROVAÇÃO

KIANE ALVES E SILVA

MÉTODO PARA SUPORTE NA IMPLANTAÇÃO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS INDIVIDUAIS E ISOLADOS EM REGIÕES REMOTAS

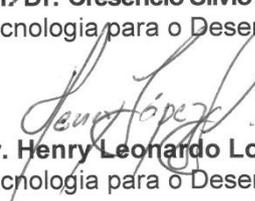
Trabalho de conclusão de curso aprovado como requisito para obtenção do grau de Mestre, no Mestrado Profissional do Programa de Pós-graduação em Desenvolvimento de Tecnologia, realização do Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (LACTEC) em parceria com o Instituto de Engenharia do Paraná (IEP), pela seguinte banca examinadora:



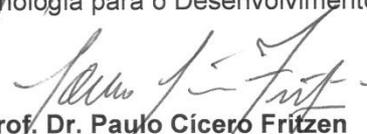
ORIENTADOR: Prof. Dr. Eduardo Kazumi Yamakawa
Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (LACTEC)



Prof. Dr. Cresencio Silvio Segura Salas
Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (LACTEC)



Prof. Dr. Henry Leonardo Lopez Salamanca
Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (LACTEC)



Prof. Dr. Paulo Cícero Fritzen
Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR)

Curitiba, 26 de fevereiro de 2021.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus e a minha família, meus pais Simone e Luiz, meus avós Aguida, José e Rosa, e meu irmão Raphael por todo suporte e apoio durante esse período. Mesmo durante a pandemia, vocês me deram animo e força para continuar. Espero conseguir retribuir todo o amor de vocês.

Ao meu orientador Prof. Dr. Eduardo Kazumi Yamakawa, que sempre esteve disposto a me orientar e incentivar, me direcionando e confiando no meu trabalho.

Aos professores do mestrado, em especial às Prof^{as}. Dras. Ana Paula e Débora e os Profs. Drs. Henry e Juliano, que compartilharam seu conhecimento e me ajudaram durante essa caminhada. Ao o Prof. Dr. Silvio Salas e toda sua paciência, que me ajudou no desenvolvimento e validação do método para recomendações específicas.

Ao LACTEC que me ofertou uma bolsa para cursar esse mestrado.

À equipe do LACTEC, em especial meus colegas do LAC, que acompanharam o meu desenvolvimento e forneceram as informações e experiências necessárias para a execução desse projeto.

Aos amigos Bruna, Erik, Érika, Everton, Filipe, Georgya, Luan, Lucas, Marine, Nicolay, Pablo e Thiago, que sempre se fizeram presentes, me incentivando, apoiando e torcendo por mim.

À minha prima Mayra, pelos conselhos, amor fraternal e por sempre acreditar em mim.

Aos demais familiares e amigos que estiveram comigo nos momentos difíceis, me encorajando e apoiando.

Vocês foram fundamentais para o meu desenvolvimento e crescimento, pessoal e profissional!

“ (...) não há portões, nem fechaduras, nem cadeados com os quais você conseguirá trancar a liberdade do meu pensamento.”

Virgínia Wolf

RESUMO

A ausência de acesso à energia elétrica é tida como um dos fatores que prejudicam o desenvolvimento econômico e social de comunidades situadas em regiões rurais e remotas. No caso de regiões remotas, as características geográficas, climáticas e sociais tornam ainda mais oneroso o fornecimento de energia elétrica a essas populações. Nesse cenário, sistemas fotovoltaicos individuais e isolados (SFII) tem se destacado como solução energética devido ao uso de fonte renovável, possibilidade de uso de mão de obra local, menor impacto ambiental comparado a outras soluções energéticas e possibilidade de padronização. Ainda assim, a literatura apresenta relatos de obstáculos que dificultam a eletrificação dessas regiões, como a dificuldade de acesso e as barreiras geográficas. Desse modo, o presente estudo tem por objetivo desenvolver um método para elaboração de recomendações que possibilitem superar esses obstáculos, fornecendo subsídios que auxiliem as concessionárias de energia no processo de eletrificação de regiões remotas com SFII, considerando aspectos técnicos, econômicos, sociais e climáticos. O estudo teve como base a revisão bibliográfica para levantamento de temas recorrentes relacionados a esses obstáculos, no contexto local do Brasil. Para avaliação do método desenvolvido, foram realizadas simulações para recomendações com influência do local de instalação para o bioma Pantanal com acesso difícil, com dados reais do projeto de eletrificação. Os resultados mostraram que a interação do usuário com o sistema durante todo o processo de implantação, operação e manutenção, é relevante para o sucesso dos projetos de eletrificação. Além disso, o estudo das características e necessidades locais impactam diretamente na viabilidade econômica da solução aplicada, destacando o impacto no dimensionamento, seleção de equipamentos e modelo de manutenção preventiva.

Palavras-chave: Regiões remotas. Eletrificação rural. Sistemas fotovoltaicos isolados. Sistemas fotovoltaicos individuais. Lições aprendidas.

ABSTRACT

The lack of access to electricity in isolated and poor communities remains an enduring social and economic issue for many countries. In remote areas, the geographic, climatic and social characteristics make electrification a difficult and expensive challenge. In this context, Solar Home Systems is becoming a popular solution due to the renewable sources application, the use of local labor, less environmental impact compared to others energy solutions combined with the possibility of modularity and standardization. However, the literature presents reports of obstacles to remote areas electrification even with this technology, such as the difficult access and geographical barriers. Therefore, the present study proposes the help electricity utilities providing a methodology of recommendations that allow overcoming these obstacles with the analysis of technical, economic, social and climatic aspects. This study was based on a bibliographic review to survey recurring themes related to the electrification obstacles in remote areas, then evaluate the method according to its application in the Brazilian context. To assess the method, it was simulated for a remote area with difficult access, due wetland characteristics, with real data from a rural electrification project. The results revealed that the main issue concern is the user involvement during the whole project, which is usually neglected. The study further indicates the analysis of local characteristics and needs has a direct impact on the economic viability of the solution, highlighting the impact on sizing, selection of equipment and preventive maintenance.

Keywords: Remote areas. Rural electrification. Off-grid photovoltaic systems. Solar home systems. Electrification barriers. Lessons learned.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Gráfico do índice de eletrificação e IDH por região do mundo	19
Figura 2 – Configuração básicos de um Sistema fotovoltaico individual e isolado	28
Figura 3 – Exemplos de fontes de energia em regiões remotas do Pantanal Sul-mato-grossense e sertão da Bahia: a) lamparina à querosene; b) local do fogão de lenha; c) gerador à diesel	34
Figura 4 – Problemas encontrados em instalações fotovoltaicas encontradas em regiões remotas do sertão da Bahia: a) Bateria; b) Disjuntor; c) Cabeamento	35
Figura 5 – Processo básico de metodologia multicritério	40
Figura 6 – Comparação entre os métodos de decisão AHP, MAHP e ELECTRE	41
Figura 7 – Etapas do método AHP	42
Figura 8 – Esquemático das entradas e saída do HOMER	48
Figura 9 – Processo de filtragem para seleção do banco de artigos	52
Figura 10 – Mapa do índice de acesso à energia elétrica no Brasil por município	69
Figura 11 – localização espacial dos municípios selecionados de acordo com os biomas brasileiros	71
Figura 12 – Fluxograma do método de Pesquisa	76
Figura 13 – Relação das entradas e saídas do método proposto	78
Figura 14 – Fluxo de interação entre os softwares utilizados no método	79
Figura 15 – Perfil de carga equivalente para regiões remotas	92
Figura 16 – Curva de eficiência de inversor fotovoltaico	95
Figura 17 – Esquemático de entrada e saídas do modelo de manutenção....	100
Figura 18 – Levantamento de temas abordados na literatura a respeito das dificuldades de eletrificação de regiões remotas.....	106
Figura 19 – Análise das notas de impacto das entrevistas	107
Figura 20 – Métodos de educação dos usuários.....	113
Figura 21 – Gráfico de disponibilidade no dia de menor radiação na caatinga	126
Figura 22 – Histograma do estado de carga da bateria OPzS do sistema de 80 kWh/mês	127

Figura 23 – Histograma do estado de Carga da bateria de lítio do sistema de 80 kWh/mês	128
Figura 24 – Gráfico da influência do aumento de SFII no custo e no número de equipes dos modelos de manutenção	130
Figura 25 – Gráfico do impacto da distância interna no rendimento semanal das equipes.....	131
Figura 26 – Custo da manutenção M1 em função da distância interna considerando dificuldade de acesso média.....	132
Figura 27 – Custo da manutenção M2 em função da distância interna considerando dificuldade de acesso média.....	133
Figura 28 – Custo da manutenção M3 em função da distância interna considerando dificuldade de acesso média.....	133
Figura 29 – Gráfico do impacto da distância externa no rendimento semanal das equipes.....	134
Figura 30 – Gráfico do impacto da distância externa no custo da manutenção considerando 100 sistemas.....	135
Figura 31 – Cronologia de publicação.....	156
Figura 32 – Mapa de publicação dos artigos avaliados.....	156
Figura 33 – Esquemático das entradas e saídas do controlador de carga.....	167

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Porcentagem da população com acesso à eletricidade por região do mundo	20
Tabela 2 – Comparação entre fontes renováveis de energia para sistemas isolados	23
Tabela 3 – Disponibilidade mensal de sistemas fotovoltaicos isolados por unidade consumidora conforme resolução normativa 498/2012	37
Tabela 4 – Limite de interrupção de fornecimento	38
Tabela 5 – Exemplo de matriz de comparação	42
Tabela 6 – Escala Saaty para aplicação do método AHP	43
Tabela 7 – Índice de consistência aleatório (h)	44
Tabela 8 – Exemplo de matriz de prioridades relativas	45
Tabela 9 – Exemplo de matriz de prioridades globais	45
Tabela 10 – Lista de <i>softwares</i> para o dimensionamento de sistemas fotovoltaicos individuais e isolados	46
Tabela 11 – Definição dos eixos de pesquisa e palavra-chave	51
Tabela 12 – Métrica dos artigos relevantes	52
Tabela 13 – Relação de artigos relevantes	54
Tabela 14 – Parâmetros para o dimensionamento de sistemas fotovoltaicos individuais e isolados	58
Tabela 15 – Equipamentos com maior desperdício energético para diferentes tipo de acesso à energia	59
Tabela 16 – Benefícios sociais da adoção de sistemas fotovoltaicos individuais e isolados	62
Tabela 17 – Resumo dos elementos críticos em projetos de eletrificação remota segundo revisão da literatura	66
Tabela 18 – Municípios selecionados	70
Tabela 19 – Dados climáticos por bioma	72
Tabela 20 – Quantificação dos equipamentos para base de dados	73
Tabela 21 – Separação dos equipamentos por potência	74
Tabela 22 – Tópicos relevantes na implantação de Sistemas fotovoltaicos individuais e isolados em regiões remotas	75
Tabela 23 – Exemplo de matriz de dados para a aplicação do método AHP ...	80

Tabela 24 - Composição do peso de cada critério	81
Tabela 25 – Influência da temperatura	82
Tabela 26 – Relação dos critérios avaliados por equipamento	83
Tabela 27 – Valor dos argumentos de cada Critério avaliado para bateria	84
Tabela 28 – Critérios de avaliação para controlador de carga	85
Tabela 29 – Critérios de avaliação para painel fotovoltaico	85
Tabela 30 – Critérios de avaliação para inversor	86
Tabela 31 – Variáveis de dimensionamento.....	87
Tabela 32 – Carga elétrica mínima rural com base na literatura	89
Tabela 33 – Relação das curvas típicas levantadas	90
Tabela 34 – Especificações técnicas do painel fotovoltaico genérico	93
Tabela 35 – Especificações técnicas das baterias	94
Tabela 36 – Nível de carga do inversor por sistema	95
Tabela 37 – Constantes de manutenção em regiões remotas	101
Tabela 38 – Inter-relação dos temas dos artigos	107
Tabela 39 – Benefícios sociais da eletrificação de regiões remotas	110
Tabela 40 – Resultado das recomendações de equipamentos.....	117
Tabela 41 – Matriz de prioridades relativas de baterias para o cenário caatinga	118
Tabela 42 – Matriz de Prioridades globais de baterias para o cenário caatinga com transporte difícil	118
Tabela 43 – Matriz de prioridades compostas de baterias para o cenário caatinga com transporte difícil	118
Tabela 44 – Matriz de prioridades globais de painéis fotovoltaicos para o cenário Pampas com transporte médio.....	119
Tabela 45 – Prioridades globais do inversor para os três níveis de dificuldade de acesso	119
Tabela 46 – Descritivo dos resultados de dimensionamento	120
Tabela 47 – Dimensionamento otimizado – sistema 45 kWh/mês – bateria oPzS	121
Tabela 48 – Dimensionamento otimizado – sistema 60 kWh/mês – bateria oPzS	122
Tabela 49 – Dimensionamento otimizado – sistema 80 kWh/mês – bateria oPzS	123

Tabela 50 – Dimensionamento otimizado – sistema 45 kWh/mês – bateria Lítio	123
Tabela 51 – Dimensionamento otimizado – sistema 60 kWh/mês – bateria Lítio	124
Tabela 52 – Dimensionamento otimizado – sistema 80 kWh/mês – bateria Lítio	125
Tabela 53 – Limites de distância interna por dificuldade de acesso sem considerar distância externa.....	132
Tabela 54 – Dados de entrada para validação do método.....	136
Tabela 55 – Resultado da simulação com dados reais	136
Tabela 56 – Classificação dos equipamentos para o estudo de caso real.....	137
Tabela 57 – Comparação dos custos de manutenção por sistema para o estudo de caso real.....	138
Tabela 58 – Quantificação dos resultados da revisão da literatura	154
Tabela 59 – Base de dados de painéis fotovoltaicos	158
Tabela 60 – Base de dados das baterias	158
Tabela 61 – Base de dados do inversor de onda senoidal pura para sistemas fotovoltaicos	159
Tabela 62 – Base de dados do controlador de carga.....	159
Tabela 63 – Resumo dos 40 artigos da revisão da literatura	161
Tabela 64 – Dados do painel fotovoltaico para dimensionamento do controlador	168
Tabela 65 – Resultado do dimensionamento do controlador de carga	169
Tabela 66 – Resultados da simulação para sistemas de 45 kWh/mês	171
Tabela 67 – Resultados da simulação para sistemas de 60 kWh/mês	172
Tabela 68 – Resultados da simulação para sistemas de 80 kWh/mês	173
Tabela 69 – Resultados das simulações de manutenção para 10 sistemas ..	175
Tabela 70 – Resultados das simulações de manutenção para 50 sistemas ..	177
Tabela 71 – Resultados das simulações de manutenção para 100 sistemas	179

LISTA DE SIGLAS

AHP	– Analytic Hierarchy Process
ANEEL	– Agência Nacional de Energia Elétrica
CA	– Corrente Alternada
CC	– Corrente Contínua
COE	– Custo Nivelado da Energia
CRESESB	– Centro de Referência para as Energias Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito
DIC	– Duração de Interrupção Individual
DOD	– Profundidade de Descarga
ELECTRE	– Elimination et Choix Traduisant la Réalité
FC	– Fator de Capacidade
FEA	– Fiji Electricity Authority
IBGE	– Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IC	– Índice de Consistência
IDEAAS	– Instituto para o Desenvolvimento de Energias Alternativas e da Auto Sustentabilidade
IDEAR	– Instituto de Desenvolvimento Sustentável e Energias Renováveis
IDH	– Índice de Desenvolvimento Humano
IDHM	– Índice de Desenvolvimento Humano Municipal
INMETRO	– Instituto Nacional de Metrologia
LCOE	– Custo nivelado da energia
LFTP	– Lifetime Throughput
MAHP	– Multiplicative AHP
MC	– Matriz de Comparação
MME	– Ministério de Minas e Energia
MPG	– Matriz de Prioridades Globais
MPPT	– Maximum Power Point Tracking
MPR	– Matriz de Prioridades Relativas
NASA	– National Aeronautics and Space Administration
NBR	– Norma Brasileira
NREL	– National Renewable Energy Laboratory
O&M	– Operação e Manutenção

ODS	– Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
ONG	– Organização Não Governamental
ONU	– Organização das Nações Unidas
OPzS	
PLpT	– Programa Luz para Todos
PROCEL	– Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica
PRODEEM	– Programa de Desenvolvimento Energético dos Estados e Municípios
PRODIST	– Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional
PV	– Painel Fotovoltaico
PWM	– Pulse Width Modulation
RC	– Razão de Consistência
SFI	– Sistemas Fotovoltaicos Isolados
SFII	– Sistemas Fotovoltaicos Individuais e Isolados
SFV	– Sistemas Fotovoltaicos
SPDA	– Sistema de Proteção contra Descarga Atmosférica
UC	– Unidade Consumidora

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	19
1.1. Contexto	19
1.2. Objetivos.....	22
1.2.1. Objetivo geral	22
1.2.2. Objetivos específicos.....	22
1.3. Justificativa	23
1.4. Estrutura da Dissertação	25
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	27
2.1. Sistemas Fotovoltaicos Individuais e Isolados.....	27
2.1.1. Painel fotovoltaico	29
2.1.2. Controlador de carga.....	29
2.1.3. Baterias	30
2.1.4. Inversor	31
2.2. Eletrificação de Regiões Remotas.....	32
2.3. Regulamentação para eletrificação com Sistemas Isolados.....	37
2.4. Modelagem e Simulação	39
2.4.1. Metodologia Multicritério.....	39
2.4.2. Ferramenta de Dimensionamento	46
2.5. Considerações Finais do Capítulo	49
3. REVISÃO DA LITERATURA	50
3.1. Processo de Pesquisa Bibliométrica.....	50
3.1.1. Definição das palavras-chaves.....	50
3.1.2. Seleção do banco de artigos	51
3.2. Análise Crítica das Contribuições mais relevantes.....	57
3.2.1. Aspecto técnico	57
3.2.2. Aspecto econômicos	60
3.2.3. Aspecto social	61

3.2.4. Aspecto regulatório.....	63
3.2.5. Implantação de sistemas fotovoltaicos isolados.....	65
3.3. Considerações Finais do Capítulo	66
4. METODOLOGIA.....	68
4.1. Materiais	68
4.1.1. Dados de eletrificação.....	68
4.1.2. Dados climáticos	72
4.1.3. Entrevistas.....	73
4.1.4. Dados dos equipamentos	73
4.1.5. Dados da literatura	74
4.2. Método.....	76
4.2.1. Método para recomendações gerais	76
4.2.2. Método para recomendações específicas	77
4.2.3. Testes e simulação.....	104
4.3. Considerações Finais do Capítulo	105
5. RESULTADOS E ANÁLISES	106
5.1. Recomendações Gerais	108
5.1.1. Envolvimento dos usuários.....	108
5.1.2. Educação dos usuários	112
5.2. Recomendações específicas	116
5.2.1. Recomendação de equipamentos.....	116
5.2.2. Recomendação de dimensionamento	120
5.2.3. Recomendação do modelo de manutenção preventiva.....	129
5.2.4. Verificação do método com dados reais.....	136
6. CONCLUSÃO	139
REFERÊNCIAS.....	142
APÊNDICE 1. Revisão da Literatura.....	154

APÊNDICE 2.	Estrutura do questionário das Entrevistas	157
APÊNDICE 3.	Base de dados de equipamentos	158
APÊNDICE 4.	Resumo dos artigos relacionados.....	161
APÊNDICE 5.	Respostas das questões abertas	165
APÊNDICE 6.	Dimensionamento do controlador.....	167
APÊNDICE 7.	Resultado do dimensionamento por cidade simulada ...	171
APÊNDICE 8.	Resultado das simulações de manutenção	175

1. INTRODUÇÃO

1.1. Contexto

O acesso à energia elétrica está diretamente relacionado ao desenvolvimento econômico e social das comunidades. Comunidades que não são eletricamente atendidas, geralmente possuem precariedade de serviços, como educação, saúde, segurança e bem-estar (JAVADI, et al., 2013). Tal fato pode ser observado quando se compara o acesso à eletricidade com os indicadores de desenvolvimento humano (IDH), como mostra a Figura 1.

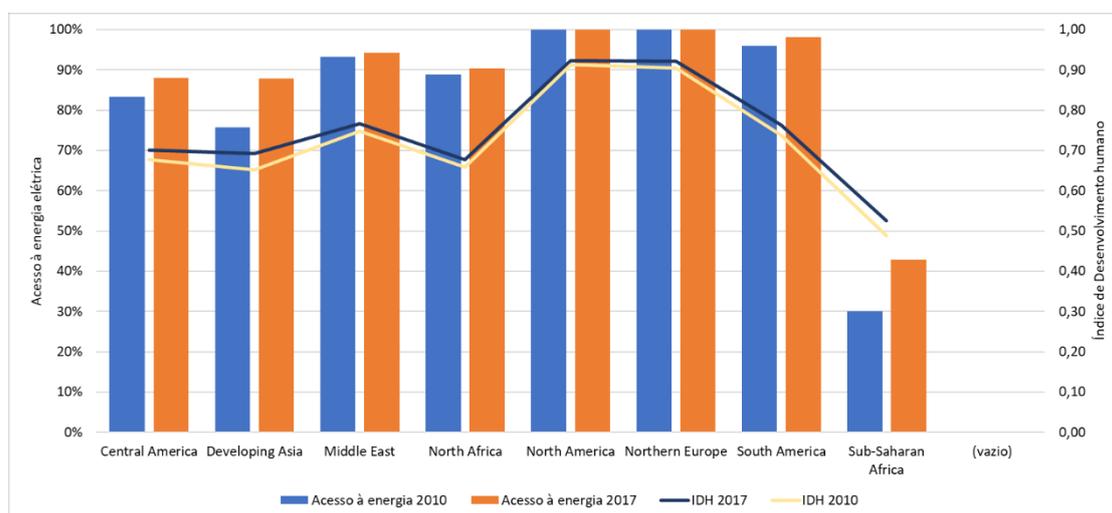


FIGURA 1 – GRÁFICO DO ÍNDICE DE ELETRIFICAÇÃO E IDH POR REGIÃO DO MUNDO

FONTE: Adaptado de INTERNACIONAL ENERGY AGENCY (IEA) (2018) e ONU (2018)

Como mostra o gráfico da Figura 1, as variações nos índices de eletrificação (percentual da população com acesso à energia) e IDH são equivalentes, ou seja, regiões com maiores índices de acesso à energia, conseqüentemente possuem um melhor IDH. Porém, os dados da Figura 1 englobam tanto as áreas urbanas quanto rurais. Analisando apenas as áreas rurais, o índice de eletrificação tende a ser ainda menor (Tabela 1).

TABELA 1 – PORCENTAGEM DA POPULAÇÃO COM ACESSO À ELETRICIDADE POR REGIÃO DO MUNDO

Região	Urbana	Rural	População sem acesso (milhão)
África	74%	36%	603
Ásia subdesenvolvida	98%	85%	351
América do Sul e Central	98%	86%	20
Oriente Médio	98%	78%	18

FONTE: IEA (2018)

Como mostra a Tabela 1, as regiões rurais possuem uma taxa de eletrificação entre 12 a 38% inferior comparado às regiões urbanas. Dentre as justificativas para essa baixa taxa, destacam-se a dificuldade de acesso, longas distâncias, baixa densidade populacional e barreiras geográficas, ambientais e climáticas (URMEE; MD, 2016).

Diversos países têm estudado soluções sustentáveis para eletrificação dessas regiões. Essa iniciativa foi reforçada em 2015 na reunião para a Agenda 2030, quando os membros da Organização das Nações Unidas (ONU) definiram os 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) (ONU, 2019). Dentre os objetivos, o ODS 7 é diretamente relacionado a eletrificação, que tem por objetivo a universalização da energia elétrica, de forma sustentável, de qualidade e a preço acessível, além de aumentar a participação de geração de fontes renováveis na matriz energética global.

Dentre as soluções estudadas, sistemas fotovoltaicos (SFV) tem se destacado no cenário internacional e nacional. Países como Austrália, Laos e da África Subsaariana, viram na energia solar uma opção viável para a eletrificação de regiões remotas. Dentre suas principais vantagens, destacam-se (BAMBAWALE; D'AGOSTINO; SOVACOOOL, 2011; AZIMOH et al., 2017; JAMAL et al., 2017):

- Uso de recursos naturais da região;
- Possibilidade de usar mão de obra local para instalação, operação e manutenção do sistema;
- Menor impacto ambiental e maior facilidade de transporte de equipamentos;

- Possibilidade de padronização e ampliação gradual.

Logo, diferentes ações têm sido realizadas para universalizar o acesso à energia com a implantação de SFV. Em Bangladesh, o programa de governamental de desenvolvimento de infraestrutura promoveu financiamentos para projetos de implantação de infraestrutura de energias renováveis, com ênfase em energia fotovoltaica, aumentando o índice de eletrificação de 22,5% no ano de 2008 para 75% no ano de 2018. Em Fiji, o *Fiji Electricity Authority* (FEA), uniu o governo de Fiji e do Japão com o objetivo de alcançar a sustentabilidade e o desenvolvimento de serviços de energia (ALMESHQAB; USTUN, 2019).

No Brasil, dentre as iniciativas de eletrificação rural destacam-se o Programa Luz Solar (implantado no estado de Minas Gerais em 1999), o Programa Luz do Sol (implantado na região nordeste) e os programas de abrangência nacional: Programa Nacional de Eletrificação Rural, Luz no Campo, Programa de Desenvolvimento Energético dos Estados e Municípios (Prodeem) e o Programa Luz para Todos. Além disso, diversas concessionárias como Coelba, Copel, Elektro, Energisa, Cemig e Eletronorte, têm realizado a eletrificação de propriedades em regiões remotas por meio de sistemas fotovoltaicos isolados¹ (SFI), podendo ser na modalidade individual (SFII) ou comunitária, chamada microrrede. No caso das regiões remotas, devido à baixa densidade demográfica, as microrredes se tornam inviáveis, tornando SFII a melhor opção.

Ainda que SFII seja a solução recomendada, diversas barreiras como a falta de padronização e regulação, elevado custo operacional e o uso incorreto pelo usuário são alguns dos principais obstáculos para o sucesso dos projetos de eletrificação rural (WOUTERS, 2015). Por serem isolados geograficamente, a dificuldade de deslocamento para realizar as atividades de operação e manutenção (O&M) dificultam o acompanhamento do desempenho dos sistemas, ficando o usuário desprotegido no caso de mau funcionamento ou outras falhas.

¹ Sistema isolado: sistema de geração de energia elétrica não conectado à rede convencional.

Desse modo, assim como se propõe o presente trabalho, é preciso que sejam estudados aspectos técnicos e não técnicos, como os sociais, ambientais e climáticos e econômicos que influenciam no sucesso da implantação de SFII para eletrificação de regiões remotas. Dentre os aspectos técnicos tem-se as características da carga, dimensionamento e soluções para a realização da O&M do sistema. Já, os desafios não técnicos são referentes a confiança no fornecimento de energia, dificuldade de entendimento em relação a integração das tecnologias, isolamento geográfico e as características ambientais e climáticas (JAMAL et al., 2017).

1.2. Objetivos

Fundamentados nos pontos apresentados na seção 1.1, foram propostos os objetivos gerais e específicos, apresentados a seguir.

1.2.1. Objetivo geral

Elaborar de um método de recomendações que auxiliem as concessionárias de energia na padronização de suas normas técnicas com relação a eletrificação de regiões remotas do Brasil com SFII.

1.2.2. Objetivos específicos

- Avaliar pontos críticos para o sucesso da eletrificação rural baseados em estudos de caso da literatura, mediante abrangência de aplicação no cenário nacional e também regional;
- Determinar as características climáticas que requerem requisitos específicos para a eletrificação por SFII;

- Determinar as características sociais e econômicas que impactam na implantação de SFII em regiões remotas e elaborar práticas para dirimi-las;
- Elaborar um método para geração de recomendações para implantação e O&M de SFII de acordo com as características climáticas de cada localidade;
- Avaliar o método para recomendações específicas através de simulações utilizando dados reais.

1.3. Justificativa

Sistemas elétricos de potência isolados têm emergido como uma alternativa para eletrificação de regiões remotas. Estes sistemas apresentam a vantagem de ter uma geração local, utilizando principalmente fontes renováveis disponíveis localmente (PINHEIRO et al., 2011).

Dentre as possibilidades de fontes renováveis, a energia solar se torna a opção viável de menor impacto para regiões remotas, como mostra a Tabela 2.

TABELA 2 – COMPARAÇÃO ENTRE FONTES RENOVÁVEIS DE ENERGIA PARA SISTEMAS ISOLADOS

	Vantagem	Desvantagem
Biomassa	Baixo risco ambiental Baixo custo de aquisição	Emissão de gases poluentes Baixa eficiência Esgotável
Eólica	Inesgotável Não emite gases poluentes	Impacto visual Fonte intermitente Impacto sonoro Impacto na avifauna Ocupa grande espaço geográfico
Geotérmica	Ocupa pouco espaço geográfico Alta eficiência energética	Manutenção cara Poluição sonora Depende de um local geográfico específico

CONTINUAÇÃO TABELA 1 – PORCENTAGEM DA POPULAÇÃO COM ACESSO À ELETRICIDADE POR REGIÃO DO MUNDO

	Vantagem	Desvantagem
Hidrelétrica	A lagoa proporciona água para irrigação Facilita o transporte fluvial	Destruição da vegetação ciliar e cultura local com a barragem Assoreamento dos rios Deslocamento da população ribeirinha
Lixo	Reduz emissão de gás metano Reduz lixões Produz biogás	Necessita compromisso da população e empresas para coleta Elevado custo na implantação do sistema
Solar	Inesgotável Não emite gases poluentes Ocupa pouco espaço geográfico Baixo custo de manutenção	Depende das condições climáticas Intermitência da fonte solar

FONTE: SANTOS et al. (2015)

Analisando a Tabela 2 é possível observar que a fonte solar causa um menor impacto ao meio ambiente quando comparado a outras fontes, que requerem uma grande área para implantação como é o caso da hidrelétrica, não são poluentes, como a biomassa, e requerem elevado custo de implantação e/ou manutenção, como a geotérmica e lixo.

Com relação as desvantagens para a fonte solar, a intermitência da fonte solar e sua dependência das condições climáticas fazem com que haja períodos de baixa ou nenhuma produção elétrica. Para isso, a implantação de SFII com sistema de armazenamento de energia tem por objetivo compensar esses períodos em que a fonte solar é insuficiente.

No Brasil, SFII tem sido a alternativa encontrada por concessionárias de energia para a eletrificação de regiões remotas, principalmente após o Decreto nº 7.246/2010 que regulamentou a lei que dispõe sobre o serviço de energia elétrica dos SI (BRASIL, 2010). Analisando os planos de universalização das concessionárias não universalizadas na área rural desde o início do programa, há um total de 39.542 SI com data limite em 2022 (ANEEL, 2020).

Além das concessionárias, outras empresas privadas e organizações não governamentais (ONG), também utilizam essa solução para fornecer acesso a eletricidade. Como exemplos, podemos citar a Litro de Luz, Piauí Solar, *Winrock International*, Instituto de desenvolvimento sustentável e energias renováveis – IDEAR, Insolar e o Instituto para o Desenvolvimento de Energias Alternativas e da Auto Sustentabilidade – IDEAAS.

Porém, as dificuldades relacionadas a eletrificação de regiões remotas, como as longas distâncias, interação com o usuário, custos de O&M, acabam sendo obstáculos na implantação de SFII, tanto para as concessionárias, quanto para ONGs.

A fim de auxiliar essas empresas, com foco nas concessionárias, a superar essas barreiras, torna-se necessária a realização de um estudo da literatura para levantamento dos principais pontos críticos que impactam no sucesso da eletrificação de regiões remotas e também dos métodos utilizados para suprimir essas dificuldades. Além, é claro, de considerar os padrões mínimos conforme regulamentação nacional e as características do local de instalação, possibilitando uma avaliação mediante abrangência no cenário nacional e também regional.

Assim, justifica-se o objetivo desse trabalho, que visa a elaboração de um método que auxilie as empresas responsáveis pela implantação de SFII em regiões remotas, propondo recomendações que viabilizem os projetos, atendendo as características sociais e climáticas do local de instalação.

1.4. Estrutura da Dissertação

A fim de facilitar a compreensão do presente trabalho, o texto está dividido em seis capítulos. O primeiro capítulo aborda a introdução do trabalho. Nele, é realizado a apresentação e contextualização do tema de eletrificação de região remotas com ênfase na implantação de SFII como solução para ausência de acesso à energia elétrica. Em seguida, são apresentados os objetivos do presente estudo, com foco na aplicação no cenário nacional e as particularidades de cada região, e, por fim, a justificativa que demonstra a relevância da pesquisa.

O segundo capítulo apresenta o conceito e descrição das questões fundamentais para o entendimento da pesquisa. Nele, são apresentados os seguintes tópicos:

- Conceito de SFII e o detalhamento de seus componentes;
- Definição de regiões remotas e descrição dos principais obstáculos que dificultam sua eletrificação;
- Síntese do histórico nacional da disseminação de SFII para eletrificação de regiões remotas;
- Apresentação dos métodos utilizados para o desenvolvimento do trabalho.

Em sequência o terceiro capítulo detalha os processos realizados na pesquisa bibliográfica para a composição do portfólio bibliográfico e apresenta a análise crítica dos artigos mais recentes, a fim de comprovar a relevância atual do tema.

O quarto capítulo apresenta os materiais e o método utilizados no desenvolvimento do trabalho. Com relação ao método, devido às restrições de aplicação dos resultados, ele foi dividido em um método para recomendações gerais e um para recomendações específicas.

O quinto capítulo contém os resultados para as recomendações gerais e específicas. No caso das recomendações específicas, além da análise individual, também é apresentada a avaliação utilizando dados reais para eletrificação de regiões remotas do Pantanal Sul-mato-grossense.

Por fim, no capítulo seis são abordadas as conclusões obtidas com o presente estudo, contendo reflexões sobre as dificuldades envolvidas na eletrificação de regiões remotas com aplicação de SFII. Também são apresentadas as limitações da pesquisa e a sugestão para trabalho futuros, seja para aplicação no contexto nacional, quanto internacional.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O presente capítulo aborda as questões fundamentais para a elaboração desse trabalho, voltadas aos seguintes temas:

- Definição de SFII e detalhamento de seus componentes;
- Conceito de regiões remotas e as barreiras associadas a eletrificação da região;
- Apresentação dos principais pontos nacionais que regularizam a implantação de SFII;
- Apresentação das ferramentas utilizadas desenvolvimento do trabalho, o método AHP e o *software* HOMER.

A seguir, cada um desses temas será detalhado.

2.1. Sistemas Fotovoltaicos Individuais e Isolados

De acordo com o Centro de Referência para as Energias Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito (CRESESB), SFIs são sistemas não conectados à rede convencional de energia, tendo como a fonte solar a única fonte de energia, além de um sistema de armazenamento de energia (CRESESB, 2006). Além disso, eles podem ser para atendimento comunitário, realizado através do sistema de microrrede, ou individual (LOUIE, 2018).

SFII são sistema individuais, dimensionados para atendimento de uma única unidade consumidora (UC). Sua aplicação é destacada especialmente em regiões remotas, onde a demanda é muito baixa ou o custo do combustível é muito elevado. Alguns fatores que influenciam para sua popularização são (MORENO, 2015; WESTPHAL et al., 2017; KHAN, 2020):

- Possibilidade de padronização para eletrificação em escala;
- Facilidade de instalação;
- Atende a dispersão geográfica característica de regiões remotas;
- Os equipamentos são mais simples, comparados à microrredes;

- Possuem apelo ambiental por serem de origem renovável e não produzir gases poluentes durante o seu funcionamento;
- Possibilidade de modularidade;
- Idealizado para atendimento de necessidades elétricas básicas, como iluminação e refrigeração para conservação de alimentos.

Desse modo, o SFII é um sistema tipicamente pequeno e simples, viável para atendimento de famílias de baixa renda (BATTEIGER; ROTTER, 2018).

A Figura 2 apresenta a configuração básica do sistema.

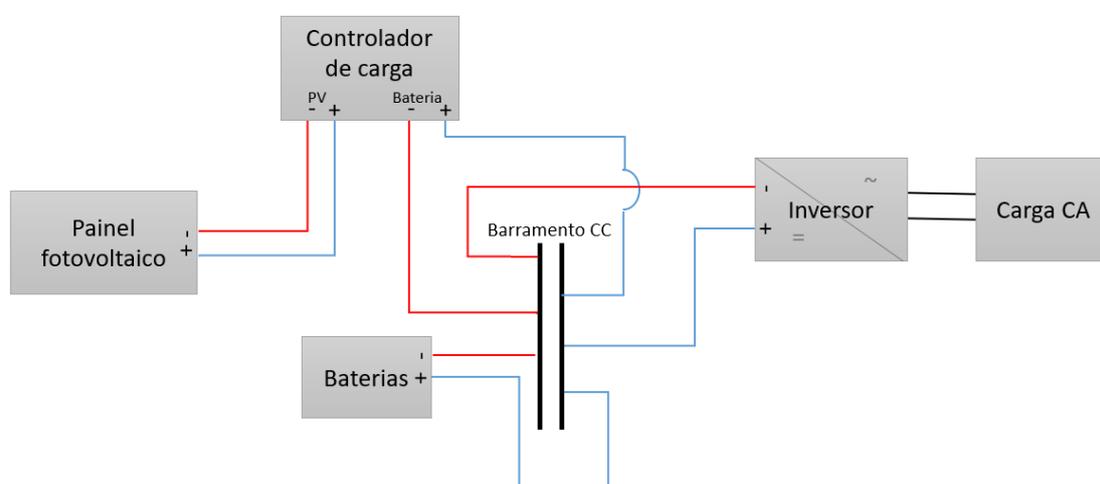


FIGURA 2 – CONFIGURAÇÃO BÁSICOS DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO INDIVIDUAL E ISOLADO

FONTE: A AUTORA (2021)

Conforme mostra a Figura 2, o sistema é composto por quatro equipamentos principais: painel fotovoltaico (PV), bateria, controlador de carga e inversor. O funcionamento é baseado na geração de energia por meio dos PV, sendo direcionada para o atendimento da carga e para a recarga das baterias. Como os PVs e as baterias fornecem energia em corrente contínua (CC), é necessário a inclusão de um inversor de corrente, que transforma a energia em corrente alternada (CA) para atendimento de cargas CA. O detalhamento de cada um desses equipamentos é apresentado a seguir.

2.1.1. Painel fotovoltaico

O módulo ou PV é o componente responsável pela geração de energia do sistema. Ele é composto por várias células fotovoltaicas fabricadas de material semicondutor que utilizam a luz solar e o efeito fotovoltaico para a geração de energia elétrica. O número de células e o tipo de arranjo definem a tensão e corrente nominais do PV.

Com relação ao material das células, o de maior representatividade comercial são as células de silício cristalino, que podem ser mono ou policristalinos. A diferença entre os dois tipos está na forma de obtenção do material – no silício monocristalino forma-se um único cristal, enquanto para o policristalino é formado um bloco composto por pequenos cristais (EDALATI; AMERI; IRANMANESH, 2015).

Apesar de serem semelhante elétrica e mecanicamente, o estudo realizado por Edalati, Ameri e Iranmanesh (2015) mostrou que, em alta temperaturas a eficiência dos painéis policristalinos é relativamente maior que as do monocristalinos considerando um mesmo coeficiente de temperatura.

Outros fatores que influenciam na eficiência dos PVs são: temperatura, irradiação solar, velocidade do vento, ângulo de inclinação, sombreamento, poeira e sujeira.

2.1.2. Controlador de carga

O controlador de carga é o equipamento responsável pelo controle da tensão no barramento CC. Além disso, ele também tem a função de proteger a bateria, não permitindo uma tensão superior a tensão de flutuação, diminuindo sua vida útil (REITER, R. A.; REITER, R. D.; PÉRES, 2014). Por esse motivo, ele deve ser dimensionado e especificado de modo compatível com a tecnologia do banco de baterias e configurado visando a otimização do sistema.

Com relação a diferenças entre os controladores disponíveis no mercado, destacam-se os controles PWM (modulação por largura de pulso) e MPPT

(rastreamento de máxima potência). O controle PWM é considerado o modo mais eficaz de alcançar a tensão desejada da bateria, diminuindo ou aumentando a corrente do PV conforme condição de carga da bateria.

Já o controlador MPPT é considerado mais sofisticado. Ele opera rastreando o ponto de máxima potência do PV, conseqüentemente, a tensão do ponto de máxima potência para o carregamento das baterias. Esse tipo de controle depende do arranjo, clima e das condições de carga utilizadas, uma vez que, se o PV obtiver tensão inferior à tensão da bateria, não ocorre o carregamento (REITER, R. A.; REITER, R. D.; PÉRES, 2014).

Desse modo, a tecnologia MPPT possui uma melhor eficiência quando comparado ao PWM em situações críticas, como elevadas temperaturas e baixa irradiância solar, chegando a ter um rendimento entre 10% a 40% superior (RUSHWORTH, 2014).

2.1.3. Baterias

O sistema de armazenamento é parte essencial dos SFII para suprir a demanda de energia quando a geração fotovoltaica é insuficiente ou nula, como por exemplo em períodos noturnos e períodos com baixa irradiância solar (PINHO; GALDINO, 2014).

Para atender as necessidades de SFII, é importante que as baterias sejam baterias carregáveis e permitam uma profundidade de descarga (DoD) superior a 50% para que forneça energia por longos períodos, conseqüentemente, permitindo uma maior capacidade de ciclagem. Por esse motivo, baterias automotivas, apesar de serem comuns nesse tipo de instalação, não são indicadas, pois são projetadas para descarregas apenas 20% de sua capacidade. Além disso, elas precisam ter uma temperatura de operação adequada as características climáticas do local de instalação e uma capacidade compatível à carga.

Um indicador interessante das baterias é o *Lifetime Throughput* (LFTP), traduzido como rendimento da vida útil, ele informa a taxa de transferência energética ao longo da vida da bateria considerando o número de ciclos estimado para um determinado DoD. O LFTP é calculado conforme equação (1).

$$LFTP = E_{kWh} \cdot DoD \cdot n^{o}ciclos_{DoD} \quad (1)$$

Onde E_{kWh} é a energia nominal e $n^{o}ciclos_{DoD}$ é o número de ciclos para um determinado DoD.

Entre as baterias indicadas para SFII, destacam-se três tecnologias: as baterias de chumbo-ácido, lítio e Na-NiCl₂. As baterias de chumbo-ácido são a tecnologia mais popular devido ao baixo custo de investimento e com eficiência entre 75 e 85%. No Brasil, as baterias estacionárias com placas tubulares (OPzS) são um dos tipos recomendados para uso em SFV (EASE, 2020).

As baterias de lítio possuem a maior eficiência do mercado, entre 90 e 98%. Devido a sua baixa taxa de autodescarga e pouca manutenção, são a tecnologia emergente para aplicação em SFV, tendo como principal barreira o custo elevado no mercado nacional. O componente eletroquímico comumente comercializado para essa aplicação é o LiFePO₄ (EASE, 2020).

Por fim, a bateria de sódio-cloreto de níquel, também chamada de bateria Zebra, possui eficiência entre 85 e 95% e densidade energética entre 100 a 120 Wh/kg. Sua principal característica é a temperatura de operação elevada (entre 270 e 350 °C), sendo uma opção adequada para ambientes com elevada temperatura. Em contrapartida, para atingir essa temperatura, ela possui um sistema de controle de temperatura interna, requerendo algumas horas de inicialização para que esteja operacional (EASE, 2020).

2.1.4. Inversor

O inversor é o componente responsável por transformar a energia fornecida em CC pelo gerador fotovoltaico e a bateria em CA para o atendimento da carga doméstica. Dentre as diferenças tecnológicas do inversor, ele pode ser caracterizado conforme o tipo de onda produzida (ALI; SALIH, 2013):

- Inversor de onda quadrada: tem alto conteúdo harmônico e pouca regulação de tensão de saída, sendo adequado para cargas resistivas e lâmpadas incandescentes;
- Inversor de onda senoidal modificada: possui regulação de tensão aprimorada, mas não é eficiente na operação de motores pois os harmônicos são dissipados nos enrolamentos do motor;
- Inversor de onda senoidal é o mais indicado para uso em SFII, produzindo uma onda equivalente às concessionárias de energia elétrica. Além disso podem atender a qualquer carga CA e possui eficiência de operação no pico da potência de 90%.

Dentre os parâmetros a serem observados no inversor, além do tipo de onda, tem-se (DAYSTAR, 1995):

- Eficiência de conversão;
- Potência nominal, compatível ao sistema de geração;
- Frequência compatível com a regulamentação local;
- Tensão de entrada compatível com o sistema de geração e tensão de saída compatível com a carga;
- Autoconsumo baixo;
- Função “soneca”, que permite que o inversor entre em modo *stand by* quando não estiver sendo utilizado.

2.2. Eletrificação de Regiões Remotas

Conforme apresentado no item 1.1 a falta de acesso a eletricidade tem relação direta com diversos problemas sociais, como pobreza, fome e desigualdade de gênero. Em locais remotos, esses problemas podem ser intensificados. Por isso, é fundamental que se defina o conceito de regiões remotas e sejam detalhados os principais obstáculos presentes na eletrificação dessas regiões, a serem apresentados no presente capítulo.

No Brasil, o Governo Federal define regiões remotas como “pequenos grupamentos de consumidores situados em Sistema Isolado, afastados das

sedes municipais, e caracterizados pela ausência de economias de escala ou de densidade” (BRASIL, 2010). A dificuldade de acesso, devido as condições das estradas e as longas distâncias, tornam de elevado custo a interação com regiões mais desenvolvidas.

Além disso, essas regiões também são caracterizadas por altos índices de analfabetismo, ausência de atendimento à saúde e de água potável (SAHNS; STIFEL, 2004).

Com relação à energia, as principais dificuldades para o acesso à energia elétrica são (AHLBORG; HAMMAR, 2011; TORERO, 2015; AZIMOH et al., 2017; HERNÁNDEZ-CALLEJO; GALLARDO-SAAVEDRA; ALONSO-GÓMEZ, 2019; SALAS; SILVEIRA, 2017):

- Baixa densidade demográfica, com poucas unidades consumidoras dispersas;
- Baixo consumo energético, tornando “difícil” o retorno financeiro do projeto;
- Elevados custo de suporte e manutenção dos equipamentos;
- Ausência de infraestrutura ou infraestrutura rudimentar;
- Falta de conhecimento técnico para operar o sistema;
- Difícil acesso e distante dos centros de consumo.

Devido às restrições para fornecimento da energia elétrica convencional, as alternativas encontradas em diversas comunidades são equipamentos manuais, a pilha e a base de fontes térmicas, como óleo diesel, querosene e carvão, como mostram os exemplos apresentados na Figura 3.



A)



B)



C)

FIGURA 3 – EXEMPLOS DE FONTES DE ENERGIA EM REGIÕES REMOTAS DO PANTANAL SUL-MATO-GROSSENSE E SERTÃO DA BAHIA: A) LAMPARINA À QUEROSENE; B) LOCAL DO FOGÃO DE LENHA; C) GERADOR À DIESEL

FONTE: A AUTORA (2021)

Como mostra a Figura 3, os geradores são de pequeno porte, sendo uma alternativa poluente, podendo resultar a longo prazo em problemas de saúde aos seus usuários, limitada e que geram ruído e vibração (SALAS; SILVEIRA, 2017). Além disso, são soluções não eficientes, de alto consumo e, muitas vezes, sem a devida segurança que a instalação requer (MORAES, 2013).

No Brasil, alternativas sustentáveis, como SFII, têm sido difundidas como alternativas para a eletrificação dessas regiões. Porém, em alguns casos, mesmo havendo a normativa para instalações elétricas de baixa potência (NBR 5410) e o padrão mínimo de atendimento estabelecido pela Resolução

Normativa 493/2012, diversos problemas de segurança podem ser encontrados, como mostra a Figura 4.



A)



B)



C)

FIGURA 4 – PROBLEMAS ENCONTRADOS EM INSTALAÇÕES FOTOVOLTAICAS ENCONTRADAS EM REGIÕES REMOTAS DO SERTÃO DA BAHIA: A) BATERIA; B) DISJUNTOR; C) CABEAMENTO

FONTE: A AUTORA (2021)

A Figura 4 apresenta exemplos de problemas de segurança encontrados em algumas instalações de SFII, sendo eles: baterias instaladas em ambiente interno sem proteção; disjuntor instalado em placa de metal sem proteção, com remendos e ao alcance de pessoas; cabeamento sem padronização e exposto. Nessa abordagem, o problema energético de regiões remotas passa também a ser um problema de segurança para os moradores.

Além dos problemas de segurança, outras barreiras que se destacam são (TORERO, 2015):

- Ausência de modelo padrão para embasamento dos projetos e aquisição de equipamentos;
- Necessidade de avaliação de recursos e estudos de engenharia mais detalhados, exigindo uma maior preparação da empresa e custos elevados;
- Ausência de procedimentos de certificação que garantam a conformidade com os regulamentos técnicos e de segurança;
- Necessidade de capacitação local relacionada às energias renováveis, mecânica e eletricidade, para uma correta operação e manutenção do sistema;
- Investimento de elevado custo e risco associado.

No caso das concessionárias, é importante ressaltar que elas são as responsáveis pela definição e delimitação de suas normas técnicas para eletrificação de regiões remotas, de acordo com suas metas de universalização, impacto tarifário e subsídios governamentais.

Ainda, deve-se também considerar as características da população de regiões remotas e os impactos e restrições socioambientais da implantação da alternativa energética na comunidade que se deseja eletrificar. De acordo com o último censo, a região rural possui o Índice de Desenvolvimento Humano Municipal (IDHM) de 0,586, considerado baixo² e que reflete os problemas de educação e renda que a população rural enfrenta (PEREIRA; CASTRO, 2019). Para isso, Moreno (2015), sugere que:

- O usuário esteja ciente das limitações do SFII e como ele opera;
- A interface seja clara para que o usuário entenda as possíveis falhas;
- Treinamento do usuário para realização de manutenção básica.

Com relação as restrições socioambientais, é importante considerar os instrumentos legais de preservação, com análises georreferenciadas dos meios físicos, bióticos e socioeconômicos. Essas análises visam identificar e mensurar

² Considerado baixo em relação ao IDHM urbano de 0,750, considerado alto.

os possíveis impactos e restrições da implementação do sistema energético, evitando o abandono parcial ou total do projeto (SALAS; SILVEIRA, 2017).

2.3. Regulamentação para eletrificação com Sistemas Isolados

A Resolução Normativa nº 83/2004 foi a primeira a regulamentar e estabelecer os procedimentos e condições para instalação de SFII, sendo posteriormente revogada pela Resolução Normativa nº 493/2012 que estabelece os procedimentos e as condições de fornecimento por meio de SFI, individuais e comunitários. Na resolução, destacam-se as seguintes diretrizes para o fornecimento por meio de SFI (ANEEL, 2012):

- Fornecedor em CA, observando os níveis de tensão local (127 V ou 220 V). Existe também a possibilidade de fornecimento em CC, conforme características da carga e anuência do consumidor. Este trabalho irá abranger apenas atendimento em CA;
- Padronização da disponibilidade de atendimento dos sistemas em seis categorias, conforme Tabela 3.

TABELA 3 – DISPONIBILIDADE MENSAL DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS ISOLADOS POR UNIDADE CONSUMIDORA CONFORME RESOLUÇÃO NORMATIVA 498/2012

Disponibilidade mensal (kWh/mês)	Consumo de referência (Wh/dia)	Potência mínima (W)
13	435	250
20	670	250
30	1.000	500
45	1.500	700
60	2.000	1.000
80	2.650	1.250

FONTE: ANEEL (2012)

A disponibilidade é definida com base no consumo diário da UC, estabelecendo o alcance da disponibilidade mensal do sistema, variando de 13 a 80 kWh/mês;

- Autonomia mínima de 48 h do sistema de armazenamento;

- Prazo máximo de 72 h para interrupções de ordem técnica, ou seja, manutenções corretivas ou preventivas;
- Componentes do sistema aprovados pelo Programa Brasileiro de Etiquetagem do Instituto Nacional de Metrologia – INMETRO ou outra organização similar e credenciada;
- Atendimento as disposições do manual de Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST) para fornecimento em CA, em especial o módulo 8 de qualidade de energia, que trata (ANEEL, 2021):
 - Tensão em regime permanente;
 - Fator de potência e harmônicos;
 - Desequilíbrio de tensão;
 - Flutuação de tensão;
 - Variação de frequência;
 - Variações de tensão de curta duração.
- Limite do indicador de duração de interrupção individual por UC (DIC), conforme Tabela 4.

TABELA 4 – LIMITE DE INTERRUPTÃO DE FORNECIMENTO

Indicador	Limite [h]
DIC mensal	216
DIC anual	648

FONTE: ANEEL (2012)

Conforme mostra a Tabela 4, esse indicador é medido em horas, limitando o intervalo de interrupções mensais em 216 h e interrupções anuais em 648 h.

Ainda, no âmbito do Programa Luz para Todos (PLpT), a universalização também deve seguir as orientações do Manual de Operacionalização. Apesar do manual ter como foco os critérios financeiros do programa, ele também estabelece alguns critérios técnicos para o atendimento, ressaltando (MME, 2018):

- Kit de instalação interna, que consiste no fornecimento e instalação de um ponto de luz no cômodo (limitado a três pontos de luz), duas tomadas, condutores, lâmpadas e demais materiais necessários;

- Considerar lâmpadas fluorescentes compactas eficientes de 9 a 11 W, ou equivalentes de tecnologia superior;
- Instalação interna seguindo as normas de instalação para baixa tensão - NBR 5410.

Essas e as demais diretrizes apontadas na resolução visam garantir a qualidade do fornecimento da energia elétrica de SFII, trazendo as obrigações para o atendimento, operação e manutenção dos sistemas. Porém, até o presente momento não há resoluções ou normas que padronizem a instalação e o modelo de O&M, viabilizando os sistemas.

2.4. Modelagem e Simulação

Para o desenvolvimento do projeto, foram utilizadas duas ferramentas. A primeira referente a uma metodologia multicritério para auxiliar na tomada de decisões necessárias para que as recomendações sejam as mais adequadas ao local de instalação de SFII e a segunda ferramenta refere-se ao dimensionamento otimizado do SFII. O presente capítulo apresenta a seleção dessas ferramentas.

2.4.1. Metodologia Multicritério

Metodologias multicritérios tem por objetivo auxiliar no processo de tomada de decisão que envolvem múltiplos critérios conflitantes. Para isso, já na década de 70 foram desenvolvidos métodos matemáticos que auxiliassem nessa decisão, analisando o problema e escolhendo a alternativa mais adequada.

De modo geral, as metodologias multicritérios seguem o processo apresentado na Figura 5.



FIGURA 5 – PROCESSO BÁSICO DE METODOLOGIA MULTICRITÉRIO

FONTE: A AUTORA (2021)

Conforme mostra a Figura 5, o processo básico utilizado em metodologias multicritérios, tem como ponto inicial a detecção do problema que se deseja resolver. O problema deve estar bem estabelecido e estruturado para que fique claro o objetivo da análise. Em seguida são elaborados os critérios relevantes a serem analisados, modelando as preferências e, por fim, aplicando o método multicritério para avaliação das preferências. Após a saída da resposta, é importante que o resultado seja analisado para validação do método e implementação do resultado.

Ainda, para a aplicação de metodologias multicritérios, alguns conceitos básicos são:

- Alternativas: conjunto de possíveis respostas diferentes e excludentes
- Atributos: valor atribuído as características de cada alternativa
- Critérios: conjunto de característica decisivas associadas as alternativas
- Pesos: valor de importância relativa dos critérios

Existem diversos métodos para resolução desses problemas, cada qual desenvolvida para problemas que incluem aspectos quantitativos e/ou qualitativos. Segundo Guglielmetti, Marins e Salomon (2003), três métodos se destacam, sendo eles: AHP (*Analytic Hierarchy Process*), MAHP (*Multiplicative AHP*) e o ELECTRE (*Elimination et Choix Traduisant la Réalité*). A comparação entre os métodos está na Figura 6.

CARACTERÍSTICAS DE DESEMPENHO	AHP	MAHP	ELECTRE
ENTRADA DE DADOS			
Utilização em decisões com vários níveis	SIM	SIM	NÃO
Restrições á quantidade de elementos de um nível	SIM	NÃO	NÃO
Quantidades de julgamentos em problemas de multicritérios e alternativas	ALTA	MEDIA ALTA	BAIXA
Necessidade de processar os dados antes de seu uso	NÃO	SIM	SIM
Permite tratar dados quantitativos e qualitativos	SIM	SIM	SIM
Possibilidade de lidar com problemas do tipo técnico	SIM	SIM	SIM
Possibilidades de tratar critérios e alternativas dependentes	NÃO	NÃO	NÃO
Permite criar escalas de julgamentos conforme contexto	NÃO	SIM	NÃO
SAÍDA DE DADOS			
Problemas com alocação em conjunto	NÃO	NÃO	NÃO
Problemas com avaliação do desempenho	SIM	SIM	NÃO
Problemas com avaliação do desempenho em classes	NÃO	NÃO	NÃO
<i>Ranking</i> completo de alternativas	SIM	SIM	NÃO
Soluções muito refinadas	SIM	SIM	NÃO
Somente eliminação de algumas alternativas	NÃO	NÃO	SIM
Permite avaliação de coerência dos julgamentos	SIM	NÃO	NÃO
INTERFACE TOMADOR DE DECISÃO X MÉTODO			
Disponibilidade de <i>software</i> para <i>download</i> gratuito	SIM	NÃO	NÃO
Necessidade de um especialista no método utilizado	MEDIA	ALTA	MEDIA
Utilização de decisões em grupo	SIM	SIM	NÃO
Permissão para a participação de mais de uma pessoa na decisão	SIM	SIM	SIM
Facilidade para estruturar o problema	ALTA	MEDIA	*
Possibilita o aprendizado sobre a estrutura do problema	SIM	SIM	*
Nível de compreensão conceitual e detalhado do modelo	ALTA	MEDIA	BAIXA
Nível de compreensão referente a forma de trabalho	ALTA	ALTA	BAIXA
Transparência no processamento e nos resultados	ALTA	BAIXA	MEDIA
Quantidade de aplicações práticas	ALTA	ALTA	BAIXA
Número de publicações científicas	ALTA	BAIXA	MEDIA

FIGURA 6 – COMPARAÇÃO ENTRE OS MÉTODOS DE DECISÃO AHP, MAHP E ELECTRE

FONTE: GUGLIELMETTI, MARINS e SALOMON (2003)

Conforme mostra a Figura 6, o método ELECTRE possui diversas restrições para saída de dados. Já, comparando o método AHP com o MAHP, observa-se que o primeiro possui melhores resultados no critério entre tomador de decisão e método, destacando os seguintes subcritérios:

- Maior facilidade para estruturação do problema;
- Maior nível de compreensão conceitual e detalhado do modelo;
- Maior transparência no processamento e resultados do método.

Desse modo, o método AHP foi o selecionado como o mais adequado para o desenvolvimento do presente projeto.

Para o desenvolvimento do trabalho o método AHP se mostrou suficiente. Porém, para problemas multicritérios mais complexos e que requerem maior

assertividade, pode-se considerar a aplicação conjunto de dois métodos, como o AHP e o Entropy para cálculo dos pesos dos critérios e subcritérios.

2.4.1.1.1. Método AHP - Analytic Hierarchy Process

O AHP é um método de decisão multicritério desenvolvido por Thomas L. Saaty na década de 1970, para avaliação hierárquica de atributos baseado na mente humana (COSTA; MOLL, 1999).

De modo geral, o método AHP possui as seguintes etapas apresentadas na Figura 7.

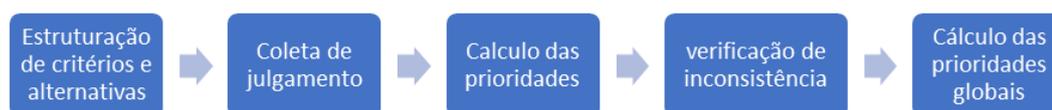


FIGURA 7 – ETAPAS DO MÉTODO AHP

FONTE: A AUTORA com base em RIBEIRO e ALVES (2016)

Conforme mostra a Figura 7, a primeira etapa consiste na estruturação dos critérios e alternativas, ou seja, a modelagem da estrutura hierárquica do problema. Uma vez estruturado, cada critério é analisado individualmente por meio da matriz de comparação (MC), conforme exemplificado na Tabela 5.

TABELA 5 – EXEMPLO DE MATRIZ DE COMPARAÇÃO

Critério n	Alternativa 1	Alternativa	...	Alternativa m
		2		
Alternativa 1	1	x_{12}	...	x_{1m}
Alternativa 2	$1/x_{12}$	1	...	x_{2m}
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
Alternativa m	$1/x_{1m}$	$1/x_{2m}$...	1

FONTE: A AUTORA (2021)

A Tabela 5 mostra uma MC genérica. Nessa matriz, os valores de um determinado critério são relacionados a fim de possibilitar uma avaliação do grau de importância entre as m alternativas. É importante destacar que no método

AHP a análise é sempre feita considerando a linha em relação à coluna. Para isso, duas regras são importantes (SAATY, 1990):

1. Se $x_{ij} = \alpha$ então $x_{ji} = 1/\alpha$. Sendo i e j a linha e coluna da matriz, respectivamente, e que $\alpha \neq 0$
2. Se a_i for igualmente importante quanto a_j , então $x_{ij} = x_{ji} = 1$. O mesmo é válido para quando $i = j$

Os valores do grau de importância são determinados conforme Escala Saaty, apresentada na Tabela 6.

TABELA 6 – ESCALA SAATY PARA APLICAÇÃO DO MÉTODO AHP

Valor numérico	Conceito	Descrição
1	Equivalente	Quando dois elementos possuem a mesma relevância
3	Moderado	Quando um elemento é levemente mais importante que o outro
5	Forte	Experiência e julgamento favorecem fortemente o elemento comparado em relação com o outro
7	Muito Forte	Quando um elemento é muita mais importante que o outro
9	Absoluto	O elemento apresenta maior nível de relevância possível quando comparado
2, 4, 6, 8	Valores intermediários	Utilizados em caso de indecisão entre dois valores adjacentes

FONTE: Adaptado de SAATY (1990)

Conforme apresentado na Tabela 6, os valores variam de 1 a 9, sendo realizado primeiramente uma avaliação de conceito e, posteriormente, a conversão para escala numérica. No caso de dados quantitativos, utiliza-se a equação (2) para conversão de escala.

$$x_{ij} = \left[8 \times \frac{(A_i - A_j)}{(A_{MC} - A_{NC})} \right] + 1 \quad (2)$$

Onde, A é o que se deseja converter, i e j são os números da linha e coluna, respectivamente, A_{MC} é o maior valor do critério avaliado e A_{NC} é o menor valor.

Após a composição da MC, é feita a normalização dos dados, igualando os valores a uma mesma unidade. Para isto, cada valor da MC é dividido pelo somatório dos valores da sua respectiva coluna, conforme equação (3).

$$y_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^m x_{ij}} \quad (3)$$

Sendo y_{ij} o valor normalizado de x_{ij} .

A partir da matriz normalizada, é calculada a prioridade relativa que identifica a ordem de importância das alternativas para o critério que está sendo avaliado. A prioridade relativa é obtida por meio da média aritmética dos valores de cada linha da matriz normalizada (equação (4)).

$$W_{ij} = \frac{\sum_{j=1}^m y_{ij}}{m} \quad (4)$$

Para verificar se a ordem de importância é consistente, calcula-se a Razão de Consistência (RC), conforme procedimento proposto por Saaty (VARGAS, 2010):

- Cálculo do autovalor (λ_{max}) da matriz normalizada, obtido por meio das equações (5) e (6);

$$[\lambda_{ij}] = [MC_{ij}] \times [w_{ij}] \quad (5)$$

$$\lambda_{max} = \text{média} \left[\frac{[\lambda_{ij}]}{[w_{ij}]} \right] \quad (6)$$

- Cálculo do índice de consistência (IC), conforme equação (7).

$$IC = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (7)$$

Sendo n o número da ordem da matriz;

- Cálculo da RC, conforme equação (8)

$$RC = \frac{IC}{h} \quad (8)$$

Onde h é um índice aleatório obtido com base na Tabela 7.

TABELA 7 – ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA ALEATÓRIO (H)

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
h	0	0	0,58	0,9	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49

FONTE: SAATY (1991, citado por RIBEIRO, ALVES, 2016)

Para que o resultado seja considerado consistente, Saaty delimita que o indicador RC seja menor que 10%. Caso o resultado não seja consistente será

preciso revisar os valores da MC até que a RC esteja dentro do limite especificado.

Ao final, ordenando os valores das prioridades relativas por critério, tem-se a matriz de prioridades relativas (MPR), apresentada na Tabela 8.

TABELA 8 – EXEMPLO DE MATRIZ DE PRIORIDADES RELATIVAS

	Critério 1	Critério 2	...	Critério n
Alternativa 1	W_{11}	W_{12}	...	W_{1n}
Alternativa 2	W_{21}	W_{22}	...	W_{2n}
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
Alternativa m	W_{m1}	W_{m2}	...	W_{mn}

FONTE: A AUTORA (2021)

A Tabela 8 mostra a MPR genérica. Nela, é apresentada a ordem de importância das alternativas para cada um dos critérios avaliados. Ou seja, se para o critério 1, w_{11} for maior que w_{21} , isso significa que Alternativa 1 tem uma maior prioridade para o critério 1 em relação a Alternativa 2.

Para obtenção da classificação geral, é preciso ainda obter a classificação de prioridade dos critérios analisados. Para isso, o mesmo procedimento apresentado para a classificação das soluções por critério é realizado para os critérios. Ao final, são obtidos os valores de prioridade relativa para cada critério, chamada de prioridade global (WG_i) e realizada a análise de consistência.

Assim como os valores das prioridades relativas foram ordenados compondo a MPR, os valores das prioridades globais são ordenados compondo a matriz de prioridade global (MPG), exemplificada na Tabela 9.

TABELA 9 – EXEMPLO DE MATRIZ DE PRIORIDADES GLOBAIS

	Prioridade global
Critério 1	WG_1
Critério 2	WG_2
⋮	⋮
Critério n	WG_n

FONTE: A AUTORA (2021)

A Tabela 9 exemplifica uma MPG genérica para n critérios avaliados. Logo, se WG_1 for maior valor, ele é o critério de maior prioridade; se WG_2 for o segundo critério de maior valor, ele é o segundo de maior prioridade; e assim por diante.

O resultado final do método é a classificação das alternativas de acordo com as prioridades relativas e global. Para isso, é feita a multiplicação das matrizes de prioridades, conforme equação (9).

$$R_i = [MPR_{ij}] \times [MPG_i] \quad (9)$$

onde R_i é a prioridade composta para cada solução.

Desse modo, a recomendação final é a solução de maior prioridade composta calculada.

2.4.2. Ferramenta de Dimensionamento

O dimensionamento de SFII, por se tratar de uma fonte intermitente, deve considerar as adaptações necessárias para atendimento das necessidades de demanda, de acordo com as características locais. Dessa forma, aumenta-se as chances de sucesso do sistema nessas comunidades (MORAES, 2013).

Para isso, diversas ferramentas de *softwares* no mercado, focados em tipos diferentes de solução. Khatib, Ibrahim e Mohamed (2016), Sinha e Chandel (2014), Khatib, Mohamed e Sopian (2012) e Connolly et al. (2010) apresentam revisão de diferentes *softwares* com aplicação para o dimensionamento de SFII. A Tabela 10 traz um resumo dos destacados por esses autores.

TABELA 10 – LISTA DE *SOFTWARES* PARA O DIMENSIONAMENTO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS INDIVIDUAIS E ISOLADOS

Software	Resumo	Tipo de análise	Disponibilidade
HOMER	Modelagem e dimensionamento de SFV e outras fontes renováveis com base no custo do ciclo de vida do sistema	Técnica, econômica e climática	Período de teste grátis
IHOGA	Simulação de hora em hora para o dimensionamento, baseado em algoritmo genético	Multi ou mono otimização, com base econômica	Versão educativa gratuita, limitada

TABELA 10 – LISTA DE *SOFTWARES* PARA O DIMENSIONAMENTO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS INDIVIDUAIS E ISOLADOS (CONTINUAÇÃO)

Software	Resumo	Tipo de análise	Disponibilidade
PV.MY	Ferramenta baseado no MATLAB para o dimensionamento ótimo, utilizando rede neural para previsão das variáveis meteorológicas	Técnica e econômica	Desconhecida
PVSYST	Dimensionamento de sistemas isolados e conectados à rede	Técnica	Pago
RETScreen	Planilha do Excel baseado na análise de projetos energéticos para o dimensionamento de diferentes configurações de energias renováveis	Econômica e climática	Gratuito a versão demo

FONTE: A AUTORA (2021)

Como mostra a Tabela 10, cinco *softwares* se destacaram nas análises dos autores. Apesar do RETScreen ser o único gratuito da lista, a versão liberada é a demo do *software*, permitindo apenas o modo visualizador com limitação de funcionalidades e na elaboração de relatórios, além de não permitir salvar os projetos criados. Nesse sentido, destaca-se o HOMER por possuir uma análise mais completa que atende as necessidades da pesquisa.

O HOMER é apontado como uma das ferramentas mais populares para dimensionamento de sistemas com configuração isolada ou conectada à rede (SINHA; CHANDEL, 2014), tendo como principais vantagens:

- Layout amigável e facilidade de simulação;
- Resultados gráficos eficientes;
- Possibilidade de download dos resultados para análises em outros *softwares*;
- Capacidade de manipulação de dados por hora;
- Base de dados meteorológicos da NASA.

Desse modo, o HOMER foi o *software* selecionado para o desenvolvimento do projeto.

2.4.2.1. HOMER Pro – Microgrid Analysis Tool

O HOMER é um *software* desenvolvido pelo *National Renewable Energy Laboratory* (NREL) em 1992 e aprimorado pela HOMER Energy, com o objetivo de otimizar projetos de SFI em diversos setores.

A Figura 8 apresenta o esquemático simplificado do HOMER.

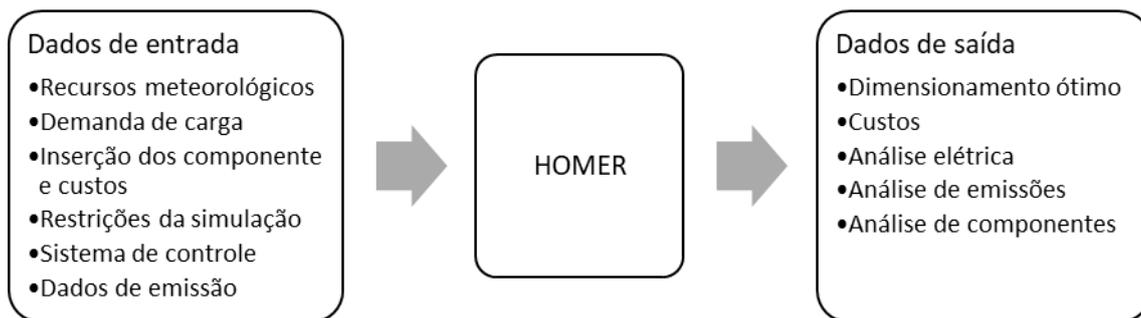


FIGURA 8 – ESQUEMÁTICO DAS ENTRADAS E SAÍDA DO HOMER

FONTE: A AUTORA (2021)

A Figura 8 apresenta o resumo dos dados de entrada necessários para realização da simulação e os dados de saída disponíveis. Desse modo, através da configuração dos dados de entrada o usuário modela a simulação.

Uma vez definido o cenário base da simulação, é realizado o processo de otimização, com o objetivo de avaliar o menor custo, atendimento da demanda e limitações técnicas definidas pelo usuário. Como resultado, é apresentado uma planilha com todas as possíveis otimizações realizadas, determinando:

- Arquitetura do sistema: capacidades ótimas de cada equipamento genérico ou quantidade mínima quando selecionado um modelo cadastrado;
- Custos: baseado nos custos fornecidos pelo usuário, é cálculo o capital inicial, custo de operação, custo da energia (LCOE);
- Dados por equipamentos: capital inicial, produção anual, autonomia (quando selecionado um sistema de armazenamento) e saída média do inversor;

- Análise elétrica, considerando produção de energia utilizada e sobressalente e a porcentagem de carga não atendida anualmente;
- Análise do componente, como perdas;
- Análise de emissões de poluentes (essa análise só é realizada quando há uma fonte térmica na simulação).

Ressalta-se ainda que é possível o *download* dos resultados, possibilitando uma análise mais completa em outros *softwares*, como por exemplo o MATLAB. Kansara e Parekh (2011), apresentam em detalhes a modelagem de um sistema autônomo híbrido utilizando o HOMER.

2.5. Considerações Finais do Capítulo

O presente capítulo descreveu os temas relevantes para o desenvolvimento do trabalho. Apresentando as definições de SFII e de regiões remotas, necessárias para a limitação da abrangência da pesquisa; as restrições para a implantação de SFII e as ferramentas selecionadas para o desenvolvimento do modelo. Desse modo, pode-se concluir com as seguintes premissas:

- SFII tem por característica uma fonte de fotovoltaica, com sistema de armazenamento, não conectada à rede convencional e limitada ao fornecimento de 80 kWh/mês sem ônus para o usuário;
- Define-se como área de aplicação do projeto regiões remotas do Brasil com baixo índice de eletrificação;
- Restrições de dimensionamento vinculadas a Resolução Normativa nº 493/2012 e ao Manual de Operacionalização, que definem as diretrizes de fornecimento por meio de SFII;
- Para auxiliar na tomada de decisão de critérios conflitantes será utilizado o método AHP;
- O dimensionamento de SFII será realizado por meio do *software* de otimização HOMER, com foco na otimização técnica e econômica.

3. REVISÃO DA LITERATURA

A eletrificação de regiões remotas é um assunto amplamente discutido na literatura. Apesar da importância da eletrificação dessas regiões, diversas iniciativas fracassaram, seja por motivos técnicos, econômicos ou sociais (ALMESHQAB; USTUN, 2019).

Desta forma, o presente capítulo apresenta trabalhos que abordam a questão da eletrificação de regiões remotas e seus principais obstáculos e diferenciais a serem considerados em outros projetos.

3.1. Processo de Pesquisa Bibliométrica

O processo de revisão da literatura baseou-se no processo de seleção apresentado em Ensslin et al. (2010), um método estruturado para seleção de artigos relevantes ao tema da pesquisa, por meio das etapas de seleção do banco de artigos brutos, filtragem inicial, análise bibliométrica e análise de aderência ao tema.

3.1.1. Definição das palavras-chaves

Para a identificação das palavras-chaves, primeiramente foram definidos dos eixos de pesquisa. O primeiro é relacionado ao tipo de sistema a ser implementado na solução; o segundo é referente a definição da aplicação do sistema ou da tecnologia que se deseja implantar; o terceiro é um eixo opcional, relacionado ao escopo do projeto apresentado. A união dos três eixos forma as palavras-chaves (Tabela 11).

TABELA 11 – DEFINIÇÃO DOS EIXOS DE PESQUISA E PALAVRA-CHAVE

Eixo de pesquisa	Palavra-chave (português)	Palavra-chave (inglês)
Tipo do sistema	Mini rede	<i>Mini-grid</i>
	Não conectado à rede	<i>Off-grid</i>
	Sistema isolado	<i>Isolated systems</i>
	Sistema solar residencial	<i>Solar home systems</i>
Aplicação	Eletrificação rural	<i>Rural electrification</i>
	Energia renovável	<i>Renewable energy</i>
	Fotovoltaico	<i>Photovoltaic</i>
	Regiões remotas	<i>Remote areas</i>
Escopo	Estudo de caso	<i>Case study</i>
	Lições aprendidas	<i>Lessons learned</i>
	Regulação	<i>Regulatory framework</i>
	Normativa	<i>Normative</i>

FONTE: A AUTORA (2021)

Após a definição das palavras-chaves, utilizou-se o *software Publish or Perish* na plataforma *Google Scholar* para a realização da busca bibliográfica, considerando a combinação das palavras de língua inglesa.

A tabela com a relação do total de resultados por conjunto de palavra-chave está apresentada no APÊNDICE 1.1. A seguir é apresentado os filtros de seleção e as análises bibliométrica e de aderência.

3.1.2. Seleção do banco de artigos

A seleção do banco de dados refere-se a análise para composição do *portfólio* bibliográfico apenas com artigos relevantes ao tema. A Figura 9 apresenta o esquema do processo de filtragem para seleção.

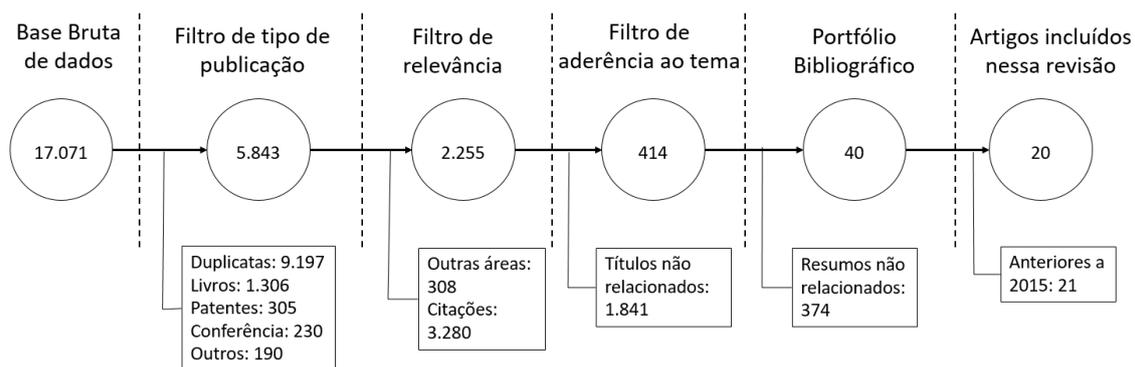


FIGURA 9 – PROCESSO DE FILTRAGEM PARA SELEÇÃO DO BANCO DE ARTIGOS

FONTE: A AUTORA (2021)

A filtragem inicial dos documentos tem por objetivo excluir arquivos duplicado, definir o tipo de documento e idiomas em inglês, português ou espanhol. A análise bibliométrica refere-se a análise de relevância, eliminando revistas não relacionadas ao tema e artigos publicados anteriormente a 2018 com menos de 25 citações³.

Na etapa de análise de aderência ao tema realizou-se a análise de títulos e a leitura dos resumos, restando 40 artigos que compõe o portfólio bibliográfico.

A fim de demonstrar a relevância atual do tema, foram considerados para a análise crítica apenas os artigos recentes, publicados a partir do ano 2015, totalizando 20 artigos (Tabela 12). Para o desenvolvimento do trabalho foram considerados todos os artigos do portfólio.

TABELA 12 – MÉTRICA DOS ARTIGOS RELEVANTES

Quantidade de artigos	Faixa anual	Total de citações	Média de citações por artigo	Média de citações por ano	Média de citações por autor
20	2015 – 2020	578	28,9	7,7	12,9

FONTE: A AUTORA (2021)

Conforme Tabela 12, os artigos possuem um total de 578 citações, com uma média 28,9 citações, sendo 7,7 a média anual. A média anual considerada baixa se deve a quantidade de artigos publicados posteriormente ao ano 2018.

³ Definiu-se como artigos relevantes aqueles que apresentavam número de citações superior a 85% da média das citações.

O APÊNDICE 1.3 apresenta a análise de publicações por ano e por país de publicação.

A Tabela 13 apresenta os artigos relevantes e recentes selecionados, evidenciando o tema, assunto, local de estudo e a contribuição realizada.

TABELA 13 – RELAÇÃO DE ARTIGOS RELEVANTES

Autor	Diallo, Moussa (2020)	Narayan et al. (2019)	Khan (2020)	Al-Smairan, Alayyash e Shatnawi (2019)	Bhumkittipich, Ohgaki (2018)
Tema	Avaliação social	Avaliação técnica	Avaliação social e regulatória	Avaliação social	Implantação de SFV
Local	Costa do Marfim	Geral	Geral	Jordânia	Taiilândia
Assunto	Impacto na qualidade de vida com a eletrificação de regiões remotas	Itens críticos no designe e O&M de SFV	Barreiras para adoção de SFI	Avaliação de SFI após o período de instalação	Sustentabilidade e da eletrificação rural com SFV
Contribuição	Evidencia melhoras na renda e educação das propriedades que adotaram a tecnologia	Indica pontos críticos para possíveis falhas e recomenda melhorias visando a operação ótima do sistema	Indica parâmetros a serem considerados no dimensionamento de SFI focando na otimização do sistema	Levantamento de pontos que influenciaram no sucesso do projeto de eletrificação na comunidade	Barreiras durante a implantação de SFV na região rural da Tailândia

FONTE: A AUTORA (2021)

TABELA 14 – RELAÇÃO DE ARTIGOS RELEVANTES (CONTINUAÇÃO)

Autor	Ahmad et al. (2018)	Batteiger e Rotter (2018)	Begay (2018)	Sovacoool (2018)	Azimoh et al. (2017)	Khatib, Ibrahim e Mohamed (2016)	Bhattacharyya e Palit (2016)
Tema	Avaliação técnica	Avaliação técnica	Implantação de SFV	Avaliação regulatória	Avaliação técnica	Avaliação técnica	Avaliação regulatória
Local	Geral	Bangladesh	Estados Unidos	Sri Lanka e Indonésia	Namíbia	Geral	Ásia
Assunto	Proteção contra descargas atmosféricas	Desperdício energético em SFV	Eletificação de comunidade indígena	Comparação entre um caso de sucesso de sistema de eletrificação e um de fracasso	Programa de eletrificação com microrrede híbrida fotovoltaica e diesel para ser replicado	Revisão de métodos de dimensionamento	Regulamentação para eletrificação com sistemas <i>off-grid</i> em países em desenvolvimento
Contribuição	Avalia a necessidade de proteção contra descargas atmosféricas em SFV <i>off-grid</i>	Estabelece os principais equipamentos elétricos e eletrônicos responsáveis pelos gastos energéticos desnecessários em SFV	Analisa o processo de eletrificação de uma comunidade indígena, ressaltando as barreiras e diferenças que levaram ao sucesso do programa	Elenca série de recomendações de itens a serem analisados na regulamentação de países que pretendem adotar SFV como forma de energia em regiões remotas	Identificação de fatores de sucesso e desafios para a implantação de microrredes, evidenciando o dimensionamento	Parâmetros a serem considerados no dimensionamento dos módulos e baterias de SFV	Recomendações de regulamentação baseados em casos de estudo de eletrificação rural na Ásia

FONTE: A AUTORA (2021)

TABELA 14 – RELAÇÃO DE ARTIGOS RELEVANTES (CONTINUAÇÃO)

Autor	Halder (2016)	Xu, Nthontho e Chowdhury (2016)	Urnee e Md (2016)	Kulworawani-chpong; Mwambelek (2015)	Chowdhury et al. (2015)	Wouters (2015)	Ustrud et al. (2015)
Tema	Avaliação econômica	Implantação de SFV	Avaliação social	Avaliação econômica	Avaliação técnica	Avaliação regulatória	Avaliação social
Local	Bangladesh	África do Sul	Geral	Tanzânia	Bangladesh	Singapura	Quênia
Assunto	Análise de viabilidade econômica de SFV	Avaliação de métodos de eletrificação rural com microrrede	Energias renováveis em regiões remotas	Design e custo de SFV individual	Dimensionamento de sistemas híbridos (fotovoltaico e diesel) para eletrificação rural	Estrutura regulatória para inserção de microrredes no sistema energético	Aspectos sócio técnicos que impedem o avanço da eletrificação de regiões remotas
Contribuição	Principais fatores que impactam o custo total de SFV e recomendações para suavizar o custo final	Comparação da composição de três SFV diferentes, com recomendações estratégicas para eletrificação de comunidades remotas	Procedimento para introdução de tecnologias de eletrificação em comunidades remotas	Modularidade do SFV para atender as necessidades de demanda e reduzir o custo do sistema	Desenvolvimento de passos para o dimensionamento de sistemas energéticos não conectados à rede	Observação de dificuldades regulatórias para uso de fontes alternativas de energia	Entendimento das dificuldades sócio técnicas que impedem a difusão de SFV dentro da comunidade

FONTE: A AUTORA (2021)

A seguir é apresentada a análise crítica dos artigos com o detalhamento da contribuição realizada.

3.2. Análise Crítica das Contribuições mais relevantes

Os artigos selecionados como relevantes foram analisados de acordo com os quatro aspectos a serem abordados neste trabalho, sendo eles: aspecto técnico, econômico, social e regulatório, além da experiência na implantação de sistemas *off-grid*.

3.2.1. Aspecto técnico

O aspecto técnico refere-se ao dimensionamento, seleção de tecnologia adotada considerando critérios técnicos e climáticos, implantação e manutenção. Nesse contexto destacam-se cinco artigos.

Chowdhury et al. (2015) apresenta quatro passos necessários para a eletrificação de regiões remotas com microrredes. O primeiro é a avaliação do projeto quanto a infraestrutura local da comunidade, como acesso, disponibilidade de local para suporte de manutenção e organização da comunidade. O segundo passo é com relação a análise da demanda, que deve considerar a renda mensal e bens de consumo, além de considerar também um cenário pós eletrificação.

O terceiro passo é o projeto do sistema e seleção dos equipamentos e o quarto é o custo de manutenções corretivas, destacando o sistema de armazenamento como o mais crítico. Na comunidade avaliada pelos autores, os principais custos são do sistema de armazenamento (21%), módulos solares (20%) e eletrônicos e equipamentos de controle (17%). Ainda, para um melhor desempenho do sistema, recomenda-se que o sistema seja operado por pessoal treinado (CHOWDHURY et al., 2015).

Khatib, Ibrahim e Mohamed (2016) apresentam parâmetros a serem considerados no dimensionamento de SFI para avaliar e estimar a disponibilidade e viabilidade do sistema (Tabela 14).

TABELA 14 – PARÂMETROS PARA O DIMENSIONAMENTO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS INDIVIDUAIS E ISOLADOS

Parâmetros técnicos	Probabilidade da perda (fornecimento, carga, carga esperada e energia total) Estado de carga Autonomia
Parâmetros econômicos	Valor presente Custos relacionados (equipamentos, instalação, manutenção e transporte) Fator de recuperação de capital
Parâmetros social e político	Aceitação social Portfólio de risco

FONTE: Adaptado de Khatib, Ibrahim e Mohamed (2016)

De acordo com a Tabela 14, os fatores são agrupados em três parâmetros: técnicos, econômicos e social e político. O parâmetro técnico visa a garantir o atendimento da demanda, enquanto o parâmetro econômico busca o atendimento da demanda com os menores custos de capital inicial e operacional, mantendo o nível de segurança necessário. Já o parâmetro social e político visa avaliar a resistência social ao projeto e os benefícios do sistema, no caso de SFV o benefício adotado é a não dependência às variações nos valores de combustível.

Para Hernández-Callejo, Gallardo-Saavedra e Alonso-Gómez (2019), a seleção de equipamentos e O&M são os pontos críticos dos SFII. Como principais obstáculos os autores destacam: a seleção do inversor e PV; na operação a rápida degradação das baterias OPzS devido a qualidade das baterias e comportamento em baixa capacidade; na manutenção a necessidade técnicos capacitados para realização das atividades e a importância da limpeza dos PVs, que diminuem a eficiência do sistema.

Ahmad et al. (2018) avalia a necessidade de sistema de proteção contra descargas atmosférica (SPDA), apesar da ausência de normas específicas, questões financeiras e falta de conhecimento técnico. De acordo com os autores,

raios são responsáveis por 26% dos danos em SFV na Alemanha, podendo ser ainda maior em locais próximos a linha equatorial. Desse modo, a instalação de SPDA estão a prevenção quanto a danos estruturais e riscos de vida, reduzindo custos de reparo.

Narayan et al. (2019) ressalta a importância do dimensionamento otimizado de SFV considerando indicadores de não atendimento a demanda e autonomia das baterias. Com isso, os autores visam que a demanda seja atendida sem desperdiçar energia e sem elevar os custos do sistema.

Batteiger e Rotter (2018) avaliam os principais elementos de desperdícios energéticos em SFV, *off-grid* e conectados à rede (Tabela 15). São considerados equipamentos do sistema (PVs, baterias, controlador, cabos e equipamentos correspondentes) e também equipamentos elétricos e eletrônicos dos usuários (iluminação, carregador de celular, televisão, ventilador e refrgerador).

TABELA 15 – EQUIPAMENTOS COM MAIOR DESPERDÍCIO ENERGÉTICO PARA DIFERENTES TIPO DE ACESSO À ENERGIA

Tipo de acesso à energia	Cargas de elevado desperdício energético
Rede convencional	Refrigerador, televisão e ventilador
Fotovoltaico conectado à rede	Bateria, televisão, ventilador e PV
Fotovoltaico não conectado à rede	Bateria, PV e cabeamento
Normalizado	Refrigerador, televisão, bateria e ventilador

FONTE: Adaptado de BATTEIGER e ROTTER (2018)

Como mostra a Tabela 15, para SFII, as maiores perdas de energia estão na bateria, no PV e no cabeamento. Isso mostra que, para o caso estudado pelos autores, a eficiência dos componentes é mais crítica do que a eficiência da carga do usuário. Desse modo, as iniciativas de eficiência energética com os usuários devem focar no uso do sistema, buscando aumentar a vida útil dos equipamentos (BATTEIGER; ROTTER, 2018).

3.2.2. Aspecto econômicos

O aspecto econômico é abordado em todas as etapas da implantação de SFV. Ainda assim, poucos autores abordam especificamente os fatores relacionados aos custos desses sistemas, destacando-se dois artigos.

Kulworawanichpong e Mwambeleko (2015) estudam a viabilidade de SFII na área rural da Tanzânia. Para os autores os principais impactos no custo do projeto estão na instalação e, posteriormente, na manutenção realizadas por pessoas não qualificadas e capacitadas. Além disso, o dimensionamento com cabos e baterias inadequadas, são alguns exemplos que encarecem o projeto a médio e longo prazo e inviabilizam a aquisição por parte do usuário.

Halder (2016) avalia a viabilidade financeira e a eficiência de SFII em Bangladesh, onde os usuários são responsáveis pela aquisição do sistema. Para os autores alguns fatores que impactaram positivamente para o aumento do número de aquisições foram as manutenções frequentes, garantia do sistema caso de o usuário ser conectado à rede e o treinamento de pessoas para cuidarem das manutenções básicas do sistema. Porém, os autores ressaltam que melhorias ainda devem ser implementadas para o sucesso do programa, destacando-se:

1. Políticas e regulamentações consistentes, com apoio financeiro e incentivo político;
2. Incentivo para a produção e montagem local de equipamentos, além de baratear o sistema, fornece uma melhor infraestrutura local de suporte técnico, com padrões técnicos e controle de qualidade pré-estabelecidos;
3. Disseminação da informação para o público e responsáveis pelo sistema, além de conscientização das limitações dos sistemas. Quanto melhor os usuários conhecerem e entenderem o sistema, melhor será a eficiência e menor as manutenções por defeito de componentes.

3.2.3. Aspecto social

A avaliação dos aspectos sociais e culturais foram realizados por meio de entrevistas semiestruturadas com usuários e pessoas envolvidas na eletrificação, bem como na revisão da literatura de estudos de casos. O objetivo da análise social é buscar os fatores relacionado a adoção dos sistemas e no sucesso no prosseguimento do programa após a fase de implantação. Nesse contexto, destacam-se cinco artigos.

Para a inserção de novas tecnologias em uma comunidade, Urme e Md (2016) indicam a utilizam o método chamado difusão da inovação, que recomenda cinco passos para que haja o envolvimento da comunidade em todo o processo do programa:

1. Gerar conhecimento do usuário a respeito da tecnologia;
2. Persuasão através da informação e seu possível impacto na vida do usuário;
3. Decisão do usuário a respeito da adoção da tecnologia;
4. Implementação e transição do comportamento do usuário do conhecimento teórico para o prático;
5. Confirmação do sucesso da tecnologia.

No âmbito político-social, Urme e Md (2016) destaca a necessidade do comprometimento político, estratégias claras e realistas e políticas dedicadas ao tema. Com relação ao sociocultural, ressalta-se o trabalho preparatório ao início do programa que consiste na comunicação com líderes locais e os membros da comunidade, além de programas de conscientização preparatório, de modo que os usuários tenham confiança na tecnologia e senso de proprietário do sistema.

Al-Smairan, Alayyash e Shatnawi (2019) entrevistou 50 pessoas que vivem em uma vila rural na Jordânia, eletrificados com SFII há mais de 15 anos. De acordo com os autores, a principal razão para o sucesso do projeto foi o dimensionamento do sistema e tecnologia adotada que atenderam as necessidades dos usuários. Além disso, benefícios sociais (iluminação, educação e diminuição da poluição de fontes à combustível) e a facilidade de

entendimento técnico para realização da manutenção básica (limpeza dos PVs e reposição da água das baterias), também foram fatores decisivos.

Diallo, Moussa (2020) analisou os benefícios sociais relacionados aos SFII, em três dimensões: renda, educação e saúde. Para isso, considerou-se a renda per capita, a média de anos escolares e o número de novas pessoas doentes, considerando um horizonte de quatro anos após a eletrificação. Apesar do sistema ter sido aceito por apenas 12% da população, devido ao elevado custo do sistema, houve melhorias na qualidade de vida dessas famílias, destacando: aumento no uso de saneamento básico, diminuição na queixa de doenças, melhora na educação e na renda e aumento do emprego de mulheres.

Khan (2020), através de uma revisão da literatura, levantou as principais barreiras na adoção de SFI em países em desenvolvimento. Destacam-se como fatores de impacto significativo positivo a instalação de protótipos por meio de projetos de pesquisa e desenvolvimento, suporte institucional e suporte técnico. Já, os fatores de impacto negativo foram a falta de informação e o custo elevado.

Ulsrud et al. (2015) apresenta uma análise sociotécnica das experiências ao acesso à eletricidade no Quênia, com base na energia solar. Para os autores o contexto local define desde a forma de abordar a implantação do sistema até a definição da tecnologia, priorizando os tipos de serviços que os usuários consideram importantes. No estudo, a tecnologia que mais se adequou foram as lanternas solares para locação, devido ao seu designe flexível a demanda, baixo custo, pouca manutenção e criação de uma cooperação dos usuários para acompanhamento do projeto.

A Tabela 16 apresenta os principais benefícios sociais relacionados à eletrificação de regiões remotas.

TABELA 16 – BENEFÍCIOS SOCIAIS DA ADOÇÃO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS INDIVIDUAIS E ISOLADOS

Autor	Benefícios
(AL-SMAIRAN; ALAYYASH; SHATNAWI, 2019)	Saúde, por não haver a poluição de geradores a diesel e lâmpadas Segurança noturna Uso de aparelhos básicos e avanço na comunicação
(DIALLO; MOUSSA, 2020)	Possibilidade de atuação da mulher no mercado de trabalho local Aumento de produção

TABELA 16 – BENEFÍCIOS SOCIAIS DA ADOÇÃO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS INDIVIDUAIS E ISOLADOS (CONTINUAÇÃO)

Autor	Benefícios
(KHAN, 2020)	Melhora no acesso à educação Diminuição da queixa de doenças Diminuição dos riscos por uso de combustíveis
	Melhora na iluminação Possibilidade de estudo noturno Acesso à informação

FONTE: A AUTORA (2021)

Conforme Tabela 16 os autores, a melhora na qualidade de vida e saúde são os principais benefícios da eletrificação rural, seguidos da educação e acesso à informação. Em contraponto, Khan (2020) cita a exclusão social de pessoas que não puderam adquirir o sistema. Ainda assim, o impacto negativo é menor quando comparado aos benefícios.

3.2.4. Aspecto regulatório

Três artigos destacam-se por apresentar recomendações de itens a serem incorporados na regulamentação de SFV.

Sovacool (2018) apresenta um estudo comparativo entre dois programas de eletrificação com SFII, um no Siri Lanka e outro na Indonésia. Enquanto o primeiro foi um sucesso, o segundo falhou, não havendo aderência dos usuários ao programa. Dentre as principais diferenças entre os programas, tem-se:

- No Siri Lanka, o envolvimento de instituições financeiras, privadas e governamentais, com experiência em SFV, juntamente com a comunidade reforçou a sensação de propriedade do sistema e a capacidade de gerenciamento do sistema. Já na Indonésia, o envolvimento exclusivo de bancos privados sem experiência no setor de energias renováveis impediu o progresso do programa, que precisava de maior envolvimento governamental e um ambiente regulatório definido;

- O dimensionamento precisa ser flexível, se adaptando as características dos usuários;
- Programas de capacitação e conscientização para que sejam atendidos os padrões técnicos de qualidade do sistema, além de garantir a segurança das pessoas e a longevidade dos equipamentos.

Wouters (2015) apresenta a estrutura regulatória para a implantação de microrredes em Singapura. De modo geral, a autora apresenta como obstáculos a falta de padronização de atendimento e uma regulamentação clara com definição legal e técnica dos sistemas a serem implantados.

Bhattacharyya e Palit (2016), através de uma revisão da literatura, apresenta uma relação de recomendações políticas necessárias em países em desenvolvimento para promover o acesso à energia em locais remotos baseados em SFII. Conforme o estudo apresentado, programas de eletrificação rural que tiveram regulamentação clara com padrões e normas técnicas estabelecidas obtiveram uma melhor performance de desempenho. As recomendações apresentadas pelos autores são:

- Prever a flexibilidade de capacidade do sistema;
- Estrutura governamental robusta;
- Regulamentação clara e transparente, reduzindo os riscos dos participantes no programa. A regulamentação deve abranger tanto a parte financeira, quanto a parte de uso da tecnologia, transferência de tecnologia, trabalho e uso da terra;
- Suporte estratégico e local, prevendo capacitação e o desenvolvimento sustentável do projeto a longo prazo, como manufatura local, montagem e serviços ancilares.

Khan (2020), além da avaliação social, também destaca a importância da regulamentação do suporte na etapa de O&M, além do envolvimento das autoridades locais da comunidade.

3.2.5. Implantação de sistemas fotovoltaicos isolados

Begay (2018) estuda o processo de eletrificação da reserva indígena de Navajo, nos Estados Unidos. A eletrificação de cerca de 34.000 membros ocorreu pela ONG local em duas fases. A primeira fase consistia na implantação de SFII com armazenamento. Porém, problemas na fabricação dos PV causaram sobreaquecimento dos painéis, diminuindo a eficiência do sistema e frustrando a confiança dos usuários no sistema. Na segunda fase buscou-se uma alternativa híbrida, com fonte solar e eólica, com apoio legislativo. Os diferenciais para o sucesso do programa foram a assistência técnica com procedimentos padronizados de operação, o estabelecimento de um cronograma de O&M e a educação de usuário e representantes locais.

Os autores ainda discutem sobre as dificuldades futuras para continuidade do programa. Para eles, a adesão de jovens consumidores pode alterar o perfil de carga, prevendo a necessidade de programas adicionais para esse público (BEGAY, 2018).

Xu, Nthontho e Chowdhury (2016) apresenta uma abordagem estratégica para a eletrificação na África do Sul, com geração fotovoltaica e eólica. Os autores recomendam delegar atividades de O&M referentes ao banco de baterias OPzS para os usuários do sistema, reduzindo custos dos técnicos especialistas e custos de deslocamento, treinando os usuários com as ferramentas necessárias.

Azimoh et al. (2017), através de um estudo de eletrificação na Namíbia, apontam como principal fator de sucesso o gerenciamento do projeto pelo conselho regional local, que é dono e mantém o sistema, e a realização de atividades periódicas de sensibilização e conscientização para uso eficiente.

Para Bhumkittipich, Ohgaki (2018), o sucesso da implantação está no equilíbrio entre os fatores políticos, econômicos, sociais e tecnológicos. Através de um *survey* na Tailândia, com entrevistando 97 UC, destacam-se os seguintes pontos:

- A ausência de pessoa qualificada na administração local impacta no uso eficiente do sistema;

- A dificuldade de transporte resultou em danos à bateria que impactaram na qualidade da energia fornecida;
- Modelos de custos de manutenção, que tornem o sistema mais viável futuramente.

3.3. Considerações Finais do Capítulo

Este capítulo apresentou uma revisão da literatura detalhada no contexto da eletrificação de regiões remotas com SFI, nos últimos cinco anos. A partir dos artigos selecionados, foram levantados os principais obstáculos e recomendações para o sucesso da eletrificação de regiões remotas. A Tabela 17 apresenta o resumo dos principais pontos abordados.

TABELA 17 – RESUMO DOS ELEMENTOS CRÍTICOS EM PROJETOS DE ELETRIFICAÇÃO REMOTA SEGUNDO REVISÃO DA LITERATURA

	Elementos críticos
Aspecto técnico	Avaliação do contexto local para o cálculo da demanda e otimização do dimensionamento Definição do escopo das atividades de manutenção Instalação de SPDA Eficiência dos equipamentos, principalmente do inversor Tecnologia da bateria
Aspecto econômico	Custos de manutenção (preventiva e corretiva) Sistema de armazenamento Dimensionamento do sistema Suporte local para manutenção com pessoal capacitado Programas de eficiência energética e conscientização
Aspecto social	Avaliação do contexto local e necessidades a serem supridas Elaboração de pré planejamento com envolvimento comunitário durante todas etapas do projeto Custo de aquisição e manutenção do sistema, quando é adquirido pelo usuário Flexibilidade do sistema em módulos que atendam às necessidades de cada UC
Aspecto regulatório	Definição legal e técnica Regulação clara e transparente Flexibilidade às necessidades locais

TABELA 17 – RESUMO DOS ELEMENTOS CRÍTICOS EM PROJETOS DE ELETRIFICAÇÃO REMOTA SEGUNDO REVISÃO DA LITERATURA (CONTINUAÇÃO)

	Diretrizes dos serviços de suporte e manutenção
	Programa de capacitação e conscientização
Implantação de SFI	Padronização de O&M
	Equipamentos adequados ao tipo de transporte

FONTE: A AUTORA (2021)

Desse modo, é possível observar os pontos relevantes dentro de dos aspectos relacionados ao tema do projeto, a serem avaliados durante o desenvolvimento da pesquisa.

4. METODOLOGIA

Para a concepção do modelo proposto, serão utilizados os materiais e métodos descritos a seguir.

4.1. Materiais

Para a elaboração do trabalho, foram utilizados os seguintes materiais:

- Dados climáticos da NASA contidos no banco de dados do *software* HOMER;
- Índice de eletrificação do censo 2010 do IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística;
- Entrevistas com empresas envolvidas na eletrificação rural com SFI;
- Dados da literatura: artigos e estudos de caso referentes aos obstáculos na eletrificação de regiões rurais e normas e regulamentações para SFI;
- Dados de equipamentos: *datasheet* e cotação em sites comerciais;
- Software Excel para implementação do método de decisão;
- Software HOMER para cálculo dos dimensionamentos dos SFI;

Os dados de eletrificação, clima, as entrevistas e os dados dos equipamentos serão descritos a seguir.

4.1.1. Dados de eletrificação

Para o levantamento dos locais com baixo índice de acesso à energia elétrica, utilizou-se como base de dados as informações do censo do IBGE (2010). De acordo com o censo, dos 57.324.185 domicílios no Brasil, 98% são eletrificados pela companhia de energia elétrica. Dos restantes, 43% possuem

uma forma alternativa própria de energia e 57% não possuem energia elétrica. A fim de apresentar dados mais compreensíveis ao leitor, o mapa da Figura 10 apresenta o índice percentual de domicílios com ausência de energia elétrica por município.

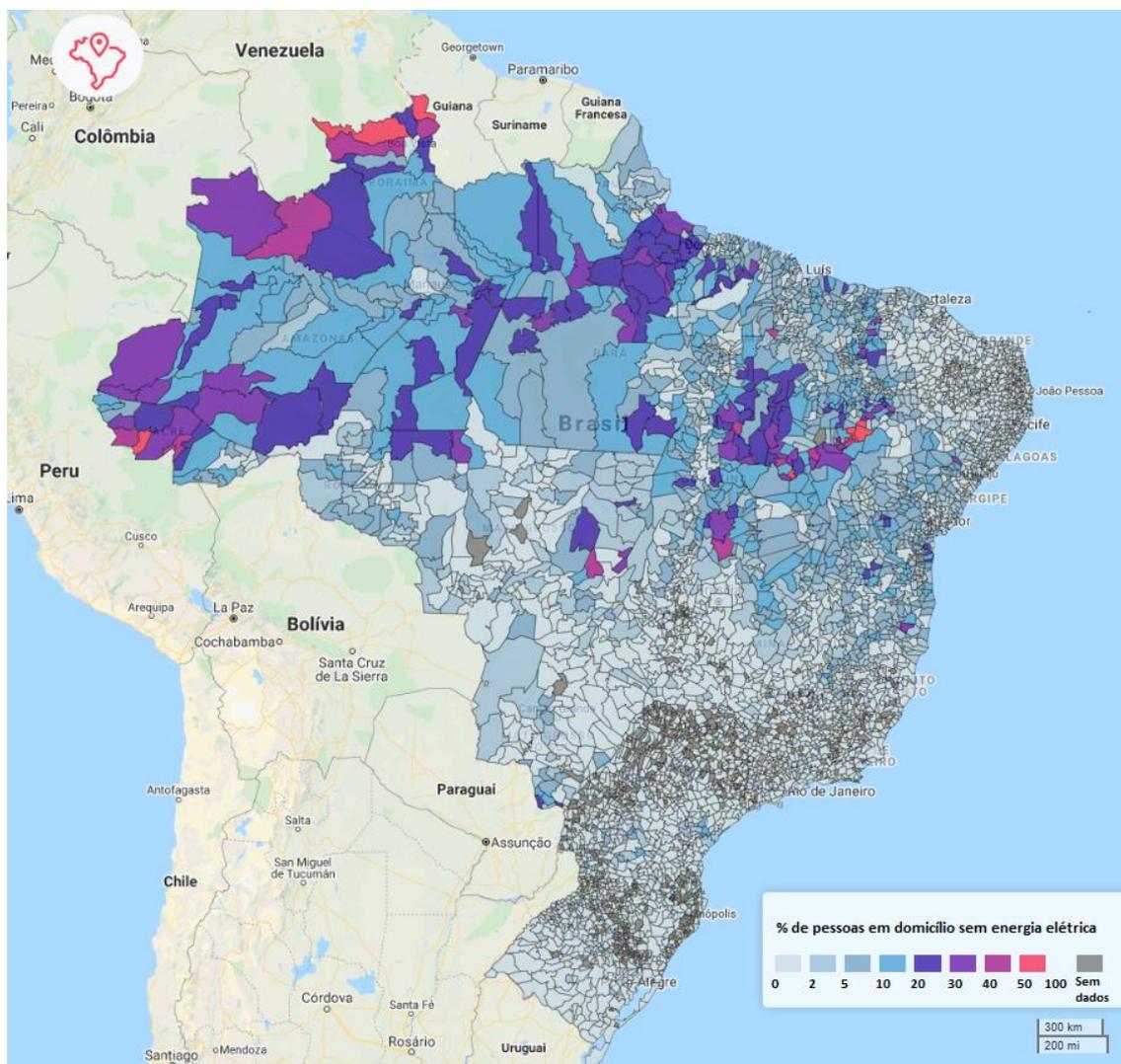


FIGURA 10 – MAPA DO ÍNDICE DE ACESSO À ENERGIA ELÉTRICA NO BRASIL POR MUNICÍPIO

FONTE: ATLAS BRASIL (2013)

O mapa apresenta as porcentagens de domicílios sem acesso à energia elétrica, mesmo que possua sistema próprio de geração. A região amazônica possui o maior número de municípios com elevado índice de ausência de energia elétrica, seguido pela região do cerrado e caatinga. A partir desses dados, elegeu-se três municípios de cada bioma para realização das análises do projeto. Os municípios selecionados estão apresentados na Tabela 18 e Figura 11.

TABELA 18 – MUNICÍPIOS SELECIONADOS

Bioma	Cidade	Estado	Ausência de energia elétrica [%]
Amazônia			
	Uiramutã	Roraima	72,6
	Marechal Thaumaturgo	Acre	48,5
	Melgaço	Pará	35,9
Cerrado			
	Cavalcante	Goiás	42,4
	Campinópolis	Mato Grosso	42,2
	Recursolândia	Tocantins	41,6
Caatinga			
	Dom Inocêncio	Piauí	55,8
	Domingos Mourão	Piauí	36,6
	Lajedinho	Bahia	29,7
Pantanal			
	Corumbá	Mato Grosso do Sul	2,5
	Barão de Melgaço	Mato Grosso	5,2
	Porto Murtinho	Mato Grosso do Sul	2,3
Mata Atlântica			
	Jucuruçu	Bahia	33,0
	Paranhos	Mato Grosso do Sul	29,0
	Barra do Turvo	São Paulo	15,0
Pampas			
	Itacurubi	Rio Grande do Sul	3,2
	Santa Margarida do Sul	Rio Grande do Sul	2,7
	Amaral Ferrador	Rio Grande do Sul	2,2

FONTE: Adaptado de IBGE (2010)



FIGURA 11 – LOCALIZAÇÃO ESPACIAL DOS MUNICÍPIOS SELECIONADOS DE ACORDO COM OS BIOMAS BRASILEIROS

FONTE: A AUTORA (2021)

Como mostra a Tabela 18, foram selecionados os locais com elevados índices de ausência de energia elétrica, distribuídos na área abrangente de cada bioma, conforme mostra a Figura 11. Nos biomas Pantanal e Pampas o índice de ausência é baixo por serem regiões já consideradas eletrificadas no índice global, possuindo índices de acesso à energia de 98,7% e 99,6%, respectivamente. Ainda assim, o número de propriedades sem acesso à energia continua expressivo, sendo 12.868 propriedades no Pampas e 10.133 no Pantanal (IBGE, 2010).

4.1.2. Dados climáticos

A partir dos locais definidos através da análise de eletrificação, realizou-se o levantamento dos dados climáticos. As características analisadas neste trabalho foram as temperaturas médias, umidade relativa do ar, precipitação, irradiação e ventos.

Para o levantamento dessas características, foram utilizados os dados do *software* HOMER, que utiliza o banco de dados da NASA. O banco possui o monitoramento de vento e temperatura das localidades entre os anos de 1984 a 2013 e de irradiação de 1983 a 2005.

Os resultados estão apresentados na Tabela 19.

TABELA 19 – DADOS CLIMÁTICOS POR BIOMA

	Amazônia	Caatinga	Cerrado	Mata Atlântica	Pampa	Pantanal
Temperatura média	25,0	26,8	25,2	21,2	19,3	26,4
Precipitação [mm/ano]	2.300	583	1.611	1.700	1.513	998
Ventos [m/s]	2,84	5,60	4,19	4,34	3,85	4,35
Irradiação média [kWh/m²/dia]	5,01	5,44	5,24	4,64	4,62	5,06

FONTE: A AUTORA (2021)

A Tabela 19 apresenta os valores médios das características para cada bioma obtidos pelo HOMER para os municípios selecionados no item anterior. Analisando a tabela, pode-se concluir que as maiores temperaturas se encontram na Caatinga, Pantanal, Cerrado e Amazônia, com temperaturas entre 25 e 26,8 °C, conseqüentemente, esses biomas também apresentam os maiores índices de irradiação. Com relação a precipitação, Amazônia é o bioma com maior precipitação, cerca de quatro vezes o índice anual da Caatinga. Em relação aos ventos, os biomas Caatinga, Pantanal e Mata Atlântica se destacam com as maiores médias de velocidade.

4.1.3. Entrevistas

A fim de aproximar os resultados obtidos na literatura com a realidade do cenário nacional, realizaram-se entrevistas com organizações responsáveis pela implantação de SFI.

As entrevistas tiveram o intuito de quantificar o peso das variáveis que influenciam no projeto, instalação e manutenção de SFII em regiões remotas. Essa entrevista foi realizada via e-mail, através de um questionário pré-elaborado (APÊNDICE 2).

4.1.4. Dados dos equipamentos

Afim de diversificar a base de dados, foram pesquisados diferentes fabricantes e modelos por tecnologia de equipamento. A Tabela 20 apresenta a quantificação dos equipamentos pesquisados.

TABELA 20 – QUANTIFICAÇÃO DOS EQUIPAMENTOS PARA BASE DE DADOS

Equipamento	Tecnologia	Modelos
PV		14
	Silício monocristalino	7
	Silício policristalino	7
Bateria		8
	Zebra	2
	Lítio	3
	Chumbo ácido	3
Controlador		10
	MPPT	6
	PWM	4
Inversor		7
	Senoidal de onda pura	7

FONTE: A AUTORA (2021)

Como mostra a Tabela 20, ao todo foram catalogados 14 modelos de PVs, 8 de baterias, 10 de controladores de carga e 7 inversores. Para o inversor, a tecnologia indicada para aplicação solar é o inversor de onda senoidal pura

CC/CA, como descrito no item 2.1.4. Além da separação por tecnologia, os equipamentos também foram separados por potência, como mostra a Tabela 21.

TABELA 21 – SEPARAÇÃO DOS EQUIPAMENTOS POR POTÊNCIA

	Pequeno	Médio	Grande
PV	Até 90 Wp	91 a 220 Wp	221 a 350 Wp
Inversor	Até 700 W	700 a 1.000 W	1.000 a 1.200

FONTE: A AUTORA (2021)

Como mostra a Tabela 21, os PVs e os inversores foram ainda separados em três tamanhos, baseados na regulamentação e nas opções comerciais disponíveis. Com relação a bateria e controlador, essa divisão é considerada opcional, pois, de modo geral, as baterias são vendidas em módulos unitários para composição do banco final, aos quais o controlador deve ser compatível. Assim, optou-se por simular um bloco único de bateria.

Os dados dos equipamentos, necessárias para realização deste trabalho estão no APÊNDICE 3.

4.1.5. Dados da literatura

A análise da literatura foi realizada em duas frentes. A primeira, é referente ao estudo de normas nacionais a respeito de SFII. A segunda, através da plataforma Google Scholar, é referente a busca de artigos relacionados a eletrificação de regiões remotas, SI e SFV, referente a 40 artigos selecionados na etapa de revisão da literatura. A planilha com o resumo dos artigos relacionados encontra-se no APÊNDICE 3.

Através dos artigos, buscou-se encontrar tópicos relevantes e recomendações importantes a serem consideradas na implantação de SFI em locais remotos associados às principais dificuldades de eletrificação de regiões remotas. Os tópicos foram agrupados de acordo com tema abordado (Tabela 22).

TABELA 22 – TÓPICOS RELEVANTES NA IMPLANTAÇÃO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS INDIVIDUAIS E ISOLADOS EM REGIÕES REMOTAS

Tema	Descrição	Artigos relacionados
Custos	Principais custos relacionados a implantação de SFI	16
Dimensionamento	Definição da carga e perfil de consumo recomendações para o dimensionamento do sistema conforme necessidades locais	29
Educação dos usuários	Programas de conscientização para uso eficiente do sistema Treinamento dos usuários para utilização do SFII	23
Envolvimento dos usuários	Importância do envolvimento do usuário nas etapas de implantação Fatores que estimulam a aceitação do sistema pelo usuário	27
Equipamentos	Recomendações de equipamentos que atendem às características de SFI e regiões remotas Equipamentos críticos do sistema	15
Manutenção Preventiva	Modelos de estrutura de manutenção preventiva para regiões remotas Itens que dificultam e encarecem a manutenção Principais causas de manutenção	22

FONTE: A AUTORA (2021)

A Tabela 22 apresenta seis tópicos que se destacaram na análise dos artigos e suas respectivas descrições. Destes, o Custos é o único tema que, apesar de relevante, não pode ser avaliado individualmente, mas será considerado dentro da avaliação dos demais temas.

Uma vez selecionados os pontos relevantes a serem utilizados, observou-se que os temas se dividiam em dois grupos:

- **Recomendações gerais:** não há interferência do local de instalação, sendo consideradas recomendações constantes. Fazem parte deste grupo os temas de Educação e Envolvimento dos usuários.
- **Recomendações específicas:** há interferência das características do local de instalação na tomada de decisão. Fazem parte de grupo os temas Dimensionamento, Equipamentos e Manutenção Preventiva.

Cada tema é avaliado com o intuito de fornecer subsídios para o desenvolvimento das recomendações para implantação e O&M de SFII em regiões remotas.

4.2. Método

O método de desenvolvimento do projeto segue o fluxograma da Figura 12.

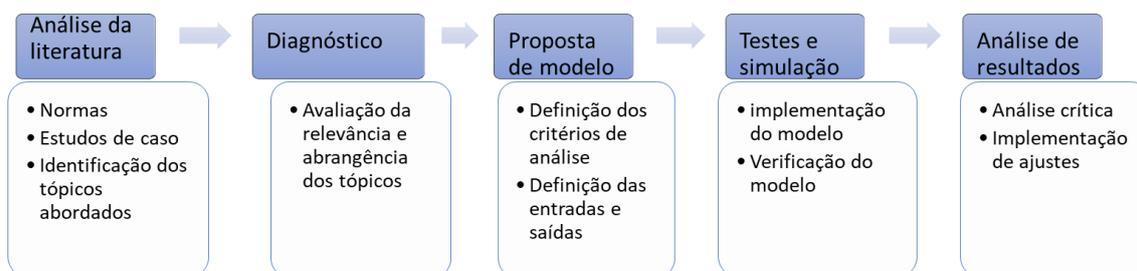


FIGURA 12 – FLUXOGRAMA DO MÉTODO DE PESQUISA

FONTE: A AUTORA (2021)

Na Figura 12, o fluxograma apresenta as principais etapas que contribuem para atingir o objetivo do trabalho. Como a pesquisa é baseada em experiências de outros projetos e na vivência de outros países com relação a implantação de SFI para atendimento de áreas remotas, a primeira etapa é a análise da literatura, os resultados estão apresentados no item 4.1.5.

Conforme apresentado na análise da literatura, os temas se dividem em tópicos gerais e específicos. Para os tópicos gerais, o método é direto através da análise dos artigos. Para os tópicos específicos, como estes sofrem alterações a depender do local de instalação, torna-se necessário o desenvolvimento de um método que auxilie na tomada de decisão. O desenvolvimento do método será apresentado a seguir (item 4.2.1).

4.2.1. Método para recomendações gerais

Conforme dito anteriormente, as recomendações gerais não sofrem interferência do local de instalação e podem ser consideradas adequadas para diversos cenários de recomendação, sendo elas Educação e Envolvimento do usuário.

Para a elaboração de como realizar esses tópicos, buscou-se na literatura as experiências de diversos estudos de caso, avaliando as vivências e os procedimentos realizados. Além disso, também foram estudados cartilhas e manuais de treinamento para os usuários.

4.2.2. Método para recomendações específicas

Diferentemente das recomendações gerais, as recomendações específicas sofrem modificações a depender do local de instalação. As principais características que alteram os resultados são:

- Bioma: devido as dimensões continentais do Brasil, cada localidade possui características climáticas únicas que influenciam tanto na produção de energia solar, quanto nas especificações que os equipamentos devem atender;
- Dificuldade de transporte: regiões remotas são caracterizadas por serem de difícil acesso, muitas vezes necessitando de mais de um tipo de transporte para acessar algumas áreas. Apesar de terem biomas que refletem uma maior dificuldade de transporte, como o Pantanal por ser a maior área alagada do mundo, a dificuldade de transporte não está necessariamente relacionada ao bioma, mas sim aos possíveis meios de acesso à UC, independente do bioma;
- Demanda mensal: a literatura mostra que é essencial que a carga seja dimensionada corretamente conforme as necessidades locais;
- Características de isolamento: dentre as características de regiões remotas, destacam-se a baixa densidade demográfica. Portanto, será considerada a relação entre o número de unidades a serem atendidas e as distâncias médias entre as unidades e também entre a empresa responsável pela instalação e a comunidade a ser atendida. Tais características impactam nas possíveis dinâmicas de O&M dos sistemas.

As características listadas acima são denominadas fatores de influência do método, sendo as entradas do sistema. A interação entre as entradas define

as recomendações indicadas para cada um dos temas (dimensionamento, equipamentos e manutenção preventiva). A Figura 13 apresenta a relação entre as entradas e saídas.

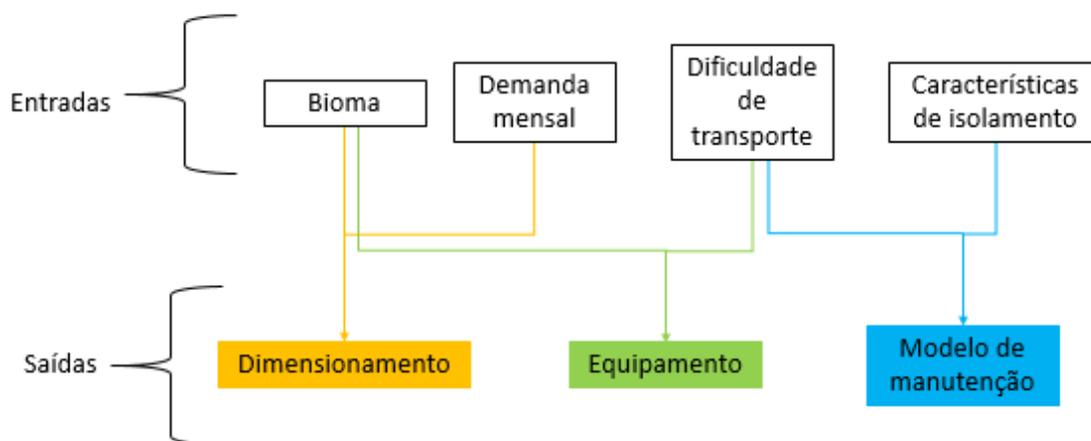


FIGURA 13 – RELAÇÃO DAS ENTRADAS E SAÍDAS DO MÉTODO PROPOSTO

FONTE: A AUTORA (2021)

Como mostra a Figura 13, o dimensionamento é influenciado tanto pelas características do local de instalação (irradiação, vento e temperatura), quanto pela demanda mensal calculada.

As recomendações de equipamentos sofrem influência das características do bioma para definição das especificações climáticas que o equipamento deve atender e também da dificuldade de transporte, que influencia na delimitação do peso e dimensões adequadas para facilitar o transporte e diminuir as chances de avaria nos equipamentos durante o transporte. Já, o modelo de manutenção preventiva é selecionado de acordo com o grau de isolamento das unidades consumidoras e também da dificuldade de acesso ao local, que impactam no custo da manutenção.

Para realizar a interação entre as entradas são utilizados dois *softwares*: HOMER, Excel. A Figura 14 apresenta como ocorre a relação entre eles.

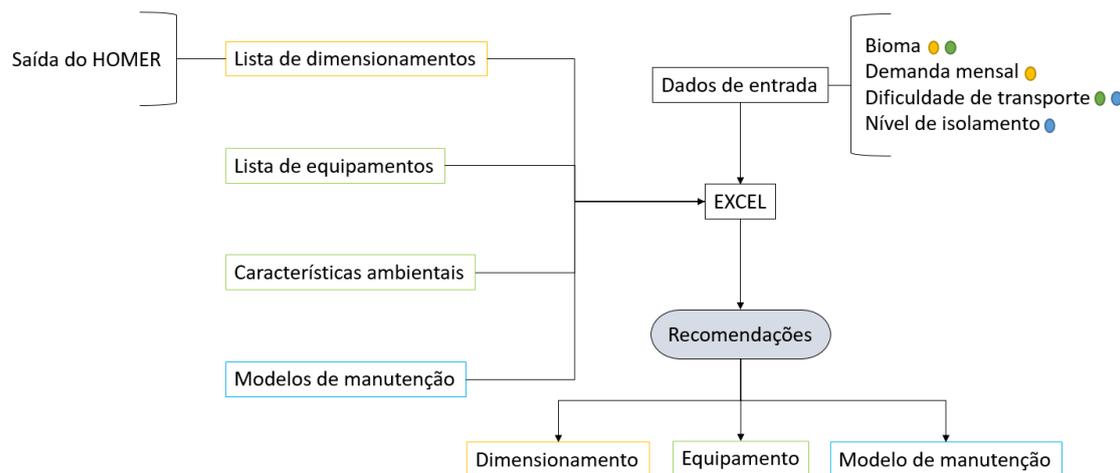


FIGURA 14 – FLUXO DE INTERAÇÃO ENTRE OS SOFTWARES UTILIZADOS NO MÉTODO
 FONTE: A AUTORA (2021)

Conforme mostra a Figura 14, no HOMER é realizado o cálculo do dimensionamento do SFII para os biomas abrangidos no projeto. Os resultados obtidos, informando a arquitetura mínima necessária para cada sistema, são tabelados e incluídos na planilha da base de dados no Excel, nomeada “lista de dimensionamento”. De acordo com os dados de entrada de bioma e demanda mensal, os dados da planilha são filtrados e selecionado o dimensionamento recomendado.

Continuando na análise da Figura 14, a planilha “lista de equipamentos” contém as especificações a serem avaliadas para a recomendações de equipamentos, juntamente com a planilha “características climáticas” que apresenta a influência da temperatura para cada bioma. Desse modo, a partir dos dados de entrada é realizado uma análise multicritério para classificação das opções e determinação da seleção recomendada.

Por fim, a planilha “modelos de manutenção” apresenta a estrutura de custo dos modelos a serem avaliados. A partir dos dados de entrada são realizados os cálculos dos custos, possibilitando a comparação entre eles. O resultado final indicado é o modelo de menor custo calculado.

A seguir será apresentado o desenvolvimento de cada recomendação.

4.2.2.1. Desenvolvimento da recomendação de equipamentos

A necessidade de equipamentos que se adequem as necessidades e características locais são apontadas por 38% dos artigos analisados. A seleção adequada mostrou impactar principalmente no custo do sistema, devido à redução das manutenções corretivas, além de melhorar a confiabilidade no sistema, justificando o desenvolvimento dessa recomendação.

A recomendação de equipamentos requer o uso de uma análise multicritério, sendo selecionado para isso o método AHP (como apresentado no item 2.4.1). Para a correta utilização do método, todos os dados a serem analisados foram tabelados (Tabela 23).

TABELA 23 – EXEMPLO DE MATRIZ DE DADOS PARA A APLICAÇÃO DO MÉTODO AHP

	Critério 1	Critério 2	...	Critério n
Alternativa 1	A ₁₁	A ₁₂	...	A _{1n}
Alternativa 2	A ₂₁	A ₂₂	...	A _{2n}
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
Alternativa m	A _{m1}	A _{m2}	...	A _{mn}

FONTE: A AUTORA (2021)

A Tabela 23 apresenta uma matriz genérica de dados. As soluções são as possíveis opções de equipamentos e os critérios são os grupos de dados (por exemplo: temperatura de operação, eficiência, vida útil, etc.). Por tanto, cada solução apresenta um valor (A), chamado argumento, para cada critério. Já, para os critérios eles são avaliados conforme o peso de cada um.

A partir desses dados, o método classifica as alternativas, seguindo o passo a passo detalhado no item 2.4.1.1.1. O método será aplicado para cada grupo de equipamentos (PV, bateria, controlador e inversor). Ao fim, a alternativa de cada grupo que tiver a melhor classificação será selecionada para compor a recomendação final.

A definição dos pesos e argumentos serão apresentadas a seguir

4.2.2.1.1. Definição dos pesos

Os pesos são utilizados para composição da MC de critérios de cada grupo de equipamento (PV, bateria, inversor e controlador). Seus valores foram definidos com base nas respostas obtidas dos questionários das entrevistas, sendo calculado como a média das notas de impacto para cada critério, conforme Tabela 24.

TABELA 24 - COMPOSIÇÃO DO PESO DE CADA CRITÉRIO

	Empresa 1	Empresa 2	Empresa 3	Peso médio
Crítérios				
Custo	10	10	8	9,3
Vida útil	10	10	5	8,3
Eficiência	8	8	5	7,0
Temperatura	10	10	5	7,9
Manutenção	10	10	5	8,3
Transporte	7	4	3	5,7
Subcritérios de transporte				
Tamanho	10	5	3	6,0
Peso	10	5	3	6,0

FONTE: A AUTORA (2021)

A Tabela 24 apresenta a notas dadas por cada empresa entrevistada e a média final, que é definida como o peso de cada critério. Observando a Tabela 24, nota-se a subdivisão do critério Transporte, nos subcritérios Tamanho e Peso, ou seja, o critério Transporte é obtido por meio do resultado da avaliação de Tamanho e Peso dos equipamentos.

Além dos critérios do questionário, observou-se a ausência do critério de disponibilidade (tempo de inicialização necessário para a bateria estar operacional). Por ser um item essencial em sistemas isolados, de acordo com a literatura, estimou-se um peso de valor 9.

Para os critérios Transporte e Temperatura, além dos pesos definidos pelo questionário, há a influência do local de instalação. Para o transporte, foram definidos três níveis de dificuldade de acesso a ser determinado pelo usuário:

- Acesso fácil (impacto 0,5), significa que o transporte é realizado via terrestre, sem nenhuma complicação significativa;
- Acesso médio (impacto 1,0), são transporte realizados com um único modo de transporte, porém com dificuldades pelo percurso;
- Acesso difícil (impacto 1,5), se refere a transporte com um ou múltiplos modos de transporte.

A escolha da dificuldade média como impacto 1,0 se deve ao fato de duas empresas entrevistadas já terem ampla experiência no transporte de equipamentos para regiões remotas, impactando na sua avaliação. O comentário de cada empresa em relação a dificuldade de transporte está no 0.

Para o critério temperatura, o impacto foi definido com base nos dados climáticos (Tabela 19). Para isso utilizou-se o método da conversão de escala, considerando que o maior e menor valor obtido para uma dada característica, corresponde aos pesos 1 e 0,1, respectivamente, como mostra a equação (10).

$$I_a = \frac{0,9 \times (t - t_{\min})}{(t_{\max} - t_{\min})} + 0,1 \quad (10)$$

Onde I_a é o impacto calculado para um dado bioma a , t é o valor que se deseja converter e t_{\max} e t_{\min} são o maior e menor valor de temperaturas médias, respectivamente. A Tabela 25 apresenta a influência da temperatura em cada bioma.

TABELA 25 – INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA

Influência da temperatura	
Amazônia	0,9
Caatinga	1,0
Cerrado	0,8
Mata Atlântica	0,3
Pampa	0,1
Pantanal	1,0

FONTE: A AUTORA (2021)

Com base na Tabela 25 é possível observar que os biomas caatinga e pantanal possuem os maiores impactos da temperatura (1,0), enquanto a Mata Atlântica e o Pampas possuem os menores impactos, 0,3 e 0,1, respectivamente.

A escolha para o maior impacto de temperatura ser 1,0 se deve ao fato dos principais locais de abrangência dos entrevistados já serem os biomas de elevadas temperaturas (Amazônia, Caatinga e Pantanal).

Desse modo, para os critérios Temperatura e Transporte, o peso final é obtido pela multiplicação o peso médio (p) pelo impacto (I), conforme equação (11).

$$Peso = p \times I \quad (11)$$

É importante destacar que cada grupo de equipamentos é avaliado conforme determinados critérios. A relação de grupo de equipamentos por critério está apresentada na Tabela 26.

TABELA 26 – RELAÇÃO DOS CRITÉRIOS AVALIADOS POR EQUIPAMENTO

	Equipamentos relacionados			
	PV	Bateria	Inversor	Controlador
Crítérios				
Custo	X	X	X	X
Vida útil	X	X	-	-
Eficiência	X	-	X	X
Temperatura	X	X	-	-
Manutenção	-	X	-	-
Disponibilidade	-	X	-	-
Subcritérios de transporte				
Transporte	X	X	X	X
Tamanho	X	X	X	X
Peso	X	X	X	X

FONTE: A AUTORA (2021)

A Tabela 26 apresenta a relação dos critérios para cada grupo de equipamentos, indicado com “X” quando há relação. A partir dessa relação é possível buscar na base de dados de cada equipamento o valor do atributo. Esse processo será explicado no item seguinte.

4.2.2.1.2. Definição dos atributos

Os atributos são os valores que relacionam as possíveis soluções com os critérios a serem avaliados.

Os atributos podem ser quantitativos e qualitativos. Para os atributos quantitativos utilizou-se a média dos valores apresentados no banco de dados de cada equipamento, elaborado conforme item 4.1.4.

Já, para os dados quantitativos, ponderou-se cada critério individualmente com base na literatura, sendo eles a manutenção das baterias e a eficiência do controlador de carga PWM.

Para a manutenção da baterias, a literatura e os manuais dos equipamentos consideram as tecnologias Zebra e Lítio como “manutenção livre”, consideradas com peso equivalente para esse critério. Porém, de acordo com (LACTEC, 2017), elas requerem cuidados básicos como limpeza e ainda, por conterem um sistema de gerenciamento, é recomendado o download dos dados para avaliação do funcionamento das baterias.

As baterias OPzS requerem mais atividades de manutenção preventiva, quando comparada as outras duas opções, como reposição da água destilada e medição da densidade do eletrólito. Desse modo, determinou-se as baterias Zebra e Lítio com peso 3 em relação a OPzS, de acordo com a tabela de Saaty. A Tabela 27 apresenta os atributos para as baterias.

TABELA 27 – VALOR DOS ARGUMENTOS DE CADA CRITÉRIO AVALIADO PARA BATERIA

	Volume [10⁻⁵ m³/Wh]	Peso [kg/Wh]	Temperatura de operação	Custo/LFTP [R\$/kWh]	Facilidade de manutenção	Disponibilidade [h]
Zebra	1,75	0,016	300	3,24	3	Aproximadamente 13
Lítio	1,73	0,016	50	1,67	3	Aproximadamente 0
OPzS	2,34	0,071	20	2,50	1	Aproximadamente 0

FONTE: A AUTORA (2021)

Analisando a Tabela 27 é possível observar que as baterias Zebra e Lítio possuem os menores volumes e peso. Ainda, a bateria Zebra se destaca positivamente pela alta temperatura de operação e negativamente pela

disponibilidade, que representa o tempo de inicialização necessário para que a bateria esteja adequada para operação.

Para o controlador de carga o critério Eficiência tem influência direta da temperatura. Como explicado no item 2.1.2, a tecnologia MPPT tem um melhor desempenho (10% a 40%) em situações críticas (elevadas temperaturas ou irradiância muito baixa). Já, em situações normais, o desempenho deles é equivalente.

Por esse motivo, a eficiência do controlador MPPT foi considerada superior a PWM, com pesos 5, de acordo com a tabela de Saaty. A Tabela 28 apresenta os atributos do controlador.

TABELA 28 – CRITÉRIOS DE AVALIAÇÃO PARA CONTROLADOR DE CARGA

	Eficiência	Volume [mm³]	Peso [kg]	Custo [R\$]
MPPT	5	0,0020	1,67	939,16
PWM	1	0,0006	0,27	332,50

FONTE: A AUTORA (2021)

Conforme Tabela 28, o controlador MPPT é um equipamento mais robusto, tanto nas dimensões físicas, quanto na eficiência. Porém, em relação ao PWM seu custo é cerca de 35% superior.

Para o PV e inversor, não houveram critérios quantitativos. Assim, os atributos foram obtidos diretamente da base de dados de equipamentos, conforme apresentado na Tabela 29 e Tabela 30.

TABELA 29 – CRITÉRIOS DE AVALIAÇÃO PARA PAINEL FOTOVOLTAICO

	Eficiência [%]	Vida útil [anos]	Volume [m³]	Peso [kg]	Custo [R\$/W]	Coefficiente de temperatura
Monocristalino até 90 W	13,8	25,0	0,021	8,5	10,93	0,042
Monocristalino de 91 a 220 W	17,1	21,7	0,046	14,3	7,80	0,062
Monocristalino de 221 a 350 W	20,1	25	0,074	23,0	3,59	0,040
Policristalino até 90 W	14,6	23,3	0,020	6,9	4,03	0,040
Policristalino de 91 a 220 W	14,2	25	0,074	19,7	1,95	0,050

TABELA 29 – CRITÉRIOS DE AVALIAÇÃO PARA PAINEL FOTOVOLTAICO (CONTINUAÇÃO)

	Eficiência [%]	Vida útil [anos]	Volume [m ³]	Peso [kg]	Custo [R\$/W]	Coefficiente de temperatura
Policristalino de 221 a 350 W	17,0	25	0,074	22,0	2,27	0,053

FONTE: A AUTORA (2021)

TABELA 30 – CRITÉRIOS DE AVALIAÇÃO PARA INVERSOR

	Eficiência [%]	Peso [g]	Volume [mm ³]	Custo [R\$/W]
Inversor até 700 W	0,91	1350	0,0018	2,41
Inversor de 701 a 1000 W	0,92	3750	0,0066	1,40
Inversor de 1001 a 1500 W	0,93	4600	0,0074	1,90

FONTE: A AUTORA (2021)

Nesses equipamentos, ressalta-se que o custo foi considerado em relação a potência nominal do equipamento. Como já existe o critério Eficiência para cada um deles, utilizar o custo em função da potência útil seria “prejudicar” o equipamento duas vezes em relação ao mesmo critério.

Com os critérios e argumentos definidos, aplicou-se o método AHP para classificação dos equipamentos.

4.2.2.2. *Desenvolvimento das recomendações de dimensionamento*

A importância de um dimensionamento correto do SFII é apontada por 73% dos estudos de caso, ressaltando os seguintes motivos:

- Maior satisfação do usuário
- Maior previsibilidade de fornecimento, aumentando a confiabilidade no sistema
- Melhor aproximação entre o fornecimento de energia e a demanda
- Diminuição das perdas energéticas por excesso de geração
- Melhor performance dos equipamentos, por não estarem operando em condição sub ou sobrecarregada
- Redução dos custos gerais, considerando CAPEX e OPEX

Desse modo, justifica-se a elaboração de uma recomendação de dimensionamento otimizado com base nas necessidades locais, no custo e no atendimento da regulamentação.

De acordo com a literatura quatro variáveis fundamentais devem ser consideradas, conforme apresentado na Tabela 31.

TABELA 31 – VARIÁVEIS DE DIMENSIONAMENTO

Variáveis	Incidência na literatura
Características climáticas	60%
Carga mínima	44%
Variáveis técnicas	36%
Perfil de demanda	16%

FONTE: A AUTORA (2021)

Conforme mostra a tabela acima, a consideração das variáveis climáticas é o item mais recorrente (60%). Essas variáveis se referem às características locais, o histórico de dados meteorológicos de temperatura vida, incidência de raios solares na região e a sazonalidade, que pode impactar no uso da energia elétrica relacionado às atividades econômicas. No presente trabalho a sazonalidade não está inclusa na análise por se tratar de um SFII exclusivo para uso residencial.

A segunda variável de maior incidência é a carga mínima (44%), que se refere a carga instalada na UC. O levantamento de carga é essencial para que o dimensionamento do sistema se aproxime o máximo possível para o atendimento das necessidades locais.

A variável técnica (36%), refere-se as especificações técnicas que o dimensionamento deve considerar. A literatura destaca as seguintes variáveis: custo, vida útil dos equipamentos, autonomia e profundidade de descarga das baterias. Por fim, o perfil de demanda, que se refere ao modo de utilização da energia elétrica, aparece com incidência de 16%.

A baixa incidência do perfil de demanda se deve ao fato dos estudos darem preferência ao cálculo considerando apenas a carga mínima a ser atendida. Porém, no presente estudo optou-se por considerar o perfil de

demanda a fim de obter uma melhor otimização do sistema, conforme utilização características de regiões remotas.

Para que o dimensionamento atendesse as quatro variáveis destacadas, dividiu-se o dimensionamento em três etapas. A primeira sendo a definição da carga mínima em UC rurais e de baixa renda, a segunda é a elaboração do perfil de demanda com base em UC rurais atendidas com SFII e a terceira a simulação para otimização do dimensionamento, considerando tanto as características climáticas, quanto as variáveis técnicas. As etapas do dimensionamento serão detalhadas a seguir.

4.2.2.2.1. Definição da carga mínima

Conforme explicado anteriormente, a carga mínima refere-se a carga instalada que se busca atender por meio do SFII. Apesar de haver diversas estimativas de consumo rural, o objetivo do presente capítulo é estabelecer um padrão de carga mínima a ser atendida, considerando tanto os dados da literatura, quanto a regulamentação brasileira.

Com apresentado no item 2.3, a regulamentação a Resolução Normativa nº 493/2012 (ANEEL, 2012) estabelece os procedimentos e condições de fornecimento de energia por meio de SFI. Ainda, na resolução são definidos seis enquadramentos de sistemas baseados na disponibilidade mensal do sistema, variando de 13 a 80 kWh/mês, definida a partir de um consumo diário da UC pré-estabelecido e a uma potência mínima de fornecimento sem ônus para o consumidor. Outro ponto considerado é o Manual Operacional do PLpT, que determina um kit mínimo de instalação interna, estabelecendo o atendimento mínimo de 3 pontos de luz e 2 tomadas.

Com relação aos dados da literatura, a definição da carga mínima é baseada nos equipamentos elétricos comuns em UC rurais. A Tabela 32 mostra a relação de equipamentos apontados na literatura, relevantes para o cálculo de carga.

TABELA 32 – CARGA ELÉTRICA MÍNIMA RURAL COM BASE NA LITERATURA

Equipamento	Incidência	Quantidade	Potência ativa [W]	Potência Stand by [W]	Consumo médio mensal (kWh)
Lâmpada	92%	3	11,0	0	1,65
Televisão	92%	1	42,0	3,1	8,04
Rádio	67%	1	5,0	1,7	2,20
Carregador de celular	58%	1	3,7	0	0,39
Ventilador	33%	1	72,0	0	17,28
Refrigerador	25%	1	-	-	25,2
Receptor satelital	17%	1	16,2	15,9	11,51
Total (sem refrigerador)					44,37 kWh/mês
Total (com refrigerador)					69,57 kWh/mês

FONTE: A AUTORA (2021)

Conforme apresentado na Tabela 32, sete equipamentos são de maior incidência, destacando lâmpadas e televisão. O consumo médio apresentado é baseado no consumo da tabela do Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica – PROCEL (Eletrobrás, 2006) e na tabela *Standby Power* (Berkeley Lab, 2019). Com relação as quantidades, para todos os equipamentos foram considerados uma única unidade, com exceção das lâmpadas, com o objetivo de atender o estabelecido no manual do Programa Luz para Todos.

Ainda, foram considerados dois cenários, um com refrigerador e outro sem. A literatura apresenta o refrigerador como um bem de alto valor, não sendo acessível a todas as famílias. Por este motivo, optou-se por considerar esses dois cenários.

Comparando os dados de carga da literatura, com o estabelecido na Resolução Normativa N° 493 (ANEEL, 2012), verificou-se que as disponibilidades de SFII que atendem a ambos os cenários são 45, 60 e 80 kWh/mês, se mostrando as mais adequadas para atendimento de regiões remotas. Assim, essas três disponibilidades foram as consideradas para o dimensionamento dos SFII.

4.2.2.2.2. Definição da curva de carga

O presente capítulo busca obter o perfil de utilização da energia em UC residenciais de regiões remotas, aproximando-se o máximo possível do real consumo dos usuários.

Para atingir esse objetivo buscou-se na literatura informações do perfil de carga de consumidores rurais ou de baixa renda. Uma vez levantadas as curvas relevantes converteram-se os valores para pu, com o objetivo de se obter apenas o formato da curva. Para isso, limitou-se como 1 pu o maior valor de consumo, convertendo os demais valores proporcionalmente.

A Tabela 33 apresenta a relação das curvas levantadas acompanhada de uma breve descrição do cenário em que a curva foi obtida, sendo consideradas quatro curvas de casos de estudo internacionais e duas de casos nacionais.

TABELA 33 – RELAÇÃO DAS CURVAS TÍPICAS LEVANTADAS

Referência	Descrição do cenário	Curva típica [pu]																																																		
Chowdhury, et al. (2015)	Perfil de carga estimado em uma região de Bangladesh atendida por SFI, considerando várias UCs	<table border="1"> <caption>Dados para o gráfico de Bangladesh</caption> <thead> <tr> <th>horário [h]</th> <th>Consumo [pu]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0</td><td>0.5</td></tr> <tr><td>1</td><td>0.5</td></tr> <tr><td>2</td><td>0.5</td></tr> <tr><td>3</td><td>0.5</td></tr> <tr><td>4</td><td>0.5</td></tr> <tr><td>5</td><td>0.25</td></tr> <tr><td>6</td><td>0.25</td></tr> <tr><td>7</td><td>0.25</td></tr> <tr><td>8</td><td>0.25</td></tr> <tr><td>9</td><td>0.75</td></tr> <tr><td>10</td><td>0.75</td></tr> <tr><td>11</td><td>0.75</td></tr> <tr><td>12</td><td>0.75</td></tr> <tr><td>13</td><td>0.75</td></tr> <tr><td>14</td><td>0.75</td></tr> <tr><td>15</td><td>0.75</td></tr> <tr><td>16</td><td>0.75</td></tr> <tr><td>17</td><td>0.25</td></tr> <tr><td>18</td><td>1.0</td></tr> <tr><td>19</td><td>1.0</td></tr> <tr><td>20</td><td>1.0</td></tr> <tr><td>21</td><td>1.0</td></tr> <tr><td>22</td><td>1.0</td></tr> <tr><td>23</td><td>1.0</td></tr> </tbody> </table>	horário [h]	Consumo [pu]	0	0.5	1	0.5	2	0.5	3	0.5	4	0.5	5	0.25	6	0.25	7	0.25	8	0.25	9	0.75	10	0.75	11	0.75	12	0.75	13	0.75	14	0.75	15	0.75	16	0.75	17	0.25	18	1.0	19	1.0	20	1.0	21	1.0	22	1.0	23	1.0
horário [h]	Consumo [pu]																																																			
0	0.5																																																			
1	0.5																																																			
2	0.5																																																			
3	0.5																																																			
4	0.5																																																			
5	0.25																																																			
6	0.25																																																			
7	0.25																																																			
8	0.25																																																			
9	0.75																																																			
10	0.75																																																			
11	0.75																																																			
12	0.75																																																			
13	0.75																																																			
14	0.75																																																			
15	0.75																																																			
16	0.75																																																			
17	0.25																																																			
18	1.0																																																			
19	1.0																																																			
20	1.0																																																			
21	1.0																																																			
22	1.0																																																			
23	1.0																																																			
Narayan et al. (2020)	Perfil de carga medido de uma UC em Ruanda atendida por SFII	<table border="1"> <caption>Dados para o gráfico de Ruanda</caption> <thead> <tr> <th>horário [h]</th> <th>Consumo [pu]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0</td><td>0.1</td></tr> <tr><td>1</td><td>0.25</td></tr> <tr><td>2</td><td>0.15</td></tr> <tr><td>3</td><td>0.15</td></tr> <tr><td>4</td><td>0.28</td></tr> <tr><td>5</td><td>0.28</td></tr> <tr><td>6</td><td>0.15</td></tr> <tr><td>7</td><td>0.05</td></tr> <tr><td>8</td><td>0.05</td></tr> <tr><td>9</td><td>0.05</td></tr> <tr><td>10</td><td>0.35</td></tr> <tr><td>11</td><td>0.5</td></tr> <tr><td>12</td><td>0.5</td></tr> <tr><td>13</td><td>0.05</td></tr> <tr><td>14</td><td>0.05</td></tr> <tr><td>15</td><td>0.05</td></tr> <tr><td>16</td><td>0.75</td></tr> <tr><td>17</td><td>0.6</td></tr> <tr><td>18</td><td>0.3</td></tr> <tr><td>19</td><td>0.6</td></tr> <tr><td>20</td><td>1.0</td></tr> <tr><td>21</td><td>0.6</td></tr> <tr><td>22</td><td>0.15</td></tr> <tr><td>23</td><td>0.15</td></tr> </tbody> </table>	horário [h]	Consumo [pu]	0	0.1	1	0.25	2	0.15	3	0.15	4	0.28	5	0.28	6	0.15	7	0.05	8	0.05	9	0.05	10	0.35	11	0.5	12	0.5	13	0.05	14	0.05	15	0.05	16	0.75	17	0.6	18	0.3	19	0.6	20	1.0	21	0.6	22	0.15	23	0.15
horário [h]	Consumo [pu]																																																			
0	0.1																																																			
1	0.25																																																			
2	0.15																																																			
3	0.15																																																			
4	0.28																																																			
5	0.28																																																			
6	0.15																																																			
7	0.05																																																			
8	0.05																																																			
9	0.05																																																			
10	0.35																																																			
11	0.5																																																			
12	0.5																																																			
13	0.05																																																			
14	0.05																																																			
15	0.05																																																			
16	0.75																																																			
17	0.6																																																			
18	0.3																																																			
19	0.6																																																			
20	1.0																																																			
21	0.6																																																			
22	0.15																																																			
23	0.15																																																			

TABELA 33 – RELAÇÃO DAS CURVAS TÍPICAS LEVANTADAS (CONTINUAÇÃO)

Referência	Descrição do cenário	Curva típica [pu]
Mandelli et al. (2016)	Perfil de carga estimado de consumo em Uganda para SFI	<p>Consumo [pu]</p> <p>horário [h]</p>
Yamakawa (2007)	Perfil de carga medido em dias úteis para caracterização do consumo em UCs residenciais de baixa renda no Brasil	<p>Consumo [pu]</p> <p>horário [h]</p>
Salas, Silveira (2017)	Perfil de carga estimado considerando um consumo diário máximo de 80 kWh/mês, na região do Pantanal, Brasil	<p>Consumo [pu]</p> <p>horário [h]</p>
Giles et al. (2007)	Perfil de carga medido de uma UC atendida com SFII na República Dominicana	<p>Consumo [pu]</p> <p>horário [h]</p>

FONTE: A AUTORA (2021)

Como apresentado na Tabela 33, foram considerados tanto perfis de sistemas individuais, quanto de sistemas comunitários, ampliando a diversificação dos usuários. Analisando as curvas, observa-se que todas as curvas obtidas apresentam o pico máximo durante a noite e um segundo pico durante o dia, que ocorre normalmente no meio do dia.

A partir das curvas obtidas foi realizada uma média de cada ponto horário, a fim de se obter um perfil de carga equivalente a ser utilizado para o dimensionamento. A curva média está apresentada na Figura 15.

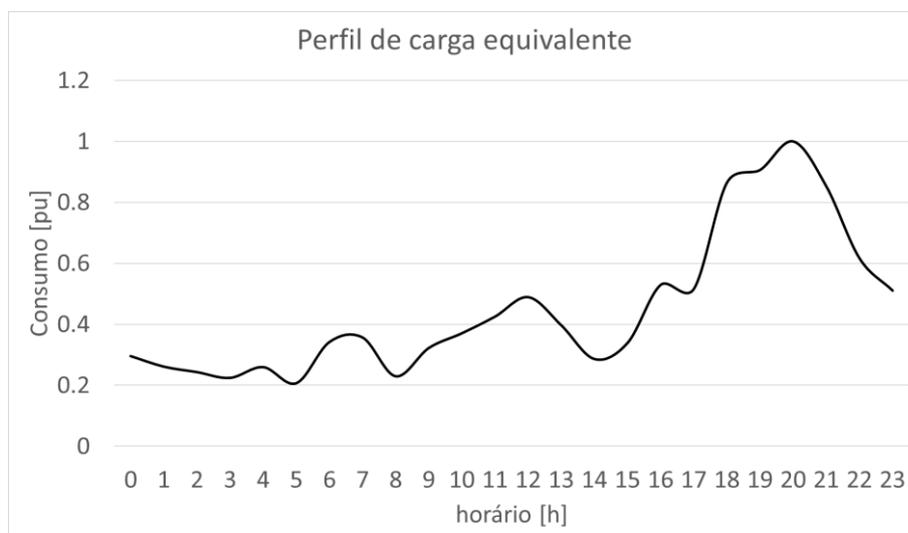


FIGURA 15 – PERFIL DE CARGA EQUIVALENTE PARA REGIÕES REMOTAS

FONTE: A AUTORA (2021)

Como mostra o gráfico da Figura 15, a curva média manteve o pico máximo durante a noite (entre 20 h e 21 h) e um segundo pico (entre 11 h e 12 h), com metade da amplitude do primeiro no meio do dia. A queda da amplitude do segundo pico se deve ao perfil de carga dos casos nacionais, que apresentam um consumo mínimo durante todo o dia. O desvio padrão em cada horário varia de 0,01 a 0,28 pu, sendo a média 0,19 pu.

4.2.2.2.3. Dimensionamento otimizado

A simulação foi realizada no *software* HOMER Pro Microgrid Analysis Tool, considerando os três cenários de carga mínima (45, 60 e 80 kWh/mês). Para compor a simulação foram realizados os seguintes passos:

1. Seleção do local geográfico da simulação
2. Carregamento das características climáticas locais (irradiação, temperatura e ventos)
3. Determinação da carga elétrica
4. Seleção dos equipamentos PV, bateria e inversor
5. Determinação da configuração do controlador de carga
6. Simulação
7. Análise dos resultados da simulação

A seleção do local e o carregamento das características climáticas já foram apresentados no item 4.1.1 e 4.1.2, respectivamente. A determinação da carga elétrica e definição da curva típica foram apresentadas anteriormente.

Com relação a seleção dos equipamentos (passo 4), foi utilizada a base de dados dos equipamentos.

Para os PVs foram considerados os parâmetros médios de silício policristalinos, que é a opção comum no Brasil. Além dos valores médios dos PVs pesquisados, foi definido um fator de degradação de 0,5% ao ano para painéis de silício cristalino (JORDAN; KURTZ, 2013) e uma degradação pela luz no primeiro ano de 2,5% (KUMAR et al., 2019). A Tabela 34 apresenta os parâmetros do PV.

TABELA 34 – ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DO PAINEL FOTOVOLTAICO GENÉRICO

Modelo	Genérico
Coeficiente de temperatura	-0,44
Temperatura de operação	47 °C
Eficiência	15,3 %
Vida útil	23 anos
Performance ao final da vida útil ⁴	87%
Custo do kW	R\$ 2395,00

FONTE: A AUTORA (2021)

⁴ Performance ao final da vida útil considerando os fatores de degradação

Os parâmetros apresentados na Tabela 34 correspondem a um painel de silício policristalino. Ainda, devido as diferenças climáticas dos locais selecionados, optou-se por considerar também os efeitos de temperatura que interferem na sua operação.

Com relação às baterias, optou-se por selecionar uma bateria OPzS e de Lítio. A bateria Zebra não foi selecionada por sua modelagem requerer os dados do sistema de controle de temperatura interna que, apesar das solicitações, não foi disponibilizado pelo fabricante e nem encontrado na literatura. Assim, a Tabela 35 apresenta os parâmetros das baterias selecionadas.

TABELA 35 – ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DAS BATERIAS

Modelo	OPzS	Lítio
Tensão nominal	2 V	48 V
Capacidade nominal	250 Ah	50 Ah
Eficiência	82%	95%
Máximo DoD	60%	80%
Ciclos (máx. DoD)	1.500	8.250
Custo por LFTP	R\$ 2,50	R\$ 1,67

FONTE: A AUTORA (2021)

Conforme apresentado na Tabela 35, a bateria OPzS corresponde a uma unidade de 0,5 kWh, enquanto a de lítio corresponde a uma de 2,4 kWh. Foram selecionadas as baterias as quais os fabricantes informaram os dados completos de eficiência, vida útil e curva de número de ciclos por DoD, necessários para a modelagem dos equipamentos.

Com relação ao inversor, para a simulação optou-se por simular um inversor ideal para sistemas fotovoltaicos. O inversor é um modelo com vida aproximada de 15 anos e a eficiência do equipamento respeita a curva apresentada na Figura 16.

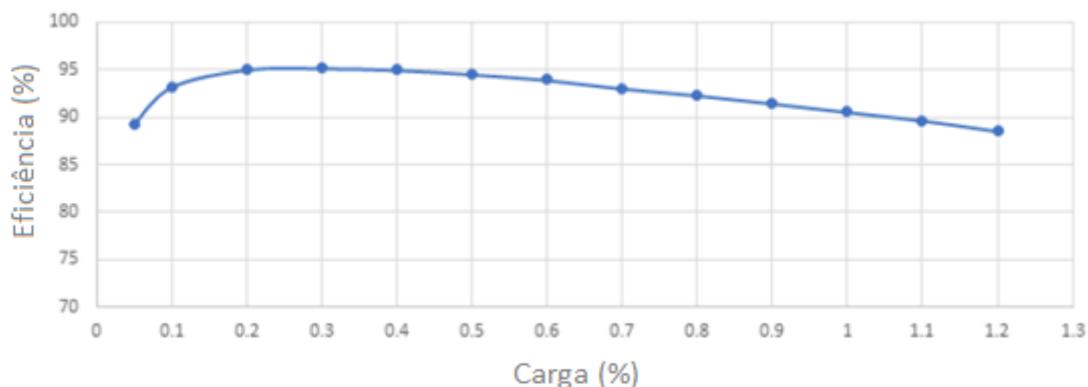


FIGURA 16 – CURVA DE EFICIÊNCIA DE INVERSOR FOTOVOLTAICO

FONTE: LACTEC (2017)

A Figura 16 apresenta a eficiência de acordo com o nível de carga do sistema. No caso do presente estudo, o nível de carga em cada cenário está apresentado na Tabela 36.

TABELA 36 – NÍVEL DE CARGA DO INVERSOR POR SISTEMA

Modelo	Inversor	Carga máxima	Nível de carga
Sistema 45 kWh/mês	700 W	140 W	0,20
Sistema 60 kWh/mês	1000 W	190 W	0,19
Sistema 80 kWh/mês	1250 W	150 W	0,20

FONTE: A AUTORA (2021)

Conforme Tabela 36 o nível de carga nos sistemas está próximo a 20%. Comparando o valor obtido com o gráfico da Figura 16, é possível assumir a eficiência do inversor em todos os casos como 95%.

Com relação ao custo do inversor, ele foi escalonado conforme Tabela 30 mais o custo médio de um controlador de carga (R\$ 695,50), que não é modelado no *software*.

O quinto passo é referente a configuração do controlador de carga. Apesar do HOMER não possuir o esse equipamento como um de seus componentes, ele permite selecionar a estratégia de controle da simulação. A estratégia selecionada foi a de Carregamento Cíclico, possibilitando que a energia excedente do PV carregue o banco de baterias até que atinja o estado de carga especificado.

A partir dos parâmetros estabelecidos anteriormente, a simulação foi realizada considerando um horizonte de 20 anos. Como o objetivo da simulação é obter uma arquitetura otimizada foram considerados o custo médio dos equipamentos baseado no levantamento realizado e desconsiderados o custo de manutenção.

Para a simulação, inicialmente optou-se por permitir a otimização automática do *software* para atendimento da demanda, fornecendo a menor arquitetura viável dos equipamentos. Em seguida, caso o resultado não atendesse a autonomia mínima necessária pela regulação de 48 h ou o limite de interrupções anuais, o banco de baterias era configurado para uma unidade superior ao resultado otimizado e a simulação era realizada novamente. Esse procedimento foi realizado até que fossem atendidos os parâmetros de autonomia mínima necessária e o limite de carga elétrica não atendida.

A partir dos resultados por cidade (APÊNDICE 7), foi realizada a comparação entre os sistemas das três localidades por bioma, sendo selecionado o maior dimensionamento entre elas.

Assim, os sistemas equivalentes para cada bioma consideram as seguintes localidades:

- Amazônia – Marechal Thaumaturgo;
- Cerrado – Recursolândia;
- Caatinga – Dom Inocêncio;
- Pantanal – Porto Murtinho;
- Mata Atlântica – Barra do Turvo;
- Pampas – Amaral Ferrador.

4.2.2.3. *Desenvolvimento das recomendações de modelo de manutenção preventiva*

A manutenção preventiva é apontada por 55% dos autores como item crítico em regiões remotas, principalmente devido ao seu elevado custo. Além disso, o correto planejamento da etapa de O&M se mostrou essencial para:

- Obtenção da alta performance do SFII;
- Aumento da eficiência global;
- Identificação de pontos de perda energética;
- Reduz dos custos de manutenção corretiva.

Os modelos de recomendação elaborados, tiveram como base as experiências apresentadas na literatura analisada. Analisando os artigos, foi possível observar três diferentes cenários de manutenção preventiva.

O primeiro é referente a participação do usuário em atividades de manutenção, com o intuito de otimizar o tempo de atendimento, consequentemente reduzindo o custo.

O segundo apresenta uma base local com moradores capacitados sendo os responsáveis por todas as atividades de manutenção preventiva e por fazer a intermediação entre o usuário e a empresa responsável. O terceiro é o modelo usual, com a própria empresa responsável realizando as manutenções com viagens diárias.

Analisando os cenários dois e três, pode-se ainda criar um quarto, considerando viagens em formato de campanhas, permanecendo um número de dias pré-estipulado nas comunidades, otimizando as manutenções.

Adaptando esses cenários ao contexto nacional onde, usualmente, as concessionárias de energia são as responsáveis pela manutenção dos sistemas, verifica-se a não adequação do cenário com participação do usuário devido aos riscos agregados. Desse modo, optou-se por deixar essa opção como um dado de entrada do programa, interferindo diretamente no tempo das atividades de manutenção.

Desse modo, foram considerados para a simulação os cenários dois, três e quatro, nomeados de modelos M1, M2 e M3, respectivamente.

De modo geral, o custo dos modelos de manutenção possui três parcelas: custo de equipe, custo de transporte e custo outros. O custo de equipe é calculado seguindo as seguintes considerações:

- O tempo de deslocamento é a soma entre o deslocamento externo (distância média entre concessionária e comunidade) e interno (distância média entre os SFIs). Ainda, o deslocamento interno considera que, ao final do dia, a equipe sempre retornará ao ponto de origem, sem repetir sistemas já visitados, conforme equação (12).

$$t_d = 2 \times t_{d,ext} + t_{d,int}(N_{S_d} + 1) \quad (12)$$

Onde N_{S_d} é o número de sistemas atendidos por dia.

- O tempo de trabalho diário ($t_{t,d}$) por equipe considera o tempo de deslocamento (t_d) e o tempo de manutenção (t_a) em cada atendimento. Além disso, ele é limitado pela máxima jornada de trabalho (max_j), conforme equação (13).

$$t_{t,d} = t_d + N_{S_d} \times t_a \mid t_{t,d} \leq max_j \quad (13)$$

- O número de sistemas atendidos dia (equação (14)) considera apenas manutenções completas.

$$N_{S_d} \in \mathbf{N} \quad (14)$$

- O número mínimo de viagens ($N_{viagens}$) necessárias é estimado com base no número atendimentos diários, conforme equação (15).

$$N_{viagens} = \frac{N_S}{N_{S_d}} \quad (15)$$

Sendo N_S o número total de sistemas.

- O número mínimo de equipes ($N_{equipes}$) é baseado no número de viagens e no período⁵ para ser realizado (equação (16)).

$$N_{equipes} = \frac{N_{viagens}}{\frac{12}{f} \times t_{\acute{u}til,m\grave{e}s}}, | N_{equipes} \in \mathbf{N} \quad (16)$$

Sendo $t_{\acute{u}til,m\grave{e}s}$ o tempo útil, em dias ou semanas, por mês e f a frequência estipulada.

- O tempo de trabalho no período (t_t) é calculado com base no trabalho diário e na quantidade de viagens necessárias, conforme equação (17).

$$t_t = t_{t,d} \times N_{viagens} \quad (17)$$

- O custo de equipes (C_E) é o custo horário de trabalho das equipes no ano, conforme equação (18).

$$C_E = t_t \times c_{h,e} \times f \quad (18)$$

Onde $c_{h,e}$ é o custo horário por equipe.

O custo de transporte considera apenas o custo de combustível, não sendo considerado gastos com veículos. Desse modo, possui as seguintes considerações:

- A distância percorrida no trabalho diariamente ($d_{t,d}$) é calculada de forma análoga ao tempo de deslocamento diário, conforme equação (19)

$$d_{t,d} = 2 \times d_{d,ext} + d_{d,inter}(N_{S_d} + 1) \quad (19)$$

Sendo $d_{d,ext}$ a distância média externa e $d_{d,inter}$ a distância média interna

- A distância percorrida no período (d_t) é calculada conforme equação (20)

$$d_t = d_{t,d} \times N_{viagens} \quad (20)$$

⁵ Período: tempo útil, em dias ou semanas, para realização da manutenção de todos os sistemas

- O custo de transporte (C_C) é o custo de combustível gasto por ano, conforme equação (21).

$$C_C = \frac{d_t}{\eta_{comb}} \times c_{comb} \times f \quad (21)$$

Onde η_{comb} é o rendimento do combustível e c_{comb} é o valor do litro de combustível

O custo outros (C_O) é relativo as demais despesas de cada modelo. No presente trabalho estão considerados os custos de insumos da equipe (ferramentas e EPI) ($c_{insumos}$), capacitação ($c_{capacitação}$), aluguel de base local ($c_{aluguel}$) e transporte para entrega de materiais ($c_{entregas}$), conforme equação (22)

$$C_O = N_{equipes} \times (c_{insumos} + c_{capacitação}) + c_{aluguel} + c_{entregas} \quad (22)$$

Logo, o custo total (C_T) da manutenção é a soma dos demais custos (equação (23)).

$$C_T = C_E + C_C + C_O \quad (23)$$

Desse modo, o esquemático do modelo está apresentado na Figura 17.



FIGURA 17 – ESQUEMÁTICO DE ENTRADA E SAÍDAS DO MODELO DE MANUTENÇÃO

FONTE: A AUTORA (2021)

Conforme mostra o esquemático da Figura 17, há cinco entradas e uma saída, subdivida em três custos. Além dessas entradas, há também as constantes do modelo.

Afim de alimentar o modelo para obtenção de uma simulação próxima à realidade, utilizou-se os dados disponibilizados por LACTEC (2017) para

trabalhos em regiões remotas e manutenção de SFII. Os dados estão apresentados na Tabela 37.

TABELA 37 – CONSTANTES DE MANUTENÇÃO EM REGIÕES REMOTAS

Descrição	Valores
Frequência	Bimestral
Velocidade média em estrada pavimentada (km/h)	80,0
Velocidade média em área rural	38,0 km/h com transporte fácil 17,0 km/h com transporte médio 11,0 km/h com transporte difícil
Tempo médio de manutenção sem participação do usuário (h)	2
Tempo médio de manutenção com participação do usuário (h)	1,3
Custo da equipe (R\$/h)	30,15
Custo do combustível (R\$/l)	4,38
Máxima jornada de trabalho (h)	8
Dias úteis	261
Semanas	52
Despesas do local de apoio (R\$/ano)	60.000,00
Insumos ⁶ (R\$)	689,47 por equipe
Capacitação ⁷ (R\$)	2.038,00 por equipe

FONTE: LACTEC (2017)

Os dados apresentados na Tabela 37 são as constantes utilizadas em todos os modelos apresentados. Além desses, será assumido que um mês possui 22 dias úteis e 4 semanas completas.

A seguir será apresentada a modelagem de cada modelo de manutenção e os resultados obtidos.

4.2.2.3.1.1. Modelo de Manutenção M1

⁶ Insumos incluem custos de EPI e ferramental para uma equipe

⁷ Capacitação considerando:

- Especialização Técnica em SFV do SENAI, para o técnico
- Curso NR10 - Segurança em Instalações e Serviços em Eletricidade, para técnico e ajudante
- Curso NR35 – Trabalho em Altura, para técnico e ajudante

O modelo de manutenção M1 é aquele em que a empresa responsável realiza as manutenções enviando as equipes diariamente, sem necessidade de pernoite local. Desse modo, esse modelo só é aplicável quando há a possibilidade de realizar ao menos uma manutenção no dia ($N_{S_d} \geq 1$), respeitando a equação (24).

$$t_d + t_a > \max_j \mid N_{S_d} = 1 \rightarrow C_{M1} = \infty \quad (24)$$

Ainda, por se tratar de viagens diárias com colaboradores da própria empresa, não há necessidade de capacitação, aluguel de base de apoio e transporte de equipamentos. Logo, o custo outros é calculado conforme equação (25).

$$C_{O_{M1}} = N_{equipes} \times C_{insumos} \quad (25)$$

4.2.2.3.2. Modelo de Manutenção M2

Assim como o modelo M1, o modelo de manutenção M2 é baseado na realização pela própria empresa responsável, porém considerando a realização de campanhas com pernoite local. Nesse cenário são consideradas semanas completas, ou seja, campanhas de cinco dias, incluso o período de deslocamento a partir da sede da empresa.

Desse modo, é possível que o período de deslocamento seja superior a 8 h, porém limitando o deslocamento diário remanescente (t'_d) a máxima jornada de trabalho e o tempo remanescente ($t'_{ext,m}$) será realizado no dia seguinte. Assim, o modelo apresenta as seguintes restrições das equações (26), (27) e (28).

$$t_{ext,m} \geq \max_j \rightarrow t'_{ext,m} = t_{ext,m} - \max_j \quad (26)$$

$$t'_{ext,m} \geq 0 \quad (27)$$

$$t'_d + t_a \leq \max_j \mid N_{S_d} = 1 \quad (28)$$

Caso a restrição (28) não seja verdadeira, o modelo é inviável, conforme equação (29).

$$t'_d + t_a > \max_j \mid N_{S_d} = 1 \rightarrow C_{M2} = \infty \quad (29)$$

Por se tratar de campanhas, o tempo de deslocamento externo influencia no número de atendimentos diários, conforme dia da campanha. Portanto, deve-se calcular os atendimentos para cada dia. Para o primeiro e último dia, o cálculo segue a equação (30).

$$\left\{ \begin{array}{l} t_{ext,m} \geq \max_j \rightarrow N_{S_{1,5}} = 0 \\ t_d + t_a > \max_j \mid N_{S_d} = 1 \rightarrow N_{S_{1,5}} = 0 \\ t_d + t_a \leq \max_j \mid N_{S_d} = 1 \rightarrow N_{S_{1,5}} = \frac{\max_j - t_{d,ext} - t_{d,int}}{t_{d,int} + t_a} \mid N_{S_{1,5}} \in \mathbf{N} \end{array} \right. \quad (30)$$

Para o segundo e quarto dia, como há a possibilidade de deslocamento remanescente, tem-se a equação (31).

$$N_{S_{2,4}} = \frac{\max_j - t'_{d,ext} - t_{d,int}}{t_{d,int} + t_a} \mid N_{S_{2,4}} \in \mathbf{N} \quad (31)$$

Para o terceiro dia, assume-se que a equipe já está na comunidade, havendo apenas o deslocamento interno, conforme equação (32).

$$N_{S_3} = \frac{\max_j - t_{d,int}}{t_{d,int} + t_a} \mid N_{S_3} \in \mathbf{N} \quad (32)$$

Logo, o número de sistemas atendidos semanalmente ($N_{S_{Sem}}$) é a soma dos atendimentos diários, conforme equação (33).

$$N_{S_{Sem}} = \sum N_{S_d} \mid N_{S_{Sem}} \in \mathbf{N} \quad (33)$$

A mesma lógica é utilizada no cálculo do deslocamento, para estimativa do custo de transporte.

Com relação ao tempo de trabalho de diário, como os colaboradores estão em viagem de trabalho, é considerado que estão trabalhando 40 h/semana.

Com relação ao custo outros, no caso da M2 há o custo do pernoite. Afim de facilitar, foi considerado o custo do aluguel por semana de trabalho, baseado no custo anual, conforme equação (34).

$$C_{O_{M2}} = N_{equipes} \times c_{insumos} + \frac{c_{aluguel}}{\frac{N_{viagens}}{N_{equipes}} \times f} \quad (34)$$

4.2.2.3.3. Modelo de Manutenção M3

O modelo de manutenção M3 é baseado no conceito de apoio local, através da capacitação de moradores locais para formação das equipes. Nesse cenário é considerado que as equipes saem sempre do mesmo ponto (local de apoio) localizado dentro da comunidade, e retornam ao final do dia. Desse modo, os principais benefícios desse modelo são a economia no custo de transporte, já que não há mais o deslocamento, e a otimização dos atendimentos diários.

O cálculo do deslocamento não possui a parcela externa, resultando na equação (35).

$$t_d = t_{d,int}(N_{S_d} + 1) \quad (35)$$

O número de atendimentos diários é equivalente a equação (32), impactando em uma redução no número de equipes quando comparado aos modelos M1 e M2.

Em contrapartida, há a necessidade de investimento no aluguel do local de apoio e na capacitação das equipes. Além disso, por serem uma unidade separada, há a necessidade de envio de ferramentas e equipamentos ao início de cada período de manutenção para abastecimento local. Desse modo, o custo outros é calculado conforme equação (36).

$$C_{O_{M3}} = N_{equipes} \times (c_{insumos} + c_{capacitação}) + c_{aluguel} + c_{entregas} \times f \quad (36)$$

4.2.3. Testes e simulação

Após o desenvolvimento das recomendações específicas, o método foi simulado para o bioma do Pantanal. O objetivo do teste é averiguar se os resultados apresentados condizem a necessidade observada durante e após a implantação de SFII. Desse modo, o responsável pela eletrificação da localidade, fornecerá as entradas (dados técnicos dos SFI) e avaliará o resultado conforme sua própria experiência e a aplicabilidade da ferramenta.

Caso os resultados obtidos não atendam às necessidades, os pesos e argumentos serão revisados, como um ajuste fino do método a fim de adquirir a aprovação final.

4.3. Considerações Finais do Capítulo

O presente capítulo apresentou os materiais utilizados no desenvolvimento do método, bem como o método utilizado para desenvolvimento das recomendações gerais e específica.

Os materiais se resumem a: portfólio bibliográfico; dados de acesso à eletricidade por município do Brasil para seleção dos locais de simulação; dados climáticos para dimensionamento e seleção dos equipamentos; entrevistas para definição dos pesos utilizados no método AHP; e composição do banco de dados de equipamentos para insumo das recomendações de equipamentos e dimensionamento.

Em seguida, foram apresentados os métodos para a elaboração das recomendações. O primeiro é referente às definições das recomendações gerais, onde o método se resume a revisão e análise da literatura. Já o segundo método refere-se às recomendações específicas, sendo desenvolvido um método baseado nas simulações para dimensionamento no Homer, método AHP para seleção das recomendações de equipamentos, e na análise de custos para recomendação do modelo de manutenção.

5. RESULTADOS E ANÁLISES

A partir da análise da literatura, observou-se a recorrência de cinco temas abordados, apresentados no gráfico da Figura 18.

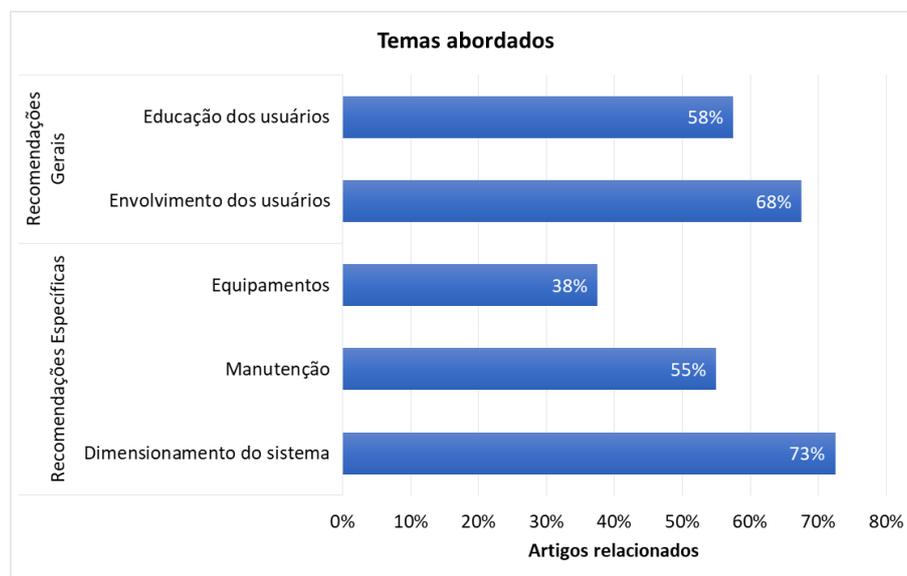


FIGURA 18 – LEVANTAMENTO DE TEMAS ABORDADOS NA LITERATURA A RESPEITO DAS DIFICULDADES DE ELETRIFICAÇÃO DE REGIÕES REMOTAS

FONTE: A AUTORA (2021)

A Figura 18 apresenta as porcentagens de recorrência dos temas, já divididos entre recomendações gerais e específicas. Observando os resultados, nota-se que a questão de dimensionamento do sistema é o assunto mais recorrente relacionado as dificuldades de implantação de SFII, sendo abordado em 73% dos artigos analisados. Dentre as importâncias de um dimensionamento adequado está a relação direta com o custo e performance do sistema e satisfação do usuário. Em sequência, destaca-se à participação do usuário, representada no Envolvimento (68%) e na Educação (58%) dos usuários.

A partir desses três primeiros tópicos, é possível concluir que a interação do usuário com o sistema é fundamental para haja uma boa performance, podendo ser considerado como a principal dificuldade na implantação de SFII.

Ainda analisando a Figura 18, as duas últimas dificuldades abordadas são relacionadas à viabilidade econômica dos sistemas, ressaltando a manutenção (55%) e a importância de uma adequada seleção de equipamentos (38%).

Além dos temas abordados, destacou-se também a inter-relação dos temas, visto que frequentemente os artigos abordavam múltiplos temas, como apresentado na Tabela 38.

TABELA 38 – INTER-RELAÇÃO DOS TEMAS DOS ARTIGOS

Quantidade de temas	Incidência
1	20%
2	18%
3	30%
4	15%
5	18%

FONTE: A AUTORA (2021)

Analisando a Tabela 38, conclui-se que 63% abordam 3 ou mais temas, demonstrando a correlação entre os tópicos e a importância do atendimento a diferentes recomendações para uma melhor probabilidade de sucesso da implantação.

Com relação as entrevistas realizadas, as respostas abertas avaliam o impacto dos temas abordados na literatura de acordo com a vivência das empresas. A análise do impacto médio de cada dificuldade está apresentada no gráfico da Figura 19.

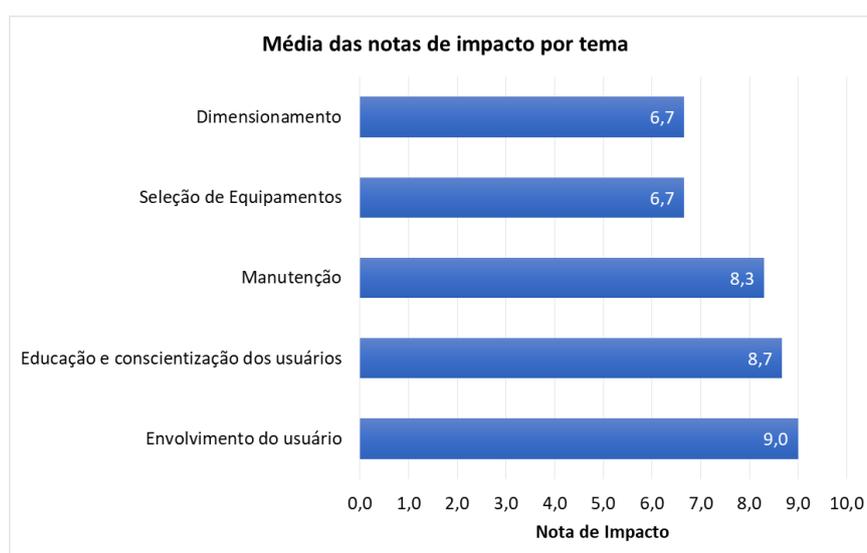


FIGURA 19 – ANÁLISE DAS NOTAS DE IMPACTO DAS ENTREVISTAS

FONTE: A AUTORA (2021)

A Figura 19 aponta os temas de Educação (8,7) e Envolvimento (9,0) dos usuários como os de maior impacto para o sucesso da implantação. Com relação a esses tópicos, as empresas citam a importância da participação ativa durante todo o processo e da capacitação básica para realizar atividades de O&M. Em seguida, as dificuldades de deslocamento, custo e ausência de apoio local, fazem com que manutenção tenha um impacto elevado (8,3).

Diferentemente da literatura, o Dimensionamento não é o tema mais relevante, com uma nota equivalente à dos Equipamentos (6,7). Isso se deve ao fato de dois dos entrevistados já terem adquirido um padrão de sistema que atende as necessidades energéticas e também de tecnologia de equipamentos. Com isso, conclui-se que a nota média das entrevistas não diminui a importância desse tema, mas apenas reflete que as empresas já conseguiram vencer esse obstáculo.

Além desses tópicos, não foram relatadas pelas empresas nenhum outro tema que tenha um impacto relevante na implantação dos sistemas. Desse modo, pode-se dizer que as respostas do questionário condizem com os dados obtidos na literatura.

A seguir são apresentados os resultados para as recomendações de cada tema.

5.1. Recomendações Gerais

No presente capítulo serão apresentados os resultados das recomendações de Envolvimento e Educação do usuário.

5.1.1. Envolvimento dos usuários

Dos 40 artigos analisados, 68% apresentavam como um dos principais pilares para o sucesso dos sistemas o envolvimento dos usuários, se mostrando significativo desde o início do projeto. Esse fato também foi confirmado nas

entrevistas, que destacaram a importância do engajamento e da participação ativa dos usuários durante todas as etapas da implantação.

Analisando a literatura, já em um primeiro momento foi possível observar que esse envolvimento impacta diretamente na forma como os usuários enxergam o sistema, desenvolvendo uma atitude positiva com relação a sua utilização. A partir desse envolvimento o usuário além de adquirir uma percepção sobre a funcionalidade e a melhor forma de usar sistema, também desenvolve um sentimento de dono. Dentre os benefícios citamos dessa prática, destacam-se:

- Melhor confiabilidade;
- Melhor operação do sistema;
- Redução dos custos de manutenção e reposição;
- Diminui as chances de adulterações no sistema;
- Diminui o uso excessivo do sistema;
- Maximiza os benefícios.

É preciso que o usuário compreenda como o sistema funciona, as diferenças com relação ao fornecimento de energia por rede convencional e o que a tecnologia tem a oferecer à população.

Comparando os estudos de caso em que o envolvimento dos usuários é aplicado, foi possível observar uma estratégia de desenvolvimento comum. Apesar de algumas divergências na aplicação da estratégia, foi possível definir quatro etapas: Observação, Constatação, Apresentação e Planejamento

A Observação é a primeira etapa, condiz ao *survey* da região para observação dos aspectos sociais e geográficos que demonstrem a aplicabilidade e funcionalidade da tecnologia que se deseja introduzir. A adequação do sistema ao meio ambiente e ao contexto social foi recomendado em 45% dos estudos. Os aspectos geográficos são referentes à irradiação, local para implantação e acessibilidade do local. Já os aspectos sociais são referentes ao estilo de vida e como o SFII pode se adequar para suprir a necessidade energética local. A coleta de dados dessa etapa é utilizada em diversas etapas do projeto, como o estudo do potencial solar e também na definição da tecnologia apropriada.

A etapa de Constatação refere-se à identificação das reais necessidades dos usuários, se mostrando relevante em 73% dos estudos. Nessa etapa é

realizado o primeiro contato efetivo com o possível usuário, realizando uma pré-apresentação do projeto e coletando as informações relativas à necessidade da energia elétrica e às experiências já vivenciadas. Nos casos em que há unidades consumidoras próximas, sugere-se que seja estabelecida uma associação local para que ocorra esse contato, conforme previsto na Lei nº 6.015 de 1973, para coleta de dados locais, apresentação do projeto e transmissão de informações pertinentes ao sistema (BRASIL, 1973).

A terceira etapa é referente a apresentação integral do projeto, já adequado às necessidades dos usuários. Além do funcionamento e operação do sistema, também se mostrou relevante apresentar os aspectos positivos e negativos do projeto, destacando as limitações do sistema como aspecto negativo e os benefícios sociais como aspectos positivos. Dentre os aspectos positivos, a Tabela 39 apresenta os benefícios observados como de maior relevância na literatura.

TABELA 39 – BENEFÍCIOS SOCIAIS DA ELETRIFICAÇÃO DE REGIÕES REMOTAS

Benefício	Incidência	Descrição
Educação	100%	Possibilidade de aulas noturnas, característico de regiões rurais e o prolongamento de horas hábeis para estudo e leitura
Renda	90%	Prolongamento das horas disponíveis para atividades econômicas
Informação	90%	Disponibilidade de acesso à informação por meio de rádio, televisão e celular, destacando os assuntos de saúde, planejamento familiar, nutrição e desastres naturais. Aqui também entram as horas de lazer utilizadas com estes equipamentos
Segurança	60%	Aumento do sentimento de segurança dos usuários devido a iluminação e queda na ocorrência de roubos e vandalismos
Saúde	50%	Melhor acesso à saúde devido a possibilidade da instalação de postos de saúde e diminuição da ocorrência de doenças respiratórias relacionadas a utilização de lamparinas e geradores à combustão
Mulher	30%	Aumento da segurança e da possibilidade de a mulher realizar outras atividades, inclusive econômicas, refletindo na equidade de gênero

TABELA 36 – BENEFÍCIOS SOCIAIS DA ELETRIFICAÇÃO DE REGIÕES REMOTAS (CONTINUAÇÃO)

Benefício	Incidência	Descrição
Meio ambiente	20%	Diminuição da liberação de gases poluentes no meio ambiente

FONTE: A AUTORA (2021)

Como mostra a Tabela 39, os benefícios de maior relevância são educação, renda e informação. A segurança se mostrou como benefício apenas nos casos em que as unidades consumidoras estavam próximas ou na eletrificação de vilas que já possuíam uma infraestrutura básica. Com relação à saúde, a literatura mostra que seu impacto é maior na eletrificação por microrredes e em vilas com número de habitantes que justifique a instalação de um posto de saúde na região. No caso das unidades consumidoras com elevado grau de isolamento, os benefícios à saúde se resumem à diminuição da ocorrência e complicações de doenças respiratórias. Os benefícios à mulher e ao meio ambiente foram brevemente comentados em alguns artigos, se mostrando de baixa relevância no contexto social geral para os autores.

A etapa Planejamento refere-se à integração do usuário com todas as etapas do projeto, inclusive na etapa de manutenção. A literatura mostrou que o acompanhamento pelo usuário do cronograma, saber o detalhamento de cada etapa do projeto e a possibilidade de observação do andamento das etapas possibilita uma melhor percepção sobre a funcionalidade do sistema e o desenvolvimento do sentimento de proprietário, impactando posteriormente na utilização eficiente e facilitando o treinamento dos usuários caso seja realizado. O planejamento comunitário foi observado em 30% dos estudos, ressaltando como principais benefícios uma melhor performance do sistema, diminuição dos custos de manutenção corretiva e aumento da confiabilidade do usuário no sistema.

Paralelamente às estratégias de envolvimento do usuário, a literatura destacou ainda que é importante compreender o processo aceitação do usuário de uma nova tecnologia, descrito por Rogers (2003) em cinco estágios:

1. **Conhecimento:** é a primeira exposição do indivíduo à tecnologia, ocorrendo a introdução é a utilização e seu funcionamento
2. **Persuasão:** ocorre após o posicionamento do indivíduo de favorável ou desfavorável à tecnologia. O principal tipo de função de persuasão é afetivo, sendo importante destacar os benefícios da tecnologia, criando uma maior busca por informação pelo indivíduo
3. **Decisão:** é o engajamento para a aceitação ou rejeição final da tecnologia. No caso da aceitação, o indivíduo está disposto a um maior envolvimento do projeto e a um melhor uso da tecnologia
4. **Implementação:** é o momento em que o usuário coloca em prática a tecnologia. Esse estágio envolve as ações educativas para a utilização correta e eficiente, problemas de operação e adequação e a manutenção, podendo se estender por até 3 anos em alguns casos
5. **Confirmação:** é o estágio final que determina o sucesso da inserção da tecnologia, ou seja, se os usuários irão utilizar corretamente ou se ficará em desuso

O conhecimento dos estágios do processo de aceitação auxilia a empresa responsável na adequação das etapas de envolvimento dos usuários, possibilitando a percepção de quando o usuário ou comunidade está apta para a próxima etapa.

5.1.2. Educação dos usuários

A educação dos usuários é essencial para uma boa eficiência e performance do SFII, evidenciado em 58% dos 40 estudos analisados. A educação se refere às boas práticas de utilização do sistema, que tem por objetivos:

- Reduzir a degradação do banco de baterias;
- Redução dos custos de manutenção corretiva;
- Melhorar a performance do sistema;
- Incentivar o uso consciente e eficiente;

De acordo com a literatura, recomenda-se que a educação seja dividida em dois métodos principais, programas de conscientização do uso eficiente e treinamento básico dos usuários. O programa de conscientização refere-se à divulgação de medidas eficientes do uso da energia, já o treinamento do usuário refere-se à operação básica do sistema, sendo o último destacado como fundamental nas entrevistas. Porém, é importante destacar que ambos os

métodos são de igual importância e a realização de uma não implica necessariamente na eliminação do outro, como mostra o gráfico da Figura 20.

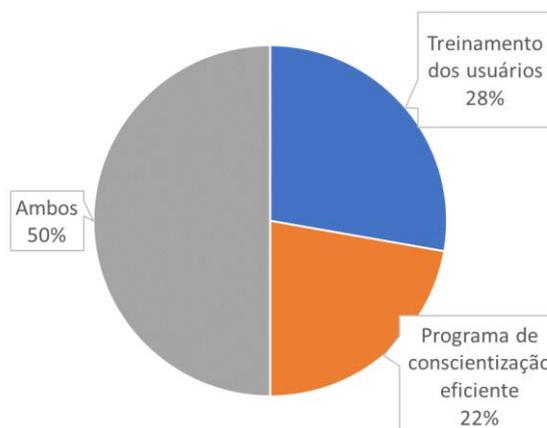


FIGURA 20 – MÉTODOS DE EDUCAÇÃO DOS USUÁRIOS

FONTE: A AUTORA (2021)

Conforme apresentado no gráfico, ambos os métodos foram realizados em 50% dos casos de estudos relacionados à educação. Destaca-se que o treinamento dos usuários como único método de educação foi realizado, em sua maioria, nas instalações onde a manutenção seria realizada pelos próprios usuários, deste modo o treinamento previa tanto a forma correta e eficiente de utilização do sistema, como os procedimentos para realização de manutenções básicas. Já nos locais onde foi determinado a capacitação de técnicos locais para manutenções, foi optado por algumas empresas apenas a realização do programa de conscientização. A seguir será detalhado a abrangência de cada método.

5.1.2.1. Programa de conscientização

O programa de conscientização se refere a utilização eficiente do sistema, respeitando as limitações de dimensionamento. Recomenda-se que o programa seja iniciado em paralelo com a divulgação do sistema, de modo que a informação seja clara e acessível a todos os usuários.

O conteúdo destacado do programa são:

- Ações de eficiência energética;

- Equipamentos aptos para utilização do sistema;
- Equipamentos que devem ser utilizados sozinhos para melhor performance do sistema;
- Recomendações de substituição de equipamentos, como lâmpadas incandescentes por fluorescentes.

Usualmente o programa é realizado com a distribuição de cartilhas explicativas, porém, é preciso considerar que parte da população de regiões rurais não sabem ler. Por este motivo é recomendável que as cartilhas contenham desenhos autoexplicativos e que o conteúdo escrito seja claro e com uso de palavras do vocabulário popular.

Além disso, recomenda-se também que os usuários recebam uma explicação oral. Para isso, alguns autores sugerem que, caso necessário, seja realizado um treinamento com as pessoas responsáveis pelo programa para se comunicar apropriadamente com a população.

5.1.2.2. *Treinamento do usuário*

O treinamento do usuário refere-se à capacitação básica para a operação sustentável do sistema, entendendo suas funcionalidades, limitações e modo de operação. O intuito do treinamento é que o usuário seja capaz de melhor administrar o uso do sistema através de uma melhor compreensão do funcionamento do sistema, melhorando sua performance.

Dentre os conteúdos de treinamento, destacam-se as limitações do sistema e o funcionamento das baterias. Assim como no programa de conscientização, os autores destacam a necessidade de o usuário compreender as cargas suportadas pelo sistema e também as limitações em dias de pouca produção energética, trazendo ao usuário um entendimento de quando e como otimizar a carga do sistema.

No funcionamento das baterias, destacaram-se o ciclo de baterias e, quando possível, o monitoramento do SOC (*state of charge*). Como em sistemas *off-grid* a bateria é a segunda responsável pelo fornecimento de energia, além de ser o equipamento de maior custo do sistema, é importante que os usuários

entendam seu funcionamento para diminuir a degradação das baterias. Compreendendo como funciona o ciclo de carregamento das baterias e a importância de respeitar seu limite mínimo de energia, o usuário é capaz de administrar seu uso, sabendo quando poupar energia, aumentando a vida útil da bateria.

Na entrevista realizada por usuários de SFII na região do Pantanal Sul-mato-grossense, observou-se que após 6 meses de utilização do sistema, o usuário que havia compreendido o funcionamento das baterias, desligando os equipamentos quando percebia que a energia estava diminuindo, obteve um melhor desempenho do sistema, não apresentando nenhuma queixa. Em comparação, outras UCs onde não foi evidenciado esse conhecimento por parte do usuário, houve um maior desgaste das baterias e inclusive interrupção do fornecimento. Outro ponto observado na pesquisa foi que a explicação do período necessário para recarga das baterias, principalmente em dias nublados, também influenciou positivamente no desempenho do sistema e satisfação do usuário.

Outro ponto importante do treinamento é o uso do quadro elétrico, principalmente do disjuntor. É importante que o usuário entenda a função desse elemento e como ele atua protegendo o sistema em situação de sobrecarga.

Além dos pontos apontados pela literatura, propõe-se também que os usuários sejam instruídos a respeito das medidas de segurança, riscos nos locais de instalação e como proceder em casos de incêndio. O manual desenvolvido pela ONG SNV Zimbabwe (2015) e o Solafrica (2013) apresentam as seguintes medidas:

- Não desmonte os módulos e não remova placas ou outros componentes;
- Não utilize espelhos para concentrar artificialmente a luz do sol no módulo;
- Não fume ou faça fogo perto do sistema;
- Não mantenha óleo, querosene ou produtos químicos perto do sistema;
- Instrua as crianças para se manterem longe do sistema.

Para um melhor aproveitamento a longo prazo, recomenda-se ainda as seguintes medidas:

- Fornecimento de um manual em linguagem simples com as informações importantes relacionados à operação do sistema;
- Instalação de barreira física para evitar interação com animais domésticos e crianças;
- Instalação de placas de aviso relacionadas aos perigos vinculado, como o perigo de choque elétrico;
- Instalação de barreira no quadro elétrico para evitar contato com partes com risco de choque elétrico. Uma opção é uma placa de acrílico que permite a visualização;
- Instalar um extintor de incêndio no local do sistema para caso de incêndio e informar a maneira correta de utilização;
- Fornecimento de recomendações em relação ao cuidado e guarda dos equipamentos e os riscos ao abrir os locais de abrigo de equipamentos.

Apesar de representar custo para a empresa responsável pelo sistema, o treinamento se mostrou uma estratégia para redução do custo de manutenção, tornando o programa de eletrificação rural mais sustentável.

5.2. Recomendações específicas

Neste capítulo serão apresentados os resultados das recomendações de Dimensionamento, Equipamentos e Manutenção Preventiva.

5.2.1. Recomendação de equipamentos

Os resultados obtidos para a recomendação de equipamentos estão apresentados na Tabela 40.

TABELA 40 – RESULTADO DAS RECOMENDAÇÕES DE EQUIPAMENTOS

	Dificuldade de transporte		
	Fácil	Médio	Difícil
Amazônia			
Bateria	Lítio	Lítio	Lítio
PV	Monocristalino 221 a 350 W	Policristalino 91 a 220 W	Policristalino 91 a 220 W
Inversor	1500 W	1000 W	700 W
Controlador	PWM	PWM	PWM
Caatinga			
Bateria	Lítio	Lítio	Lítio
PV	Monocristalino 221 a 350 W	Policristalino 91 a 220 W	Policristalino 91 a 220 W
Inversor	1500 W	1000 W	700 W
Controlador	PWM	PWM	PWM
Cerrado			
Bateria	Lítio	Lítio	Lítio
PV	Monocristalino 221 a 350 W	Policristalino 91 a 220 W	Policristalino 91 a 220 W
Inversor	1500 W	1000 W	700 W
Controlador	PWM	PWM	PWM
Mata Atlântica			
Bateria	Lítio	Lítio	Lítio
PV	Monocristalino 221 a 350 W	Monocristalino 221 a 350 W	Policristalino até 90 W
Inversor	1500 W	1000 W	700 W
Controlador	PWM	PWM	PWM
Pampas			
Bateria	Lítio	Lítio	Lítio
PV	Monocristalino 221 a 350 W	Monocristalino 221 a 350 W	Policristalino até 90 W
Inversor	1500 W	1000 W	700 W
Controlador	PWM	PWM	PWM
Pantanal			
Bateria	Lítio	Lítio	Lítio
PV	Monocristalino 221 a 350 W	Policristalino 91 a 220 W	Policristalino até 91 a 220 W
Inversor	1500 W	1000 W	700 W
Controlador	PWM	PWM	PWM

FONTE: A AUTORA (2021)

Como mostra a Tabela 40, os resultados variam de acordo com o bioma e a dificuldade de transporte. Analisando os resultados apresentados é possível obter quatro conclusões.

A primeira conclusão é referente as baterias de lítio, que são recomendadas em todos os cenários simulados. Isso se deve principalmente ao custo e disponibilidade imediata dessa tecnologia de bateria, se sobressaindo mesmo em localidades em que há temperatura é fator determinante. Esse fato é comprovado quando se analisa as matrizes de prioridades das baterias para o cenário “Caatinga com transporte difícil” (Tabela 41, Tabela 42 e Tabela 43), considerado um cenário extremo.

TABELA 41 – MATRIZ DE PRIORIDADES RELATIVAS DE BATERIAS PARA O CENÁRIO CAATINGA

	Custo	Temperatura de operação	Facilidade de manutenção	Disponibilidade	Transporte
Zebra	0,22	0,81	0,43	0,05	0,46
Lítio	0,48	0,11	0,43	0,47	0,49
OPzS	0,30	0,08	0,14	0,47	0,05

FONTE: A AUTORA (2021)

TABELA 42 – MATRIZ DE PRIORIDADES GLOBAIS DE BATERIAS PARA O CENÁRIO CAATINGA COM TRANSPORTE DIFÍCIL

	Prioridades globais
Custo	0,553
Temperatura	0,046
Facilidade de manutenção	0,046
Disponibilidade	0,270
Transporte	0,085

FONTE: A AUTORA (2021)

TABELA 43 – MATRIZ DE PRIORIDADES COMPOSTAS DE BATERIAS PARA O CENÁRIO CAATINGA COM TRANSPORTE DIFÍCIL

	Prioridades compostas
Zebra	23,1%
Lítio	46,0%
OPzS	30,9%

FONTE: A AUTORA

A matriz de prioridades relativas (Tabela 41) mostra que, apesar do critério Temperatura de operação ser favorável à bateria zebra, a tecnologia lítio

possui vantagem nos critérios Custos e Disponibilidade. Esses critérios se mostram de maior relevância em relação a Temperatura, como mostra a Tabela 42. Porém, analisando a bateria Zebra, é possível observar que com a entrada da tecnologia no mercado nacional e a diminuição dos custos, ela pode se tornar uma opção viável e indicada para locais de elevadas temperaturas.

A mesma análise pode ser feita para obtenção da segunda conclusão: a tecnologia de painéis monocristalinos é mais indicado para cenários de temperatura amenas e dificuldade de transporte fácil e até médio, em alguns casos. Esse fato se deve a uma relevância significativa do critério Eficiência, como mostra a matriz de prioridades globais do cenário “Pampas com transporte médio” (Tabela 44).

TABELA 44 – MATRIZ DE PRIORIDADES GLOBAIS DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS PARA O CENÁRIO PAMPAS COM TRANSPORTE MÉDIO

	Prioridades globais
Custo	0,423
Vida útil	0,279
Eficiência	0,165
Temperatura	0,031
Transporte	0,102

FONTE: A AUTORA (2021)

De acordo com a Tabela 44 o critério Eficiência é terceiro mais relevante, sendo os dois primeiros o Custo e Vida útil, respectivamente. Para esses dois primeiros critérios, os painéis monocristalino e policristalinos de 201 a 350 W são similares, se tornando o critério Eficiência um item decisivo.

A terceira conclusão é referente aos inversores que, assim como esperado, reduz de tamanho conforme aumento da relevância do critério dificuldade de transporte, conforme Tabela 45.

TABELA 45 – PRIORIDADES GLOBAIS DO INVERSOR PARA OS TRÊS NÍVEIS DE DIFICULDADE DE ACESSO

	Prioridades Globais		
	Acesso fácil	Acesso médio	Acesso difícil
Custo	0,686	0,753	0,685
Eficiência	0,256	0,182	0,058
Transporte	0,059	0,065	0,256

FONTE: A AUTORA (2021)

A Tabela 45 apresenta a matriz de prioridades globais para os possíveis níveis de dificuldade de acesso. Como a seleção do inversor não sofre impacto da temperatura, o bioma se torna irrelevante. Analisando a matriz, é possível observar a variação das prioridades conforme aumento da dificuldade de transporte. Desse modo, enquanto para o acesso fácil o critério Transporte era o de menor relevância, com o aumento da dificuldade ele vai ganhando relevância em relação ao critério Eficiência.

Por fim, a tecnologia de controlador de carga PWM é sempre a mais indicada devido ao seu baixo custo e facilidade de transporte, quando comparado a tecnologia MPPT.

O resultado por cidade está apresentado no APÊNDICE 7.

5.2.2. Recomendação de dimensionamento

Os resultados fornecidos pelo HOMER e o dimensionamento do controlador, considerados nessa simulação estão explicados na Tabela 46.

TABELA 46 – DESCRITIVO DOS RESULTADOS DE DIMENSIONAMENTO

Resultados	Descritivo
Arquitetura	Especifica o dimensionamento otimizado dos equipamentos do sistema
Bateria	Horas de autonomia do banco de bateria em relação a carga elétrica
Energia	Fator de capacidade (FC) que é a razão entre a potência média de saída do PV (em kW) e sua potência nominal, Produção anual de energia e o custo médio por kWh (LCOE)
Não atendimento	Horas de carga não atendida pelo sistema em um ano. Não estão sendo considerados as horas paradas por manutenção

TABELA 46 – DESCRITIVO DOS RESULTADOS DE DIMENSIONAMENTO (CONTINUAÇÃO)

FONTE: A AUTORA (2021)

Conforme mostra a Tabela 46, estão sendo considerados o dimensionamento mínimo dos equipamentos para atendimento da demanda local, visando minimizar o custo de projeto sem comprometer a confiabilidade do sistema. Além disso, a autonomia da bateria e índice de atendimento demonstram o cumprimento da regulamentação.

Os dimensionamentos finais por bioma estão apresentados na Tabela 47, Tabela 48 e Tabela 49 para os sistemas com bateria OPzS e na Tabela 50, Tabela 51 e Tabela 52 para bateria de lítio. Além disso, para cada cenário, também está apresentado a média (\bar{x}), o desvio padrão (σ) e a variância (σ^2).

TABELA 47 – DIMENSIONAMENTO OTIMIZADO – SISTEMA 45 KWH/MÊS – BATERIA OPZS

	Amazônia	Cerrado	Caatinga	Mata Atlântica	Pantanal	Pampas	\bar{x}	σ	σ^2
Arquitetura									
PV [kW]	0,86	0,78	0,60	0,83	0,63	0,94	0,77	0,13	0,0181
Baterias [kWh]	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	-	-
Inversor [kW]	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	-	-
Bateria									
Autonomia [h]	51	51	51	51	51	51	51	-	-
Energia									
FC (%)	15,8	17,68	19,48	15,79	17,76	16,74	17,21	-	-
Produção anual [kWh]	1189	1210	1022	1152	973	1374	1153	-	-
LCOE [R\$/kWh]	10,58	10,53	10,49	10,57	10,52	10,6	10,55	0,04	0,0017

TABELA 47 – DIMENSIONAMENTO OTIMIZADO – SISTEMA 45 KWH/MÊS – BATERIA OPZS (CONTINUAÇÃO)

	Amazônia	Cerrado	Caatinga	Mata Atlântica	Pantanal	Pampas	\bar{x}	σ	σ^2
Não Atendimento									
Energia [kWh/ano]	0,322	0,428	0,222	0,450	0,480	0,477	0,397	-	-
Horas [h/ano]	11	15	7	15	13	13	12,3	-	-

FONTE: A AUTORA (2021)

TABELA 48 – DIMENSIONAMENTO OTIMIZADO – SISTEMA 60 KWH/MÊS – BATERIA OPZS

	Amazônia	Cerrado	Caatinga	Mata Atlântica	Pantanal	Pampas	\bar{x}	σ	σ^2
Arquitetura									
PV [kW]	1,17	1,04	0,83	1,08	0,86	1,25	1,04	0,17	0,0276
Baterias [kWh]	8,5	8,5	8,5	8,5	8,5	8,5	8,5	-	-
Inversor [kW]	1	1	1	1	1	1	1,0	-	-
Bateria									
Autonomia [h]	50,2	50,2	50,2	50,2	50,2	50,2	50,2	-	-
Energia									
FC (%)	15,8	17,7	19,5	15,8	17,8	16,7	17,2	-	-
Produção anual [kWh]	1622	1613	1422	1494	1337	1828	1553	-	-
LCOE [R\$/kWh]	10,35	10,30	10,26	10,34	10,29	10,37	10,32	0,04	0,0017
Atendimento									
Energia [kWh/ano]	0,5111	0,436	0,604	0,641	0,651	0,607	0,575	-	-
Horas [h/ano]	10	12	9	15	13	13	12	-	-

FONTE: A AUTORA (2021)

TABELA 49 – DIMENSIONAMENTO OTIMIZADO – SISTEMA 80 KWH/MÊS – BATERIA OPZS

	Amazônia	Cerrado	Caatinga	Mata Atlântica	Pantanal	Pampas	\bar{x}	σ	σ^2
Arquitetura									
PV [kW]	1,62	1,46	1,12	1,51	1,23	1,98	1,49	0,30	0,0925
Baterias [kWh]	11	11	11	11	11	11	11	-	-
Inversor [kW]	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	-	-
Bateria									
Autonomia [h]	49	49	49	49	49	49	49	-	-
Energia									
FC (%)	15,8	17,7	19,5	15,8	17,8	16,7	17,2	-	-
Produção anual [kWh]	2234	2258	1911	2089	1908	2902	2217	-	-
LCOE [R\$/kWh]	10,13	10,07	10,09	10,11	10,07	10,01	10,08	0,04	0,0017
Não Atendimento									
Energia [kWh/ano]	0,399	0,369	0,474	0,396	0	0,461	0,350	-	-
Horas [h/ano]	10	11	10	10	0	15	9	-	-

FONTE: A AUTORA (2021)

TABELA 50 – DIMENSIONAMENTO OTIMIZADO – SISTEMA 45 KWH/MÊS – BATERIA LÍTIU

	Amazônia	Cerrado	Caatinga	Mata Atlântica	Pantanal	Pampas	\bar{x}	σ	σ^2
Arquitetura									
PV [kW]	0,76	0,68	0,53	0,73	0,53	0,76	0,66	0,10	0,0110
Baterias [kWh]	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8	-	-
Inversor [kW]	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	-	-
Bateria									
Autonomia [h]	58	58	58	58	58	58	58	-	-
Energia									
FC (%)	15,8	17,68	19,48	15,79	17,76	16,74	17,21	-	-
Produção anual [kWh]	1045	1049	911	1008	831	1107	992	-	-
LCOE [R\$/kWh]	5,66	5,62	5,58	5,64	5,59	5,65	5,62	0,03	0,0011

TABELA 50 – DIMENSIONAMENTO OTIMIZADO – SISTEMA 45 KWH/MÊS – BATERIA LÍTIO (CONTINUAÇÃO)

	Amazônia	Cerrado	Caatinga	Mata Atlântica	Pantanal	Pampas	\bar{x}	σ	σ^2
Atendimento									
Energia [kWh/ano]	0,762	0,827	0,837	0,749	0,871	0,810	0,809	-	-
Horas [h/ano]	13	16	12	15	14	12	14	-	-

FONTE: A AUTORA (2021)

TABELA 51 – DIMENSIONAMENTO OTIMIZADO – SISTEMA 60 KWH/MÊS – BATERIA LÍTIO

	Amazônia	Cerrado	Caatinga	Mata Atlântica	Pantanal	Pampas	\bar{x}	σ	σ^2
Arquitetura									
PV [kW]	0,938	0,833	0,677	0,846	0,677	0,859	0,8050	0,11	0,0112
Baterias [kWh]	7,2	7,2	7,2	7,2	7,2	7,2	7,0	-	-
Inversor [kW]	1	1	1	1	1	1	1,0	-	-
Bateria									
Autonomia [h]	65	65	65	65	65	65	65	-	-
Energia									
FC (%)	15,8	17,68	19,48	15,79	17,76	16,74	17,21	-	-
Produção anual [kWh]	1297	1291	1155	1170	1054	1260	1205	-	-
LCOE [R\$/kWh]	6,13	6,10	6,06	6,11	6,07	6,11	6,10	0,03	0,0007
Atendimento									
Energia [kWh/ano]	0,459	0,595	0,249	0,626	0,445	0,570	0,491	-	-
Horas [h/ano]	12	10	7	11	8	10	10	-	-

FONTE: A AUTORA (2021)

TABELA 52 – DIMENSIONAMENTO OTIMIZADO – SISTEMA 80 KWH/MÊS – BATERIA LÍTIO

	Amazônia	Cerrado	Caatinga	Mata Atlântica	Pantanal	Pampas	\bar{x}	σ	σ^2
Arquitetura									
PV [kW]	1,48	1,33	1,04	1,38	1,33	1,85	1,40	0,26	0,0697
Baterias [kWh]	7,2	7,2	7,2	7,2	7,2	7,2	7,2	-	-
Inversor [kW]	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	-	-
Bateria									
Autonomia [h]	49,6	49,6	49,6	49,6	49,6	49,6	49,6	-	-
Energia									
FC (%)	15,8	17,7	19,5	15,8	17,8	16,7	17,2	-	-
Produção anual [kWh]	2054	2057	1778	1914	2072	2711	2098	-	-
LCOE [R\$/kWh]	4,89	4,85	4,8	4,87	4,83	4,74	4,83	0,05	0,0029
Atendimento									
Energia [kWh/ano]	0,709	0,396	0,785	0,617	0,872	0,806	0,698	-	-
Horas [h/ano]	11	9	9	11	12	14	11	-	-

FONTE: A AUTORA (2021)

Como apresentado nas tabelas, a arquitetura para cada disponibilidade de sistema é similar entre os biomas, variando apenas a capacidade de geração fotovoltaica. Analisando a variância dos cenários, observa-se que a variância do gerador fotovoltaico está, em média, 0,019 para os sistemas com bateria OPzS e 0,058 para baterias lítio, indicando a possibilidade de padronização completa da arquitetura dos sistemas. Essa conclusão vai de acordo com a resposta obtida pelas empresas no questionário, que informaram ter sistemas padronizados para cada tamanho.

Ainda avaliando a arquitetura do gerador fotovoltaico, é possível observar que a região da Amazônia, Mata Atlântica e Pampas, são as que requerem uma maior quantidade de potência do gerador. Isso mostra a influência do local, que interfere no FC (15,8% para Amazônia e Mata Atlântica e 16,7% para o Pampas).

As características locais comuns aos três biomas são: baixas temperaturas médias e baixa radiação diária. Porém, o bioma Pantanal também apresenta níveis de irradiação semelhantes a Amazônia, demonstrando uma

maior influência da temperatura. O inverso também é verdadeiro, pois as regiões da Caatinga e Pantanal possuem os maiores FC (19,5% e 17,8%, respectivamente) e as maiores temperaturas médias, apesar de não serem as maiores radiações.

Com relação ao atendimento da regulamentação, todos os sistemas atenderam aos requisitos de autonomia e disponibilidade. Com relação a disponibilidade, ressalta-se que os períodos de não atendimento são todos curtos períodos durante a madrugada, não interferindo no uso do sistema para atividades diárias, conforme apresentado na Figura 21, obtida com os dados do resultado da simulação no HOMER.

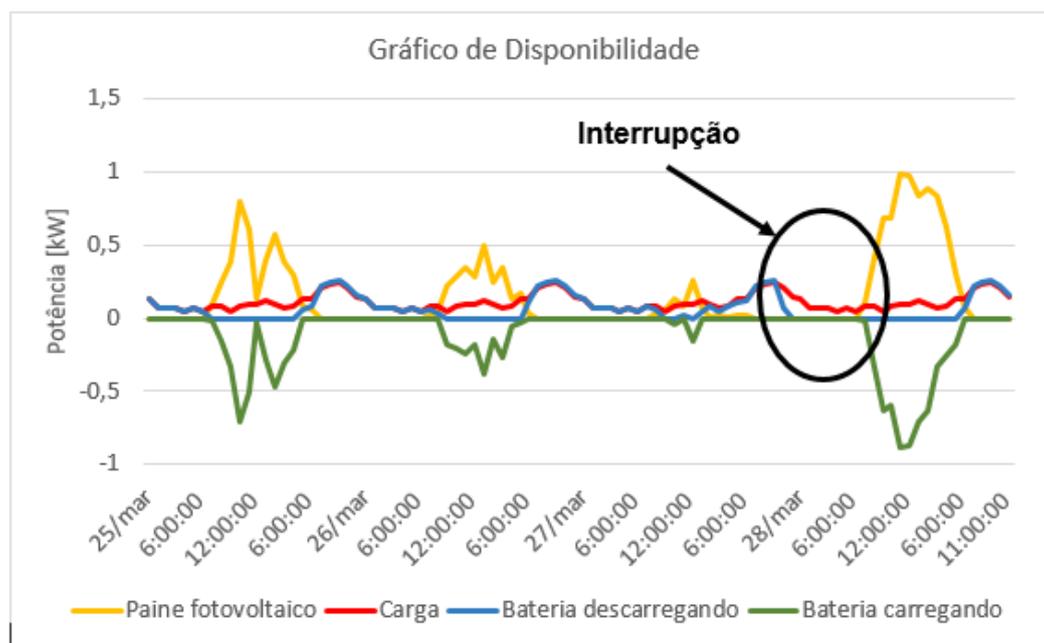


FIGURA 21 – GRÁFICO DE DISPONIBILIDADE NO DIA DE MENOR RADIAÇÃO NA CAATINGA

FONTE: A AUTORA (2021)

O gráfico da Figura 21 mostra o menor dia de irradiação no bioma Caatinga, que apresentou a maior média de energia por hora de interrupção (0,09 kW/h) considerando um sistema de 80 kWh/mês com bateria de lítio. A bateria descarregando refere-se a energia demanda do banco pela carga, já a bateria carregando é a energia fornecida pelo PV para recarregar o banco. Conforme mostra o gráfico, a carga não é atendida no período entre 21 h do dia

27 de março e 6 h do dia 28 de março, devido ao carregamento insuficiente da bateria no dia anterior. Ressalta-se que, durante todo o ano, esse foi o único incidente reportado na simulação.

Com relação a bateria além do cumprimento da regulamentação pela autonomia, não há um desgaste excedente, conforme histogramas da Figura 22 e Figura 23.

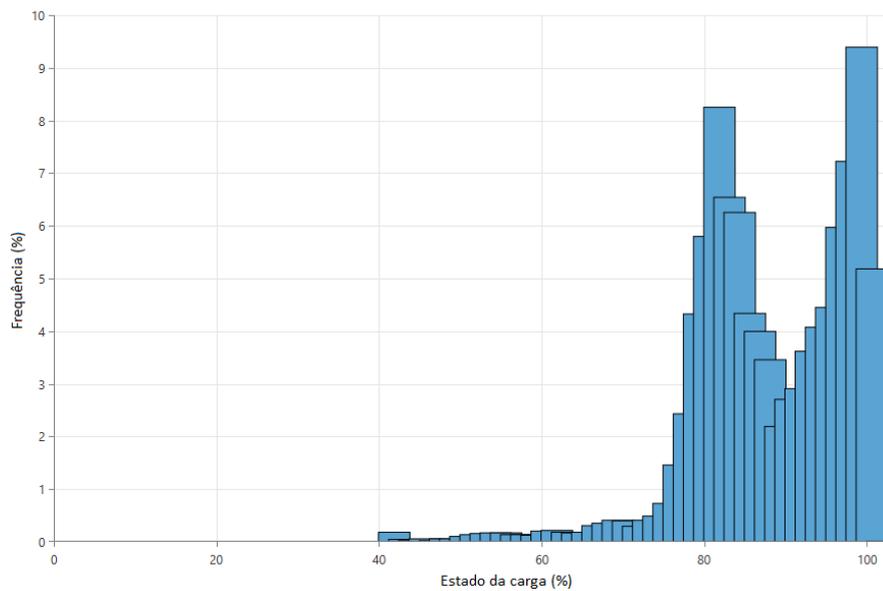


FIGURA 22 – HISTOGRAMA DO ESTADO DE CARGA DA BATERIA OPZS DO SISTEMA DE 80 KWH/MÊS

FONTE: A AUTORA (2021)

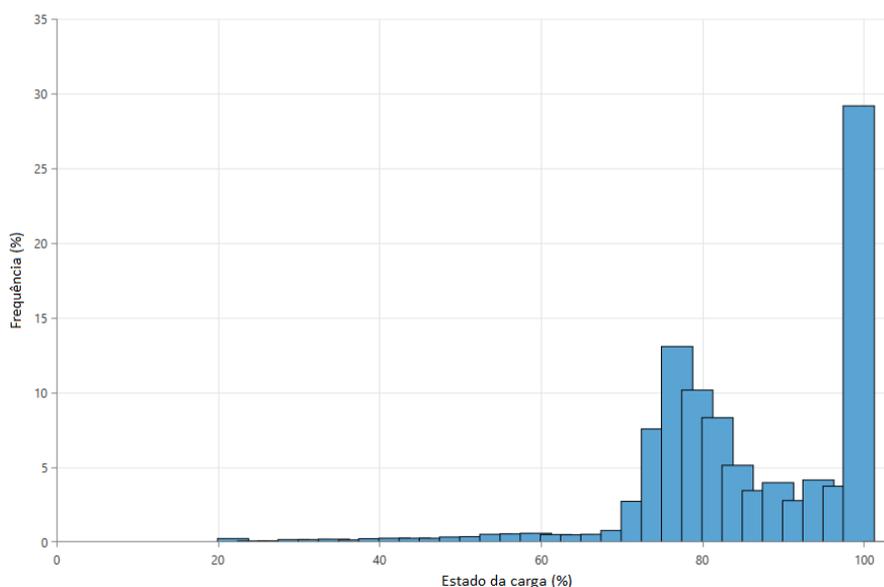


FIGURA 23 – HISTOGRAMA DO ESTADO DE CARGA DA BATERIA DE LÍTIO DO SISTEMA DE 80 KWH/MÊS

FONTE: A AUTORA (2021)

Os histogramas mostram o estado da carga ao longo de toda vida útil das baterias. Através dos histogramas é possível observar que ambas as baterias permanecem frequentemente com o nível de carga acima do máximo DoD permitido, estando poucas vezes com o estado de carga abaixo de 70%. Ainda, no caso das baterias OPzS, observa-se que as maiores frequências estão dentro da faixa de 60% do DoD, o indicado pelo fabricante como DoD ótimo.

Com relação ao custo da energia, observa-se que os valores sofrem pequenas alterações para cada sistema, conforme demonstrado pela variância máxima de 0,0029 para os sistemas de 80 kWh/mês com bateria de lítio, evidenciando novamente a possibilidade de padronização dos sistemas. Além disso, os sistemas com baterias de lítio se destacaram como mais atrativos, com diferença média de 47% entre os custos gerais.

Como o HOMER não realiza o dimensionamento do controlador, foi realizado o seu dimensionamento separadamente. Os resultados do dimensionamento do controlador de carga estão apresentados no APÊNDICE 6.

5.2.3. Recomendação do modelo de manutenção preventiva

Com dito anteriormente, a recomendação de manutenção não sofre influência do bioma, apenas da dificuldade de acesso envolvida.

A fim de facilitar a visualização dos resultados, devida a variedade de entradas, decidiu-se analisar individualmente os seguintes cenários:

- Influência do aumento do número de SFII no custo final da manutenção, avaliando também o número de equipes e a influência da participação do usuário. Para esse cenário não foram consideradas as distâncias internas e externas;
- Influência da distância interna e da dificuldade de acesso. Com esse cenário, busca-se avaliar o impacto da distância interna no rendimento das equipes e também no custo final;
- Influência da distância externa, não considerando a distância interna. O objetivo é relacionar o custo de deslocamento externo com a viabilidade de apoio local.

A seguir é apresentada a análise de cada cenário.

5.2.3.1.1. Influência do aumento de SFII

Como dito anteriormente, esse cenário não considerou a influência da distância. Foram simulados o custo em um passo de 10 SFII até observar a estabilidade do custo final. O gráfico da Figura 24 apresenta os resultados obtidos não considerando a participação do usuário na realização de atividades básica de manutenção.

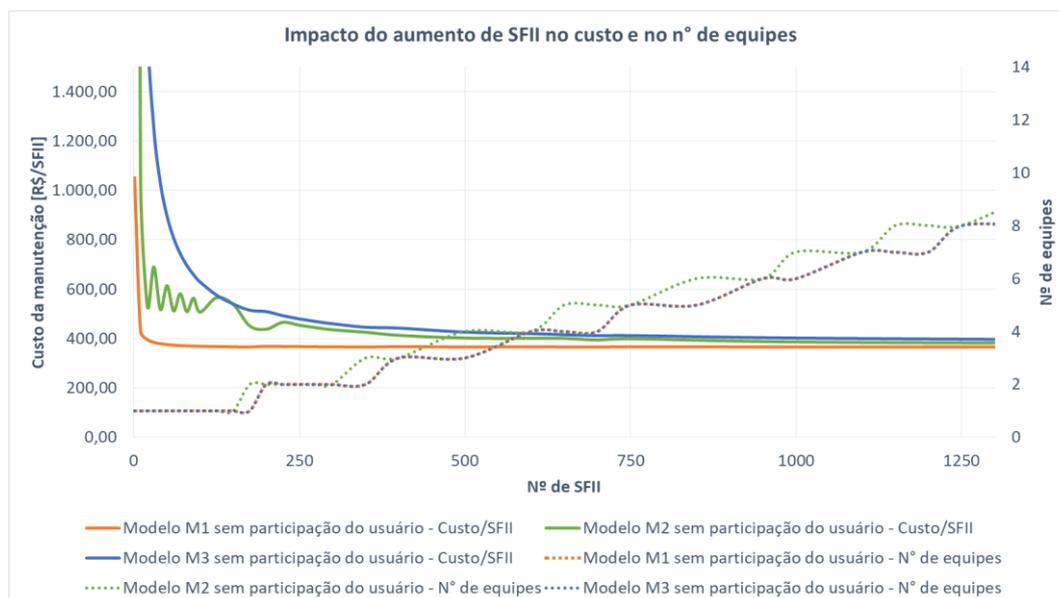


FIGURA 24 – GRÁFICO DA INFLUÊNCIA DO AUMENTO DE SFII NO CUSTO E NO NÚMERO DE EQUIPES DOS MODELOS DE MANUTENÇÃO

FONTE: A AUTORA (2021)

No gráfico da Figura 24 é possível observar o custo por unidade de SFII no eixo principal e o número de equipes necessárias no eixo secundário, ambas em relação ao número de SFII. Avaliando dos custos, é possível observar que ambos os modelos encontram a estabilidade a partir de 1000 sistemas com o custo de aproximado de R\$ 400,00 por SFII. A diferença inicial se deve ao custo “outros” de aluguel e capacitação, que é amortizado com o aumento de sistemas.

Com relação ao número de equipes, é possível observar um degrau, que representam o limite de atendimentos por equipe. Comparando os modelos, enquanto M1 e M3 se sobrepõem, M2, devido a sua dinâmica de campanhas, a partir de 300 SFIIs ele requer um aumento adiantado em relação aos demais modelos.

A respeito da influência da participação do usuário na manutenção preventiva, observa-se uma otimização no tempo de atendimento, fazendo o custo diminuir, em média, 32% para M1, 25% para M2 e 21% para M3.

5.2.3.1.2. Influência da distância interna

Para a simulação da influência da distância interna não foi considerada a distância externa. Desse modo, para cada passo de aumento de SFII, foram variados o nível da dificuldade de acesso (fácil, médio e difícil) e a distância interna em passos de 20 km.

Como todos os modelos percorrem o mesmo percurso, o rendimento das equipes é igual para todos os modelos. O gráfico da Figura 25 apresenta o rendimento semanal das equipes.

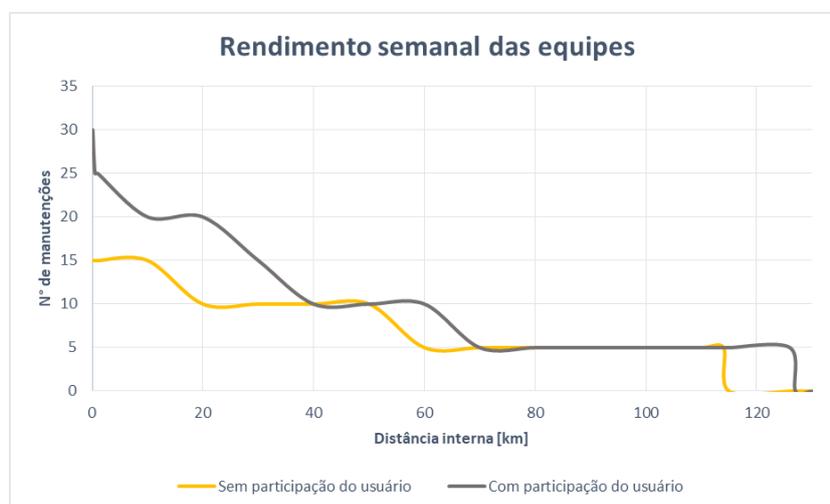


FIGURA 25 – GRÁFICO DO IMPACTO DA DISTÂNCIA INTERNA NO RENDIMENTO SEMANAL DAS EQUIPES

FORTE: A AUTORA (2021)

Analisando a Figura 25 é possível observar que até a distância interna de 20 km, o rendimento dobra quando há participação do usuário. A partir de 70 km, como as distâncias são grandes, não há mais impacto da participação do usuário, pois mesmo reduzindo o tempo de atividade, o tempo de percurso impede a manutenção de mais sistemas.

Ainda analisando o gráfico, é possível ver o limite máximo de distância interna que permitem o atendimento de, ao menos, um sistema ao dia. Esse limite é referente ao acesso fácil, para acessos mais difíceis esse limite é alterado, conforme Tabela 53, válido para todos os modelos de manutenção.

TABELA 53 – LIMITES DE DISTÂNCIA INTERNA POR DIFICULDADE DE ACESSO SEM CONSIDERAR DISTÂNCIA EXTERNA

	Limite de distância interna [km]	
	Sem participação	Com participação
	do usuário	do usuário
Acesso fácil	114	126
Acesso médio	51	56
Acesso difícil	33	36

FORTE: A AUTORA (2021)

Conforme mostra a Tabela 53, quanto maior a dificuldade menor limite de distância máxima. É importante lembrar que esse limite não considera a distância externa, ou seja, é o máximo limite possível.

Com relação aos custos da manutenção, em relação ao cenário simulado anteriormente (5.2.3.1.1 – Influência do aumento de SFII) há um incremento das horas das equipes e custo de combustível, devido ao deslocamento realizado. As Figura 26, Figura 27 e Figura 28 apresentam os custos médios de manutenção para cada faixa de distância interna.

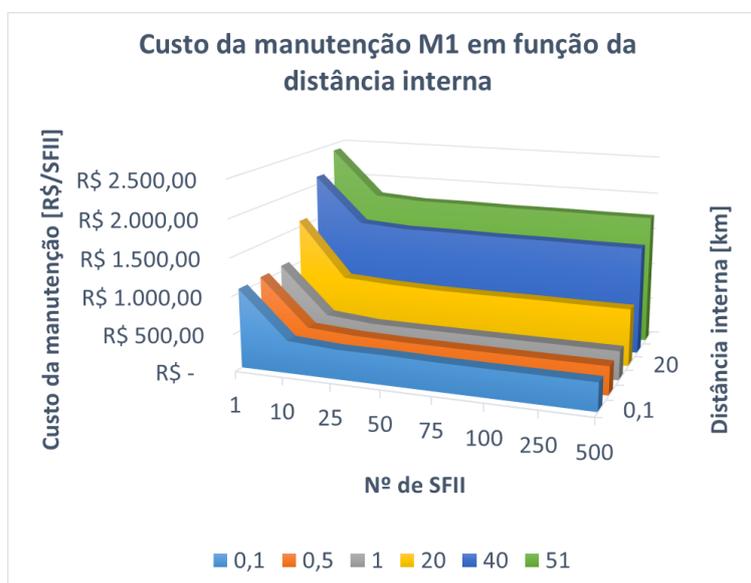


FIGURA 26 – CUSTO DA MANUTENÇÃO M1 EM FUNÇÃO DA DISTÂNCIA INTERNA CONSIDERANDO DIFICULDADE DE ACESSO MÉDIA

FORTE: A AUTORA (2021)

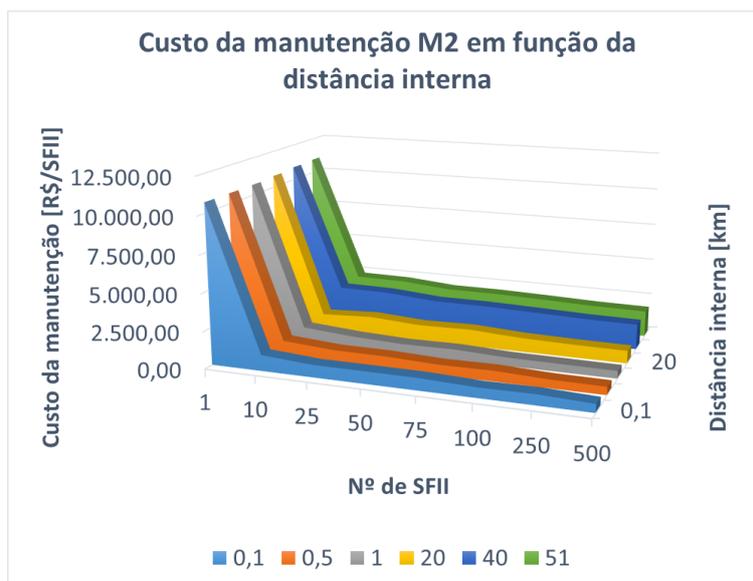


FIGURA 27 – CUSTO DA MANUTENÇÃO M2 EM FUNÇÃO DA DISTÂNCIA INTERNA CONSIDERANDO DIFICULDADE DE ACESSO MÉDIA

FONTE: A AUTORA (2021)

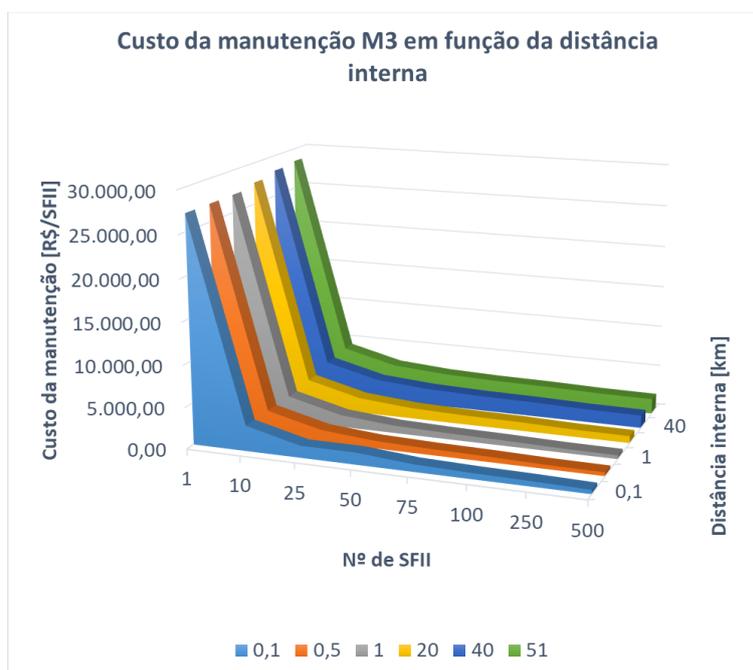


FIGURA 28 – CUSTO DA MANUTENÇÃO M3 EM FUNÇÃO DA DISTÂNCIA INTERNA CONSIDERANDO DIFICULDADE DE ACESSO MÉDIA

Como mostra os gráficos, a curva de custo apresenta sempre o mesmo comportamento. Analisando individualmente cada modelo, pode-se observar que há um pequeno aumento no custo conforme maior a distância interna.

Mantendo constante o número de SFII, o desvio padrão médio é de R\$ 545 para M1, R\$ 509 para M2 e R\$ 542 para M3.

Já, comparando os cenários, o modelo M3 é expressivamente elevado inicialmente, devido ao custo “outros”. A partir de 50 SFIs esse valor é amortizado, chegando a uma diferença de R\$ 32 reais com relação aos outros modelos.

5.2.3.1.3. Influência da distância externa

A simulação para análise da distância externa é realizada sem considerar a distância interna. Essa distância impacta apenas nos modelos M1 e M2, já o modelo M3 considera apoio local e o custo de entrega de material equivale a apenas uma viagem dos demais modelos.

O impacto do aumento da distância externa no rendimento das equipes pode ser observado na Figura 29.

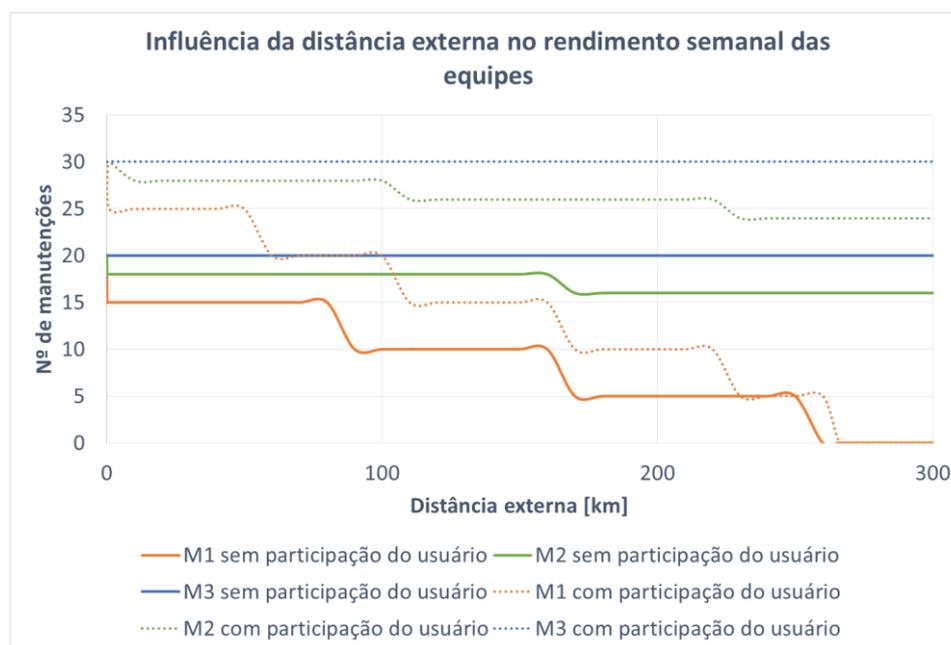


FIGURA 29 – GRÁFICO DO IMPACTO DA DISTÂNCIA EXTERNA NO RENDIMENTO SEMANAL DAS EQUIPES

FORTE: A AUTORA (2021)

A Figura 29 apresenta a variação do rendimento das equipes de acordo com a distância externa. Apesar de M1 não sofrer influência dessa distância, ela

foi inserida no gráfico para fim de comparação. Comparando os modelos M1 e M2, observa-se que o degrau de diminuição do rendimento de M2 é mais sutil. Isso ocorre devido ao fato desse modelo só realizar o percurso externo duas vezes na semana, nos demais dias, seu rendimento é equivalente a M3. Já M1 realiza o percurso externo diariamente.

Com relação ao custo, o gráfico da Figura 30 apresenta o impacto da distância externa considerando 100 SFIs.

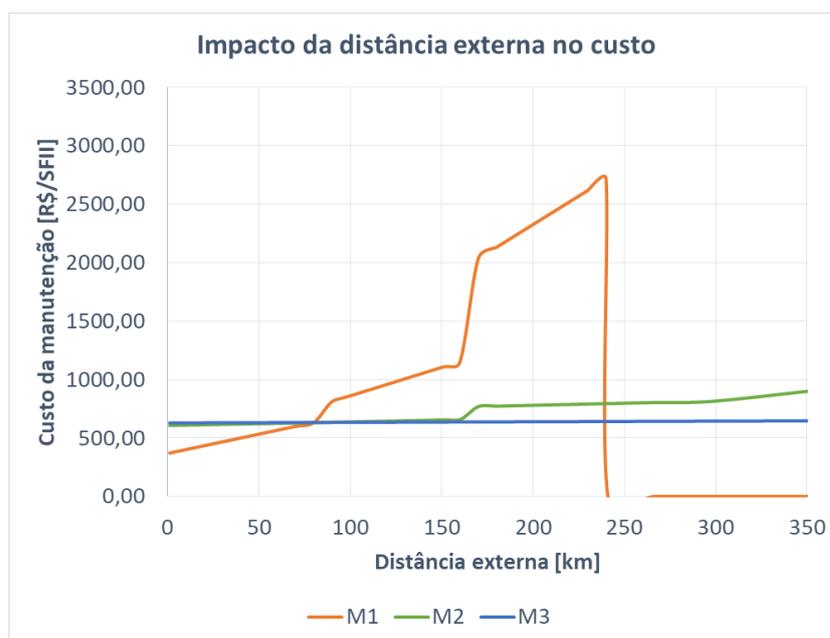


FIGURA 30 – GRÁFICO DO IMPACTO DA DISTÂNCIA EXTERNA NO CUSTO DA MANUTENÇÃO CONSIDERANDO 100 SISTEMAS

FORTE: A AUTORA (2021)

Como mostra a Figura 27, M1 é o que apresenta menor custo unitário de manutenção até 90 km, quando ele se torna o modelo de maior custo até que se torne inviável devido ao limite de distância (240 km). M2 e M3 são equivalente até 170 km, com uma diferença média de R\$ 4,00 por SFII. A partir de 170 km o custo de M2 aumenta até seu limite de 1.120 km, atingindo um custo unitário de R\$ 2.397,81.

Apesar do gráfico ser elaborado para 100 SFII, o comportamento é semelhante para outras quantidades. Quanto maior a quantidade de SFIs, menor é a distância para o ponto de intersecção onde M3 se torna a opção de menor custo.

Os resultados para simulações com 10, 50 e 100 SFII, com variação das distâncias internas e externas, estão no APÊNDICE 8.

5.2.4. Verificação do método com dados reais

Para a verificação do método utilizou-se um estudo de caso real de eletrificação de regiões remotas do Pantanal. O projeto foi executado pelo LACTEC (2017). Para a análise, foi solicitada a empresa os dados de entrada para executar o método desenvolvido (Tabela 54).

TABELA 54 – DADOS DE ENTRADA PARA VALIDAÇÃO DO MÉTODO

Descrição	Valores
Bioma	Pantanal
Demanda mensal	80 kWh/mês
Dificuldade de acesso	Difícil
Número de SFII	2001
Distância concessionária até comunidade	160 km
Distância média interna entre as unidades na comunidade	30 km

FONTE: A AUTORA (2021)

A Tabela 55 apresenta o resultado do modelo e os dados informados que foram realizados no projeto.

TABELA 55 – RESULTADO DA SIMULAÇÃO COM DADOS REAIS

	Resultados do método	Resultados do Projeto
Recomendação de Equipamentos		
Bateria:	Lítio	Lítio
Painel:	Policristalino 91 a 220 Wp Senoidal onda pura de 0,7	Policristalino de 150 Wp
Inversor:	kW se atender ao dimensionamento	Senoidal pura
Controlador:	PWM	PWM
Recomendação de Dimensionamento		
Bateria:	7,2 kWh	7,2 kWh
Painel:	1,33 kW	1,2 kW
Inversor:	1,2 kW	1,5 kW
Recomendação de Modelo de Manutenção		
Modelo M3		M2

FONTE: A AUTORA (2021)

A Tabela 55 traz a comparação para as três recomendações específicas. Avaliando os equipamentos, é possível observar que a tecnologia selecionada é equivalente em todos os equipamentos. A fim de comparação para possíveis alternativas tecnológicas, a Tabela 56 apresenta a classificação final dos equipamentos para o cenário simulado.

TABELA 56 – CLASSIFICAÇÃO DOS EQUIPAMENTOS PARA O ESTUDO DE CASO REAL

Classificação final dos equipamentos	
Baterias	
Bateria Lítio	46,3%
Bateria OPZ	30,1%
Bateria Zebra	23,6%
PV	
Policristalino 91 a 220 W	21,2%
Policristalino até 90 W	19,6%
Policristalino 221 a 350 W	19,6%
Monocristalino 221 a 350 W	16,9%
Monocristalino até 90 W	14,8%
Monocristalino 91 a 220 W	7,8%
Inversores senoidal de onda pura	
700 W	37,7%
1000 W	33,7%
1500 W	28,6%
Controlador de carga	
PWM	74,8%
MPPT	25,2%

FONTE: A AUTORA (2021)

Como mostra a Tabela 56, é possível avaliar outras alternativas que se adequem ao local de aplicação, caso não seja viável a aplicação do resultado de recomendação por motivos específicos da empresa responsável.

Já, com relação ao dimensionamento, é possível observar na Tabela 56 que o banco de baterias dimensionado é o mesmo, porém com uma redução no gerador fotovoltaico.

Ainda analisando o dimensionamento, o inversor também está sobredimensionado além do necessário para atender a regulamentação. Em

conversa com o responsável pelo estudo de caso, verificou-se que esse aumento se deve as opções comerciais encontradas na época para um fornecimento em 220 V. A tensão de saída do inversor não foi considerada no desenvolvimento do presente trabalho.

Avaliando os resultados de manutenção, o método recomenda que a manutenção seja feita com apoio local, ou seja, a capacitação de moradores locais para realização da manutenção preventiva. Já, o modelo realizado hoje equivale ao modelo M2, com campanhas de, em média, 15 dias. A Tabela 57 traz a comparação dos custos para cada modelo.

TABELA 57 – COMPARAÇÃO DOS CUSTOS DE MANUTENÇÃO POR SISTEMA PARA O ESTUDO DE CASO REAL

Custo por SFII	Modelo M3	Modelo M2	Modelo M2 modificado (15 dias de campanha)
Custo de Equipe	R\$ 1.348,53	R\$ 2.412,00	R\$ 1.670,68
Custo de Transporte	R\$ 156,00	R\$ 433,75	R\$ 220,03
Custo Outros	R\$ 75,11	R\$ 39,93	R\$ 24,37
Total	R\$ 1.579,64	R\$ 2.885,68	R\$ 1.915,08

FONTE: A AUTORA (2021)

A Tabela 57 apresenta os custos por SFII para os modelos M2, M3 e M2 modificado conforme realização atual do projeto. Ressalta-se que o modelo M1 foi considerado inviável devido as longas distâncias.

Comparando os modelos, é possível observar que o principal custo é o da equipe, representando cerca de 85% do custo dos modelos. Isso se deve, principalmente as horas ociosas das equipes de M2, visto que o máximo que podem atender em um dia é 1 SFII. Desse modo, mesmo para o modelo modificado, das 8 horas da jornada de trabalho, apenas 6,78 são utilizadas, desconsiderando o deslocamento externo.

Assim, é possível concluir que o método desenvolvido está validado com base nesse estudo de caso.

6. CONCLUSÃO

O presente trabalho teve por objetivo elaborar recomendações que auxiliem na implantação as concessionárias de energia na padronização de suas normas técnicas com relação a eletrificação de regiões remotas com SFII, destacando-se na literatura cinco vertentes que impactam desde a aceitação do sistema pelo usuário, até a manutenção deles.

De modo geral, as recomendações propiciam os seguintes benefícios:

- Aumentar a confiabilidade e melhorar a percepção do sistema pelo usuário
- Proporcionar uma operação segura pelo usuário
- Redução dos custos de manutenção e reposição
- Diminuir as chances de adulterações no sistema
- Incentivar o uso consciente e eficiente
- Melhor aproximação entre o fornecimento de energia e a demanda
- Diminuição das perdas energéticas por excesso de geração
- Diminuir a sobrecarga do sistema, proporcionando uma melhor performance dos equipamentos e respeitando as suas limitações
- Redução dos custos gerais, para as fases de implantação, operação e manutenção

A análise das vertentes abordadas na literatura mostrou que a ausência de estudos da comunidade e o envolvimento do usuário desde o início o projeto são os principais fatores que interferem no sucesso da implantação. Em sequência, estão os temas relacionados à viabilidade econômica dos sistemas, ressaltando a manutenção e a seleção adequada de equipamentos (38%).

Apesar de algumas recomendações sofrerem influência do local de instalação, pode-se observar uma inter-relação entre elas, tendo uma importância equivalente para o sucesso da implantação.

A integração do usuário com o sistema, recomendada como a abordagem inicial do projeto, visa identificar as necessidades locais e fornecer subsídios para que o sistema se adapte as características do local, além de possibilitar uma avaliação prévia de viabilidade do sistema.

Ainda relacionado ao usuário, a vertente da educação para utilização do sistema objetiva o uso consciente, respeitando as limitações do sistema, quanto

a capacitação para uma operação sustentável. Aqui, pode-se observar uma relação entre a educação do usuário e as etapas de dimensionamento e O&M.

A análise dos equipamentos evidenciou a aplicação da tecnologia de bateria de lítio em regiões remotas, ressaltando o custo por LFTP, a disponibilidade e a facilidade de manutenção. O controlador PWM também se destacou em todos os cenários, tendo como pontos fortes seu custo razoavelmente baixo e facilidade de transporte.

A influência do local de instalação na análise de equipamentos foi observada na seleção dos PVs. Por uma eficiência significativamente superior as demais opções, a tecnologia de silício monocristalino para painéis de 221 a 350 Wp, se destacou como a opção recomendada para locais com temperaturas amenas e transporte fácil ou médio.

O estudo de dimensionamento mostrou que a temperatura é o aspecto de maior impacto em relação a influência local. Localidade de temperaturas amenas, como o Pampas e Mata Atlântica, tendem a ter um menor FC. Ainda assim, a variação dos dimensionamentos dos PV é pequena, indicando a possibilidade de padronização dos sistemas.

Com relação aos modelos de manutenção, verificou-se que o modelo M1 é indicado para distâncias curtas, internas e externas, não havendo o custo de locação de local de apoio. Já o modelo M2 é recomendado para pequenas distâncias internas, com acesso fácil ou médio. Por fim, M3 é recomendado para longas distâncias internas e externas, a partir de 50 SFlls, quando o custo “outros” é amortizado.

Em relação ao apoio local, pode-se concluir que seu impacto só percebido em comunidades com distâncias internas até 70 km, que possibilitem a manutenção de 2 ou mais SFlls por dia.

A validação do método utilizando um estudo de caso real mostrou que o método aplicado abrange as características individuais se adequando a soluções ótimas encontradas em campo. Além disso, ele também possibilita uma análise detalhada da recomendação de equipamentos e dos custos dos modelos de manutenção preventiva, possibilitando alterações que viabilizem outras alternativas.

Desse modo, o presente trabalho cumpriu com o objetivo de fornecer uma visão mais abrangente dos tópicos que interferem no sucesso de eletrificação de regiões remotas. As recomendações elaboradas podem ser utilizadas como subsídios para que as concessionárias de energia possam adequar suas normas técnicas, aumentando a viabilidade de seus sistemas de eletrificação remota com ênfase em SFII.

Para trabalhos futuros, no que tange eletrificações remotas, sugere-se que os seguintes estudos:

- Adequação das recomendações para uso comercial rural
- Avaliação de outras tecnologias de baterias com aplicação fotovoltaica
- Avaliação da aplicabilidade do método para outras fontes de energia renováveis
- Adaptação das recomendações para a eletrificação com microrredes
- Estudo de recomendações técnicas específicas, como aterramento e segurança das instalações.

Por fim, sugere-se também que sejam avaliados outros métodos para a aplicação de recomendações específicas, bem como a abrangência para o contexto internacional, e também o desenvolvimento de um *software* com o método aprimorado para que as empresas pudessem avaliar os cenários com dados específicos da empresa e do local de instalação.

REFERÊNCIAS

AHLBORG, H.; HAMMAR, L. **Drivers and Barriers to Rural Electrification in Tanzania and Mozambique - Grid Extension, Off-Grid and Renewable Energy Sources.** *In: PROCEEDINGS OF THE WORLD RENEWABLE ENERGY CONGRESS – SWEDEN 2011, Linköping, Suécia.* Linköping, Suécia p. 2493–2500. DOI: 10.3384/ecp110572493.

AHMAD, N. I.; AB-KADIR, M. Z. A.; IZADI, M.; AZIS, N.; RADZI, M. A. M.; ZAINI, N. H.; NASIR, M. S. M. **Lightning protection on photovoltaic systems: A review on current and recommended practices.** *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 82, p. 1611–1619, 2018. DOI: 10.1016/j.rser.2017.07.008.

AL-SMAIRAN, MH; ALAYYASH, S. M.; SHATNAWI, R. S. **Socio-economic effects of solar home systems in Jordan Badia – A case study in Rawthat Albandan village.** *International Journal of Sustainable Development and Planning*, v. 14, n. 03, p. 191–201, 2019. DOI: 10.2495/SDP-V14-N3-191-201.

ALI, M. M. E.; SALIH, S. K. **A visual basic-based tool for design of stand-alone solar power systems.** *Energy Procedia*, v. 36, p. 1255–1264, 2013. DOI: 10.1016/j.egypro.2013.07.142.

ALMESHQAB, F.; USTUN, T. S. **Lessons learned from rural electrification initiatives in developing countries: Insights for technical, social, financial and public policy aspects.** *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 102, n. December 2017, p. 35–53, 2019. DOI: 10.1016/j.rser.2018.11.035.

ALZOLA, J. A.; VECHIU, I.; CAMBLONG, H.; SANTOS, M.; SALL, M.; SOW, G. **Microgrids project, Part 2: Design of an electrification kit with high content of renewable energy sources in Senegal.** *Renewable Energy*, 2009. DOI: 10.1016/j.renene.2009.01.013.

ANEEL. **Resolução Normativa N° 493.** 2012. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012493.pdf>. Acesso em: 4 maio. 2020.

ANEEL. **Planos de Universalização - ANEEL**. 2020. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/planos-de-universalizacao>. Acesso em: 30 jan. 2021.

ANEEL. **PRODIST Módulo 8-Qualidade da Energia Elétrica**, 2021.

ATLAS BRASIL. **Atlas do Desenvolvimento Humano no Brasil**. 2013. Disponível em: <https://atlasbrasil.org.br/>. Acesso em: 29 out. 2020.

AZIMOH, C. L.; KLINTENBERG, P.; MBOHWA, C.; WALLIN, F. **Replicability and scalability of mini-grid solution to rural electrification programs in sub-Saharan Africa**. *Renewable Energy*, v. 106, p. 222–231, 2017. DOI: 10.1016/j.renene.2017.01.017.

BALINT, P. J. **Bringing solar home systems to rural El Salvador: lessons for small NGOs**. *Energy Policy*, v. 34, n. 6, p. 721–729, 2006. DOI: 10.1016/j.enpol.2004.07.010.

BAMBAWALE, M. J.; D'AGOSTINO, A. L.; SOVACOOOL, B. K. **Realizing rural electrification in Southeast Asia: Lessons from Laos**. *Energy for Sustainable Development*, v. 15, n. 1, p. 41–48, 2011. DOI: 10.1016/j.esd.2010.11.001.

BARUA, D. C.; URMEE, T. P.; KUMAR, S.; BHATTACHARYA, S. C. **A photovoltaic solar home system dissemination model**. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, v. 9, n. 4, p. 313–322, 2001. DOI: 10.1002/pip.376.

BATTEIGER, A.; ROTTER, V. **Material Implications of Rural Electrification—A Methodological Framework to Assess In-Use Stocks of Off-Grid Solar Products and EEE in Rural Households in Bangladesh**. *Recycling*, v. 3, n. 1, p. 7, 2018. DOI: 10.3390/recycling3010007.

BEGAY, S. K. **Navajo residential solar energy access as a global model**. *The Electricity Journal*, v. 31, n. 6, p. 9–15, 2018. DOI: 10.1016/j.tej.2018.07.003.

BHATTACHARYYA, S. C. **To regulate or not to regulate off-grid electricity access in developing countries***Energy policy*. Elsevier, , 2013. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421513008215>.

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. DOI: 10.1016/j.enpol.2016.04.010.

BHUMKITTIPICH, P.; OHGAKI, H. **Development Strategy for Sustainable Solar Home System in the Akha Upland Community of Thailand.** *Energies*, v. 11, n. 6, p. 1509, 2018. DOI: 10.3390/en11061509.

BRASIL. **LEI Nº 6.015, DE 31 DE DEZEMBRO DE 1973** República Federativa do Brasil, Brasil, 1973. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l6015compilada.htm. Acesso em: 16 nov. 2020.

BRASIL. **DECRETO Nº 7.246, DE 28 DE JULHO DE 2010.** República Federativa do Brasil, 2010. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/decreto/D7246.htm. Acesso em: 16 nov. 2020.

CHOWDHURY, S. A.; AZIZ, S.; GROH, S.; KIRCHHOFF, H.; LEAL FILHO, W. **Off-grid rural area electrification through solar-diesel hybrid minigrids in Bangladesh: resource-efficient design principles in practice.** *Journal of Cleaner Production*, v. 95, p. 194–202, 2015. DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.02.062.

CONNOLLY, D.; LUND, H.; MATHIESEN, B. V.; LEAHY, M. **A review of computer tools for analysing the integration of renewable energy into various energy systems.** *Applied Energy*, v. 87, n. 4, p. 1059–1082, 2010. DOI: 10.1016/j.apenergy.2009.09.026. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.09.026>.

COSTA, Helder Gomes; MOLL, Roberto Nunes. **Emprego do método de análise hierárquica (AHP) na seleção de variedades para o plantio de cana-de-açúcar.** *Gestão & Produção*, v. 6, n. 3, p. 243–256, 1999. DOI: 10.1590/s0104-530x1999000300009.

CRESESB. **Tutorial de Energia Solar Fotovoltaica.** 2006. Disponível

em:

http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=com_content&lang=pt&cid=341.

Acesso em: 1 maio. 2020.

DAYSTAR, Inc. **Stand-Alone Photovoltaic Systems: A Handbook of Recommended Design Practices**. Las Cruces, México: Sandia National Laboratories - SAND2007-4268, 1995.

DIALLO, A.; MOUSSA, R. K. **The effects of solar home system on welfare in off-grid areas: Evidence from Côte d'Ivoire**. *Energy*, v. 194, p. 116835, 2020. DOI: 10.1016/j.energy.2019.116835.

DÍAZ, P.; PEÑA, R.; MUÑOZ, J.; ARIAS, C. A.; SANDOVAL, D. **Field analysis of solar PV-based collective systems for rural electrification**. *Energy*, v. 36, n. 5, p. 2509–2516, 2011. DOI: 10.1016/j.energy.2011.01.043.

DOE. **Solar PV Standardised Training Manual**. Filipinas: Japan International Cooperation Agency (JICA), 2009.

EASE. **Energy Storage Technologies**. 2020. Disponível em: <https://ease-storage.eu/energy-storage/technologies/>. Acesso em: 26 out. 2020.

EDALATI, S.; AMERI, M.; IRANMANESH, M. **Comparative performance investigation of mono- and poly-crystalline silicon photovoltaic modules for use in grid-connected photovoltaic systems in dry climates**. *Applied Energy*, v. 160, p. 255–265, 2015. DOI: 10.1016/j.apenergy.2015.09.064.

ENSSLIN, L.; ENSSLIN, S.; PINTO, H. M. **Processo de Investigação e Análise Bibliométrica: Avaliação da Qualidade dos Serviços Bancários**. *RAC*, Rio de Janeiro, v. 17, n. 3, p. 325–349, 2013. Disponível em: <http://www.anpad.org.br/rac>. Acesso em: 29 mar. 2020.

GARCÍA, V. G.; BARTOLOMÉ, M. M. **Rural electrification systems based on renewable energy: The social dimensions of an innovative technology**. *Technology in Society*, v. 32, n. 4, p. 303–311, 2010. DOI: 10.1016/j.techsoc.2010.10.007.

GARRO, A.; BARRARA, F. **Reliability analysis of residential photovoltaic systems**. *Renewable Energy and Power Quality Journal*, p.

1197–1202, 2011. DOI: 10.24084/repqj09.594.

GILES, L.; SKOLNIK, E. G.; MARCHIONINI, B.; FALL, N. K. **Remote Area Power Supply (RAPS) load and resource profiles.** [s.l.] : Sandia National Laboratories - SAND2007-4268, 2007. Disponível em: <https://prod-ng.sandia.gov/techlib-noauth/access-control.cgi/2007/074268.pdf>.

GÓMEZ, M. F.; SILVEIRA, S. **Delivering off-grid electricity systems in the Brazilian Amazon.** *Energy for Sustainable Development*, v. 16, n. 2, p. 155–167, 2012. DOI: 10.1016/j.esd.2012.01.007.

GUGLIELMETTI, F. V.; MARINS, F. a. S.; SALOMON, V. a. P. **Comparação teórica entre métodos de auxílio à tomada de decisão por múltiplos critérios.** *In: XXIII ENCONTRO NAC. DE ENG. DE PRODUÇÃO 2003a*, Ouro Preto, MG. Ouro Preto, MG p. 1–6.

GUGLIELMETTI, F. V; MARINS, F. A. S.; SALOMON, V. A. P. **Comparação teórica entre métodos de auxílio à tomada de decisão por múltiplos critérios.** *In: XXIII ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO 2003b*, Ouro Preto, MG. Ouro Preto, MG: UNESP, 2003. p. 1–6.

HALDER, P. K. **Potential and economic feasibility of solar home systems implementation in Bangladesh.** *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016. DOI: 10.1016/j.rser.2016.07.062.

HERNÁNDEZ-CALLEJO, L.; GALLARDO-SAAVEDRA, S.; ALONSO-GÓMEZ, V. **A review of photovoltaic systems: Design, operation and maintenance.** *Solar Energy*, v. 188, p. 426–440, 2019. DOI: 10.1016/j.solener.2019.06.017.

HOQUE, S. M. N.; DAS, B. K. **Analysis of cost, energy and emission of solar home systems in Bangladesh.** *International Journal of Renewable Energy Research*, v. 3, n. 2, 2013. Disponível em: <https://pdfs.semanticscholar.org/2988/3b2cea03de2d00c0a33e988c10747d2b4e14.pdf>.

IEA. **World Energy Outlook 2018: The Future is Electrifying.** 2018. Disponível em: <https://www.iea.org/workshops/world-energy-outlook-2018-the-future-is-electrifying.html>.

JAMAL, T.; URMEE, T.; CALAIS, M.; SHAFIULLAH, G. M.; CARTER, C. **Technical challenges of PV deployment into remote Australian electricity networks: A review.** *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 77, p. 1309–1325, 2017. DOI: 10.1016/J.RSER.2017.02.080.

JAVADI, F. S.; RISMANCHI, B.; SARRAF, M.; AFSHAR, O.; SAIDUR, R.; PING, H. W.; RAHIM, N. A. **Global policy of rural electrification.** *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 19, p. 402–416, 2013. DOI: 10.1016/j.rser.2012.11.053. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032112006673>.

JORDAN, D. C.; KURTZ, S. R. Photovoltaic **Degradation Rates-an Analytical Review.** *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, v. 21, n. 1, p. 12–29, 2013. DOI: 10.1002/pip.1182.

KANSARA, B. U.; PAREKH, B. R. **Modelling and simulation of distributed generation system using HOMER software.** *In: 2011 INTERNATIONAL CONFERENCE ON RECENT ADVANCEMENTS IN ELECTRICAL, ELECTRONICS AND CONTROL ENGINEERING 2011*, Sivakasi, India. Sivakasi, India: IEEE, 2011. p. 328–332. DOI: 10.1109/ICONRAEeCE.2011.6129804.

KHAN, I. **Impacts of energy decentralization viewed through the lens of the energy cultures framework: Solar home systems in the developing economies.** *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 119, p. 109576, 2020. DOI: 10.1016/j.rser.2019.109576.

KHATIB, T.; IBRAHIM, I. A.; MOHAMED, A. **A review on sizing methodologies of photovoltaic array and storage battery in a standalone photovoltaic system.** *Energy Conversion and Management*, v. 120, p. 430–448, 2016. DOI: 10.1016/j.enconman.2016.05.011.

KHATIB, T.; MOHAMED, A.; SOPIAN, K. **A Software Tool for Optimal Sizing of PV Systems in Malaysia.** *Modelling and Simulation in Engineering*, v. 2012, p. 1–11, 2012. DOI: 10.1155/2012/969248.

KOMATSU, S.; KANEKO, S.; GHOSH, P. P.; MORINAGA, A. **Determinants of user satisfaction with solar home systems in rural**

Bangladesh. Energy, v. 61, p. 52–58, 2013. DOI: 10.1016/j.energy.2013.04.022.

KRAUTER, S. C. W. **Development of an integrated solar home system.** Solar Energy Materials and Solar Cells, v. 82, n. 1–2, p. 119–130, 2004. DOI: 10.1016/j.solmat.2004.01.010.

KULWORAWANICHPONG, T.; MWAMBELEKO, J. J. **Design and costing of a stand-alone solar photovoltaic system for a Tanzanian rural household.** Sustainable Energy Technologies and Assessments, v. 12, p. 53–59, 2015. DOI: 10.1016/j.seta.2015.10.001.

KUMAR, S.; RADHA, A.; KOUR, M.; KUMAR, R.; CHOUAIH, A.; PANDEY, S. K. **DFT studies of disubstituted diphenyldithiophosphates of nickel(II): Structural and some spectral parameters.** Journal of Molecular Structure, v. 1185, p. 212–218, 2019. DOI: 10.1016/j.molstruc.2019.02.105.

LACTEC. **Avaliação de tecnologias de armazenamento de energia e de soluções de gerenciamento da operação e manutenção para aplicação em sistemas isolados no Pantanal Sul-mato-grossense.** LACTEC e Energisa-EMS, PD-00404-1609/2017, , 2017.

LOUIE, H. **Off-Grid Electrical Systems in Developing Countries.** 1. ed. Cham: Springer International Publishing, 2018. DOI: 10.1007/978-3-319-91890-7.

MANDELLI, S.; BRIVIO, C.; COLOMBO, E.; MERLO, M. **Effect of load profile uncertainty on the optimum sizing of off-grid PV systems for rural electrification.** Sustainable Energy Technologies and Assessments, v. 18, p. 34–47, 2016. DOI: 10.1016/j.seta.2016.09.010.

MERAL, M. E.; DINÇER, F. **A review of the factors affecting operation and efficiency of photovoltaic based electricity generation systems.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 15, n. 5, p. 2176–2184, 2011. DOI: 10.1016/j.rser.2011.01.010.

MME. **MANUAL DE OPERACIONALIZAÇÃO.** 2018. Disponível em: <https://www.mme.gov.br/luzparatodos/asp/>. Acesso em: 26 out. 2020.

MORAES, A. M. **Energia Solar Fotovoltaica no Piauí: Barreiras e**

Potencialidades. 1. ed. Teresina/PI: EDUFPI – Editora da Universidade Federal do Piau, 2013.

MORENO, L. M. C. **Characterisation of the operation & maintenance phase in PV rural electrification programmes**. Madrid Tese de Doutorado - Universidad Politécnica de Madrid, , 2015. Disponível em: <http://oa.upm.es/id/eprint/37540/contents>.

NARAYAN, N.; CHAMSEDDINE, A.; VEGA-GARITA, V.; QIN, Z.; POPOVIC-GERBER, J.; BAUER, P.; ZEMAN, M. **Exploring the boundaries of Solar Home Systems (SHS) for off-grid electrification: Optimal SHS sizing for the multi-tier framework for household electricity access**. Applied Energy, v. 240, p. 907–917, 2019. DOI: 10.1016/j.apenergy.2019.02.053.

NARAYAN, N.; QIN, Z.; POPOVIC-GERBER, J.; DIEHL, J.; BAUER, P.; ZEMAN, M. **Stochastic load profile construction for the multi-tier framework for household electricity access using off-grid DC appliances**. Energy Efficiency, v. 13, n. 2, p. 197–215, 2020. DOI: 10.1007/s12053-018-9725-6.

ONU. | **Human Development Reports**. 2018. Disponível em: <http://hdr.undp.org/en/2018-update>. Acesso em: 14 jun. 2019.

ONU. **Agenda 2030 | ONU Brasil**. 2019. Disponível em: <https://nacoesunidas.org/pos2015/agenda2030/>. Acesso em: 14 jun. 2019.

PALIT, D. **Solar energy programs for rural electrification: Experiences and lessons from South Asia**. Energy for Sustainable Development, v. 17, n. 3, p. 270–279, 2013. DOI: 10.1016/j.esd.2013.01.002.

PALIT, D.; CHAUREY, A. **Off-grid rural electrification experiences from South Asia: Status and best practices**. Energy for Sustainable Development, v. 15, n. 3, p. 266–276, 2011. DOI: 10.1016/j.esd.2011.07.004.

PEREIRA, C. N.; CASTRO, C. N. **EDUCAÇÃO: CONTRASTE ENTRE O MEIO URBANO E O MEIO RURAL NO BRASIL**. Boletim Regional, Urbano e Ambiental n° 21, Julho/Dezembro 2019 - IPEA, Brasília, p. 63–74, 2019.

PINHEIRO, G.; RENDEIRO, G.; PINHO, J.; MACEDO, E. **Rural electrification for isolated consumers: Sustainable management model**

based on residue biomass. Energy Policy, v. 39, n. 10, p. 6211–6219, 2011. DOI: 10.1016/j.enpol.2011.07.020.

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. **Manual de Engenharia Fotovoltaica.** 1^a ed. Rio de Janeiro: CEPEL - CRESESB, 2014. Disponível em: http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Manual_de_Engenharia_FV_2014.pdf.

RAHMAN, Md M.; PAATERO, JV.; POUDYAL, A.; LAHDELMA, R. **Driving and hindering factors for rural electrification in developing countries: Lessons from Bangladesh.** Energy Policy, v. 61, p. 840–851, 2013. DOI: 10.1016/j.enpol.2013.06.100.

REBANE, K. L.; BARHAM, B. L. **Knowledge and adoption of solar home systems in rural Nicaragua.** Energy Policy, v. 39, n. 6, p. 3064–3075, 2011. DOI: 10.1016/j.enpol.2011.02.005.

REITER, R. A.; REITER, R. D. O.; PÉRES, A. **Controlador De Carga De Acordo Com a Portaria 396 Do Inmetro.** In: SEMINÁRIO DE ELETRÔNICA DE POTÊNCIA E CONTROLE (SEPOC) 2014, Santa Maria, Brasil. Santa Maria, Brasil p. 94. DOI: 10.13140/RG.2.1.3871.0882.

RIBEIRO, M. C. C. R.; ALVES, A. S. **Aplicação do método Analytic Hierarchy Process (AHP) com a mensuração absoluta num problema de seleção qualitativa.** Sistemas & Gestão, v. 11, n. 3, p. 270–281, 2016. DOI: 10.20985/1980-5160.2016.v11n3.988.

ROGERS, E. M.; SINGHAL, A.; QUINLAN, M. M. **Diffusion of Innovations 1.** In: An Integrated Approach to Communication Theory and Research. fifth ed ed. New York: Routledge, 2019. p. 415–434. DOI: 10.4324/9780203710753-35. Disponível em: <https://www.taylorfrancis.com/books/9781351358712/chapters/10.4324/9780203710753-35>.

RUSHWORTH, J. **Which solar charge controller: PWM or MPPT?** Victron Energy B.V, v. 31, n. June, p. 14, 2014. Disponível em: <https://www.victronenergy.com/upload/documents/White-paper-Which-solar-charge-controller-PWM-or-MPPT.pdf>.

SAATY, T. L. **How to make a decision: The analytic hierarchy process.** European Journal of Operational Research, v. 48, n. 1, p. 9–26, 1990. DOI: 10.1016/0377-2217(90)90057-1.

SAHNS, D. E.; STIFEL, D. C. **Urban-rural inequality in living standards in Africa.** HelsinkiWIDER Research Paper, No. 2004/04, The United Nations University World Institute for Development Economics Research (UNU-WIDER), , 2004.

SALAS, Cresencio Silvio Segura; SILVEIRA, Letícia Helena Souza. **Eletrificação de regiões remotas: estudo de alternativas e aplicação no Pantanal Sul-mato-grossense.** 1ª ed ed. Bragança Paulista, SP: Margem da Palavra, 2017.

SANTOS, P. R. G.; FLORENTINO, M. C. C.; BASTOS, J. L. C.; TREVISAN, G. V. **Fontes renováveis e não renováveis geradoras de energia elétrica no Brasil.** In: VIII MOSTRA NACIONAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E TECNOLOGIA INTERDISCIPLINAR 2015, Santa Rosa do Sul, Brasil. Santa Rosa do Sul, Brasil: Instituto Federal Catarinense, 2015.

SHYU, C. W. **End-users' experiences with electricity supply from stand-alone mini-grid solar PV power stations in rural areas of western China.** Energy for Sustainable Development, v. 17, n. 4, p. 391–400, 2013. DOI: 10.1016/j.esd.2013.02.006.

SINHA, S.; CHANDEL, S. S. **Review of software tools for hybrid renewable energy systems.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 32, p. 192–205, 2014. DOI: 10.1016/j.rser.2014.01.035.

SOLAFRICA. **Solar Home System Basic Maintenance & Repair Training Workbook.** Bern, Suíça.

SOVACOOOL, B. K. **Success and failure in the political economy of solar electrification: Lessons from World Bank Solar Home System (SHS) projects in Sri Lanka and Indonesia.** Energy Policy, v. 123, p. 482–493, 2018. DOI: 10.1016/j.enpol.2018.09.024.

SOVACOOOL, B. K.; D'AGOSTINO, A. L.; BAMBAWALE, M. J. **The socio-technical barriers to Solar Home Systems (SHS) in Papua New Guinea: “**

Choosing pigs, prostitutes, and poker chips over panels". *Energy Policy*, v. 39, n. 3, p. 1532–1542, 2011. DOI: 10.1016/j.enpol.2010.12.027.

TORERO, M. **The Impact of Rural Electrification: Challenges and Ways Forward**. *Revue d'économie du développement*, v. 23, n. HS, p. 49, 2015. DOI: 10.3917/edd.hs03.0049.

ULSRUD, K.; WINTHER, T.; PALIT, D.; ROHRACHER, H. **Village-level solar power in Africa: Accelerating access to electricity services through a socio-technical design in Kenya**. *Energy Research & Social Science*, v. 5, p. 34–44, 2015. DOI: 10.1016/j.erss.2014.12.009.

URMEE, T.; HARRIES, D. **Determinants of the success and sustainability of Bangladesh's SHS program**. *Renewable Energy*, v. 36, n. 11, p. 2822–2830, 2011. DOI: 10.1016/j.renene.2011.04.021.

URMEE, Tania; MD, Anisuzzaman. **Social, cultural and political dimensions of off-grid renewable energy programs in developing countries**. *Renewable Energy*, v. 93, p. 159–167, 2016. DOI: 10.1016/j.renene.2016.02.040. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0960148116301410>.

VARGAS, R. V. **Utilizando a programação multicritério (Analytic Hierarchy Process - AHP) para selecionar e priorizar projetos na gestão de portfólio**. *In: PMI GLOBAL CONGRESS 2010 - NORTH AMERICA 2010*, Washington, estados Unidos. Washington, estados Unidos p. 1–22. Disponível em: rvarg.as/g0/.

WESTPHAL, M. I.; MARTIN, S.; ZHOU, L.; SATTERTHWAIT, D. **Powering Cities in the Global South: How Energy Access for All Benefits**. World Resources Institute. Washington DC, Estados Unidos, 2017. Disponível em: www.citiesforall.org.

WOUTERS, C. **Towards a regulatory framework for microgrids—The Singapore experience**. *Sustainable Cities and Society*, v. 15, p. 22–32, 2015. DOI: 10.1016/j.scs.2014.10.007.

XU, Z.; NTHONTHO, M.; CHOWDHURY, S. **Rural electrification implementation strategies through microgrid approach in South African**

context. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, v. 82, p. 452–465, 2016. DOI: 10.1016/j.ijepes.2016.03.037.

YAMAKAWA, Eduardo Kazumi. **Sistema de controle nebuloso para bancos de capacitores automáticos aplicados em alimentadores de distribuição de energia elétrica.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Paraná - Curitiba, 2007.

ZILLES, R.; LORENZO, E.; SERPA, P. **From candles to PV electricity: a four-year experience at Iguape-Cananéia, Brazil.** Progress in Photovoltaics: Research and Applications, v. 8, n. 4, p. 421–434, 2000. DOI: 10.1002/1099-159X(200007/08)8:4<421::AID-PIP323>3.0.CO;2-J.

APÊNDICE 1. REVISÃO DA LITERATURA

No presente item, seguem os apêndices referentes ao capítulo de revisão da literatura.

APÊNDICE 1.2. Quantificação de resultados por conjunto de palavras-chave

A tabela abaixo apresenta o total de resultados obtidos por cada conjunto de palavras-chave.

TABELA 58 – QUANTIFICAÇÃO DOS RESULTADOS DA REVISÃO DA LITERATURA

Eixo 1	Eixo 2	Eixo 3	Resultados
"Mini-grid"	"rural electrification"	"case study" OR "lessons learned"	14
"Mini-grid"	"rural electrification"	"regulatory framework" OR "normative"	4
"Mini-grid"	"rural electrification" OR "remote areas"		138
"Mini-grid"	"remote areas"	"case study" OR "lessons learned"	56
"Mini-grid"	"remote areas"	"regulatory framework" OR "normative"	42
"Mini-grid"	"renewable energy"	"case study" OR "lessons learned"	221
"Mini-grid"	"renewable energy"	"regulatory framework" OR "normative"	197
"Mini-grid"	"renewable energy" OR "photovoltaic"		38
"Mini-grid"	"photovoltaic"	"case study" OR "lessons learned"	757
"Mini-grid"	"photovoltaic"	"regulatory framework" OR "normative"	107
"isolated systems"	"rural electrification"	"case study" OR "lessons learned"	478
"isolated systems"	"rural electrification"	"regulatory framework" OR "normative"	224
"isolated systems"	"rural electrification" OR "remote areas"		395
"isolated systems"	"remote areas"	"case study" OR "lessons learned"	534
"isolated systems"	"remote areas"	"regulatory framework" OR "normative"	211
"isolated systems"	"renewable energy"	"case study" OR "lessons learned"	152
"isolated systems"	"renewable energy"	"regulatory framework" OR "normative"	600
"isolated systems"	"renewable energy" OR "photovoltaic"		990
"isolated systems"	"photovoltaic"	"case study" OR "lessons learned"	113

TABELA 58 – QUANTIFICAÇÃO DOS RESULTADOS DA REVISÃO DA LITERATURA (CONTINUAÇÃO)

Eixo 1	Eixo 2	Eixo 3	Resultados
"isolated systems"	"photovoltaic"	"regulatory framework" OR "normative"	384
"off-grid"	"rural electrification"	"case study" OR "lessons learned"	980
"off-grid"	"rural electrification"	"regulatory framework" OR "normative"	157
"off-grid"	"rural electrification" OR "remote areas"		1000
"off-grid"	"remote areas"	"case study" OR "lessons learned"	804
"off-grid"	"remote areas"	"regulatory framework" OR "normative"	103
"off-grid"	"renewable energy"	"case study" OR "lessons learned"	980
"off-grid"	"renewable energy"	"regulatory framework" OR "normative"	33
"off-grid"	"renewable energy" OR "photovoltaic"		1000
"off-grid"	"photovoltaic"	"case study" OR "lessons learned"	980
"off-grid"	"photovoltaic"	"regulatory framework" OR "normative"	219
"solar home systems"	"rural electrification"	"case study" OR "lessons learned"	980
"solar home systems"	"rural electrification"	"regulatory framework" OR "normative"	69
"solar home systems"	"rural electrification" OR "remote areas"		990
"solar home systems"	"remote areas"	"case study" OR "lessons learned"	422
"solar home systems"	"remote areas"	"regulatory framework" OR "normative"	53
"solar home systems"	"renewable energy"	"case study" OR "lessons learned"	830
"solar home systems"	"renewable energy"	"regulatory framework" OR "normative"	90
"solar home systems"	"renewable energy" OR "photovoltaic"		990
"solar home systems"	"photovoltaic"	"case study" OR "lessons learned"	665
"solar home systems"	"photovoltaic"	"regulatory framework" OR "normative"	71

APÊNDICE 1.3. Análise de publicação por ano e local de publicação

O gráfico da Figura 31 apresenta a relação de artigos por ano de publicação, enquanto a Figura 32 traz o mapa de publicação de acordo com primeiro autor do artigo.



FIGURA 31 – CRONOLOGIA DE PUBLICAÇÃO

FONTE: A AUTORA (2021)

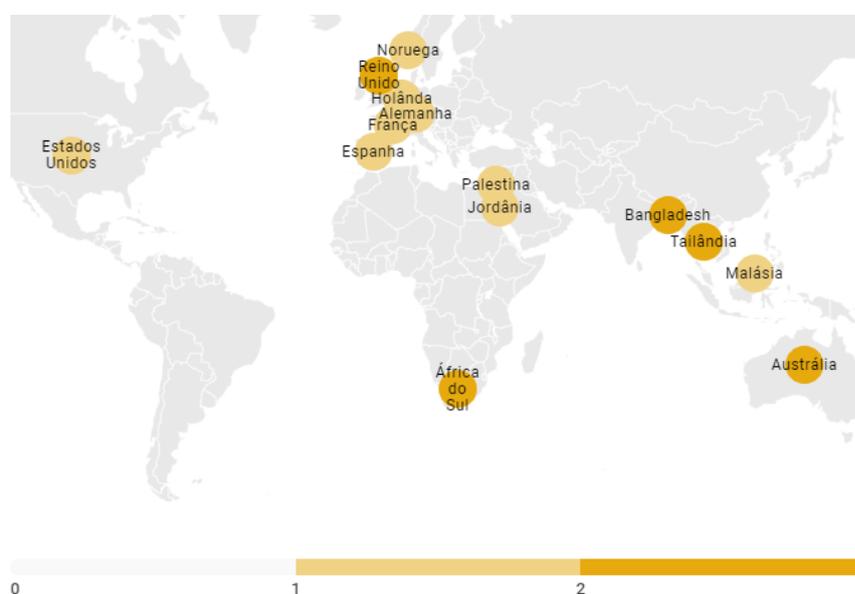


FIGURA 32 – MAPA DE PUBLICAÇÃO DOS ARTIGOS AVALIADOS

FONTE: A AUTORA (2021)

Conforme mostra o gráfico da Figura 31, metade dos artigos são considerados novas publicações, o que demonstra a relevância atual do tema. Já a Figura 32 destaca o continente Europeu e a Ásia como locais que concentram maior quantidade de publicações nesse tema.

APÊNDICE 2. ESTRUTURA DO QUESTIONÁRIO DAS ENTREVISTAS

Questionário de adversidades na implantação de sistemas fotovoltaicos em regiões remotas			
Nome do entrevistado:			
Qual a região de instalação:			
	Adversidade	Nota de Impacto (0-10)	Fique à vontade para contar mais sobre a sua experiência!
Q1	Nível de envolvimento do usuário ou comunidade no projeto		
Q2	Dificuldades na escolha dos equipamentos para o sistema		
Q3	Dificuldade no dimensionamento dos sistemas, conforme necessidades e expectativas dos usuários		
Q4	Dificuldade no transporte dos equipamentos		
Q5	Necessidade de conhecimento e conscientização dos usuários para o bom desempenho do sistema		
Q6	Qual (is) a principal dificuldade na realização de manutenção preventiva: 1. Falta de pessoal capacitado próximo ao local (suporte local) 2. Deslocamento da equipe até o local 3. Outro		
Q7	Qual (is) as principais dificuldades na manutenção corretiva: 1. Falta de suporte local 2. Má utilização do usuário 3. Danos causados pelo meio ambiente 4. Outro		
Q8	Envolvimento do usuário nas realizações de manutenções básicas. Se sim, quais atividades ele realiza? Houve capacitação?		
Q9	Por favor, avalie o impacto dos seguintes itens na escolha dos equipamentos (se possível, justificar a nota):	Custo	
Q10		Vida útil	
Q11		Eficiência	
Q12		Profundidade de descarga da bateria	
Q13		Tamanho	
Q14		Peso	
Q15		Temperatura	
Q16		Umidade	
Q17		Precipitação	
	Houveram outras dificuldades que não foram inseridas neste questionário?		

APÊNDICE 3. BASE DE DADOS DE EQUIPAMENTOS

As planilhas a seguir apresentam os dados levantados de cada equipamento para realização do presente trabalho.

TABELA 59 – BASE DE DADOS DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS

	Potência [Wp]	Vmp	Imp	Voc	Isc	Eficiência	Peso [kg]	Volume [m ³]	Coef. de temperatura	Custo [R\$/W]	Vida útil
Monocristalinos	220	26,06	8,45	30,86	8,9	16%	14,5	0,046	0,06	3,05	20
	220	19,8	11,11	23,3	12,3	17%	13,5	0,045	0,065	10,37	25
	220	25,2	8,73	30,4	7,28	18%	15,0	0,046	0,06	9,99	20
	90	16,7	5,4	20,7	6,2	14%	9,4	0,024	0,045	5,80	25
	90	19,6	4,59	24,06	5,03	14%	6,1	0,016	0,04	13,19	25
	90	18,4	4,89	22,5	5,33	14%	10,0	0,023	0,04	13,79	25
	370	39,3	9,41	48,3	9,85	19%	23,0	0,079	0,05	2,68	25
	330	33,7	9,8	40,9	8,89	21%	23,0	0,069	0,03	4,50	25
	90	17,8	5,1	21,7	5,6	14%	7,8	0,025	0,04	5,56	25
Policristalinos	90	19,54	4,61	23,44	4,98	15%	6,4	0,021	0,04	3,10	20
	90	17,06	5,28	19,96	5,94	18%	6,5	0,015	0,039	3,43	25
	330	37,3	8,85	45,6	9,33	17%	22,0	0,078	0,05	1,91	25
	330	37,26	8,86	44,72	9,57	17%	22,5	0,078	0,06	2,18	25
	330	37,3	8,85	46,1	9,29	17%	24,0	0,068	0,05	2,72	25
	220	29,5	7,46	36,6	7,46	13%	22,5	0,083	0,045	2,12	25
	220	36	6,12	45	6,61	15%	16,9	0,066	0,055	1,79	25

FONTE: A AUTORA (2021)

TABELA 60 – BASE DE DADOS DAS BATERIAS

	Energia ⁸ [Wh]	DoD _{ótimo}	Ciclos	Peso [kg]	Volume [m ³]	Temperatura de operação	LFTP [kWh]	Disponibilidade [h]	Custo por LFTP [R\$/kWh]
Zebra	3650	0,8	3.000	45,0	0,046	300	8.760	13	3,42
	5700	0,8	3.000	77,0	0,089	300	13.680	13	3,06
Lítio	2560	0,8	4.000	38,0	0,030	50	8.192	0	2,27

⁸ Energia considerada na curva C10

TABELA 60 – BASE DE DADOS DAS BATERIAS (CONTINUAÇÃO)

	Energia ⁸ [Wh]	DoD _{ótimo}	Ciclos	Peso [kg]	Volume [m ³]	Temperatura de operação	LFTP [kWh]	Disponibi- lidade [h]	Custo por LFTP [R\$/kWh]
	4800	0,8	6.000	69,0	0,108	50	23040	0	0,98
	2400	0,8	6.000	24,0	0,020	40	11520	0	1,75
Chumbo- ácido OPzS	500	0,6	1.500	21,0	0,010	35	450	0	3,63
	500	0,6	2.200	22,3	0,001	35	660	0	1,22
	518	0,6	1.750	21,8	0,011	25	544	0	2,67

FONTE: A AUTORA (2021)

TABELA 61 – BASE DE DADOS DO INVERSOR DE ONDA SENOIDAL PURA PARA SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

	Potência	Eficiência	Peso [kg]	Volume [m ³]	Custo [R\$/W]
Onda senoidal pura	350	0,90	1,0	0,0013	2,57
	350	0,91	1,0	0,0013	2,57
	500	0,92	1,7	0,0023	2,26
	500	0,91	1,7	0,0023	2,26
	1.000	0,92	3,9	0,0068	1,40
	1.000	0,92	3,6	0,0065	1,40
	1.500	0,93	4,6	0,0074	1,80
	1.600	0,94	4,6	0,0074	2,00

FONTE: A AUTORA (2021)

TABELA 62 – BASE DE DADOS DO CONTROLADOR DE CARGA

	Eficiência de conversão	Peso [kg]	Volume [m ³]	Custo [R\$]
MPPT	0,80	0,65	0,0010	435,00
	0,85	2,00	0,0030	850,00
	0,90	1,35	0,0019	840,00
	0,91	2,30	0,0027	1500,00
	0,85	2,00	0,0030	960,00
	0,91	1,70	0,0004	1050,00

TABELA 62 – BASE DE DADOS DO CONTROLADOR DE CARGA (CONTINUAÇÃO)

	Eficiência de conversão	Peso [kg]	Volume [m³]	Custo [R\$]
PWM	-	0,15	0,0004	170,00
	-	0,16	0,0004	240,00
	-	0,39	0,0008	370,00
	-	0,39	0,0008	550,00

FONTE: A AUTORA (2021)

APÊNDICE 4. RESUMO DOS ARTIGOS RELACIONADOS

TABELA 63 – RESUMO DOS 40 ARTIGOS DA REVISÃO DA LITERATURA

Autor	Título	Localidade	Resumo
(DIALLO; MOUSSA, 2020)	<i>The effects of solar home system on welfare in off-grid areas: Evidence from Côte d'Ivoire</i>	Costa do Marfim	Apresenta análise dos benefícios de SFII na qualidade de vida dos usuários
(HERNÁNDEZ-CALLEJO; GALLARDO-SAAVEDRA; ALONSO-GÓMEZ, 2019)	<i>A review of photovoltaic systems: Design, operation and maintenance</i>	Geral	Revisão bibliográfica com foco no design, operação e manutenção de SFI
(NARAYAN et al., 2019)	<i>Exploring the boundaries of Solar Home Systems (SHS) for off-grid electrification: Optimal SHS sizing for the multi-tier framework for household electricity ...</i>	Geral	Método para dimensionamento de SFII, com foco em minimizar perdas e maximizar a vida útil da bateria
(KHAN, 2020)	<i>Impacts of energy decentralization viewed through the lens of the energy cultures framework: Solar home systems in the developing economies</i>	Geral	Análise de impactos e dificuldades na implantação de SFI
(AL-SMAIRAN; ALAYYASH; SHATNAWI, 2019)	<i>Socio-economic effects of solar home systems in Jordan Badia—A case study in Rawthat Al-Bandan village</i>	Jordânia	Análise socioeconômica de microrredes
(BHUMKITTIPICH; OHGAKI, 2018)	<i>Development Strategy for Sustainable Solar Home System in the Akha Upland Community of Thailand</i>	Tailândia	Análise de problemas e fatores externos que impactam o desenvolvimento e operação de SFII
(BATTEIGER; ROTTER, 2018)	<i>Lightning protection on photovoltaic systems: A review on current and recommended practices</i>	Alemanha e Malásia	Revisão de sistemas de proteção em SFII, com foco em SPDA
(BATTEIGER; ROTTER, 2018)	<i>Material implications of rural electrification—a methodological framework to assess in-use stocks of off-grid solar products and eee in rural households in Bangladesh</i>	Bangladesh	Metodologia de análise do uso equipamentos elétricos e eletrônicos em SFII
(BEGAY, 2018)	<i>Navajo residential solar energy access as a global model</i>	Estados Unidos	Estudo de caso de SFII para atendimento das necessidades dos usuários
(SOVACOOOL, 2018)	<i>Success and failure in the political economy of solar electrification: Lessons from World Bank Solar Home System (SHS) projects in Sri Lanka and Indonesia</i>	Sri Lanka e Indonésia	Análise comparativa de dois estudos de caso com SFII em diferentes países
(AZIMOH et al., 2017)	<i>Replicability and scalability of mini-grid solution to rural electrification programs in sub-Saharan Africa</i>	Namíbia	Estudo de caso de uma mini rede híbrida (solar e diesel), com foco em problemas técnicos e impactos econômicos

TABELA 63 – RESUMO DOS 40 ARTIGOS DA REVISÃO DA LITERATURA (CONTINUAÇÃO)

Autor	Título	Localidade	Resumo
(KHATIB; IBRAHIM; MOHAMED, 2016)	<i>A review on sizing methodologies of photovoltaic array and storage battery in a standalone photovoltaic system</i>	Geral	Dimensionamento e design de SFI considerando as necessidades dos usuários, avaliando dificuldades e limitações do sistema
(BHATTACHARYYA; PALIT, 2016)	<i>Mini-grid based off-grid electrification to enhance electricity access in developing countries: What policies may be required?</i>	Índia	Análise dos desafios referentes ao objetivo universal de eletrificação até 2030
(HALDER, 2016)	<i>Potential and economic feasibility of solar home systems implementation in Bangladesh</i>	Bangladesh	Estudo de caso de SFII com foco na prospecção e disseminação do sistema
(URMEE; MD, 2016)	<i>Social, cultural and political dimensions of off-grid renewable energy programs in developing countries</i>	Geral	Análise de considerações sociais e culturais para a difusão de SFI
(KULWORAWANICHPON G; MWAMBELEKO, 2015)	<i>Design and costing of a stand-alone solar photovoltaic system for a Tanzanian rural household</i>	Tanzânia	Avaliação de erros comuns no dimensionamento e instalação de SFI
(CHOWDHURY et al., 2015)	<i>Off-grid rural area electrification through solar-diesel hybrid mini-grids in Bangladesh: resource-efficient design principles in practice</i>	Bangladesh	Modelo de negócio para aplicação de mini redes híbridas com diesel, com foco na análise econômica
(WOUTERS, 2015)	<i>Towards a regulatory framework for microgrids— The Singapore experience</i>	Singapura	Análise de desafios regulatórios para a integração de SFI
(ULSRUD et al., 2015)	<i>Village-level solar power in Africa: Accelerating access to electricity services through a socio-technical design in Kenya</i>	Quênia	Análise sociotécnica do design e funcionamento de microrredes
(BARUA et al., 2001)	<i>A photovoltaic solar home system dissemination model</i>	Bangladesh	Avaliação de estratégias para a disseminação de SFII
(MERAL; DINÇER, 2011)	<i>A review of the factors affecting operation and efficiency of photovoltaic based electricity generation systems</i>	Geral	Avaliação de requisitos para a instalação de SFII
(HOQUE; DAS, 2013)	<i>Analysis of cost, energy and emission of solar home systems in Bangladesh</i>	Bangladesh	Análise de custo, energia e emissões de carbono por SFII
(BALINT, 2006)	<i>Bringing solar home systems to rural El Salvador: lessons for small NGOs</i>	El Salvador	Análise de projetos de SFI em pequena escala
(GÓMEZ; SILVEIRA, 2012)	<i>Delivering off-grid electricity systems in the Brazilian Amazon</i>	Brasil	Avaliação institucional e regulatória para a eletrificação da Amazônia por meio de SFI

TABELA 63 – RESUMO DOS 40 ARTIGOS DA REVISÃO DA LITERATURA (CONTINUAÇÃO)

Autor	Título	Localidade	Resumo
(GARRO; BARRARA, 2011)	<i>Dependability analysis of stand-alone photovoltaic systems</i>	Geral	Análise de confiabilidade de SFI: designe, dimensionamento, vida útil e falhas técnicas
(URMEE; HARRIES, 2011)	<i>Determinants of the success and sustainability of Bangladesh's SHS program</i>	Bangladesh	Análise dos fatores de sucesso em programas de eletrificação com SFII
(KOMATSU et al., 2013)	<i>Determinants of user satisfaction with solar home systems in rural Bangladesh</i>	Bangladesh	Avaliação das características para instalação de SFII
(KRAUTER, 2004)	<i>Development of an integrated solar home system</i>	Geral	Avaliação dos equipamentos e componentes de SFII
(RAHMAN et al., 2013)	<i>Driving and hindering factors for rural electrification in developing countries: Lessons from Bangladesh</i>	Bangladesh	Análise dos fatores que influenciam o sucesso inicial e posterior declínio dos programas de eletrificação rural com energias renováveis
(SHYU, 2013)	<i>End-users' experiences with electricity supply from stand-alone mini-grid solar PV power stations in rural areas of western China</i>	China (Ocidental)	Análise das perspectivas dos usuários de SFI, com foco na satisfação, comportamentos e necessidades
(DÍAZ et al., 2011)	<i>Field analysis of solar PV-based collective systems for rural electrification</i>	Argentina	Estudo de sistemas fotovoltaicos coletivos
(ZILLES; LORENZO; SERPA, 2000)	<i>From candles to PV electricity: a four-year experience at Iguape–Cananéia, Brazil</i>	Brasil	Estudo de caso da eletrificação de região isolada no Brasil, destacando os fatores de sucesso
(JAVADI et al., 2013)	<i>Global policy of rural electrification</i>	Geral	Revisão de políticas globais para eletrificação de áreas rurais
(REBANE; BARHAM, 2011)	<i>Knowledge and adoption of solar home systems in rural Nicaragua</i>	Nicarágua	Investigação das características que determinam o conhecimento e adoção de SFII pela população rural
(ALZOLA et al., 2009)	<i>Microgrids project, Part 2: Design of an electrification kit with high content of renewable energy sources in Senegal</i>	Senegal	Análise da eletrificação por meio de microrredes com energias renováveis, destacando o desenvolvimento de um kit de instalação e considerações econômicas
(PALIT; CHAUREY, 2011)	<i>Off-grid rural electrification experiences from South Asia: Status and best practices</i>	Sul da Ásia	Análise comparativa de estudos de caso com o objetivo de levantar lições aprendidas e sugestões que possam melhorar o futuro da eletrificação com SFI
(GARCÍA; BARTOLOMÉ, 2010)	<i>Rural electrification systems based on renewable energy: The social dimensions of an innovative technology</i>	Geral	Análise da relação entre tecnologia e sociedade, considerando potenciais fatores de insucesso
(PALIT, 2013)	<i>Solar energy programs for rural electrification: Experiences and lessons from South Asia</i>	Sul da Ásia	Levantamento de tendências e boas práticas na aplicação de programas de eletrificação rural

TABELA 63 – RESUMO DOS 40 ARTIGOS DA REVISÃO DA LITERATURA
(CONTINUAÇÃO)

Autor	Título	Localidade	Resumo
(SOVACOOOL; D'AGOSTINO; BAMBAWALE, 2011)	<i>The socio-technical barriers to Solar Home Systems (SHS) in Papua New Guinea: "Choosing pigs, prostitutes, and poker chips over panels"</i>	Papua Nova Guine	Avaliação de barreiras técnicas, econômicas, políticas e sociais para a adoção de SFII em comunidades isoladas
(BHATTACHARYYA, 2013)	<i>To regulate or not to regulate off-grid electricity access in developing countries</i>	Geral	Análise crítica da regulação do fornecimento de energia elétrica por meio de SFI, com foco em desafios e questões regulatórias

APÊNDICE 5. RESPOSTAS DAS QUESTÕES ABERTAS

Q1 - Nível de envolvimento do usuário ou comunidade no projeto
Empresa 1: Impacto 10. Houveram reuniões para divulgação e esclarecimento de dúvidas.
Empresa 2: Impacto 8. Temos uma metodologia social que engaja os moradores durante 2 meses antes da instalação, capacitando-os como embaixadores do projeto na comunidade e engajando moradores para que montem sua própria solução solar no dia da instalação.
Empresa 3: Impacto 9. Os usuários participam ativamente de todas as etapas de implantação dos sistemas de bombeamento do Projeto, ajudando na montagem e interagindo na capacitação inicial de operação e manutenção básica.
Q2 - Dificuldades na escolha dos equipamentos para o sistema
Empresa 1: Impacto 10. Dificuldade em encontrar fabricantes nacionais, principalmente dos inversores.
Empresa 2: Impacto 3. Hoje temos uma tecnologia mais padronizada - então temos dificuldade na escolha de equipamentos apenas quando executamos melhorias ou desenvolvemos novas tecnologias. No dia a dia, utilizamos a tecnologia padronizada já, onde os componentes em geral vêm de SP e são direcionados para o Brasil inteiro.
Empresa 3: Impacto 7. Devido a dificuldades orçamentárias e melhor apropriação tecnológica resolvemos implantar, em sua maioria, equipamentos de fabricação nacional
Q3 - Dificuldade no dimensionamento dos sistemas, conforme necessidades e expectativas dos usuários
Empresa 1: Impacto 10. Devido à expectativa dos usuários e aos poucos recursos disponíveis.
Empresa 2: Impacto 5. Para o poste, a utilização em horas é fixa, pois acende e apaga automaticamente. Porém para o lampião e a iluminação interna, dimensionamos o sistema para o que seria uma utilização recomendada em horas/noite e instruímos os moradores. Em geral, tentamos mirar sempre um DoD diário de uns 25% e DoD médio de no máx. 33% para que a bateria de chumbo dure 2 mais anos.
Empresa 3: Impacto 5. Utilizamos basicamente uma configuração de sistema, dessa forma a dificuldade foi encontrar as comunidades com o perfil que o sistema.
Q4 - Dificuldade no transporte dos equipamentos
Empresa 1: Impacto 10. Houveram diversas dificuldades durante o transporte, principalmente devido à necessidade de múltiplos modais de transporte e a dinâmica climática da região.
Empresa 2: Impacto 4. Criamos certa experiência nisso e, portanto, não temos muito problema nisso - Talvez tenhamos dificuldades com o transporte das novas versões que utilizam bateria de lítio por conta das restrições específicas.
Empresa 3: Impacto 3. Pouca dificuldade, pois o sistema utilizado é composto de apenas um módulo fotovoltaico, mas as estradas vicinais de acesso as comunidades nem sempre estão em bom estado de conservação, principalmente os períodos de chuvas.
Q5 - Necessidade de conhecimento e conscientização dos usuários para o bom desempenho do sistema
Empresa 1: Impacto 10. Foram compartilhadas cartilhas de informação de eficiência energética.
Empresa 2: Impacto 8. Bem importante isso, tanto para utilização, quanto para manutenções preventivas. Por isso trabalhamos capacitando embaixadores locais (que ficam de suporte técnico local, recebem ferramentas e uma certa quantidade de material de reposição).

Empresa 3: Impacto 8. Importante, mas uma capacitação básica de operação e manutenção possibilita um bom desempenho do sistema.
Q6 – Qual (is) as principais dificuldades na realização de manutenção preventiva
Empresa 1: Falta de pessoal capacitado localmente e dificuldade de deslocamento.
Empresa 2: Garantir que cada morador e embaixador executem as instruções que foram passadas (garantir limpeza da placa, evitar que arvores cresçam a sombreiem a placa...).
Empresa 3: A distâncias até as comunidades são certamente uma das dificuldades, mas o apoio de instituições locais facilita eventuais reparos.
Q7 – Qual (is) as principais dificuldades na manutenção corretiva
Empresa 1: Falta de suporte local, utilização incorreta do usuário, danos ambientais e custo de reposição dos equipamentos.
Empresa 2: Custos de baterias de reposição - quando chegam ao final da vida útil, estes custos são relativamente altos se a comunidade não se programa para adquirir novos componentes, o equipamento pode ficar inoperante.
Empresa 3: Iguais a manutenção preventiva.
Q8 - Envolvimento do usuário na realização de manutenções básicas. Se sim, quais atividades ele realiza? Houve capacitação?
Empresa 1: Impacto Sim, na limpeza das placas fotovoltaicas, mas verificou-se que não a realizam como deveria ser.
Empresa 2: Sim, nossos embaixadores são capacitados para executar todo tipo de manutenção (principalmente manutenção corretiva), desde a fase de diagnóstico até a parte de correção. Todos os usuários são instruídos sobre manutenção preventiva.
Empresa 3: Sim houve capacitações
Q19 – Outras dificuldades
Empresa 1: Não.
Empresa 2: Não.
Empresa 3: Dificuldades burocráticas na aquisição dos equipamentos pela universidade

APÊNDICE 6. DIMENSIONAMENTO DO CONTROLADOR

O controlador é dimensionado com base na geração do PV, na tensão e corrente máximas entram no controlador e na tensão da bateria, conforme Figura 33.

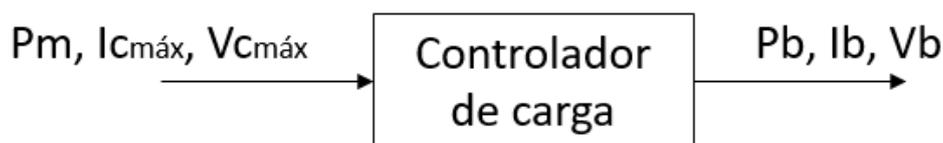


FIGURA 33 – ESQUEMÁTICO DAS ENTRADAS E SAÍDAS DO CONTROLADOR DE CARGA

FONTE: A AUTORA (2021)

Como mostra a Figura 33, do lado da entrada do controlador tem-se: P_m é a potência nominal do gerador fotovoltaico em Watts; $I_{c_{máx}}$ é a corrente máxima de curto-circuito do PV; $V_{c_{máx}}$ é a tensão de circuito aberto do PV. Do lado da saída do controlador tem-se: P_b é a potência de saída de conversão, V_b é a tensão usual do banco de baterias (12 V, 24 V ou 48 V); I_b é a corrente de saída do controlador.

A equação de conversão, de acordo com a base de dados de equipamentos, possui uma eficiência de 87% (Tabela 62), conforme equação (37).

$$P_m = 1,15 \cdot P_b \quad (37)$$

CEPEL (2014), apresenta o dimensionamento em quatro passos. Primeiro deve-se calcular os painéis em série e em paralelo, conforme equações (38) e (39).

$$N^{\circ}módulos_{série} = 1,15 \cdot \frac{V_b}{V_{mp}} \quad (38)$$

$$N^{\circ}módulos_{paralelo} = \frac{P_m}{I_{mp} \cdot (N^{\circ}módulos_{série} \cdot V_{mp})} \quad (39)$$

Onde, P_m é a potência média do PV, V_{mp} é a tensão do PV no ponto de máxima potência e I_{mp} a corrente no mesmo ponto.

Em seguida, calcula-se a corrente máxima do controlador, considerando um fator mínimo de segurança de 25%, conforme equação (40).

$$I_c = 1,25 \cdot N^{\circ}módulos_{paralelo} \cdot I_{c_{máx}} \quad (40)$$

A tensão máxima do controlador deve ser capaz de suportar a tensão de circuito aberto ($V_{c_{máx}}$) do PV, conforme equação (41)

$$V_c > N^{\circ}módulos_{série} \cdot V_{c_{máx}} \quad (41)$$

Por fim, a corrente de saída do controlador é dada pela (42)

$$I_b = \frac{0,87 \cdot P_m}{V_b} \quad (42)$$

APÊNDICE 6.1. Resultados do dimensionamento do controlador

Para o dimensionamento foram consideradas os valores usuais para a tensão de saída do controlador (12 V, 24 V e 48 V) e os dados do PV estão na Tabela 64.

TABELA 64 – DADOS DO PAINEL FOTOVOLTAICO PARA DIMENSIONAMENTO DO CONTROLADOR

	PV 90 W	PV 220 W	PV 350
Tensão operacional (V_{mp})	18,30	32,75	37,29
Corrente operacional (I_{mp})	5,00	6,79	8,50
Tensão de circuito aberto (V_{oc})	21,70	40,80	45,47
Corrente de curto-circuito (I_{sc})	5,51	7,040	9,40

FONTE: A AUTORA (2021)

Para os resultados finais, calculou-se os parâmetros máximos de cada tamanho de sistema de acordo com a tecnologia de bateria e adotou-se os valores comerciais disponíveis. Os resultados estão na Tabela 65.

TABELA 65 – RESULTADO DO DIMENSIONAMENTO DO CONTROLADOR DE CARGA

			Sistemas com bateria OPzS			Sistemas com bateria Lítio			
			45 kWh/mês	60 kWh/mês	80 kWh/mês	45 kWh/mês	60 kWh/mês	80 kWh/mês	
	Corrente de carga nominal [A]	12 V 24 V 48 V	100 50 25	120 60 30	170 90 45	45 25 15	75 40 20	135 70 35	
	PV 90 W	Máx. corrente de curto circuito [A]	12 V 24 V 48 V	100 50 30	125 65 30	170 90 40	50 25 15	80 40 25	140 70 35
		Tensão máx. de circuito aberto [V]	12 V 24 V 48 V	25 45 90	25 45 90	25 45 90	25 45 90	25 45 90	25 45 90
PV 220 W		Máx. corrente de curto circuito [A]	12 V 24 V 48 V	60 60 30	65 65 35	90 90 45	30 30 10	45 45 20	70 70 35
	Tensão máx. de circuito aberto [V]	12 V 24 V 48 V	45 45 90	45 45 90	45 45 90	45 45 90	45 45 90	45 45 90	
	PV 350 W	Máx. corrente de curto circuito [A]	12 V 24 V 48 V	50 50 25	60 60 35	90 90 50	25 25 15	35 35 25	70 70 35
Tensão máx. de circuito aberto [V]		12 V 24 V 48 V	45 45 100	45 45 100	45 45 100	45 45 100	45 45 100	45 45 100	

FONTE: A AUTORA (2021)

Como mostra a Tabela 65, os parâmetros de tensão e corrente do controlador se alteram de acordo com a potência unitária do PV e do gerador fotovoltaico, sendo que a segunda varia conforme dimensionamento do sistema e tecnologia de bateria.

A partir das potências do PV e do gerador é possível determinar o arranjo dos painéis de modo que atenda a tensão do banco de baterias. De acordo com

o arranjo, que é estabelecido pelas equações (38) e (39), os parâmetros de saída do gerador é alterado, impactando diretamente no dimensionado do controlador.

Com relação a potência do controlador de carga, ela é dada pela multiplicação da tensão operacional (12 V, 24 V ou 48 V) e a máxima corrente de curto-circuito.

APÊNDICE 7. RESULTADO DO DIMENSIONAMENTO POR CIDADE SIMULADA

TABELA 66 – RESULTADOS DA SIMULAÇÃO PARA SISTEMAS DE 45 KWH/MÊS

	Bateria OPzS			Bateria Lítio		
	PV [kW]	Bateria [kWh]	Inversor [kW]	PV [kW]	Bateria [kWh]	Inversor [kW]
Amazônia						
Uiramutã	0,574	6,5	0,7	0,469	4,8	0,7
Marechal Thaumaturgo	0,859	6,5	0,7	0,755	4,8	0,7
Melgaço	0,885	6,5	0,7	0,781	4,8	0,7
Cerrado						
Cavalcante	0,677	6,5	0,7	0,599	4,8	0,7
Campinópolis	0,677	6,5	0,7	0,599	4,8	0,7
Recursolândia	0,781	6,5	0,7	0,677	4,8	0,7
Caatinga						
Dom Inocêncio	0,599	6,5	0,7	0,534	4,8	0,7
Domingos Mourão	0,573	6,5	0,7	0,495	4,8	0,7
Lajedinho	0,521	6,5	0,7	0,469	4,8	0,7
Pantanal						
Corumbá	0,604	6,5	0,7	0,547	4,8	0,7
Barão de Melgaço	0,599	6,5	0,7	0,521	4,8	0,7
Porto Murtinho	0,625	6,5	0,7	0,534	4,8	0,7
Mata Atlântica						
Jucuruçu	0,729	6,5	0,7	0,614	4,8	0,7
Paranhos	0,677	6,5	0,7	0,547	4,8	0,7
Barra do Turvo	0,833	6,5	0,7	0,729	4,8	0,7
Pampas						
Itacurubi	0,781	6,5	0,7	0,677	4,8	0,7
Santa Margarida do Sul	0,859	6,5	0,7	0,729	4,8	0,7

TABELA 66 – RESULTADOS DA SIMULAÇÃO PARA SISTEMAS DE 45 KWH/MÊS (CONTINUAÇÃO)

	Bateria OPzS			Bateria Lítio		
	PV [kW]	Bateria [kWh]	Inversor [kW]	PV [kW]	Bateria [kWh]	Inversor [kW]
Amaral Ferrador	0,938	6,5	0,7	0,755	4,8	0,7

FONTE: A AUTORA (2021)

TABELA 67 – RESULTADOS DA SIMULAÇÃO PARA SISTEMAS DE 60 KWH/MÊS

	Bateria OPzS			Bateria Lítio		
	PV [kW]	Bateria [kWh]	Inversor [kW]	PV [kW]	Bateria [kWh]	Inversor [kW]
Amazônia						
Uiramutã	0,755	8,5	1	0,599	7,2	1
Marechal Thaumaturgo	1,17	8,5	1	0,938	7,2	1
Melgaço	1,2	8,5	1	0,964	7,2	1
Cerrado						
Cavalcante	0,898	8,5	1	0,755	7,2	1
Campinópolis	0,898	8,5	1	0,729	7,2	1
Recursolândia	1,04	8,5	1	0,833	7,2	1
Caatinga						
Dom Inocêncio	0,833	8,5	1	0,677	7,2	1
Domingos Mourão	0,755	8,5	1	0,603	7,2	1
Lajedinho	0,677	8,5	1	0,573	7,2	1
Pantanal						
Corumbá	0,833	8,5	1	0,677	7,2	1
Barão de Melgaço	0,781	8,5	1	0,677	7,2	1
Porto Murtinho	0,859	8,5	1	0,677	7,2	1

TABELA 67 – RESULTADOS DA SIMULAÇÃO PARA SISTEMAS DE 60 KWH/MÊS (CONTINUAÇÃO)

	Bateria OPzS			Bateria Lítio		
	PV [kW]	Bateria [kWh]	Inversor [kW]	PV [kW]	Bateria [kWh]	Inversor [kW]
Mata Atlântica						
Jucuruçu	0,99	8,5	1	0,729	7,2	1
Paranhos	0,885	8,5	1	0,677	7,2	1
Barra do Turvo	1,08	8,5	1	0,846	7,2	1
Pampas						
Itacurubi	1,05	8,5	1	0,755	7,2	1
Santa Margarida do Sul	1,17	8,5	1	0,833	7,2	1
Amaral Ferrador	1,25	8,5	1	0,859	7,2	1

FONTE: A AUTORA (2021)

TABELA 68 – RESULTADOS DA SIMULAÇÃO PARA SISTEMAS DE 80 KWH/MÊS

	Bateria OPzS			Bateria Lítio		
	PV [kW]	Bateria [kWh]	Inversor [kW]	PV [kW]	Bateria [kWh]	Inversor [kW]
Amazônia						
Uiramutã	1,02	11	1,2	0,964	7,2	1,2
Marechal Thaumaturgo	1,62	11	1,2	1,48	7,2	1,2
Melgaço	1,61	11	1,2	1,51	7,2	1,2
Cerrado						
Cavalcante	1,24	11	1,2	1,17	7,2	1,2
Campinópolis	1,25	11	1,2	1,17	7,2	1,2
Recursolândia	1,46	11	1,2	1,33	7,2	1,2
Caatinga						

TABELA 68 – RESULTADOS DA SIMULAÇÃO PARA SISTEMAS DE 80 KWH/MÊS (CONTINUAÇÃO)

	Bateria OPzS			Bateria Lítio		
	PV [kW]	Bateria [kWh]	Inversor [kW]	PV [kW]	Bateria [kWh]	Inversor [kW]
Dom Inocêncio	1,12	11	1,2	1,04	7,2	1,2
Domingos Mourão	1,04	11	1,2	0,964	7,2	1,2
Lajedinho	0,964	11	1,2	0,885	7,2	1,2
Pantanal						
Corumbá	1,17	11	1,2	1,07	7,2	1,2
Barão de Melgaço	1,09	11	1,2	1,02	7,2	1,2
Porto Murtinho	1,23	11	1,2	1,33	7,2	1,2
Mata Atlântica						
Jucuruçu	1,22	11	1,2	1,15	7,2	1,2
Paranhos	1,23	11	1,2	1,17	7,2	1,2
Barra do Turvo	1,51	11	1,2	1,38	7,2	1,2
Pampas						
Itacurubi	1,5	11	1,2	1,39	7,2	1,2
Santa Margarida do Sul	1,66	11	1,2	1,56	7,2	1,2
Amaral Ferrador	1,98	11	1,2	1,85	7,2	1,2

FONTE: A AUTORA (2021)

TABELA 69 – RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES DE MANUTENÇÃO PARA 10 SISTEMAS (CONTINUAÇÃO)

Distância externa	Distância interna	Dificuldade de acesso	Sem participação do usuário			Com participação do usuário		
			M1 [R\$]	M2 [R\$]	M3 [R\$]	M1 [R\$]	M2 [R\$]	M3 [R\$]
100	10	Médio	1170,98	1229,11	3122,85	903,20	1228,85	3000,18
100	10	Fácil	1115,82	880,09	921,81	760,10	664,08	799,58
100	20	Fácil	2135,28	1039,65	884,97	1204,39	720,57	699,68
100	20	Médio	2330,75	2358,59	3443,77	2209,55	1334,67	3300,49
100	20	Difícil	2289,39	1651,64	1243,17	2168,18	984,25	1086,64
100	30	Fácil	Inviável	2128,30	1574,69	Inviável	1490,15	1205,39
100	30	Médio	Inviável	2235,30	1849,76	Inviável	1779,56	1453,19
100	30	Difícil	Inviável	2615,99	3995,81	Inviável	2491,19	3653,79
100	40	Difícil	Inviável	4955,04	4731,86	Inviável	4955,04	4610,66
100	40	Médio	Inviável	3652,65	2585,81	Inviável	3652,65	2464,61
100	40	Fácil	Inviável	3520,22	2310,74	Inviável	3520,22	2189,54
100	50	Fácil	Inviável	Inviável	Inviável	Inviável	3572,22	2336,75
100	50	Médio	Inviável	Inviável	Inviável	Inviável	3704,65	2611,82
100	60	Fácil	643,73	1125,11	3079,08	472,60	1124,59	2955,23
100	60	Médio	558,62	838,49	919,29	397,46	432,72	796,24
100	70	Fácil	1398,26	1253,03	1056,18	894,68	982,45	934,98
100	80	Fácil	1711,34	2303,99	3855,02	1590,14	2254,59	3535,20
100	90	Fácil	1927,90	1915,10	1745,52	1806,70	1915,10	1624,32
100	100	Fácil	Inviável	4435,04	4384,66	Inviável	2407,99	4263,46
100	110	Fácil	Inviável	Inviável	Inviável	Inviável	Inviável	Inviável
100	120	Fácil	936,73	1177,11	3105,08	716,98	1176,85	2981,23
100	130	Fácil	1891,28	1572,60	1303,98	1770,07	1154,71	1182,78
150	1	Fácil	1884,38	1286,83	1058,78	1763,18	1011,05	937,58
150	1	Médio	Inviável	2381,99	3881,02	2076,26	2306,59	3561,20
150	1	Difícil	Inviável	2022,10	1755,77	2034,90	1615,24	1381,40
150	10	Médio	1124,64	880,20	929,69	767,98	664,08	806,64
150	10	Fácil	1124,64	873,33	654,62	761,08	549,33	531,56
150	10	Difícil	2112,58	1146,91	1110,57	1991,37	912,49	968,18
150	20	Difícil	2153,95	1264,47	3311,16	2032,74	1261,87	3176,72
150	20	Médio	Inviável	2314,39	3509,78	2297,57	2314,39	3388,58
150	20	Fácil	Inviável	1609,00	1309,18	2256,20	1609,00	1187,98
150	30	Fácil	Inviável	4643,04	4436,66	Inviável	4643,04	4315,46
150	30	Médio	Inviável	3340,65	2290,62	Inviável	3340,65	2169,41
150	30	Difícil	Inviável	3208,22	2015,54	Inviável	3208,22	1894,34
150	40	Difícil	904,33	943,45	944,63	783,13	864,25	765,68
150	40	Fácil	1630,43	1811,10	1448,04	1509,22	1811,10	1326,84
150	40	Médio	Inviável	4331,04	4203,27	Inviável	2303,99	4082,07
150	50	Médio	Inviável	3059,85	2098,83	Inviável	1964,90	1977,62
150	50	Fácil	Inviável	2927,42	1828,95	Inviável	1863,10	1707,75

TABELA 69 – RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES DE MANUTENÇÃO PARA 10 SISTEMAS (CONTINUAÇÃO)

Distância externa	Distância interna	Dificuldade de acesso	Sem participação do usuário			Com participação do usuário		
			M1 [R\$]	M2 [R\$]	M3 [R\$]	M1 [R\$]	M2 [R\$]	M3 [R\$]
150	60	Médio	Inviável	2329,99	3848,37	2043,61	2329,99	3727,16
150	60	Fácil	Inviável	1865,70	1450,64	1995,35	1865,70	1329,44
150	70	Fácil	Inviável	4435,04	4229,27	Inviável	4435,04	4108,07

FONTE: A AUTORA (2021)

TABELA 70 – RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES DE MANUTENÇÃO PARA 50 SISTEMAS

Distância externa	Distância interna	Dificuldade de acesso	Sem participação do usuário			Com participação do usuário		
			M1 [R\$]	M2 [R\$]	M3 [R\$]	M1 [R\$]	M2 [R\$]	M3 [R\$]
50	1	Difícil	784,22	1157,87	3163,59	551,07	1155,27	3035,03
50	1	Médio	729,06	869,85	1000,18	473,52	662,46	873,09
50	1	Fácil	729,06	760,30	730,31	461,03	555,26	602,48
50	10	Fácil	1505,71	1277,47	3502,18	994,24	1277,47	3380,98
50	10	Médio	1464,35	1201,51	1343,18	939,08	1201,51	1221,98
50	10	Difícil	1457,45	1060,45	1100,58	939,08	1060,45	979,38
50	20	Difícil	1899,08	2071,10	1716,70	1777,88	2071,10	1595,49
50	20	Médio	1905,98	2172,90	1986,57	1784,77	2172,90	1865,37
50	20	Fácil	1947,35	2511,99	4091,02	1826,14	2511,99	3969,82
50	30	Fácil	Inviável	2667,99	4532,65	2267,77	2667,99	4411,45
50	30	Médio	Inviável	2328,90	2428,20	2226,41	2328,90	2307,00
50	30	Difícil	Inviável	2227,10	2158,33	2219,51	2227,10	2037,13
50	40	Médio	Inviável	Inviável	Inviável	Inviável	Inviável	Inviável
50	40	Fácil	Inviável	Inviável	Inviável	Inviável	Inviável	Inviável
50	50	Médio	1656,05	1154,71	1127,57	961,33	711,86	971,03
50	50	Fácil	1649,16	1011,05	882,37	961,33	704,97	697,08
50	60	Médio	1943,58	1371,59	1103,18	1822,37	1089,05	981,98
50	60	Fácil	2139,05	2394,99	3638,59	2017,85	1368,47	3517,38
50	70	Fácil	2286,26	2537,99	3969,81	2165,06	2439,19	3627,79
50	80	Fácil	Inviável	2125,70	1719,30	2264,00	2125,70	1598,09
50	90	Fácil	Inviável	2641,99	4264,23	Inviável	2641,99	4143,03
50	100	Fácil	Inviável	2229,70	2013,72	Inviável	2229,70	1892,52
50	110	Fácil	Inviável	4799,04	4558,65	Inviável	2745,99	4437,45
50	120	Fácil	Inviável	3431,82	2308,14	Inviável	3431,82	2186,94
50	130	Fácil	Inviável	Inviável	Inviável	Inviável	4903,04	4731,87
100	10	Fácil	1115,82	765,34	646,74	753,20	549,33	524,50
100	10	Médio	1988,07	905,85	735,51	1093,98	687,29	607,68
100	10	Difícil	2036,33	1261,87	3215,59	1149,14	1259,27	3087,03
100	20	Difícil	2282,49	1363,01	995,37	2161,29	978,13	811,56
100	20	Médio	2436,60	1694,28	1353,58	2315,39	1263,91	1232,38
100	20	Fácil	2477,96	2402,79	3554,18	2356,76	1381,47	3432,98
100	30	Difícil	Inviável	2667,99	4143,02	Inviável	2667,99	4021,82
100	30	Médio	Inviável	2287,30	1996,97	Inviável	2287,30	1875,77

TABELA 70 – RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES DE MANUTENÇÃO PARA 50 SISTEMAS (CONTINUAÇÃO)

Distância externa	Distância interna	Dificuldade de acesso	Sem participação do usuário			Com participação do usuário		
			M1 [R\$]	M2 [R\$]	M3 [R\$]	M1 [R\$]	M2 [R\$]	M3 [R\$]
100	30	Fácil	Inviável	2180,30	1721,90	Inviável	2180,30	1600,69
100	40	Fácil	Inviável	3468,22	2163,53	Inviável	3468,22	2042,33
100	40	Médio	Inviável	3600,65	2438,60	Inviável	3600,65	2317,40
100	40	Difícil	Inviável	4903,04	4584,65	Inviável	4903,04	4463,45
100	50	Médio	Inviável	Inviável	Inviável	Inviável	5007,04	4757,87
100	50	Fácil	Inviável	Inviável	Inviável	Inviável	Inviável	Inviável
100	60	Médio	551,72	728,94	649,42	385,57	423,22	526,36
100	60	Fácil	817,27	1084,51	1100,17	597,10	869,85	957,78
100	70	Fácil	1405,15	1536,20	1298,78	894,68	1123,51	1177,58
100	80	Fácil	1669,97	1964,90	1750,57	1548,77	1578,84	1376,20
100	90	Fácil	1934,80	2016,90	2015,39	1813,59	2016,90	1894,19
100	100	Fácil	Inviável	3163,85	2280,22	Inviável	2068,90	2159,01
100	110	Fácil	Inviável	Inviável	Inviável	Inviável	Inviável	Inviável
100	120	Fácil	1667,82	1212,47	3285,16	994,29	1209,87	3150,72
100	130	Fácil	1932,64	2262,39	3483,78	1811,44	1251,47	3362,58
150	1	Difícil	Inviável	1917,70	1483,29	2028,00	1329,21	1136,20
150	1	Médio	Inviável	1969,70	1748,12	Inviável	1969,70	1626,92
150	1	Fácil	Inviável	2074,10	2020,59	Inviável	2074,10	1899,39
150	10	Difícil	Inviável	Inviável	Inviável	Inviável	Inviável	Inviável
150	10	Médio	1179,80	1229,11	3131,08	911,43	1228,85	3007,23
150	10	Fácil	2105,68	1000,65	862,77	1984,48	905,85	693,10
150	20	Fácil	Inviável	1320,63	1061,38	2249,30	1320,63	940,18
150	20	Médio	Inviável	2459,99	3907,02	Inviável	2358,59	3587,20
150	20	Difícil	Inviável	2079,30	1760,97	Inviável	1651,64	1386,60
150	30	Difícil	Inviável	Inviável	Inviável	Inviável	Inviável	Inviável
150	30	Médio	Inviável	Inviável	Inviável	Inviável	Inviável	Inviável
150	30	Fácil	Inviável	Inviável	Inviável	Inviável	Inviável	Inviável
150	40	Difícil	904,33	1084,51	1187,23	783,13	870,89	1035,56
150	40	Médio	1678,69	2251,99	3822,37	1557,49	2251,99	3701,16
150	40	Fácil	1637,32	1912,90	1717,92	1516,12	1912,90	1596,71
150	50	Fácil	Inviável	Inviável	Inviável	Inviável	Inviável	Inviável
150	50	Médio	Inviável	Inviável	Inviável	Inviável	Inviável	Inviável
150	60	Médio	1735,64	972,05	947,23	1026,19	885,05	768,28
150	60	Fácil	Inviável	1970,10	1723,12	2002,24	1970,10	1601,91
150	70	Fácil	Inviável	3148,25	2104,03	Inviável	3148,25	1982,82
150	80	Fácil	Inviável	Inviável	Inviável	Inviável	Inviável	Inviável
150	90	Fácil	1885,84	880,20	937,47	1012,14	664,08	813,60
150	100	Fácil	2228,66	1566,36	1197,63	2107,46	912,49	1045,96
150	110	Fácil	Inviável	2027,30	1728,32	Inviável	2027,30	1607,11
150	120	Fácil	Inviável	3236,65	2109,23	Inviável	3236,65	1988,02

FONTE: A AUTORA (2021)

TABELA 71 – RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES DE MANUTENÇÃO PARA 100 SISTEMAS

Distância externa	Distância interna	Dificuldade de acesso	Sem participação do usuário			Com participação do usuário		
			M1	M2	M3	M1	M2	M3
50	1	Fácil	894,63	1199,47	3281,36	710,09	1189,07	3130,72
50	1	Médio	839,47	1123,51	1122,37	616,93	696,26	965,83
50	1	Difícil	839,47	982,45	879,77	610,04	689,37	694,48
50	10	Difícil	1652,92	2342,99	3612,59	1104,65	1316,47	3491,38
50	10	Médio	1611,56	1664,12	1453,59	1049,49	1240,51	1332,39
50	10	Fácil	1604,66	1380,17	1210,99	1049,49	1099,45	1089,79
50	20	Fácil	2094,56	2563,99	4238,23	1973,35	2563,99	4117,03
50	20	Médio	2053,19	2224,90	2133,78	1931,99	2224,90	2012,58
50	20	Difícil	2046,29	2123,10	1863,91	1925,09	2123,10	1742,71
50	30	Difícil	Inviável	3343,42	2305,54	Inviável	2279,10	2184,34
50	30	Médio	Inviável	3475,85	2575,41	Inviável	2380,90	2454,21
50	30	Fácil	Inviável	4747,04	4679,86	Inviável	2719,99	4558,66
50	40	Difícil	927,91	1177,11	3096,85	610,79	1176,85	2974,18
50	40	Médio	1027,28	1209,87	3189,59	801,49	1207,27	3061,03
50	40	Fácil	972,12	891,69	1005,38	683,58	678,06	878,29
50	50	Fácil	1844,63	1290,47	3417,77	1126,89	1282,67	3274,49
50	50	Médio	1803,26	1193,71	1237,97	1071,74	963,45	1081,44
50	60	Médio	1796,37	1050,05	992,77	1071,74	957,33	808,96
50	60	Fácil	2097,68	1700,52	1458,79	1976,48	1271,71	1337,59
50	70	Fácil	2090,79	1413,97	1213,59	1969,58	1128,05	1092,39
50	80	Fácil	Inviável	2230,10	1991,77	2270,90	2230,10	1870,57
50	90	Fácil	Inviável	2589,99	4117,02	2312,27	2589,99	3995,82
50	100	Fácil	Inviável	2334,10	2286,19	Inviável	2334,10	2164,99
50	110	Fácil	Inviável	2693,99	4411,44	Inviável	2693,99	4290,24
50	120	Fácil	Inviável	3564,25	2580,61	Inviável	3564,25	2459,41
50	130	Fácil	Inviável	Inviável	Inviável	Inviável	3616,25	2606,62
100	10	Difícil	1994,96	912,49	1010,58	1093,98	694,18	883,49
100	10	Médio	2183,54	1303,47	3333,36	1259,55	1293,07	3182,72
100	10	Fácil	2142,17	1185,91	1132,77	1204,39	727,46	976,23
100	20	Fácil	Inviável	2446,99	3664,59	2503,97	2446,99	3543,38
100	20	Médio	Inviável	1736,92	1463,99	2462,60	1736,92	1342,79
100	20	Difícil	Inviável	1447,77	1216,19	2455,71	1447,77	1094,99
100	30	Fácil	Inviável	3364,22	1869,11	Inviável	2232,30	1747,91
100	30	Médio	Inviável	3496,65	2144,18	Inviável	2339,30	2022,98
100	30	Difícil	Inviável	4799,04	4290,23	Inviável	2719,99	4169,03
100	40	Difícil	Inviável	4851,04	4437,44	Inviável	2771,99	4316,24
100	40	Médio	Inviável	3548,65	2291,39	Inviável	2391,30	2170,19
100	40	Fácil	Inviável	3416,22	2016,32	Inviável	2284,30	1895,12
100	50	Fácil	Inviável	Inviável	Inviável	Inviável	Inviável	Inviável
100	50	Médio	Inviável	Inviável	Inviável	Inviável	Inviável	Inviável
100	60	Médio	872,43	1160,47	3259,16	689,37	1157,87	3124,72
100	60	Fácil	817,27	943,45	857,57	590,21	760,30	687,90

TABELA 71 – RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES DE MANUTENÇÃO PARA 100 SISTEMAS (CONTINUAÇÃO)

Distância externa	Distância interna	Dificuldade de acesso	Sem participação do usuário			Com participação do usuário		
			M1	M2	M3	M1	M2	M3
100	70	Fácil	1446,52	2210,39	3457,78	949,84	1199,47	3336,58
100	80	Fácil	1663,08	1863,10	1480,69	1541,88	1295,41	1133,60
100	90	Fácil	1976,17	2355,99	4119,84	1854,96	2355,99	3998,64
100	100	Fácil	Inviável	3031,42	2010,34	Inviável	1967,10	1889,14
100	110	Fácil	Inviável	Inviável	Inviável	Inviável	Inviável	Inviável
100	120	Fácil	1626,45	1115,71	1105,37	939,13	890,65	962,98
100	130	Fácil	1619,56	972,05	860,17	939,13	778,50	690,50
150	1	Fácil	Inviável	2433,99	4145,84	Inviável	2433,99	4024,64
150	1	Médio	Inviável	4539,04	4410,66	Inviável	4539,04	4289,46
150	1	Difícil	Inviável	3252,25	2285,42	Inviável	3252,25	2164,21
150	10	Fácil	Inviável	3119,82	2012,94	Inviável	3119,82	1891,74
150	10	Médio	Inviável	Inviável	Inviável	Inviável	Inviável	Inviável
150	10	Difícil	Inviável	Inviável	Inviável	Inviável	Inviável	Inviável
150	20	Difícil	Inviável	1972,30	1485,89	Inviável	1363,01	1138,80
150	20	Médio	Inviável	3288,65	2025,79	Inviável	2131,30	1904,59
150	20	Fácil	Inviável	4591,04	4171,84	Inviável	2511,99	4050,64
150	30	Fácil	651,86	1125,11	3087,21	480,14	1124,59	2962,20
150	30	Médio	566,39	838,49	927,07	404,78	432,72	803,20
150	30	Difícil	559,50	728,94	657,20	392,83	423,22	533,33
150	40	Difícil	959,49	1160,47	3346,23	838,29	1157,87	3205,98
150	50	Médio	Inviável	Inviável	Inviável	Inviável	Inviável	Inviável
150	50	Fácil	945,44	1177,11	3113,21	725,11	1176,85	2988,20
150	60	Fácil	1783,91	1212,47	3372,23	1081,35	1209,87	3231,98
150	60	Médio	1742,54	1115,71	1192,43	1026,19	891,69	1040,76
150	70	Fácil	Inviável	3015,82	1831,55	Inviável	3015,82	1710,35
150	80	Fácil	Inviável	Inviável	Inviável	Inviável	Inviável	Inviável
150	90	Fácil	1878,95	873,33	662,40	1012,14	549,33	538,53
150	100	Fácil	2221,77	1278,25	949,83	2100,57	905,85	770,88
150	110	Fácil	Inviável	1920,30	1453,24	Inviável	1920,30	1332,04
150	120	Fácil	Inviável	4539,04	4255,27	Inviável	4539,04	4134,07
150	130	Fácil	Inviável	Inviável	Inviável	Inviável	Inviável	Inviável

FONTE: A AUTORA (2021)