

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

VERÓNICA ANASTÂNCIA RAFAEL WAMUSSE

OTIMIZAÇÃO DE SISTEMAS ISOLADOS PARA ELETRIFICAÇÃO RURAL
CONSIDERANDO A PROBABILIDADE DE PERDA DE CARGA

CURITIBA

2019

VERÓNICA ANASTÂNCIA RAFAEL WAMUSSE

OTIMIZAÇÃO DE SISTEMAS ISOLADOS PARA ELETRIFICAÇÃO RURAL
CONSIDERANDO A PROBABILIDADE DE PERDA DE CARGA

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

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

CURITIBA

2019

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

- W243o Wamusse, Verónica Anastância Rafael
Otimização de sistemas isolados para eletrificação rural
considerando a probabilidade de perda de carga [recurso eletrônico] /
Verónica Anastância Rafael Wamusse – Curitiba, 2019.
- Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia,
Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica.
Orientador: Prof. Dr. Alexandre Rasi Aoki
Coorientador: Dr. Cresencio Silvio Segura Salas
1. Eletrificação rural. 2. Energia elétrica – Otimização. I.
Universidade Federal do Paraná. II. Aoki, Alexandre Rasi. III. Segura
Salas, Cresencio Silvio. IV. Título.

CDD: 621.31

Bibliotecária: Roseny Rivelini Morciani CRB-9/1585



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR DE TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO ENGENHARIA
ELÉTRICA - 40001016043P4

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ENGENHARIA ELÉTRICA da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da dissertação de Mestrado de **VERÔNICA ANASTÂNCIA RAFAEL WAMUSSE** intitulada: **OTIMIZAÇÃO DE SISTEMAS ISOLADOS PARA ELETRIFICAÇÃO RURAL CONSIDERANDO A PROBABILIDADE DE PERDA DE CARGA**, sob orientação do Prof. Dr. ALEXANDRE RASI AOKI, que após terem inquirido a aluna e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua **APROVAÇÃO** no rito de defesa. A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 13 de Dezembro de 2019.

ALEXANDRE RASI AOKI

Presidente da Banca Examinadora (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

JAIR URBANETZ JUNIOR

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ)

CLODOMIRO UNSIHUAY-VILA

Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

THELMA SOLANGE PIAZZA FERNANDES

Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais Adozinda Leonor Xerinda e Rafael Mário Mussá Wamusse,

Às minhas Princesas, Anáisa Brianca Guambe e Shelsya Naazlly Manjate,

Ao meu sobrinho Abson Brighton Wamusse,

Aos meus irmãos Neíma Antonieta Wamusse e Mário Paulo Wamusse,

Aos meus cunhados, em especial Ainda Telma Mahagane e Jafar Correia,

À minha sogra Maria Felicidade Zucula,

À paixão da minha vida, Maurício Manjate,

A todos amigos e familiares,

Pelo amor, carinho e compreensão.

Porque dele, e por Ele, e para Ele são todas as coisas, A Ele seja a glória para sempre! Amém.

(Romanos 11:36)

AGRADECIMENTOS

É sempre um motivo de alegria terminar um trabalho que teve um começo difícil, mas que com o cuidado e o amor de Deus, se tornou uma realidade. Tal fato deveu-se à intervenção de individualidades que desde já expressei a minha gratidão em particular:

- ✓ Prof. Dr. Alexandre Rasi Aoki (Universidade Federal do Paraná); e
- ✓ Dr. Cresencio Silvio Segura Salas (Lactec).

Pela orientação, dedicação, competência, acompanhamento, paciência no esclarecimento de dúvidas relacionadas aos diversos aspectos técnicos de Engenharia.

Os agradecimentos são também extensivos ao Lactec pelo apoio técnico e financeiro e a todos os Professores da Universidade Federal do Paraná, especialmente, aos do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, do Departamento de Engenharia Elétrica, pelas disciplinas ministradas e pela partilha do conhecimento que com certeza serão muito úteis para o desenvolvimento acadêmico no meu País, ao Dr. Eduardo Kazumi Yamakawa, Profa. Dra. Thelma Solange Piazza Fernandes, Profa. Dra. Elizete Maria Lourenço, Prof. Dr. Odilon Luís Tortelli e ao Prof. Dr. Evelio Martín García Fernández.

Agradeço a todos os colegas de turma e Laboratório de Pesquisa em Sistemas de Energia da Universidade Federal do Paraná e do Lactec, pelo apoio, companheirismo e ensinamentos, Patrícia Monteiro Barbosa de Freitas, Rodrigo Alves Moraes, Henrique Degraf, Juliana D'Ângela Mariano e Erico Gurski, especialmente aos coautores do artigo desta Dissertação, Leonel João Muthemba, Thaís Marzalek Blasi, Gilmar Edson Schewtschik Filho, Gabriela Rosalee Weigert, Jefferson Augusto Cardozo Matias.

Quero agradecer em especial, ao governo de Moçambique em nome da instituição na qual sou funcionária, o Instituto Superior Politécnico do Songo pela permissão para continuação de estudos e pelo apoio financeiro.

Expresso o meu muito obrigado aos meus pais, tios, irmãos, primos, esposo, cunhados e aos pastores e pastoras por serem mãe e pai para minha filha, que tão pequena apreendeu a abrir mão da minha presença pela realização de mais que um sonho, mas para aprender e ensinar, contribuindo para o desenvolvimento do país.

A todos os amigos, conterrâneos e compatriotas, agradeço pela amizade, convívios, e apoio incondicional, especialmente ao Idalécio Pascoal Joaquim, Caisse Amisse, Nocy Bila, Vitor Nypwipwy, Evaristo Nhassengo, Gisela Bettencourt, Marcelino Lourenco Xavier, Mateus Manharage, André Moiane, Jaime Macuácuá, Sr. Johane, Ambrósio Ananias e Jucélia, Dona Hili e Sr. Amâncio, Juscelino, Juliano, Paula Cristina dos Santos Ávila, Pastor Pedroso e Pastora Sandra Del, irmão Gilson, Pastor Leandro, à todos irmãos e irmãs em Cristo, foram para mim mais que uma família.

*Por que estás abatida, ó minha alma?
Por que te perturbas dentro mim?
Espera em Deus, pois ainda o
louvarei, a Ele meu auxílio e Deus
meu.*

*Alegrai-vos na esperança, sede
pacientes na tribulação, perseverai
na oração e tenham fé.*

(Salmos 42:11, Romanos 12:12)

RESUMO

A eletrificação rural é de extrema importância, visto que a energia elétrica representa fator dinamizador dos diferentes setores de atividade socioeconômica e industrial de qualquer unidade territorial de um país. Atualmente, a implantação de energias novas e renováveis, como a fotovoltaica, por exemplo, tem se mostrado viável no meio rural, pois é uma das melhores fontes de energia renovável com menos impactos negativos ao meio ambiente. Este trabalho, apresenta um modelo de otimização para dimensionamento de sistemas isolados para eletrificação rural com o objetivo de minimizar a área do sistema fotovoltaico (FV), a quantidade de baterias, o custo do sistema e o LOLP (*Loss of Load Probability*), aplicando a técnica de Algoritmos Genéticos para determinar a melhor configuração do sistema. A metodologia de estudo compreendeu o dimensionamento do sistema fotovoltaico pelo método do mês mais crítico, assim como o banco de baterias para o sistema de armazenamento de energia em razão de a fonte solar ser de natureza intermitente. Foram também dimensionados os dispositivos de condicionamento de potência, o inversor e o controlador de carga. O modelo matemático desenvolvido foi implementado na ferramenta computacional MATLAB[®], testado no âmbito do Projeto Pantanal, da Energisa Mato Grosso do Sul, o qual contempla o atendimento de quase duas mil localidades sem eletrificação no Pantanal Sul-mato-grossense. O índice LOLP foi usado para medir a confiabilidade do sistema por meio da análise de sensibilidade sobre o comportamento do sistema com o aumento da carga ao longo do tempo. Esse aspecto é crítico em sistemas fotovoltaicos instalados e em operação no Brasil, onde o crescimento de carga não planejado compromete o CAPEX (*Capital Expenditure*) e OPEX (*Operational Expenditure*) dos projetos. De acordo com os resultados obtidos, houve uma redução da área do painel que contribui para a diminuição da energia excedente, da quantidade de baterias para o sistema de armazenamento de energia, do LOLP e conseqüente do custo total do sistema. Conclui-se neste trabalho, que foi encontrado um bom resultado para a função objetivo e a otimização Multiobjetivo mostrou ser um método muito eficiente na busca de soluções ótimas.

Palavras-chaves: Otimização. Sistemas isolados. Eletrificação rural. Probabilidade de perda de carga.

ABSTRACT

Rural electrification is extremely important, since electric energy is a driving factor for the different sectors of socioeconomic and industrial activity of any territorial unit in a country. Currently, the deployment of new and renewable energies, such as photovoltaics, for example, has been viable in rural areas, as it is one of the best sources of renewable energy with less negative impacts on the environment. The objectives include minimization of the PV (Photovoltaic System) system area, amount of batteries, the system cost and the LOLP (Loss of Load Probability). This was done by applying Genetic Algorithm techniques to determine the best system configuration. The photovoltaic system was designed by the most critical month method, as well as the battery bank voltage for the energy storage system because in nature, the solar source is stochastic. The power conditioning devices, the inverter, and the load controller was also designed. For the experimental part, a mathematical model was developed and implemented in the MATLAB[®] computational tool, having been tested under the Pantanal Project, from “Energisa Mato Grosso do Sul”, which contemplates the attendance of almost two thousand locations without electrification in the Mato Grosso do Sul Pantanal. Three scenarios were tested: (1) total system cost vs battery life; (2) total system cost vs LOLP and (3) total system cost vs wasted energy. The system reliability was measured using the LOLP index by sensitivity analysis of system behavior with increasing load over time. This aspect is seen as critical in installed photovoltaic systems and operations in Brazil, where unplanned load growth compromises the CAPEX (Capital Expenditure) and OPEX (Operational Expenditure) of the projects. The results show reduction in the panel area, the number of batteries for the storage system, the LOLP and the total cost of the system. Concluded in this work, a good result was found for the objective and optimization function. Multiobjective proved to be a very efficient method in the search for optimal solutions.

Key words: Optimization. Isolated Systems. Rural Electrification. Loss of Load Probability.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| | |
|---|----|
| FIGURA 1 – POPULAÇÃO SEM ACESSO À ELETRICIDADE POR REGIÃO | 24 |
| FIGURA 2 – PERFIL ESQUEMÁTICO DE USINA HIDRELÉTRICA..... | 26 |
| FIGURA 3 – CURVA TÍPICA DE CORRENTE X TENSÃO DO MÓDULO FOTOVOLTAICO | 27 |
| FIGURA 4 – EXEMPLO DO SISTEMA ISOLADO FOTOVOLTAICO..... | 28 |
| FIGURA 5 – SISTEMA CONECTADO À REDE (<i>Grid-tie</i>)..... | 29 |
| FIGURA 6 – ESQUEMADO APROVEITAMENTO DA ENERGIA SOLAR | 30 |
| FIGURA 7 – PARQUE EÓLICO GERIBATU PARA GERAÇÃO DE ELETRICIDADE..... | 33 |
| FIGURA 8 – TECNOLOGIA DE APROVEITAMENTO DA BIOMASSA | 34 |
| FIGURA 9 – (a) VIDA ÚTIL VERSUS TEMPERATURA E PROFUNDIDADE DE DESCARGA E (b) TENSÃO DA CÉLULA DE CHUMBO - ÁCIDO DURANTE O SEU PROCESSO DE CARGA | 39 |
| FIGURA 10 – PERFIL TÍPICO DE TENSÃO DE UMA CÉLULA CHUMBO - ÁCIDO DURANTE O PROCESSO DE DESCARGA..... | 40 |
| FIGURA 11 – CURVA TÍPICA DE CARGA DA BATERIA ÍONS DE LÍTIO | 42 |
| FIGURA 12 – ESTÁGIOS DE CARGA DA BATERIA ÍONS DE LÍTIO | 42 |
| FIGURA 13 – TENSÃO /CAPACIDADE vs TEMPO DE CARREGAMENTO DA BATERIA ÍONS DE LÍTIO | 43 |
| FIGURA 14 – ESTRUTURA BÁSICA DE UM ALGORITMO GENÉTICO | 49 |
| FIGURA 15 – FLUXOGRAMA DO PROCESSO DE EVOLUÇÃO DO NSGA-II..... | 51 |
| FIGURA 16 – MAPA DE MATO GROSSO DO SUL (PANTANAL) | 70 |
| FIGURA 17 – METODOLOGIA | 71 |
| FIGURA 18 – VARIAÇÃO DA TEMPERATURA DO MÓDULO EM CORUMBÁ..... | 76 |
| FIGURA 19 – PERFIL DE CARGA DIÁRIO DO CONSUMIDOR RURAL | 77 |
| FIGURA 20 – PROCESSO DE CÁLCULO DO ALGORITMO | 82 |
| FIGURA 21 – PROCESSO DE OTIMIZAÇÃO CENÁRIO 1 | 87 |
| FIGURA 22 – EVOLUÇÃO GAMULTIOBJ | 89 |
| FIGURA 23 – PROCESSO DE EVOLUÇÃO DO ALGORITMO GENÉTICO MULTI OBJETIVO..... | 91 |
| FIGURA 24 – EVOLUÇÃO DOS RESULTADOS | 93 |
| FIGURA 25 – EVOLUÇÃO DO PROCESSO DE OTIMIZAÇÃO GAMULTIOBJ | 94 |

| | |
|--|-----|
| FIGURA 26 – EVOLUÇÃO DA OTIMIZAÇÃO EM RELAÇÃO AO CUSTO E ENERGIA DESPERDIÇADA NO SISTEMA COM O AUMENTO DA CARGA | 96 |
| FIGURA 27 – CURVAS DE IRRADIAÇÃO SOLAR VS CURVA DE CARGA COM A ÁREA DE 1.6368 m ² | 98 |
| FIGURA 28 – CURVAS DE IRRADIAÇÃO SOLAR VS CURVA DE CARGA COM A ÁREA DE 0.9996 m ² DEPOIS DA APLICAÇÃO DO ALGORITMO NO PROBLEMA | 98 |
| FIGURA 29 – MOVIMENTO APARENTE DO SOL AO REDOR DA TERRA, O EQUADOR CELESTE E A DIRECÇÃO DO EQUINÓCIO VERNAL | 114 |
| FIGURA 30 – (a) O SISTEMA DE COORDENADAS ECLÍPTICAS E..... | 114 |
| FIGURA 31 – ASCENSÃO RETA α , ÂNGULO DA HORA LOCAL h , O TEMPO SIDERAL MÉDIO DE GREENWICH GMST E O TEMPO SIDERAL MÉDIO LOCAL θ_L | 115 |
| FIGURA 32 – (a) ORIENTAÇÃO DE UM TELHADO EM UM PLANO HORIZONTAL E (b) A ORIENTAÇÃO DE UM MÓDULO MONTADO EM UM TELHADO | 115 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|-----|
| TABELA 1 – DADOS TÉCNICOS QUE CONSTAM NA ETIQUETA DO MÓDULO FOTOVOLTAICO | 31 |
| TABELA 2 – DADOS TÉCNICAS ADICIONAIS QUE PODEM CONSTAR NA FOLHA DE DADOS DO MÓDULO FOTOVOLTAICO..... | 32 |
| TABELA 3 – DADOS TÉCNICAS DE CATÁLOGOS DE BATERIAS RECARREGÁVEIS DISPONÍVEIS COMERCIALMENTE..... | 37 |
| TABELA 4 – TENSÕES CARACTERÍSTICAS DE CÉLULAS E BATERIAS DE CHUMBO - ÁCIDO..... | 40 |
| TABELA 5 – COMBINAÇÃO DAS PALAVRAS-CHAVE | 53 |
| TABELA 6 – QUADRO DE ARTIGOS SELECIONADOS POR PALAVRA-CHAVE .. | 55 |
| TABELA 7 – MÉTRICAS DOS ARTIGOS SELECIONADOS | 56 |
| TABELA 8 – QUADRO COMPARATIVO DOS ARTIGOS DA REVISÃO DA LITERATURA EM CADA CATEGORIA DO ESTUDO | 64 |
| TABELA 9 – APARELHOS ELETRODOMÉSTICOS MAIS USADOS..... | 78 |
| TABELA 10 – CARACTERÍSTICAS DO MÓDULO FOTOVOLTAICO POLICRISTALINO DA JINKO SOLAR JKM265P-60 | 79 |
| TABELA 11 – MÓDULOS USADOS PARA O SORTEIO NO TRABALHO | 86 |
| TABELA 12 – CAPACIDADES NOMINAIS DA BATERIA MOURA MFV12 250Ah ... | 86 |
| TABELA 13 – COMBINAÇÕES DAS FUNÇÕES OBJETIVOS EM CADA CENÁRIO | 86 |
| TABELA 14 – RESULTADOS DO PROCESSO DE OTIMIZAÇÃO..... | 88 |
| TABELA 15 – FRETE DE PARETO – RESULTADOS DAS FUNÇÕES OBJETIVOS E VARIÁVEIS DE DECISÃO | 90 |
| TABELA 16 – RESULTADOS DA OTIMIZAÇÃO | 92 |
| TABELA 18 – RESULTADOS DA OTIMIZAÇÃO DA RELAÇÃO CUSTO E LOLP COM O AUMENTO DA CARGA NO SISTEMA..... | 95 |
| TABELA 19 – RESULTADOS DA OTIMIZAÇÃO | 97 |
| TABELA 20 – RESULTADOS GERADOS PELO SISTEMA NO DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA FOTOVOLTAICO..... | 99 |
| TABELA 17 – RELAÇÕES CUSTO BENEFÍCIO ENTRE AS FUNÇÕES OBJETIVAS E AS VARIÁVEIS DE DECISÃO | 100 |

LISTA DE SIGLAS

| | |
|---------|---|
| ABNT | Associação Brasileira de Normas Técnicas |
| AG | Algoritmos genéticos |
| ASPE | Agência de Serviços Públicos de Energia do Estado do Espírito |
| BESS | Sistema de Armazenamento de Energia por Baterias (<i>Battery Energy Storage System</i>) |
| CA | Corrente Alternada |
| CAPES | Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior |
| CAPEX | <i>Capital Expenditure</i> |
| CC | Corrente Contínua |
| CRESESB | Centro de Referência para a Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito |
| EA | Algoritmos Evolutivos |
| ED | Déficit de Energia |
| EE | Energia Excedente |
| EPE | Empresa de Pesquisa Energética |
| EUA | Estados Unidos da América |
| FV | Fotovoltaico |
| HOMER | <i>Hybrid Optimization Model for Electric Renewable</i> |
| HRES | Sistemas de Energias Renováveis Hídrica |
| LCC | Custo nivelado de energia (<i>life-cycle cost</i>) |
| LCOE | Custo Nivelado de Eletricidade (<i>Levelized Cost of the Electricity</i>) |
| LCoSLE | Custo Nivelado de Energia Fornecida e Perdida (<i>Levelized Cost of Supplied and Lost Energy</i>) |
| LOLP | <i>Loss of Load Probability</i> |
| MEC | Ministério da Educação |
| MIGD | Microsistema Isolado de Geração e Distribuição de Energia Elétrica |
| MINLP | Programação Linear Inteira Mista |
| MOEA | Algoritmo Evolucionário Multiobjetivo |
| MOO | Otimização Multiobjetivo |
| MTF | Estrutura Multicamadas (<i>Multi-tier Framework</i>) |
| NOCT | Temperatura nominal da célula nas condições de operação |
| NPC | Custo Líquido Presente (<i>Net Present Cost</i>) |

| | |
|--------------------|--|
| NSGA-II | <i>Non-dominated sorting genetic algorithm II</i> |
| OPEX | <i>Operational Expenditure</i> |
| PL | Programação Linear |
| PMP | Ponto de Máxima Potência |
| Proinfa | Programa de Incentivos às Fontes Alternativas de Energia Elétrica |
| PSO | Otimização de Enxame de Partículas |
| RNA | Redes Neurais Artificiais |
| SHS | <i>Solar Home Systems</i> |
| SIGFI | Sistema Individual de Geração de Energia Elétrica com Fonte Intermitente |
| SIN | Sistema Interligado Nacional |
| SMES | <i>Superconducting Magnetic Energy Storage</i> |
| SOC _{min} | Estado de carga mínimo da bateria |
| SoDa | <i>Solar radiation data</i> |
| STC | Temperatura nas condições padrão de ensaio |
| TV | Televisão |
| VOLL | Valor Econômico de Carga Perdida (<i>Value of Lost Load</i>) |

LISTA DE SÍMBOLOS

| | |
|----------------------|---|
| α | Alfa |
| β | Beta |
| γ | Gama |
| $^{\circ}\text{C}$ | Graus Célsius |
| % | Porcentagem |
| A_{PV} | Área do módulo FV |
| atm. | Atmosfera |
| E_{L} | Energia demanda pela carga |
| E_{pv} | Energia do módulo fotovoltaico |
| G_{av} | Radiação solar do módulo FV |
| I_{PM} | Corrente no ponto de máxima potência |
| I_{SC} | Corrente de curto-circuito |
| I | Corrente Elétrica |
| k | Coeficiente de temperatura da célula especificada pelo fabricante |
| kg | Quilograma |
| kW | Quilo watts |
| l | Litros |
| m^2 | Metro quadrado |
| m/s | Metros por segundo |
| N | Número de dias do ano |
| η_{bo} | Eficiência de Equilíbrio do Sistema |
| η_{inv} | Eficiência do Inversor |
| η_{pv} | Eficiência FV |
| η_{wire} | Eficiência do fio condutor |
| P | Potência Elétrica |
| P_{m} | Probabilidade de mutação |
| T | Temperatura da célula |
| T | Período estimado de tempo em porcentagem |
| T_{f} | Tempo total de análise em horas |
| T_{ref} | Temperatura de referência adotada pelo fabricante |
| V | Tensão Elétrica |
| $V(T)$ | Tensão da célula na temperatura T |

| | |
|------------|---|
| V_{Tref} | Tensão da célula na temperatura de referência adotada pelo fabricante |
| V_{MP} | Tensão no ponto de máxima potência |
| V_{OC} | Tensão de circuito aberto |
| W | Watt |
| W/m^2 | Watts por metros quadrados |
| Wh | Watt hora |
| Wp | Watt pico |

SUMÁRIO

| | | |
|----------|--|----|
| 1 | INTRODUÇÃO | 18 |
| 1.1 | CONTEXTO | 18 |
| 1.2 | OBJETIVOS | 20 |
| 1.3 | JUSTIFICATIVA | 20 |
| 1.4 | ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO | 21 |
| 2 | FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA | 23 |
| 2.1 | ELETRIFICAÇÃO RURAL | 23 |
| 2.1.1 | CENÁRIO MUNDIAL | 24 |
| 2.1.2 | CENÁRIO NACIONAL | 25 |
| 2.2 | FONTES ALTERNATIVAS DE ENERGIA | 25 |
| 2.2.1 | ENERGIA HIDRELÉTRICA | 26 |
| 2.2.2 | ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA | 26 |
| 2.2.3 | ENERGIA EÓLICA | 32 |
| 2.2.4 | ENERGIA DA BIOMASSA | 33 |
| 2.3 | BATERIAS | 36 |
| 2.3.1 | BATERIAS DE CHUMBO-ÁCIDO | 38 |
| 2.3.2 | BATERIAS ÍONS DE LÍTIO | 41 |
| 2.4 | PROBABILIDADE DE PERDA DE CARGA (LOLP) | 44 |
| 2.5 | ALGORITMOS GENÉTICOS | 46 |
| 2.5.1 | VANTAGENS DOS ALGORITMOS GENÉTICOS | 47 |
| 2.5.2 | OPERADORES GENÉTICOS | 48 |
| 2.6 | ALGORITMO GENÉTICO DE ORDENAÇÃO NÃO-DOMINADA | 49 |
| 2.7 | CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO | 52 |
| 3 | REVISÃO DA LITERATURA | 53 |
| 3.1 | PROCESSO DE SELEÇÃO DE PORTFÓLIO BIBLIOGRÁFICO | 53 |
| 3.2 | ANÁLISE DA LITERATURA | 56 |
| 3.3 | CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO | 63 |
| 4 | MATERIAL E MÉTODOS | 70 |
| 4.1 | MATERIAL | 70 |
| 4.2 | MÉTODOS | 70 |
| 5 | ANÁLISE DOS RESULTADOS E DISCUSSÃO | 86 |
| 5.1 | ANÁLISE DE RESULTADOS | 86 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 5.1.1 | CENÁRIO 1 | 87 |
| 5.1.2 | CENÁRIO 2 | 89 |
| 5.1.3 | CENÁRIO 3 | 91 |
| 5.2 | ANÁLISE SENSIBILIDADE | 93 |
| 5.2.1 | CENÁRIO 1 | 93 |
| 5.2.2 | CENÁRIO 2 | 94 |
| 5.2.3 | CENÁRIO 3 | 96 |
| 5.3 | COMPARAÇÃO DAS CURVAS DE CARGA E IRRADIAÇÃO SOLAR..... | 97 |
| 5.4 | TOMADA DE DECISÃO..... | 100 |
| 5.5 | DISCUSSÃO DE RESULTADOS..... | 101 |
| 6 | CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS..... | 105 |
| | REFERÊNCIAS..... | 107 |
| | ANEXO A – ÂNGULOS DE POSIÇÃO SOLAR | 114 |

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTO

A universalização da energia elétrica no Brasil, em particular a eletrificação rural, é fomentada pelo Governo Federal Brasileiro através do Programa Luz para Todos – PLpT, instituído pelo Decreto nº 4.873, de 11 de novembro de 2003 (ANEEL, 2019).

O Brasil dispõe de uma matriz elétrica de origem predominantemente renovável, com destaque para a fonte hídrica que apresenta 66,6% da oferta interna. As fontes renováveis representam 83,3% da oferta interna de eletricidade no Brasil, resultante da soma dos montantes referentes à produção nacional mais a geração, principalmente de origem renovável (EPE, 2019).

Atualmente, no mundo cerca de um bilhão de pessoas ainda vivem sem eletricidade, enquanto centenas de milhões vivem com acesso insuficiente ou não confiável a ela. Ao mesmo tempo, quase três bilhões de pessoas cozinham ou aquecem suas casas com combustíveis poluentes, como madeira ou outra biomassa, resultando em poluição do ar que causa impactos negativos à saúde (BANCO MUNDIAL, 2018).

Segundo o relatório de metas de desenvolvimento sustentável da United Nations (2018), o acesso à energia é essencial para reduzir a pobreza, pois a energia está no centro do desenvolvimento. Sem energia, as comunidades vivem na escuridão, os serviços essenciais, como clínicas e escolas, sofrem e as empresas operam sob-restrições incapacitantes.

A energia possibilita investimentos, inovações e novas indústrias que são os motores de empregos e crescimento para economias inteiras. O acesso universal a energia acessível, confiável e sustentável é essencial para alcançar o Objetivo de Desenvolvimento Sustentável (ODS), que é uma meta do acesso universal a serviços de energia acessíveis, confiáveis e modernos estabelecida para até 2030 (AGECC, 2010).

O atendimento a comunidades isoladas é um fator crítico no processo de universalização, uma vez que os custos de operação e manutenção – O&M para o atendimento aos consumidores isolados é muito elevado, tendo em vista que os mesmos estão localizados em regiões remotas, que possuem condições de acesso

e comunicação difícil, e logística de transporte complexa. Neste sentido, o estudo e o desenvolvimento de soluções tecnológicas e modelos de gestão alternativos, que sejam adequados à realidade desses consumidores, é de fundamental importância para que sejam atingidas as metas de universalização (PINHEIRO *et al.*, 2012).

Segundo Singh e Fernandez (2014), a energia solar fotovoltaica é uma das potenciais tecnologias de geração de energia renovável que recentemente recebeu considerável atenção globalmente. No entanto, a natureza estocástica dessas fontes de energia dificulta o processo de produção da mesma e, portanto, é recomendável um dispositivo de armazenamento de energia para coordenar com tais fontes de energia a fim de manter a confiabilidade do sistema.

A eletrificação rural é de extrema importância, visto que a energia elétrica representa fator dinamizador dos diferentes setores de atividade socioeconômico e industrial de qualquer unidade territorial de um país. Atualmente, a implantação de energias novas e renováveis, como a fotovoltaica, por exemplo, tem se mostrado viável não no meio rural, pois é uma das melhores fontes de energia renovável com menos impactos negativos ao meio ambiente.

Os sistemas isolados de energia têm desempenhado atualmente um papel importante no processo de eletrificação rural, promovendo desenvolvimento local. A literatura científica tem abordado esta questão com ênfase nos conceitos de sustentabilidade e tecnologias apropriadas com a implementação de fontes energéticas alternativas e renováveis que não poluem o ambiente, diversificando cada vez mais a matriz energética.

Assim, os serviços de energia limpa, eficiente, acessível e confiável, como a fotovoltaica são indispensáveis para promover o bem-estar humano incentivando na criação de atividades domésticas e geradoras de renda. Desse modo, o planejamento energético adequado para atender a demanda de energia em comunidades isoladas é de interesse no âmbito dos processos de eletrificação rural para garantir que nessas comunidades as pessoas tenham o mínimo de conforto no seu dia-a-dia promovendo assim, o desenvolvimento nas comunidades isoladas.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é desenvolver um modelo que otimize o sistema isolado para eletrificação rural considerando a probabilidade de perda de carga (do inglês, *Loss of Load Probability* - LOLP), onde se deseja minimizar a área do sistema FV, a quantidade de bateria, o custo do sistema e o LOLP utilizando os Algoritmos Genéticos para a determinação da melhor configuração do sistema.

Os objetivos específicos a serem alcançados são:

- Dimensionar o sistema fotovoltaico isolado incluindo:
 - ✓ Determinar a potência do sistema FV (quantidade de módulos fotovoltaicas necessárias);
 - ✓ Determinar a quantidade de baterias (capacidade do banco de baterias necessárias para sistema de armazenamento);
 - ✓ Determinar a potência do inversor; e
 - ✓ Determinar a capacidade do controlador de carga (o controlador deve suportar a corrente máxima dos painéis e a carga);
- Determinar a LOLP para avaliar a confiabilidade do sistema;
- Analisar o desempenho das baterias conforme:
 - ✓ Capacidade de carga/descarga; e
 - ✓ Autonomia do sistema;
- Implementar na ferramenta computacional MATLAB o modelo matemático desenvolvido; e
- Analisar e validar os resultados em relação aos existentes e já consolidados.

1.3 JUSTIFICATIVA

Para Cruz et al. (2004), a inexistência de energia elétrica impossibilita o acesso da população a diversos serviços sociais básicos, tais como água, saneamento, educação e comunicação. Partindo dessa perspectiva, percebe-se, portanto, que há uma relação entre os indicadores de eletrificação e o grau de modernização do espaço rural, redundando na qualidade de vida da população.

Com a eletrificação rural espera-se gerar benefícios substancialmente positivos sob o ponto de vista econômico e de emprego no meio rural, gerando riqueza e combatendo a pobreza com:

- Melhoria dos serviços de saúde com o hospital atendendo 24 horas por dia;
- Acesso à iluminação pública melhorando desta forma a segurança dos habitantes (Cruz et al., 2004);
- Melhoria dos acessos à informação modernos como rádio, internet e TV;
- Redução do analfabetismo com a introdução de cursos noturnos nas escolas, promovendo assim o acesso à educação;
- Melhoria e manutenção da qualidade de vida com a substituição de fontes de energia poluentes por limpas, que não prejudicam a saúde e o meio ambiente (Pereira (2014); e
- Melhoria das condições de vida desestimulando a migração do campo para a cidade, permitindo a permanência do indivíduo em seu ambiente familiar e social (Cruz et al., 2004).

A Eletricidade é um subconjunto de serviços de energia, tornando a eletrificação universal uma prioridade nacional dos 98 países em todo o mundo (IRENA, 2018).

1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

O conteúdo deste trabalho está organizado da seguinte forma:

No primeiro capítulo contam a introdução, os objetivos do trabalho e a justificativa, o que motivou a apresentação deste tema. Fez-se uma pequena abordagem sobre o assunto que envolve o tema até o alcance do objetivo do problema.

No segundo capítulo foi abordada a fundamentação teórica, com a descrição de conceitos relacionados à eletrificação rural e aos sistemas isolados e com apresentação de seus principais componentes e características tais como: fontes alternativas para a eletrificação rural, baterias para o sistema de armazenamento da energia gerada, índice de probabilidade de perda de carga que mede a confiabilidade do sistema a eletrificar, técnicas de algoritmos genéticos, que

auxiliarão na escolha da melhor configuração do sistema, e o NSGA-II para o alcance dos multiobjectivos do problema.

No terceiro capítulo, apresenta-se a revisão da literatura que vai desde o processo de seleção do portfólio bibliográfico até a análise da literatura.

No quarto capítulo, são apresentados os métodos e matérias usados para a elaboração deste trabalho.

No quinto capítulo, foi feita a análise de resultados e discussão dos resultados obtidos, de acordo com a literatura sobre o assunto aqui abordado.

No sexto capítulo, são apresentadas as conclusões e trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 ELETRIFICAÇÃO RURAL

A eletrificação rural pode ser entendida como um processo de transição energética, que não envolve apenas a construção de infraestruturas, mas a aceitação de uma nova tecnologia, difusão, capacidade de manutenção e apropriação por parte dos usuários (SALAS *et al.*, 2017). A eletrificação rural é um instrumento adotado pela política energética usada em vários países em desenvolvimento para minimizar a falta do fornecimento da energia elétrica no meio rural. Ela deixa de ser atrativa para as concessionárias de energia devido a fatores como: relação custo benefício; dispersão geográfica de residências e a baixa renda familiar nessas comunidades.

Um dos objetivos da eletrificação rural passa pela erradicação da pobreza, pelo alívio dos problemas sociais e pelo impulso das prioridades da população, e deve ser parte de uma estratégia de desenvolvimento rural (SEBASTIÃO, 2016). A introdução de novas tecnologias de energias renováveis e limpas, com o baixo custo possível, pode ser entendida como umas das formas de se fazer a eletrificação no meio rural, atendendo assim a demanda energética, com o intuito de promover o desenvolvimento local.

Segundo Bansal, Khatod e Saini (2014), as tecnologias de energia verde incluem a geração de energia elétrica a partir de fontes limpas e inesgotáveis na eletrificação rural. São comumente utilizadas: a energia hidrelétrica, solar fotovoltaica, eólica e biomassa, etc. Embora as usinas hidrelétricas sejam consideradas fontes de energia renováveis e limpas (as mais antigas e utilizadas em quase todo mundo) nem sempre são uma opção viável para a produção de energia elétrica em questões rurais, devido à desequilíbrios que podem causar no ecossistema, pelos impactos negativos à vida dos que dependem do rio para sobreviver, caso exista um nessa região (MATIELLO *et al.*, 2018).

Especificamente, a tecnologia fotovoltaica é umas das primeiras entre várias tecnologias universalmente utilizadas para o atendimento das necessidades básicas de eletricidade nas áreas isoladas (CHAUREY e KANDPAL, 2010).

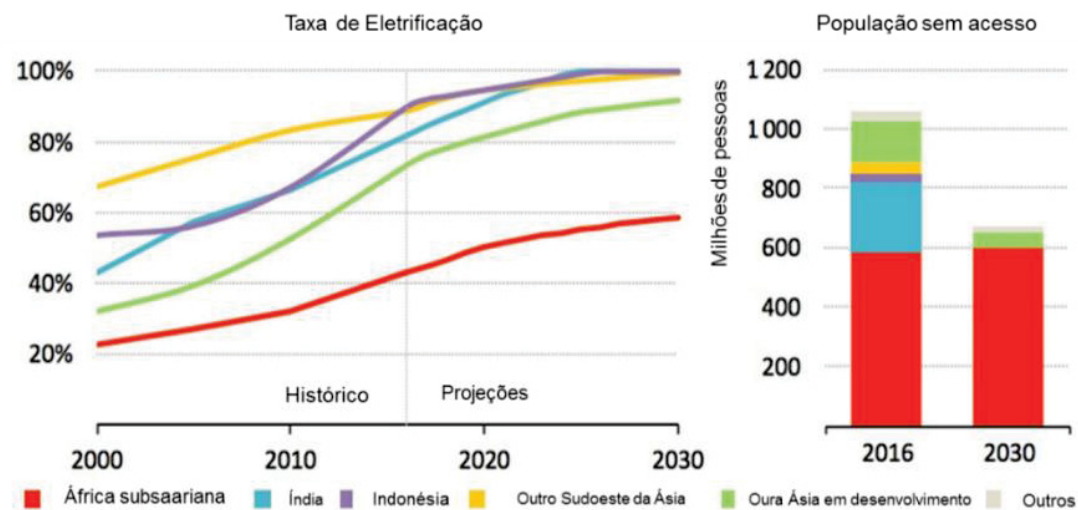
Atualmente, a energia renovável desempenha um papel importante para iluminar milhões de pessoas satisfazendo desta forma, as suas necessidades

básicas de eletricidade. A eletrificação rural pode contribuir para melhoramento do estado socioeconômico da vida de quem reside nessas regiões, pelo uso e aproveitamento de recursos de energias renováveis disponíveis localmente. Tais tecnologias devem atender a aspectos técnicos, econômicos, ambientais e de confiabilidade do sistema como um todo (PATEL; SINGAL, 2016).

2.1.1 CENÁRIO MUNDIAL

No mundo, cerca de 1,1 bilhões da população mundial ainda não têm acesso à eletricidade no século XXI. Os esforços para promover o acesso à eletricidade aceleram e estão a ter um impacto positivo em todas os ritmos do progresso. Uma análise feita recentemente, mostra que o número de pessoas sem o acesso à eletricidade baixou para 1,1 bilhão de pessoas pela primeira vez em 2016, com quase cerca de 1,2 bilhões pessoas que obtiveram acesso desde 2000 (Figura 1). Apesar do progresso ter alcançado 14% da população mundial, a população ainda carece do acesso à eletricidade, pois 84% dela vive em áreas rurais (IEA, 2017).

FIGURA 1 – POPULAÇÃO SEM ACESSO À ELETRICIDADE POR REGIÃO



FONTE: IEA (2017)

Como pode ser observado no gráfico da Figura 1, houve alguns progressos encorajadores no acesso à eletricidade na Índia, Ásia, e outros países nos períodos de 2000 a 2016. Tal crescimento não se verifica na África-Subsaharia devido ao crescimento brusco da população com uma taxa de acesso a energia elétrica de

43% em 2016 o que veio a superar todas as expectativas de acesso à eletricidade naquela região do mundo. A taxa de acesso ainda vai aumentar até 2030 com cerca de 59% do crescimento populacional (IEA, 2017).

2.1.2 CENÁRIO NACIONAL

Segundo a Amazonas GT (2019), o acesso à energia elétrica é fundamental no mundo moderno, sendo um dos principais indicadores de desenvolvimento social de um país. No Brasil, o uso da eletricidade ganhou impulso no início do século XX, com a multiplicação de empreendimentos de geração de energia elétrica, especialmente no Rio de Janeiro, São Paulo e Minas Gerais. Ainda assim, em 1940, só 47,2% dos domicílios urbanos e 2,4% dos rurais tinham acesso à eletricidade, percentagem essa que deu um salto em 70 anos: em 2010, os índices eram de 99,1% e 92%, respectivamente.

No Brasil, várias foram as iniciativas e políticas destinadas à eletrificação rural, como as cooperativas de eletrificação rural na região Sul e programas instituídos por governos estaduais e federais. Em termos de resultados efetivos, porém, destaque é dado a mais recente iniciativa promovida pelo Programa Nacional de Universalização do Acesso e Uso da Energia Elétrica – “Luz para Todos”, doravante expresso pelo acrônimo PLpT, instituída pela Resolução 223 da ANEEL em 29 de abril de 2003 (MATOSINHOS, FERREIRA e DE CAMPOS, 2017). Neste Programa o governo definiu uma política de ampliação da rede elétrica, principalmente nos meios rurais, comunidades isoladas e áreas indígenas, e o seu objetivo é atender às necessidades da população (CARDOSO, OLIVEIRA e SILVA, 2013).

2.2 FONTES ALTERNATIVAS DE ENERGIA

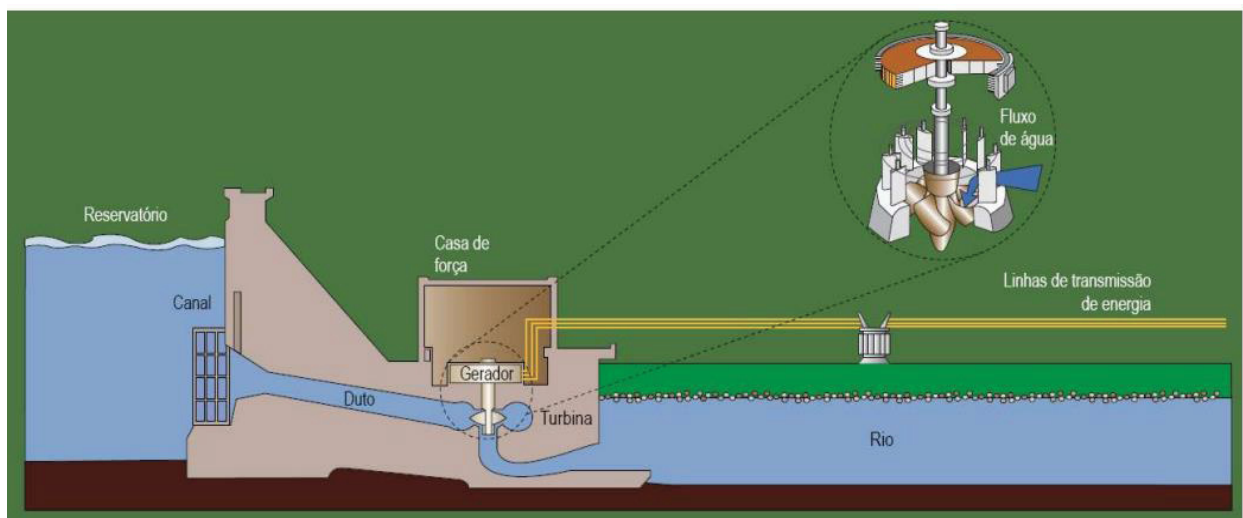
O atendimento às comunidades isoladas por meio de sistemas de geração baseados em fontes de energia renováveis tem se tornado uma alternativa viável. Para Villalva (2015), o aumento acelerado da demanda de energia elétrica no mundo, a necessidade de diminuir a dependência de combustíveis fósseis e a preferência por fontes de energia que não poluem tem levado a busca de novas

fontes de energia para a geração de eletricidade. A seguir são apresentados alguns exemplos de fontes renováveis que podem ser utilizadas para eletrificação rural.

2.2.1 ENERGIA HIDRELÉTRICA

A água é o recurso natural mais abundante na terra. As usinas hidrelétricas transformam a energia cinética em energia elétrica a partir do aproveitamento do movimento das águas. O princípio de funcionamento de uma usina hidrelétrica é mostrado na Figura 2.

FIGURA 2 – PERFIL ESQUEMÁTICO DE USINA HIDRELÉTRICA



FONTE:ANEEL (2008)

A Figura 2 mostra como é gerada a energia elétrica por meio de uma usina hidrelétrica. A água armazenada no reservatório e conduzida pelo canal até o duto para a turbina. A água turbinada transmite potência ao gerador onde é transformada em energia elétrica. A energia elétrica é transmitida ao sistema elétrico pelas de transmissão.

2.2.2 ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

Uma das fontes promissoras de energias renováveis é a tecnologia fotovoltaica (FV). Nessa tecnologia, a energia solar é convertida em eletricidade usando células solares incorporadas dentro de um módulo fotovoltaico. A energia

solar fotovoltaica é definida como a energia gerada através da conversão direta da radiação solar em eletricidade. Esse efeito ocorre por meio de um dispositivo conhecido como célula fotovoltaica que atua utilizando o princípio do efeito fotovoltaico (SULAIMAN *et al.*, 2012).

A Figura 3 apresenta a curva típica da tensão e corrente ($I - V$, azul) do módulo fotovoltaico e a curva ($P - V$) que relaciona a potência e a tensão (vermelho). O ponto onde as duas curvas se cruzam denomina-se Ponto de Máxima Potência (P_{MP}), o ponto no qual a sua derivada em relação à tensão é nula ($\frac{dp}{dv} = 0$).

Onde:

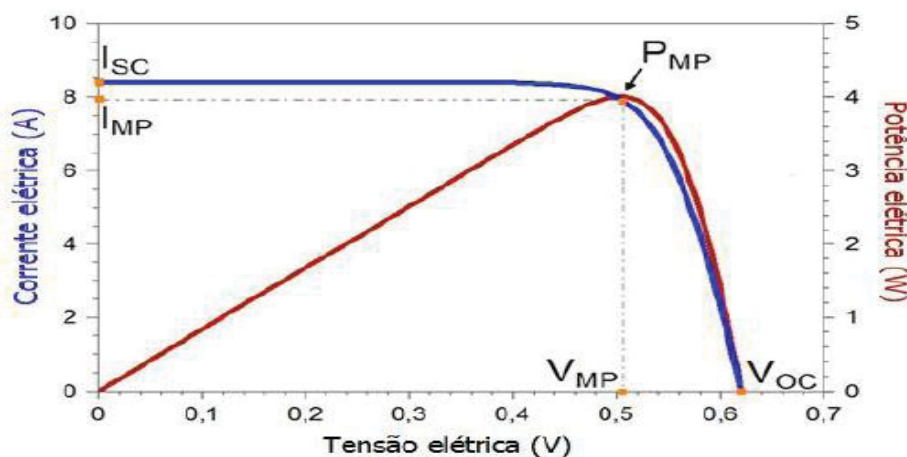
I_{SC} – Corrente de curto-circuito;

V_{OC} – Tensão de circuito aberto;

V_{MP} – Tensão no ponto de máxima potência; e

I_{PM} – Corrente no ponto de máxima potência.

FIGURA 3 – CURVA TÍPICA DE CORRENTE X TENSÃO DO MÓDULO FOTOVOLTAICO



FORNTE: PINHO e GALDINHO (2014)

Existem dois tipos básicos de sistemas fotovoltaicos: Sistemas Isolados (*Off-grid*) e Sistemas Conectados à Rede (*Grid-tie*).

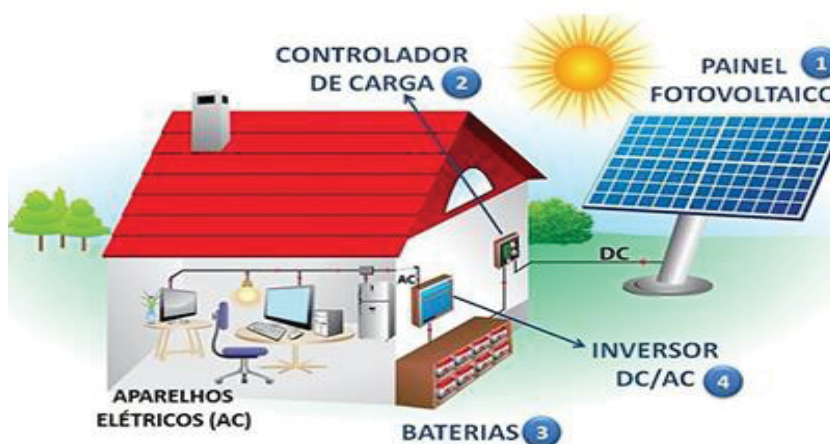
2.2.2.1 Sistemas isolados

Denomina-se sistema isolado o sistema elétrico, que em sua configuração normal, não esteja conectado ao Sistema Interligado Nacional - SIN. Atualmente, existe cerca de 250 localidades isoladas no Brasil, a maior parte na região Norte.

Compete à Empresa de Pesquisa Energética (EPE) a avaliação técnica das propostas de planejamento do atendimento aos Sistemas Isolados, apresentadas pelos Agentes de Distribuição, bem como a habilitação técnica das propostas de Solução de Suprimento, cadastradas para participar dos Leilões para atendimento aos Sistemas Isolados (EPE, 2018).

O atendimento aos sistemas isolados, conforme Manual para Atendimento às Regiões Remotas dos Sistemas Isolados é feito por meio de Microsistema Isolado de Geração e Distribuição de Energia Elétrica (MIGDI) ou Sistema Individual de Geração de Energia Elétrica com Fonte Intermitente (SIGFI), os quais possuem procedimentos e condições definidos na Resolução Normativa da ANEEL nº 493/2012 (ANEEL, 2017). Os sistemas isolados são sistemas de energia solar fotovoltaica que não estão conectados à rede elétrica convencional, alimenta diretamente os aparelhos que irão consumir a energia gerada, conforme o exemplo da Figura 4.

FIGURA 4 – EXEMPLO DO SISTEMA ISOLADO FOTOVOLTAICO



FONTE: Redimax (2018)

Os sistemas isolados são utilizados em locais remotos onde o custo de se conectar à rede elétrica é elevado devido à distância e isolamento. Estes precisam de baterias para o armazenamento da energia produzida durante o dia e depois ser reutilizada durante a noite e/ou em dias de céu nublado.

Segundo Salas *et al.*, (2015), o atendimento a comunidades isoladas, torna-se mais complexo, por serem de baixa densidade populacional, com restrições ao uso de fontes de energia convencionais, com infraestrutura deficiente, de difícil

acesso e distantes dos centros de consumo. Entretanto, devido a limitações técnicas e de custo, é necessário que ações educativas sejam conduzidas junto com os usuários, de forma a evitar condições de sobrecargas nas instalações, que possam comprometer sua operação.

2.2.2.2 Sistema conectado à rede

Os sistemas conectados à rede caracterizam-se por estarem interligados à rede elétrica convencional para o abastecimento da energia elétrica. A Figura 5 apresenta um sistema fotovoltaico conectado à rede (*grid-tie*). Os elementos do sistema segundo a Figura 5 são: painel solar e o inversor *grid-tie*.

FIGURA 5 – SISTEMA CONECTADO À REDE (*Grid-tie*)



FONTE: Redimax (2018)

Como se pode observar na Figura 5, o inversor (*grid-tie*) é o elemento principal e tem a função de estabilizar a tensão, frequência, também com a capacidade de detectar a falta de energia no sistema, além de converter a corrente CC em CA.

Um sistema fotovoltaico possui quatro componentes básicos, a saber: painéis solares, controladores de carga, baterias e inversores. As baterias e controladores de carga são elementos essenciais para os sistemas autônomos e os painéis solares e inversores para os sistemas ligados à rede.

Painéis solares: são responsáveis pela transformação da energia solar produzida em eletricidade (ALMEIDA *et al.*, 2016). O painel solar é o principal componente do sistema composto por um conjunto de células fotovoltaicas que

geram energia através da luz do sol, seus tipos básicos são os painéis Monocristalinos, Policristalinos e os de Filme Fino. Existem também os painéis térmicos que captam a luz solar através de ondas eletromagnéticas e a convertem em energia térmica para o aquecimento de água, destinada a fins distintos.

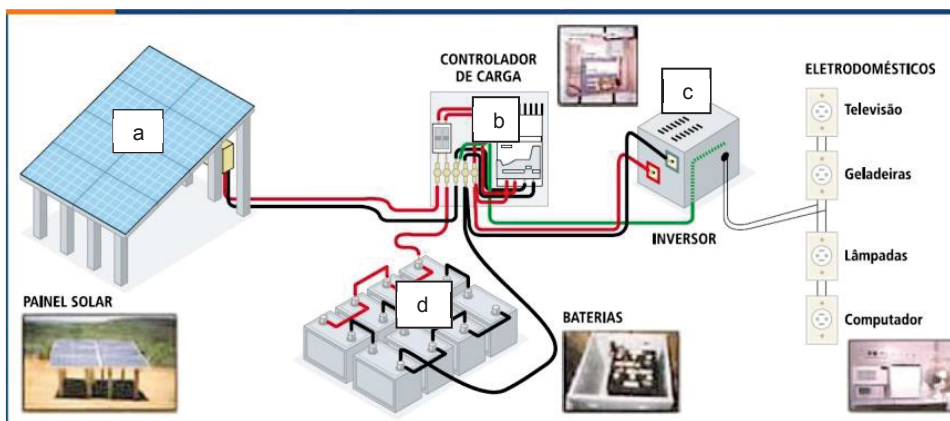
Controladores de carga: evitam que sobrecargas ou descargas excessivas da bateria, aumentando assim a vida útil e o seu desempenho (VILLALVA, 2015).

Inversores: são responsáveis pela conversão da corrente contínua (CC) das baterias em corrente alternada (CA) dos 110 a 220 V ou outra tensão desejada. No caso de sistemas conectados permite a sincronia com a rede elétrica (PINHO e GALDINHO, 2014).

Baterias: armazenam a energia elétrica gerada que depois é reutilizada nos dias de pouca incidência do sol e/ou a noite. As baterias podem ser classificadas de acordo com o tipo de célula que as compõem, se recarregáveis ou não recarregáveis. Existem várias formas de armazenamento de energia, tais como, campo elétrico (supercapacitor), campo magnético (indutores com supercondutores, *SMES - Superconducting Magnetic Energy Storage*), energia mecânica (volantes de inércia - *flywheels*, ar comprimido, bombeamento de água), vetores energéticos (Hidrogênio), entre outros (PINHO e GALDINHO, 2014).

A Figura 6 ilustra o aproveitamento da radiação solar para fins de aproveitamentos energéticos.

FIGURA 6 – ESQUEMADO APROVEITAMENTO DA ENERGIA SOLAR



FONTE: CRESESB(2019)

Como pode ser observado na Figura 6 a partir da coleta da radiação solar por meio de painéis solares (a), a mesma é transportada para um controlador de

carga (b), que posteriormente passa pelo inversor (c), que vai transformá-la em energia elétrica. O excedente da energia gerada pelos painéis solares é armazenado nas baterias (d), para ser utilizada em horários de consumo de pico ou quando não há radiação solar (KEMERICH *et al.*, 2016).

As Tabelas 1 e 2 apresentam os dados dos módulos fotovoltaicos comercializáveis no Brasil que devem apresentar a etiqueta do Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (Inmetro) afixada na sua superfície posterior dos módulos.

TABELA 1 – DADOS TÉCNICOS QUE CONSTAM NA ETIQUETA DO MÓDULO FOTOVOLTAICO

| Informação | Significado ou importância da informação |
|--|---|
| Nome do fabricante | Identificação do responsável pela qualidade do módulo. |
| Identificação do modelo | Pelo modelo pode-se identificar a folha de dados técnicos com informações sobre tecnologia, potência e tolerância. |
| Número de série | O número de série é obrigatório para o registro, qualificação, rastreabilidade e garantia do produto. |
| Tensão máxima do sistema | Indica o maior valor de tensão de circuito aberto de um arranjo onde o módulo pode ser instalado. |
| Tensão de circuito aberto (V_{OC}) | Multiplicando-se V_{OC} de cada módulo pelo número de módulos em série em um arranjo, obtém-se V_{OC} nominal do arranjo. |
| Corrente de curto-circuito (I_{SC}) | Multiplicando-se I_{SC} de cada módulo pelo número de módulos em paralelo em um arranjo, obtém-se I_{SC} nominal do arranjo. |
| Tensão de máxima potência (V_{MP}) | Multiplicando-se V_{MP} de cada módulo pelo número de módulos em série em um arranjo, obtém-se V_{MP} nominal do arranjo. |
| Corrente de máxima potência (I_{MP}) | Multiplicando-se I_{MP} de cada módulo pelo número de módulos em paralelo em um arranjo, obtém-se I_{MP} nominal do arranjo. |
| Potências nas condições-padrão de ensaio (STC) | Potência máxima nominal do módulo nas condições de irradiância de 1000 W/m^2 , espectro AM 1,5 e temperatura da célula $25 \text{ }^\circ\text{C}$. |
| Temperatura nominal da célula nas condições de operação (NOCT) | Temperatura das células do módulo nas condições de irradiância de 800 W/m^2 , temperatura ambiente de 20°C e velocidade de vento de 1 m/s . |

FONTE: Pinho e Galdinho (2014)

TABELA 2 – DADOS TÉCNICAS ADICIONAIS QUE PODEM CONSTAR NA FOLHA DE DADOS DO MÓDULO FOTOVOLTAICO

| Informação | Significado ou importância da informação |
|--|--|
| Potência nas condições de operação (P_{MP}) | Potência máxima do módulo nas condições de irradiância de 800 W/m^2 , e temperatura de célula NOCT. |
| Tensão de máxima potência nas condições de operação (V_{MP}) | Tensão do ponto de máxima potência do módulo, medida com o módulo sob irradiância de 800 W/m^2 e temperatura NOCT. |
| Corrente de máxima potência nas condições de operação (I_{MP}) | Corrente no ponto de máxima potência do módulo, medida com o módulo sob irradiância de 800 W/m^2 e temperatura NOCT. |
| Coeficiente de temperatura para tensão | Coeficiente de variação da tensão de circuito aberto com a temperatura (β), em volts por grau Celsius. |
| Coeficiente de temperatura para corrente | Coeficiente de variação da corrente de curto-circuito com a temperatura (α), em volts por grau Celsius. |
| Coeficiente de temperatura para potência | Coeficiente de variação da corrente de curto-circuito com a temperatura (γ), em volts por grau Celsius. |
| Dimensões externas | Dimensões de largura, comprimento e espessura do módulo, incluindo a moldura. |
| Número de células | Número de células associadas no módulo. |
| Tecnologia das células | Tipo de célula fotovoltaica e materiais envolvidos. |
| Desenho indicando furacões | Desenho com localização das perfurações da moldura, para instalação dos módulos em painéis. |

FONTE: Pinho e Galdinho (2014)

2.2.3 ENERGIA EÓLICA

O Programa de Incentivos às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (Proinfa) criada pela Lei nº 10.438/2002, que tem como objetivo aumentar a participação de fontes alternativas renováveis na produção de energia elétrica, tendo como privilégio os empreendedores que ainda não tem vínculos societários com as concessionárias de geração, transmissão ou distribuição de energia elétrica no País

(VILLALVA, 2015). A Figura 7 ilustra o Parque Eólico Geribatu, em Santa Vitória do Palmar, no extremo sul gaúcho, Rio Grande do Sul.

FIGURA 7– PARQUE EÓLICO GERIBATU PARA GERAÇÃO DE ELETRICIDADE



FONTE:SME (2016)

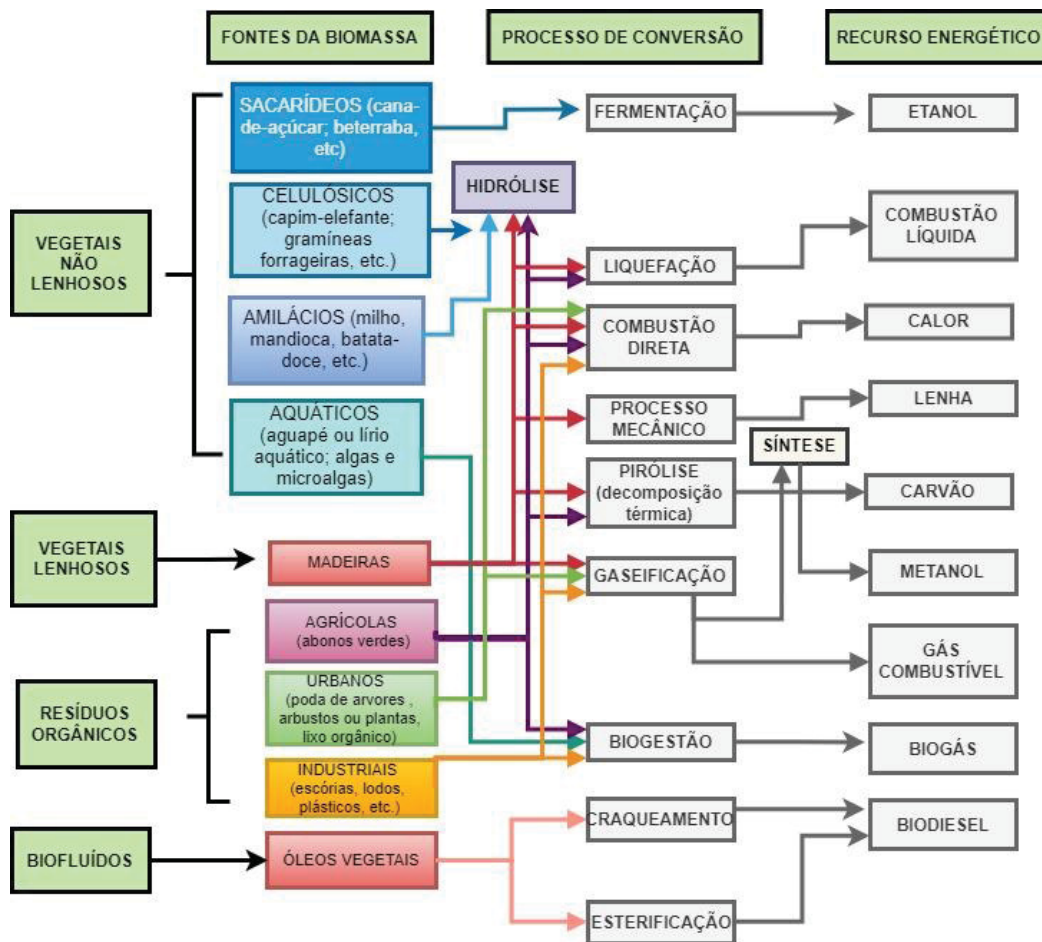
A energia cinética contida nas massas de ar em movimento (vento) denomina-se energia eólica. Seu aproveitamento ocorre por meio da conversão da energia cinética em movimento em energia cinética de rotação, com o emprego de turbinas eólicas, também denominadas aerogeradores, para a geração de eletricidade, ou cata-ventos (e moinhos), para trabalhos mecânicos como bombeamento d'água (ANEEL, 2005).

2.2.4 ENERGIA DA BIOMASSA

A biomassa é definida como qualquer matéria orgânica que pode ser de origem animal ou vegetal utilizado para a geração de eletricidade. O aproveitamento da biomassa pode ser feito por meio da combustão direta de processos termoquímicos (gaseificação, pirólise, liquefação e transesterificação) ou de processos biológicos (digestão anaeróbia e fermentação) (ASPE, 2013).

A Figura 8 apresenta as fontes da biomassa e os seus principais fins energéticos.

FIGURA 8 – TECNOLOGIA DE APROVEITAMENTO DA BIOMASSA



FONTE: Adaptado, ASPE (2013)

A biomassa pode ser empregada na geração de diversas fontes de energia, entre elas os bicomcombustíveis, conforme a Figura 8. Os principais processos de conversão da biomassa são:

Fermentação: é um processo biológico anaeróbico em que os açúcares de plantas como a batata, o milho, a beterraba e, principalmente, a cana de açúcar são convertidos em álcool, por meio da ação de microrganismos (usualmente leveduras). O produto final da fermentação é o álcool, composto por etanol e metanol que pode ser usado como combustível em motores de combustão interna (ASPE, 2013).

Liquefação: é a transformação da biomassa sob pressão e temperatura elevadas (entre 400°C e 600°C) em produtos principalmente líquidos. Ela pode ser feita diretamente, por meio de uma atmosfera redutora de hidrogênio ou por uma mistura de hidrogênio e monóxido de carbono (espécie de pirólise), ou indiretamente, por meio da gaseificação com catalisador, obtendo-se metanol (VIDAL e HORA, 2011).

Combustão direta: é a transformação da energia química dos combustíveis em calor, por meio de reações químicas dos elementos constituintes com o oxigênio. É considerado como processo ineficiente e por ser muito úmida com cerca de mais ou menos 20% no caso da lenha e também pela baixa densidade energética do combustível (lenha, palha, resíduos etc.), o que dificulta o seu armazenamento e transporte (ANEEL, 2005).

Processamento mecânico: consiste no corte ou no trituração da madeira, com a manutenção de sua forma bruta (VIDAL e HORA, 2011).

Pirólise: é a transformação por aquecimento de uma mistura ou de um composto orgânico em outras substâncias, normalmente a temperaturas que variam entre (300°C e 500°C) em um ambiente com pouco ou sem nenhum oxigênio. O principal produto final é o carvão, com densidades energéticas duas vezes maiores que aquela do material de origem (lenha). Além de gás combustível, a pirólise produz alcatrão e ácido pirolenhoso (ANEEL, 2008).

Gaseificação: é um processo de conversão de combustíveis sólidos em gasosos, através de reações termoquímicas com o vapor quente e oxigênio, em quantidades inferiores à estequiométrica (mínimo teórico para a combustão). O produto resultante é o gás (mistura de monóxido de carbono, hidrogênio, metano, dióxido de carbono e nitrogênio), em que suas proporções variam de acordo com as condições do processo, por exemplo, se oxigênio que está a ser usado na oxidação (ANEEL, 2002).

Biodigestão: consiste na decomposição do material pela ação de bactérias (microrganismos ácido-gênicos e metano-gênicos). É um processo simples, que ocorre naturalmente com quase todos os compostos orgânicos (ANEEL, 2002).

Craqueamento: é o processo que consiste na quebra de moléculas do óleo e gordura, até à formação de uma mistura de compostos químicos com propriedades muito semelhantes às do diesel de petróleo. Essa mistura pode ser usada diretamente em motores convencionais do ciclo diesel (combustão interna com ignição por compressão), reação realizada a altas temperaturas, na presença ou ausência de catalisadores (SUAREZ et al., 2007).

Esterificação: é um processo químico que consiste da reação de óleos vegetais por intermediário de um produto ativo (metóxido ou etóxido), proveniente de reações entre os álcoois (metanol ou etanol) e uma base (hidróxido de sódio ou de

potássio). O produto dessa reação química é o biodiesel, com características físico-químicas muito semelhantes às do óleo diesel que pode ser usado em motores de combustão interna, de uso veicular ou estacionário (ANEEL, 2008).

2.3 BATERIAS

Em sistemas fotovoltaicos isolados ou fora da rede elétrica convencional, o uso de dispositivos para o armazenamento de energia faz-se necessário quando a questão é atender a demanda em períodos nos quais a geração de eletricidade é nula ou ineficiente (a noite, em dias chuvosos ou nublados, com baixos níveis de irradiação solar). Para o armazenamento da energia elétrica gerada a partir de um sistema fotovoltaico isolado são usadas as baterias eletroquímicas como Chumbo-Ácido (*Pb – ácida*) a tecnologia mais usada e barata; as baterias Níquel-Cadmio (*NiCd*), Níquel-hidreto metálico (*NiMH*) e a de íons de Lítio (*Li – ion*) consideradas como tecnologias modernas e que apresentam vantagens como maior eficiência, vida útil, profundidade de descarga e, que estão alcançando a viabilidade econômica para a maioria dos sistemas fotovoltaicos (PINHO e GALDINHO, 2014).

A Tabela 3 apresenta as principais características de alguns tipos de baterias recarregáveis disponíveis comercialmente que podem ser aplicadas em sistemas fotovoltaicos para eletrificação rural.

TABELA 3 – DADOS TÉCNICAS DE CATÁLOGOS DE BATERIAS RECARREGÁVEIS DISPONÍVEIS COMERCIALMENTE

| Tecnologia | Eletrólito | Densidade energética [Wh/kg] | Densidade energética [Wh/L] | Eficiência η_{Wh} [%] | Vida útil [anos] | Vida elétrica [ciclos] | Temperatura de operação | | Aplicações típicas (exemplos) |
|---|---|------------------------------|-----------------------------|----------------------------|------------------|------------------------|-------------------------|---------------|--|
| | | | | | | | Carga padrão [°C] | Descarga [°C] | |
| Chumbo-Ácido (Pb-ácido) | H ₂ SO ₄ | 20-40 | 50-120 | 80-90 | 3-20 | 250-500 | -10 a + 40 | -15 a + 50 | Uso estacionário, tração, automotiva. |
| Níquel-Cadmio (NiCd) | KOH | 30-50 | 100-150 | 60-70 | 3-25 | 300-700 | -20 a + 50 | -45 a + 50 | Mesmo tipo de aplicação das baterias chumbo-, ferramentas, veículos elétricos. |
| Níquel-hidreto metálico (NiMH) | KOH | 40-90 | 150-320 | 80-90 | 2-5 | 300-600 | 0 a + 45 | -20 a + 60 | Notebooks, celulares, câmeras fotográficas, veículos elétricos e híbridos, brinquedos. |
| Íons de Lítio (Li-íon, Li-polímero) | Polímeros orgânicos | 90-150 | 230-330 | 90-95 | - | 500-1000 | 0 a + 40 | -20 a + 60 | Notebooks, celulares, filmadoras, smart cards, veículos elétricos e híbridos. |
| Bateria alcalina recarregável de Manganês (RAM) | KOH | 70-100 | 200-300 | 75-90 | - | 20-50 | -10 a + 60 | -20 a + 50 | Produtos de consumo, brinquedos. |
| Cloreto de Níquel e Sódio (NaNiCl) | B ²⁺ -Al ₂ O ₃ | ~100 | ~150 | 80-90 | - | ~1000 | +270 a + 300 | +270 a + 300 | Veículos elétricos e híbridos (possíveis aplicações estacionárias) |

FONTE: Pinho e Galdinho (2014)

As baterias Chumbo-Ácido são as mais disponíveis comercialmente e mais usadas para aplicações como Sistemas Fotovoltaicos Isolados (SFI) apesar de as baterias *NiCd* e *NiMH* serem as mais favoráveis em termos operacionais por não apresentarem problemas de descargas profundas ou sulfatação e poderem permanecer descarregas por muito tempo. No entanto, o custo elevado e o número reduzido de fornecedores em relação às baterias Chumbo-Ácido, fazem com que sejam menos atraentes para os SFI, sendo assim aplicadas para sistemas pequenos (PINHO e GALDINHO, 2014).

As baterias automotivas ou tradicionais, segundo (Pinho e Galdinho, 2014) foram projetadas para pequenos períodos e descargas rápidas, tornando-as inapropriadas para aplicações em SFI devido à sua vida útil muito reduzida em regimes de ciclagem quando comparada com outras tecnologias de baterias.

As baterias íons de lítio têm potencial para aumentar a eficiência energética, o tempo de vida e a viabilidade de sistemas alternativos, como a energia solar fotovoltaica e a energia eólica em sistemas isolados, que atualmente utilizam quase que exclusivamente as baterias Chumbo-Ácido (DIOUF e PODE, 2015).

As baterias alcalinas são prejudiciais à saúde do ser humano devido a presença do efeito corrosivo e também ao meio ambiente e quando mal usadas podem libertar ácido sulfúrico que pode contaminar os cursos de água existentes (PINHO e GALDINHO, 2014).

Dentre os vários tipos de tecnologia de armazenamento de eletricidade apresentados, conforme a Tabela 3 serão descritos apenas dois tipos de baterias, as de Chumbo-Ácido e Íons de Lítio, por serem as mais utilizadas para aplicações rurais em sistemas fotovoltaicos. Em relação a outras tecnologias de armazenamento, estas são economicamente viáveis, podem contribuir para a preservação do meio ambiente por utilizarem materiais menos prejudiciais a natureza, por possuírem profundidades de descargas elevadas, e por suportarem variações de temperaturas elevadas ao mesmo tempo em que sua eficiência energética é elevada e com uma boa capacidade de armazenamento.

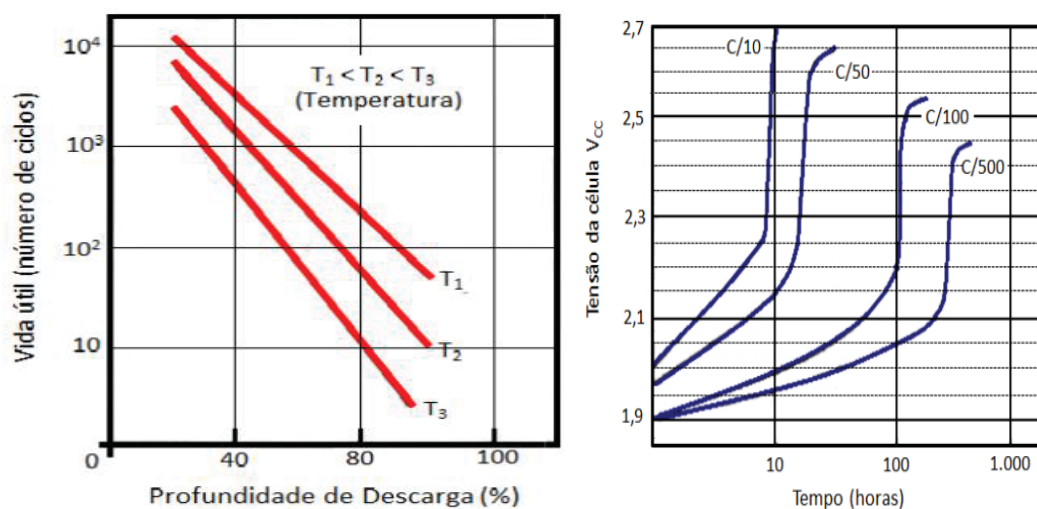
2.3.1 BATERIAS DE CHUMBO-ÁCIDO

As baterias Chumbo-Ácido foram as primeiras disponíveis para uso comercial, sendo assim consideradas como tecnologias de armazenamento de baixo

custo por Wh, atualmente disponíveis no mercado para aplicações em sistemas fotovoltaicos (PINHO e GALDINHO, 2014).

As Figuras 9 (a) e (b) ilustram as curvas típicas da influência da profundidade de descarga e da temperatura na vida útil da bateria e perfil de tensão típico respectivamente, durante o processo de carga da bateria Chumbo-Ácido aberta com várias taxas de carga:

FIGURA 9 – (a) VIDA ÚTIL VERSUS TEMPERATURA E PROFUNDIDADE DE DESCARGA E (b) TENSÃO DA CÉLULA DE CHUMBO - ÁCIDO DURANTE O SEU PROCESSO DE CARGA

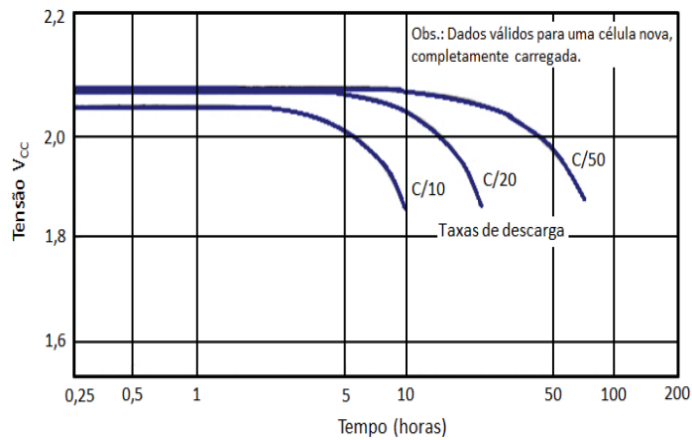


FONTE: Pinho e Galdinho (2014)

A Figura 10 mostra o perfil típico de tensão de uma célula chumbo ácido durante o processo de descarga.

As taxas de carga/descarga $C/10$ até $C/500$ da Figura 10 (b) e $C/10$ até $C/50$ Figura 10, respectivamente, são a corrente de carga ou descarga utilizada pela bateria Chumbo-Ácido. Está relacionada com a razão entre a capacidade máxima da bateria e o período de carga ou descarga em horas. Neste trabalho usou-se a $C/20$, capacidade de descarga de 20 horas.

FIGURA 10 – PERFIL TÍPICO DE TENSÃO DE UMA CÉLULA CHUMBO - ÁCIDO DURANTE O PROCESSO DE DESCARGA



FONTE: Pinho e Galdinho (2014)

As características típicas das baterias Chumbo-Ácido de 12 volts são apresentadas na Tabela 4 para a temperatura ambiente de 20°C.

TABELA 4 – TENSÕES CARACTERÍSTICAS DE CÉLULAS E BATERIAS DE CHUMBO - ÁCIDO

| Tensões Características | Tensões a 20° C (V) | |
|---|-------------------------------------|------------------------------------|
| | Célula | Baterias com seis células |
| Nominal | 2 | 12 |
| Tensão máxima | 2,3 – 2,5 | 14,0 – 15,0 |
| Tensão de flutuação | 2,2 – 2,3 | 13,0 – 14,0 |
| Tensão de circuito aberto com carga plena | 2,1 – 2,2 | 12,5 – 13,0 |
| Tensão medida para limite da capacidade | 1,8 – 1,9 | 10,8 – 11,4 |
| Mudança das características de tensão com a temperatura | -00,5 V para cada 10 ° C de aumento | -0,33 V para cada 10° C de aumento |

FONTE: Pinho e Galdinho (2014)

A correção da tensão da célula de uma bateria com a temperatura, pelo princípio de Arrhenius, é segundo a equação (1):

$$V(T) = V_{Tref} + Kx(T - T_{ref}) \quad (1)$$

Onde:

$V(T)$ (V) – Tensão da célula na temperatura T;

V_{Tref} (V) – Tensão da célula na temperatura de referência adotada pelo fabricante;

K (V/°C) – Coeficiente de temperatura da célula especificada pelo fabricante;

T (°C) – Temperatura da célula; e

T_{ref} (°C) – Temperatura de referência adotada pelo fabricante.

Segundo Pinho e Galdinho (2014), as baterias Chumbo-Ácido apresentam vantagens como:

- Custo baixo e simplicidade fabricação em relação às outras tecnologias;
- baixo custo de manutenção;
- maior vida útil;
- tecnologia madura e confiável;
- auto-descarga baixa em relação às outras baterias recarregáveis;
- podem sofrer ciclos profundos e ser descarregadas; e
- capaz de suportar temperaturas elevadas.

E as desvantagens são:

- densidade energética baixa quando comparada com outras tecnologias;
- tempo de vida útil curta;
- pode prejudicar o meio ambiente caso sejam manuseadas inadequadamente;
- limitações de transporte; e
- meios para a medição do estado de carga complexo entre outras limitações (o estado de carga é que define o tempo de vida da bateria).

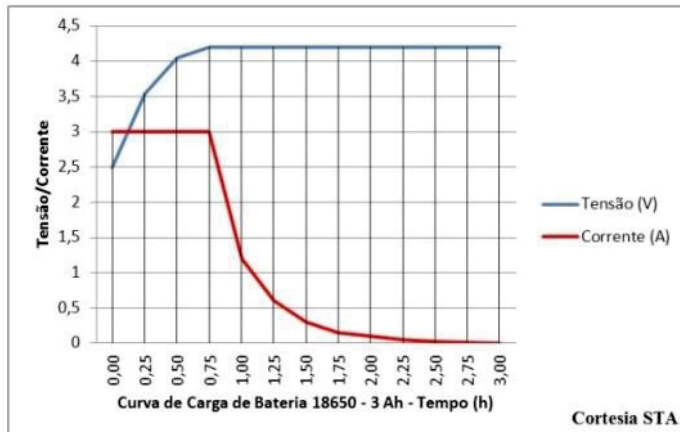
2.3.2 BATERIAS ÍONS DE LÍTIO

A bateria de Li íons apresenta densidades energéticas elevadas, na faixa de 90-150 Wh/kg, tem sido atualmente usada em larga escala em equipamentos eletrônicos portáteis como câmaras, *laptops*, celulares, veículos elétricos, entre outras aplicações (PINHO e GALDINHO 2014). São uma tecnologia promissora e que ainda tem muito espaço para novos desenvolvimentos.

A Figura 11 ilustra o comportamento da tensão/corrente de uma bateria íons de lítio. A tensão varia de 0 a 4,5 V. O pico se mantém constante a 4,2 V e a

corrente cai para 3 Ah (ampère hora). Quando a tensão se torna constante a corrente da bateria cai, o que significa que está completamente carregada.

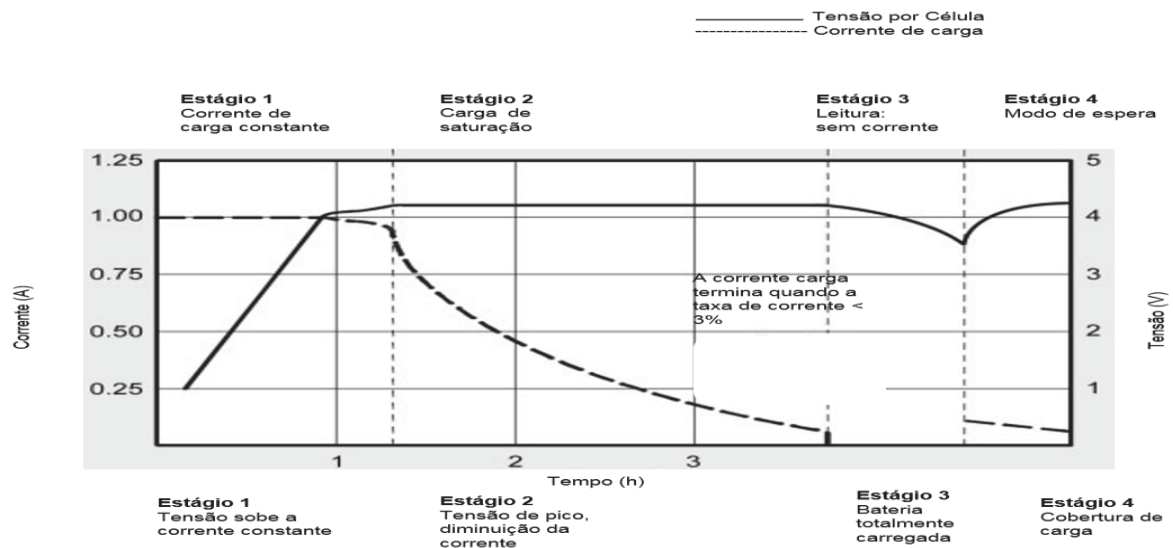
FIGURA 11 – CURVA TÍPICA DE CARGA DA BATERIA ÍONS DE LÍTIO



FONTE: Rontek (2019)

A Figura 12 mostra os estágios de carga de uma bateria de íons de Lítio. A carga total é atingida quando a corrente diminui no intervalo de 3 a 5 Ah.

FIGURA 12 – ESTÁGIOS DE CARGA DA BATERIA ÍONS DE LÍTIO

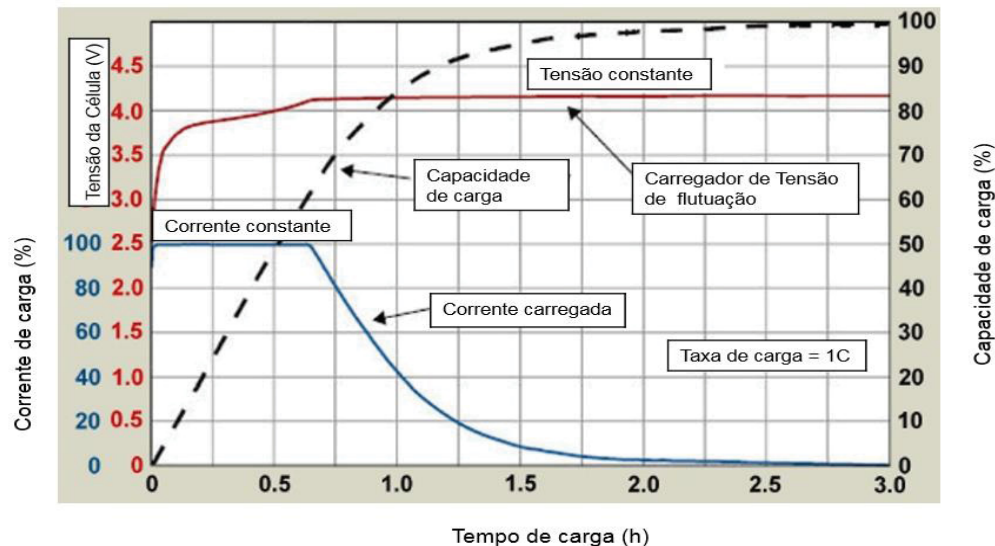


FONTE: Himaxbattery (2019)

Quando a bateria é carregada pela primeira vez, a tensão dispara e sua capacidade é atingida quando a bateria está totalmente carregada conforme a Figura 13. Essa característica é típica em todas as baterias no processo de carga. Este processo pode ser comparado com o levantar de um peso com um elástico

causando um atraso. Quanto maior for a corrente de carga, maior será o efeito de elasticidade.

FIGURA 13 – TENSÃO /CAPACIDADE vs TEMPO DE CARREGAMENTO DA BATERIA ÍONS DE LÍTIO



FONTE: Himaxbattery (2019)

O processo de carga pode ser variado e a bateria de íons de lítio não entra em saturação como é o caso da bateria Chumbo-Ácido, favorecendo-as no armazenamento de energia renovável gerada pelos painéis solares e turbinas eólicas, que nem sempre podem carregar totalmente a bateria.

Segundo Anuphapparadorn et al. (2014), as baterias íons de lítio apresentam vantagens como:

- alta densidade energética;
- nenhuma ou baixa manutenção;
- ecologicamente limpas;
- possui um sistema de controlo eletrónico e monitoramento da bateria;
- suporta picos de corrente elevadas;
- auto-descarga baixa;
- eficiência de carga elevada; e o
- número de ciclos de vida maiores quando comparada com a bateria de Chumbo-Ácido.

As desvantagens são:

- requer circuito de proteção que limita a tensão e a corrente. A bateria é segura se não sobrecarregada;
- custo elevado;
- sujeita ao envelhecimento mesmo quando não estiver em uso;
- o transporte físico da bateria está sujeito aos regulamentos de transporte devido a possíveis derramamentos do eletrólito impactando na segurança, saúde e ao meio ambiente;
- pequenos desvios de tensão de operação podem reduzir sua vida útil;
- tecnologia não inteiramente madura;
- requer cuidados ao manuseá-la devido a sua alta densidade energética que pode causar curto-circuito, sobrecarga ou esmagamento, deve também ter cuidados para não bater, não perfurar, não aplicar polaridade reversa, não expor à alta temperatura e não desmontar; e
- a ruptura pode causar a abertura com chama devido a altas temperaturas.

Para que se tenha uma ótima configuração do sistema é necessário que o sistema de armazenamento de energia apresente características fundamentais tais como segurança, acessibilidade, eficiência, tolerância a variações de parâmetros externa como temperatura e umidade, boa densidade de energética, vida útil elevada e nenhuma ou baixa manutenção (DIOUF e PODE, 2015).

A preferência por baterias Chumbo-Ácido está no custo inicial de investimento em relação às baterias de íons de lítio, que é elevado em relação às outras tecnologias de armazenamento, porém, suas vantagens superam este impasse, tornando-as ideais para aplicações rurais por apresentarem maior tempo de vida útil, não requerem ou requerem manutenção e alta densidade energética (ANUPHAPPHARADORN et al., 2014).

2.4 PROBABILIDADE DE PERDA DE CARGA (LOLP)

Ao se projetar um Sistema Fotovoltaico Isolado é importante conhecer a disponibilidade da fonte de alimentação. Se a disponibilidade da fonte é 100%, ela é

capaz de fornecer energia para toda a demanda de carga sem quaisquer interrupções e se é 0% não é capaz de fornecer energia para toda a demanda de carga no período de interesse Otumdi *et al.* (2017). A Probabilidade de Perda de Carga (do inglês *Loss of Load Probability* – LOLP) é definida neste trabalho de duas maneiras, a saber:

LOLP é o desempenho do sistema dado pela relação entre os déficits de energia anual e a carga anual demanda de acordo com Otumdi *et al.* (2017) é dada por:

$$LOLP = \frac{\sum_{i=1}^{366} E_{\text{déficit}, i}}{\sum_{j=1}^{366} E_{\text{carga}, j}} \quad (2)$$

Por outro lado, Theristis e Papazoglou (2014) definem a LOLP como a porcentagem de energia no momento em que o sistema não atendeu à demanda de carga totalmente, expressa por:

$$LOLP = \frac{\sum_{j=1}^N E_{\text{déficit}}(j)}{N} \times 100\% \quad (3)$$

$$E_{\text{Déficit}}(j) = E_{\text{Disponível}}(j) - E_{\text{carga}}(j) \quad (4)$$

$$E_{\text{Disponível}}(j) = E_{\text{SFV}}(j) - E_{\text{Perdas}}(j) - E_{\text{Desperdício}}(j) \quad (5)$$

$$E_{\text{Desperdício}}(j) = E_{\text{Excedente}}(j) - E_{\text{Bateria}}(j) \quad (6)$$

$$E_{\text{Excedente}}(j) = E_{\text{SFV}}(j) - E_{\text{carga}}(j) - E_{\text{Perdas}}(j) \quad (7)$$

Onde:

N – Número de período de interesse;

$E_{\text{FV}}(j)$ – Energia Solar Fotovoltaico no dia j [Wh];

$E_{\text{Carga}}(j)$ – Energia demandada pela carga no dia j (ou na hora j se for expressa como demanda de carga horária) [Wh];

$E_{\text{Perdas}}(j)$ – Energia perdida no sistema no dia j [Wh];

$E_{\text{Déficit}}(j)$ – Déficit de energia no sistema no dia j [Wh].

De acordo com Amaral (2019), as perdas do sistema nas condições ideais de funcionamento para um sistema fotovoltaico isolado é um total de 30 a 35 %. Tais perdas foram usadas para no cálculo da Energia perdida no sistema, nomeadamente:

- Perdas de potência do sistema fotovoltaico;
- Perdas por desacoplamento (*Mismatch*);
- Perdas ôhmicas;
- Perdas por conversão do inversor; e perdas globais (sujeira, inclinação, orientação, poeira, tolerância, entre outras).

O déficit de energia pode ser positivo ou zero. Quando é positivo significa que há falta de energia no sistema. Neste caso, utiliza-se energia armazenada nas baterias para atender a demanda da carga. Quando é zero significa que toda a carga está a ser atendida pela geração. O excedente dessa energia é armazenado nas baterias.

$$E_{Excedente}(j) = E_{desperdício}(j) \quad \text{se} \quad E_{SFV}(j) \geq E_{Carga}(j) \quad (8)$$

$$E_{Déficit}(j) = E_{desperdício}(j) \quad \text{se} \quad E_{SFV}(j) < E_{Carga}(j) \quad (9)$$

O comportamento do sistema também pode ser interpretado da seguinte maneira:

$$E_{Déficit} = \begin{cases} 1, & \text{se } E_{Disponível}(j) < E_{Carga}(j) \\ 0, & \text{se } E_{Disponível}(j) > E_{Carga}(j) \end{cases} \quad (10)$$

O valor "0" do LOLP significa que a carga será sempre satisfeita e o valor "1" significa que a carga nunca é suprida. O sistema está satisfeito quando a potência gerada pelo gerador fotovoltaico for suficiente e energia de armazenamento da bateria não se esgota. Quando a energia gerada pelo arranjo fotovoltaico é maior que a carga do sistema, a energia excedente é armazenada nas baterias (SINGH e FERNANDEZ, 2014).

2.5 ALGORITMOS GENÉTICOS

Os Algoritmos Genéticos (AGs) são uma técnica de otimização de busca baseadas nos princípios da genética e seleção natural (GOLDBERG, 1989). Foram introduzidos em meados de 1976 por John Holland e seus colaboradores da Universidade de Michigan, mas seu pleno desenvolvimento, só ocorreu a partir da década de 80, através do trabalho de Goldberg. Eles baseiam-se inicialmente na geração de uma população formada por um conjunto aleatório de indivíduos que podem ser vistos como possíveis soluções para um problema.

Os Algoritmos genéticos são também definidos como procedimentos computacionais estocásticos cujos métodos de busca modelam os fenômenos

biológicos de herança genética e seleção natural. Partem do pressuposto que, em uma dada população, indivíduos com boas características genéticas têm maiores oportunidades de sobrevivência e de produzirem indivíduos cada vez mais aptos enquanto indivíduos menos aptos tendem a desaparecer.

Segundo Goldberg (1989a), os Algoritmos Genéticos diferem-se dos algoritmos tradicionais de busca e otimização em basicamente quatro aspectos:

- trabalham com uma codificação do conjunto de parâmetros e não com os próprios parâmetros;
- trabalham com uma população e não com um único ponto;
- utilizam informações de custo ou recompensa e não derivadas ou outro conhecimento auxiliar; e
- utilizam regras de transição probabilísticas e não determinísticas.
- o bom funcionamento dos Algoritmos Genéticos depende de parâmetros tais como: o tamanho máximo da população; o tamanho máximo do indivíduo (ou cromossomo); os vetores que representam os indivíduos da população; o valor de aptidão e os vetores que representam os indivíduos da nova população.

2.5.1 VANTAGENS DOS ALGORITMOS GENÉTICOS

Os Algoritmos Genéticos são muito eficientes para busca de soluções ótimas, ou aproximadamente ótimas em uma grande variedade de problemas, pois não impõem muitas das limitações encontradas nos métodos de busca tradicionais (HAUPT e HAUPT, 1998).

As principais vantagens dos AGs são:

- para a otimização do problema podem ser usadas variáveis contínuas ou discretas;
- não requerem informações de derivadas;
- faz pesquisas simultâneas a partir de uma ampla amostragem da superfície de custo;
- lida com um grande número de variáveis;
- é adequado para computadores paralelos;
- otimizam variáveis com superfícies de custo complexas;
- fornecem uma lista de variáveis ótimas, não apenas uma única solução;

- codificam variáveis para que a otimização seja feita com variáveis codificadas; e
- podem trabalhar com dados gerados numericamente, dados experimentais ou funções analíticas.

2.5.2 OPERADORES GENÉTICOS

Os operadores genéticos realizam transformações em uma população, fazendo com que, a cada nova geração, indivíduos cada vez mais aptos contribuam na evolução de uma nova geração (PINHEIRO *et al.*, 1997).

I. Inicialização

Um Algoritmo Genético tem início a partir da execução do operador inicialização, que consiste na criação de uma população inicial de forma aleatória, na qual os demais serão aplicados para a satisfação das restrições de um determinado problema (LEE, BAI e PARK 1995).

II. Função de Aptidão

A evolução das possíveis soluções é guiada pela função aptidão, que é projetado como uma medida da qualidade das soluções (UDHAYAKUMAR, CHARLES, e UTHARIARAJ, (2010). É a função a ser otimizada, fornecendo o mecanismo de avaliação em cada geração.

III. Seleção

Conforme Udhayakumar, Charles, e Uthariaraj, (2010), o procedimento de seleção controla como os indivíduos escolhidos se acasalarem e produzirem descendentes na geração seguinte. São usados no processo de seleção de indivíduos dois métodos: a coleta e o torneio, de onde os indivíduos mais aptos têm maiores probabilidades de gerar mais descendente, enquanto os menos aptos em uma escala menor.

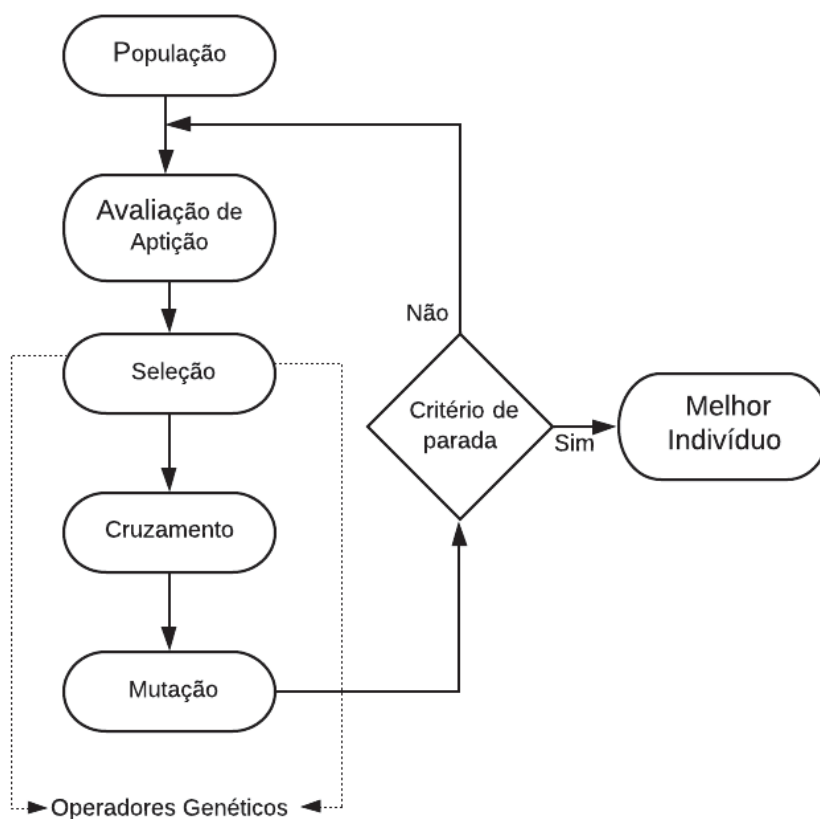
IV. Cruzamento

É o operador genético mais predominante. Através dele são criados novos indivíduos misturando-se as características dos seus descendentes (pai e mãe). Quando maior for a taxa de cruzamento mais rapidamente novas estruturas são introduzidas na população. O operador cruzamento garante a troca de informações que levam a geração de indivíduos mais aptos a sobreviverem (GOLDBERG, 1989).

V. Mutação

Para Pinheiro *et al* (1997), o operador mutação altera bits numa cadeia de caracteres com a probabilidade de mutação (p_m). O operador mutação simplesmente modifica aleatoriamente alguma característica sobre a qual é aplicada, necessária para a manutenção da originalidade genética da população. A Figura 14 apresenta a estrutura do funcionamento de um algoritmo genético, indicando seus operadores genéticos dominantes.

FIGURA 14 – ESTRUTURA BÁSICA DE UM ALGORITMO GENÉTICO



FONTE: Tavares (2014)

2.6 ALGORITMO GENÉTICO DE ORDENAÇÃO NÃO-DOMINADA

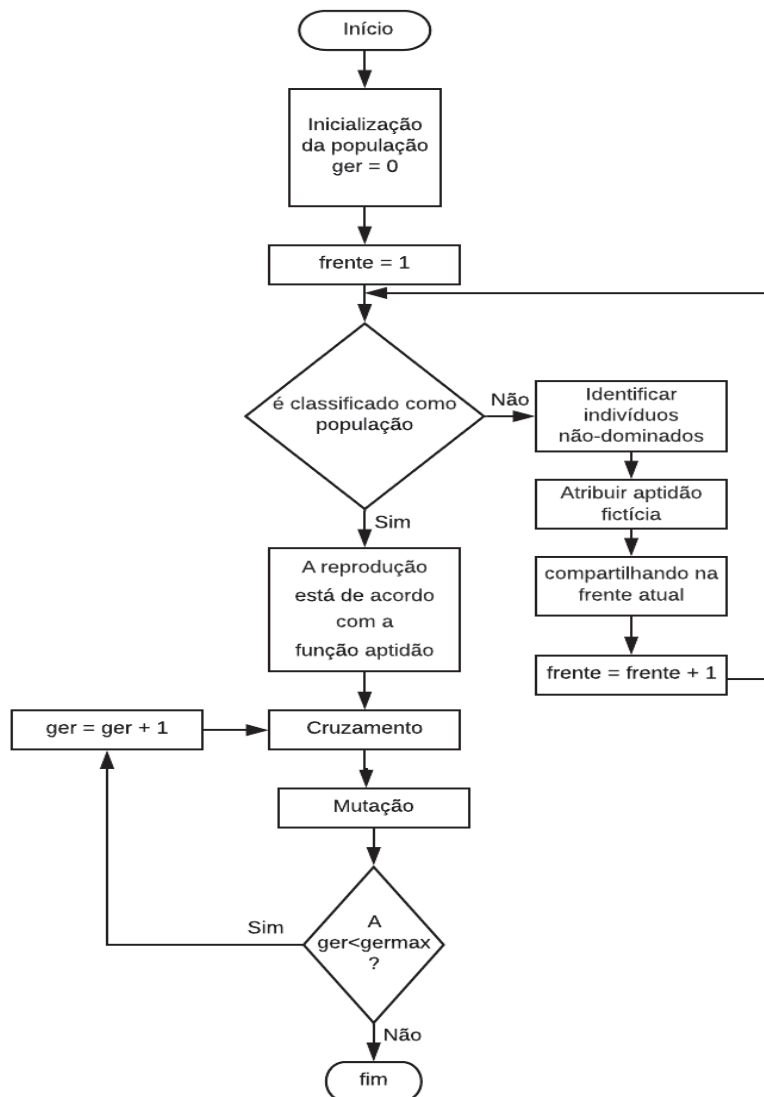
O Algoritmo Genético de Ordenação Não-Dominada (do inglês *Non-dominated sorting genetic algorithm*, NSGA-II) foi criado por Deb *et al.* (2000), para aliviar as dificuldades e críticas apresentadas pelos algoritmos evolutivos multi-objetivos que usam ordenação e compartilhamento não dominado (NSGA) principalmente por: elevada complexidade computacional; falta de elitismo; e pela necessidade de especificar um parâmetro de compartilhamento. O NSGA-II foi

capaz de resolver estes problemas e manter um grande número de soluções que convergiram para a melhor frente Pareto ótimas próxima da verdadeira computacionalmente rápida e elitista (DEB *et al.*, 2002).

Os NSGA-II têm sido observados como a melhor metaheurística na resolução de problemas de otimização multiobjectivo, sendo ele uma extensão dos AGs em que uma dada classificação baseada em Pareto é usada para atribuir a adequação em um conjunto de indivíduos. A classificação feita em cada indivíduo é determinada por meio da sua dominância com a população atual (KAUSHIK e VIDYARTHI, 2016). Ele conduz a ordenação não dominada da população inicial, seleciona, cruza e muta para obter uma nova população. Combina a população descendente com os seus progenitores que depois são conduzidos a uma classificação não dominada para obter uma fronteira de soluções não dominadas. No NSGA-II anterior, apenas uma população era mantida durante sua evolução. A única desvantagem desta abordagem está no que respeita a diversidade populacional. Ela pode ser pobre, porque em alguns problemas de otimização multiobjectivo com muitos ótimos locais, as populações tendem a convergir para ótimos locais (ZHAO *et al.*, 2019).

De acordo com Ye e Huang (2015), o NSGA-II tem demonstrado estar entre os algoritmos mais eficientes para otimização multiobjetivo em um grande número de problemas. Uma breve descrição do procedimento NSGA-II é mostrada na Figura 15.

FIGURA 15 – FLUXOGRAMA DO PROCESSO DE EVOLUÇÃO DO NSGA-II



FONTE: Srinivas e Deb (1994)

A população inicial é gerada aleatoriamente considerando um número específico de indivíduos com bits assumindo valores entre (0 ou 1). Uma vez inicializada a população, inicia-se com o processo de evolução. O primeiro passo é classificar a população baseando-se na não dominância em cada frente. Para além frente de classificação calcula-se a distância de superposição para cada cromossomo. A distância de superposição é uma medida que indica quão perto o cromossomo está próximo do outro (YE e HUANG, 2015).

Após esse passo, os indivíduos são classificados em diversos níveis de acordo com o grau de dominância para o cálculo da função de aptidão. Os indivíduos mais aptos são definidos e selecionados. Este processo é repetido até

que se atinja o número máximo de gerações, também definido por testes empíricos (VITORINO *et al.*, 2015).

2.7 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Neste capítulo foram apresentados os conceitos Eletrificação Rural, Sistemas Isolados, tecnologias de fontes alternativas renováveis e inesgotáveis, abundantes em quase todas as regiões do mundo, tecnologias maduras, consideradas disponíveis para atender o suprimento energético local e baterias usadas para o armazenamento do excesso de energia gerada para o uso a noite e/ou em dias de pouca incidência solar.

Foram também revisados os conceitos de Probabilidade de Perda de Carga, que mede a confiabilidade do sistema; as técnicas de Algoritmos Genéticos, para a obtenção da melhor configuração do sistema. Por fim o NSGA-II, uma metaheurística que é adequada para a resolução de problemas de otimização Multiobjectivos, que neste projeto usa a minimização do custo de operação do sistema e pessoa quantidade de bateria, por exemplo, elemento essencial para a eletrificação rural *off-grid*. As simulações serão desenvolvidas na ferramenta de computacional no MATLAB®.

3 REVISÃO DA LITERATURA

3.1 PROCESSO DE SELEÇÃO DE PORTFÓLIO BIBLIOGRÁFICO

A coleta de artigos científicos para a realização deste trabalho foi feita através do Portal de Periódicos da CAPES, disponibilizado pelo Ministério da Educação (MEC). Para a seleção do portfólio bibliográfico, o primeiro passo foi a definição do eixo de pesquisa: "Eletrificação Rural" para as seguintes palavras-chave: *Off-Grid Systems*, *Photovoltaic Systems* e *Battery Energy Storage Systems*, que relacionam o problema a ser resolvido. Foram também definidas as seguintes palavras-chave: *Loss of Load Probability* e *Non-dominated sorting genetic algorithm*, NSGA-II relacionadas à abordagem técnica do problema.

O uso destas técnicas auxiliou na resolução do problema que é a obtenção da melhor configuração do sistema, que é suprir as necessidades energéticas em comunidades isoladas da rede elétrica de distribuição de energia nacional, de modo economicamente viável e sustentável. Assim, o sistema aqui em estudo deve ser confiável, ou seja, a oferta e a demanda devem estar sempre em equilíbrio.

A combinação das palavras-chave é apresentada na Tabela 5.

TABELA 5 – COMBINAÇÃO DAS PALAVRAS-CHAVE

| | |
|--------------------------------|--|
| Rural Electrification + | <i>Off-Grid Systems</i> |
| | <i>Photovoltaic Systems</i> |
| | <i>Battery Energy Storage Systems</i> |
| | <i>Loss of Load Probability</i> |
| | <i>Non-dominated sorting genetic algorithm</i> (NSGA-II) |

FONTE: A autora (2019)

A partir da combinação das palavras-chave, realiza-se o processo de seleção de artigos na base de dados do *software Publish or Perish*[®] versão 6 através do alinhamento das palavras-chaves, submetidas aos filtros, selecionando-se os mais relevantes, publicados nos últimos dez anos (2009-2019), a fim de limitar o número de buscas. Neste *software*, o número máximo de buscas é de até 1000 itens incluindo (livros, artigos, *links* entre outros).

Obtiveram-se 899 artigos para a primeira a busca (*Off-Grid Systems*), 997 para a segunda busca (*Photovoltaic Systems*), 882 para a terceira busca (*Battery Energy Storage Systems*), 908 para a quarta busca (*Loss of Load Probability*) e

finalmente 1000 artigos para a quinta busca o *NSGA-II*, fazendo um total de 4.686 itens. Este processo foi realizado na plataforma *Google Scholar* baseado no impacto da revista, número de citações do artigo, ano de publicação (dos quais os mais recentes foram privilegiados). Ainda na mesma plataforma foram retirados documentos como livros, sites desconhecidos e congressos, ficando-se com 3.234 artigos desde a primeira a quinta busca, respectivamente.

Depois deste processo de filtragem, os artigos foram exportados para o *software Mendeley*[®] também usado para inserir citações e na organização de referências bibliográficas do trabalho pela ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas da Universidade Federal do Paraná, para a eliminação de duplicatas). Nesse processo, 1.096 artigos foram eliminados ficando com um total de 2.138 artigos.

A partir desde passo procedeu-se com a eliminação de artigos que não eram relevantes ao tema, muitos dos quais publicados em revistas e/ou jornais não reconhecidos cientificamente. Para garantir um portfólio alinhado ao tema, realizou-se o teste de aderência das palavras-chave, através da leitura dos títulos dos artigos encontrados, onde foi possível eliminar um universo de 1.661 artigos, ficando com 477 artigos. Foi possível eliminar, ainda neste processo todos os artigos que fazem parte de estudos de caso, dos quais, não extensivos para outras regiões, que são as abordadas no próprio estudo. Por fim, restaram 165 artigos para a leitura dos resumos. Durante a leitura dos resumos, foi possível eliminar mais artigos que não estavam alinhados ao problema e às suas abordagens técnicas, ou seja, que não abordavam o assunto pesquisado no presente trabalho, ficando somente com 33 artigos para a leitura seletiva. Nesta fase, procedeu-se com a leitura da introdução e conclusão dos artigos sobrando 11 artigos selecionados conforme a Tabela 6.

TABELA 6 – QUADRO DE ARTIGOS SELECIONADOS POR PALAVRA-CHAVE

| Palavra-Chave | Artigo Selecionado | Revista | Ano |
|---------------------------------------|--|---|------|
| <i>Off-Grid Systems</i> | <i>Hierarchical methodology to optimize the design of stand-alone electrification systems for rural communities considering technical and social criteria</i> | <i>Renewable and Sustainable Energy Reviews</i> | 2015 |
| | <i>Social, cultural and political dimensions of off-grid renewable energy programs in developing countries</i> | <i>Renewable Energy</i> | 2016 |
| | <i>Modelling, planning, application and management of energy systems for isolated areas: A review</i> | <i>Renewable and Sustainable Energy Reviews</i> | 2018 |
| <i>Photovoltaics Systems</i> | <i>Techno-Economic Optimum Sizing of a Stand-Alone Solar Photovoltaic System</i> | <i>IEEE Transactions on Energy Conversion</i> | 2009 |
| | <i>A design methodology of stand-alone photovoltaic power systems for rural electrification</i> | <i>Energy Conversion and Management</i> | 2017 |
| <i>Battery Energy Storage Systems</i> | <i>Technical and economic design of photovoltaic and battery energy storage system</i> | <i>Energy Conversion and Management</i> | 2014 |
| | <i>A linear programming approach for battery degradation analysis and optimization in off-grid power systems with solar energy integration</i> | <i>Renewable Energy</i> | 2017 |
| | <i>Economic and resilience benefit analysis of incorporating battery storage to photovoltaic array generation</i> | <i>Renewable Energy</i> | 2019 |
| <i>Loss of Load Probability</i> | <i>A sizing methodology based on Levelized Cost of Supplied and Lost Energy for Off-Grid rural electrification systems</i> | <i>Energy Conversion and Management</i> | 2016 |
| NSGA-II | <i>Optimization methods applied to renewable and sustainable energy: A review</i> | <i>Renewable and Sustainable Energy Reviews</i> | 2011 |
| | <i>Exploring the boundaries of Solar Home Systems (SHS) for Off-Grid electrification: Optimal SHS sizing for the multi-tier framework for household electricity access</i> | <i>Applied Energy</i> | 2019 |

Fonte: A autora (2019)

Depois deste processo, os artigos selecionados foram exportados novamente ao *software Publish or Perish*[®] para a verificação das métricas, Tabela 7. Importa salientar que a maioria os artigos selecionados para esta pesquisa são recentes e ainda não tem muitas citações.

TABELA 7 – MÉTRICAS DOS ARTIGOS SELECIONADOS

| Métricas | |
|---------------------|-----------|
| Ano de Publicação | 2009-2019 |
| Número de artigos | 11 |
| Citações | 215 |
| Citações por ano | 21,50 |
| Citações por artigo | 19,55 |
| Citações por autor | 74,83 |
| Artigos por autor | 3,83 |
| Autores por artigo | 4,00 |
| h-index | 5 |
| g-index | 11 |
| hI-norm | 4 |
| hI-annual | 0,40 |
| Count: | 2 |

Fonte: A autora (2019)

3.2 ANÁLISE DA LITERATURA

Neste subcapítulo será feita a leitura, análise, interpretação e síntese dos artigos selecionados para se melhor debruçar sobre o assunto aqui tratado. Foram detalhados os resumos dos artigos selecionados que serviram de escopo para a realização deste trabalho, organizados em ordem cronológica dos acontecimentos, para melhor percepção do problema aqui abordado.

Kolhe (2009) apresentou uma metodologia analítica e completa para a obtenção da relação ótima entre o arranjo fotovoltaico e a capacidade de armazenamento da bateria necessária para uma fração de carga de energia especificada. A otimização tecno-econômica do sistema fotovoltaico foi feita somando os custos nivelados de energia (do inglês *life-cycle cost-LCC*) baseadas nas alterações do número total da bateria usando o modelo de ciclo de vida pelo conceito de utilização da radiação solar e a eficiência média mensal para a estimativa do desempenho do sistema fotovoltaico autônomo durante seu período de vida útil. Este método permitiu a obtenção do arranjo fotovoltaico normalizado e a capacidade da bateria em qualquer nível de fração de carga de energia especificado e o benefício deste procedimento é reduzir as informações contidas nos parâmetros meteorológicos. Verificou-se que a utilização deste método as frações de carga

assim como o número de baterias têm um impacto significativo na seleção e dimensionamento de um sistema fotovoltaico autônomo na determinação da configuração ótima do sistema.

Baños et al. (2011) apresentaram em seu estudo uma visão geral da literatura sobre pesquisas relacionadas ao uso de algoritmos de otimização computacional aplicados a sistemas de energia renovável e sustentável. Vários métodos de otimização foram apresentados, tendo em conta a demanda de carga e a expansão da rede elétrica de distribuição de energia. Foram abordados neste estudo, conceitos sobre a escolha da melhor alternativa energética (eólica, solar, hidráulica, biomassa, geotérmica ou híbrida) e sua aplicação considerando os padrões de alocação de recursos e serviços, políticas locais, o desenvolvimento econômico, estrutura energética, análises entre as interrupções no fornecimento, custo, confiabilidade e segurança do sistema. A primeira conclusão desta revisão focou-se no número de trabalhos de pesquisa que usam métodos de otimização especialmente para sistemas de energia eólica e solar. Alguns desses métodos, segundo os autores são baseados em abordagens tradicionais como a programação linear inteira e mista, Lagrangeano, programação quadrática e simplex que alguns trabalhos abordam métodos heurísticos como algoritmos genéticos e enxame de partículas. Os algoritmos Multiobjectivo utilizam técnicas de otimização de Pareto e processamento ótimos paralelo para a resolução de problemas de otimização em sistemas de energia renovável.

O objetivo do trabalho elaborado por Bortolini, Gamberi e Graziani (2014) foi apresentar o sistema fotovoltaico com o sistema de armazenamento por baterias (do inglês *Photovoltaic systems with battery energy storage system* - BESS), projeto técnico e econômico como estratégia de gestão e discutir o modelo analítico para determinar a capacidade do sistema capaz de minimizar o (*Levelized Cost of the Electricity-LCOE*). O sistema BESS conectado à rede é instalado nos prédios da Engenharia e Escola de Arquitetura da Universidade de Bolonha, Itália. Foi também apresentado pelos autores, o fluxograma de referência para o sistema PV – BESS conectado à rede, incluindo as direções do fluxo de energia. O sistema integrou os módulos fotovoltaicos, os bancos de baterias equipados com os dispositivos de conversão de energia elétrica DC/AC, o controlador de carga que protege as baterias sob o risco de sobrecarga e o excesso do nível de descarga, as conexões ligadas à rede e à carga. O sistema satisfaz a demanda horária de energia

produzida pelos módulos fotovoltaicos ou a energia armazenada no Sistema BESS. Os autores apresentaram uma análise Multi-Cenário na qual variam a potência do sistema PV e a capacidade de armazenamento do sistema BESS, considerando o perfil de carga e a demanda de energia por hora de 1995 a 2012. Relacionaram à sua análise a irradiação horária, a temperatura no local de instalação e a vida útil do sistema. Concluíram nesse estudo que a capacidade de armazenamento do sistema BESS depende da potência do sistema PV, que também depende do nível de irradiação solar para cada hora do dia de acordo com o algoritmo de controle de fluxo de potência orientada para atender o perfil de carga de energia com sistema PV - BESS.

O trabalho elaborado por Domenech, Ferrer-Martí e Pastor (2015) teve como objetivo o desenvolvimento de uma metodologia que otimiza a configuração de um sistema isolado para a eletrificação rural baseada em energias renováveis, considerados por eles, como sendo adequados para eletrificar comunidades rurais. Neste trabalho os autores combinaram as tecnologias de geração eólica e solar, o microredes e os sistemas individuais considerando as características econômicas, técnicas e sociais da população. A metodologia de estudo, por eles abordada e devido à complexidade do processo de tomada de decisão foi dividida em três categorias de decisão: primeiro a coleta das características da comunidade alvo e da população; a escolha da melhor configuração do sistema. Este processo foi dividido em três níveis de decisão ordenados de acordo com o peso do tomador de decisão, de onde foram geradas várias alternativas de geração de eletricidade qual uma foi selecionada. No terceiro nível foi discutida a questão custo de investimento obtido opcionalmente como forma de melhorá-lo e para a manutenção das decisões tomadas anteriormente, através de um processo de otimização. Para validar a metodologia, os autores optaram em aplicá-la em uma comunidade para verificar sua adequação, de onde concluíram que sua participação é sempre bem-vinda para evitar conflitos sociais. Esta metodologia foi desenhada com o intuito de facilitar aos projetistas, em seus projetos de eletrificação rural, o estudo de uma variedade de opções sem uma estrutura clara e organizada para a obtenção de soluções que combinem com as preferências dos usuários, incluindo as considerações econômicas, técnicas e sociais. Como trabalhos futuros dois projetistas abordaram esta metodologia em seus estudos para aplicá-la em comunidades rurais reais.

Urmee e Md (2016) consideraram que os programas de eletrificação rural isolados, baseados em energias renováveis são uma das formas mais eficazes para expandir o acesso à energia elétrica em áreas remotas dos países em desenvolvimento. Porém, sentiram a necessidade de identificar os principais fatores socioculturais e políticos, que desempenham um papel importante para o fornecimento de energia elétrica em regiões isoladas e como eles podem ser introduzidos na elaboração de programas de eletrificação rural. A divulgação de tecnologias de energias renováveis, segundo os autores, pode ser considerada uma das opções viáveis, porém, para a sua aplicação é importante envolver a comunidade para o sucesso de um programa de eletrificação rural. Devido aos diferentes níveis de compreensão sobre a adoção ou não de uma nova tecnologia, à capacidade socioeconômica e a autodeterminação cultural foi necessário identificar o tomador de decisões dentro das famílias ou num grupo comunitário; identificar dentro da comunidade um grupo alvo, aqueles que se adaptam facilmente a novas tecnologias; criar estratégias/critérios de adoção da nova tecnologia e entender suas necessidades energéticas. Como conclusão os autores recomendam a abordagem de aspectos socioculturais e políticos em diferentes estágios de desenvolvimento na implementação de programas de eletrificação rural, a fim de assegurar um programa sustentável e em longo prazo.

A metodologia de dimensionamento proposta por Mandelli, Stefano et al. (2016) relacionou os melhores resultados no dimensionamento dos principais componentes do sistema fotovoltaico isolado para eletrificação rural em Uganda (estudo de caso) baseando-se nas características específicas do local. A metodologia utilizou o conceito de Custo Nivelado de Energia Fornecida e Perdida (*Levelized Cost of Supplied and Lost Energy-LCoSLE*), baseado na estimativa do Valor Econômico de Carga Perdida (*Value of Lost Load- VOLL*) e o LOLP foi considerado como os resultados de saída do processo de otimização na obtenção de um sistema confiável ao menor custo. Para tal, modificaram o Custo Líquido Presente (*Net Present Cost-NPC*) considerando o VOLL como custos adicionais e o LCoSLE (baseado no novo NPC *) como função objetivo. A modelagem proposta foi implementada na ferramenta computacional MATLAB a Estrutura geral da nova metodologia de dimensionamento incluiu os dados do recurso solar, da demanda de carga, das principais características físicas do sistema (temperatura, o SOC_{min} das baterias, vida útil das baterias, inversores, entre outros). Os resultados apresentados

pelos autores, mostraram-se satisfatórios embora tenha sido uma adaptação de um método aplicado em sistemas de energia de países desenvolvidos para países em desenvolvimento em aplicações *off-grid* baseado em fontes de energias renováveis. Sustentam ainda que a metodologia pode ser considerada uma abordagem alternativa quando for necessário apresentar os valores de LOLP.

Ghaib e Ben-Fares (2017) apresentaram em seu estudo uma metodologia para o projeto de sistemas fotovoltaicos autônomos confiáveis e sustentáveis. No estudo os autores apresentaram conceitos de previsão da demanda de carga, as características da estrutura e o dimensionamento do sistema fotovoltaico considerando várias tecnologias de armazenamento em busca da melhor configuração do sistema, apresentando como critérios de análise de viabilidade técnicas, ambientalmente limpas e desempenho econômico. Para validar sua metodologia, apresentaram como caso de estudo das 93 residências eletrificadas numa comunidade rural próxima usando dados estatísticos sobre demografia, os tipos, o número e as características dos eletrodomésticos, e dos dados dos aparelhos obtidos por meio de uma pesquisa, obtendo um perfil de carga desejado. Tecnologia de armazenamento a ar comprimido e o supercapacitor foram as opções que mais se adequaram para uma eletrificação de comunidade rural parcialmente. Como trabalhos futuros recomendam o desenvolvimento do modelo na ferramenta MATLAB[®] Simulink incluindo as especificações técnicas assim como o cálculo dos custos.

Neste artigo, Bordin *et al.*, (2017) apresentaram modelos de programação linear que podem ser usados para o gerenciamento ótimo de sistemas *off-grids*. A principal contribuição deste estudo foi o desenvolvimento de uma metodologia que inclui os processos de degradação da bateria dentro dos modelos de otimização, através da definição dos custos de degradação da bateria relacionados aos processos de carga/descarga apresentando as melhores combinações de custos e seu desempenho para tornar o sistema mais econômico. Para os autores, existem duas maneiras de abordar o conceito baterias na literatura que são através de aplicações experimentais baseados em análises químicas e testes de laboratório e os modelos matemáticos baseados em simulações computacionais e técnicas de otimização para facilitar o processo de tomada de decisão. Sob o ponto de vista analítico, os autores aplicaram as análises de sensibilidade para avaliar os custos de degradação da bateria para demonstrar quantitativamente o tempo de vida, ou

melhores custos de capital para tornar a bateria competitiva, considerando que a tecnologia de armazenamento das baterias Chumbo-Ácido é a mais adequada para o sistema em questões de emergência e segurança. Conclui-se neste trabalho, que para a redução de custos dos sistemas isolados que para aumentar a vida útil das baterias são necessárias de técnicas de gerenciamento e controle adequadas.

Segundo Liu *et al.*, (2018) os sistemas de energia em áreas isoladas são diferentes dos sistemas de energia estáveis das áreas continentais, sua particularidade cria mais riscos no planejamento energético, considerando-as como uma meta de análise mais específica. As características típicas das áreas isoladas, como a dispersão geográfica entre os grandes centros populacionais, a falta do acesso aos serviços públicos de energia elétrica, a elevada dependência de recursos energéticos importado e a dificuldades de transporte criaram interesse por parte dos autores numa revisão abrangente da literatura para identificar, classificar, avaliar e analisar o desempenho de diferentes metodologias para as áreas isoladas. Para auxiliar no processo de tomada de decisão, os autores desenvolveram técnicas de previsão da demanda de carga em diferentes níveis e modelos para aplicação em sistemas de energia renovável e/ou híbridos composto por fotovoltaicos, vento, diesel com o sistema de armazenamento por baterias para a obtenção de configurações ótimas para a manutenção sustentável dos sistemas e no gerenciamento do recurso energético em áreas isoladas (ilhas e aldeias remotas) nos programas de eletrificação utilizando o software HOMER[®]. Os autores apontaram as energias eólica e solar como fontes energéticas potentes para a redução da dependência por combustíveis fósseis e a otimização do sistema de energia, embora sejam incertas devido à natureza estocástica da fonte solar e intermitente da fonte eólica. A introdução de energias renováveis, segundo os autores, nos processos de eletrificação rural contribui para a redução do custo inicial de investimento e aumenta os benefícios ambientais. Por fim, enfatizam no seu trabalho, durante a excussão de programas de eletrificação rural futuros, a compreensão das características e necessidades dos usuários dessas comunidades para a modelagem e planejamento considerando suas especificidades, complexidades e incertezas.

Em seu estudo, Zhou *et al.*, (2019) abordaram em seu problema um processo de tomada de decisão para medir a resiliência do custo do sistema para determinar os tamanhos ótimos sistemas Painel solar + Baterias. Foi por eles

desenvolvido um método de otimização simulando as interrupções aleatórias da rede elétrica com o objetivo de otimizar a capacidade da bateria inserida aos painéis solares para que se forneça aos clientes, uma energia confiável e economicamente viável. Para validar seu estudo, realizaram estudos de caso nos EUA (Estados Unidos da América), considerando dados históricos de radiação solar e demanda de carga, o que tornou seus resultados mais realistas. Foram considerados como parâmetros de otimização, durante a elaboração deste trabalho o custo total do sistema, a variação da radiação solar, a variação da demanda de carga e o índice de probabilidade de perda de carga (LOLP). Consideraram-se neste estudo três métricas de confiabilidade como custo total do sistema, a probabilidade da redução de interrupções da rede, sendo a probabilidade da redução de interrupções na rede e o LOLP importante para avaliar a confiabilidade do fornecimento de energia dos sistemas fotovoltaico + baterias. Realizaram análises de sensibilidades entre o custo total do sistema e a resiliência da fonte de alimentação do sistema reduzindo seu custo. Finalmente concluíram que a diminuição do custo das baterias pode reduzir o custo total e melhorar a confiabilidade do sistema. Como trabalhos futuros propõem encontrar uma comutação entre as duas métricas e o custo total do sistema.

O dimensionamento ótimo de um sistema solar doméstico (SHS) é uma tarefa imprescindível, pois seu sobre-dimensionamento assim como o sub-dimensionamento podem ser prejudiciais para o custo do sistema e à indisponibilidade de energia, respectivamente. Narayan, Nishant *et al.*, (2019) apresentaram no seu trabalho uma metodologia para ao dimensionamento ótimo do SHS que minimiza o LOLP (Probabilidade de Perda de Carga), o desperdício do excesso de energia e o tamanho da bateria enquanto maximiza a sua vida útil. Para a avaliação dos tamanhos reais do sistema foram utilizadas a otimização Multiobjetivo baseada em técnicas de algoritmos genéticos atendendo a 5 níveis de eletricidade das estruturas multicamadas (MTF) para medir o acesso ao fornecimento doméstico de eletricidade com picos de potência variando de 3 W a 2 kW. O dimensionamento do SHS corresponde à determinação do tamanho das baterias e da capacidade dos conversores, necessárias para evitar falhas no fornecimento de energia e a consequente subida da LOLP no sistema. A LOLP é uma métrica que quantifica a confiabilidade do sistema em atender a demanda. A Otimização Multiobjetivo foi realizada para várias funções objetivos de onde se obtiveram diferentes frentes de Pareto com diferentes tamanhos ótimos do FV e das

baterias. Os resultados deste trabalho mostraram certa dependência dos parâmetros do SHS para obtenção da solução ótima, de onde se concluiu pela necessidade de anexar microredes centralizadas para partilhar o excesso de energia entre as residências, melhorando as métricas gerais do sistema como LOLP e desperdício de energia através da interconexão dos SHS autônomos para explorá-la e quantificar os níveis mais altos (4 e 5) da MTF de energia.

3.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Como considerações finais deste capítulo, apresentam-se na Tabela 8, as principais características das fontes e tecnologias de geração ou armazenamento de eletricidade usada pelos autores descritos nos processos eletrificação rurais em comunidades isoladas. Foram apresentados estudos comparativos das tecnologias e das técnicas de otimização, bem como os objetivos definidos em cada artigo. Foi importante também apresentar as vantagens e desvantagens de cada fonte e tecnologia de armazenamento, assim como sua aplicação, para melhor entendimento sobre o assunto a ser abordado neste estudo.

TABELA 8 – QUADRO COMPARATIVO DOS ARTIGOS DA REVISÃO DA LITERATURA EM CADA CATEGORIA DO ESTUDO

| Autor / ano | Fonte / Tecnologia | Características | | | Técnica de Otimização | Finalidade |
|---------------------|------------------------------|---|---|--------------------------------------|--|--|
| | | Vantagens | Desvantagens | Aplicação | | |
| Kolhe (2009) | Solar Fotovoltaica + Bateria | Tecnologia do futuro | Depende do ângulo de inclinação do painel fotovoltaico; pode não ser econômico e dependência do desempenho e equilíbrio entre o custo e a disponibilidade de energia. | Sistemas isolados | Conceito de utilizabilidade da radiação solar e a eficiência média mensal do painel fotovoltaico autônomo; Modelos analíticos. | Dimensionamento ótimo do sistema entre o gerador fotovoltaico e a capacidade da bateria para fornecer a energia necessária numa fração de carga de energia especificada. |
| Baños et al. (2011) | Eólica | Renováveis; Inesgotável; Tecnologia do futuro. | Natureza Intermitente; Depende da velocidade do vento, do local e do clima. Custo elevado de manutenção. | Sistemas isolados | GA, PSO, SA, e métodos de construção de cenários; Lógica Fuzzy; Otimização Multi-Objetivo e Algoritmos Evolutivos; e MINLP. | Custo de produção deve satisfazer a confiabilidade do sistema. |
| | Solar Fotovoltaica | Renovável e inesgotável; Disponível em todo mundo; reduz a dependência de combustíveis fósseis e reduz a emissão de CO ₂ na atmosfera. | Natureza Estocástica; Depende da radiação solar; Requer um sistema de armazenamento de energia; e Custo inicial de investimento elevado. | Comunidades rurais. | Interpolação/ extrapolação; RNA; AG's; NSGA-II; Neuro-fuzzy; e EA. | Fornecimento de energia economicamente viável e de qualidade para o consumidor doméstico. |
| | Hídrica | Renovável, limpa e inesgotável. | Depende das políticas e regras do setor elétrico; Lucro incerto; e Custo de investimento elevado. | Residencial, Comercial e Industrial. | Modelos matemáticos, determinísticos e estocásticos; P L; Lógica Difusa; e as Técnicas de inteligência artificial. | Produção e vende de eletricidade. |
| | Biomassa | Renovável | Podem não ser tecnicamente viáveis. | Industrial e residencial. | Otimização de Enxame de Partículas (PSO); e Algoritmos Genéticos. | Produzir eletricidade ou calor para indústrias e residências. |
| | Híbrida | Sistema operacional e econômico | Custos acrescidos ao sistema. | Iluminação pública e comercial. | PSO; AG's; Algoritmo Evolucionário Multi-Objetivo (MOEA). | Fornecer energia em regiões remotas. |

| Autor / ano | Fonte / Tecnologia | Características | | | Técnica de Otimização | Finalidade |
|--|--------------------|---|--|---|--|---|
| | | Vantagens | Desvantagens | Aplicação | | |
| Bortolini, Gamberi e Graziani (2014) | Solar fotovoltaica | Uso da bateria para a compensação de flutuações e atender a demanda a noite. | Natureza estocástica e aleatória da fonte solar; requer um sistema de armazenamento de energia para atender a diferença entre a disponibilidade e demanda. | Consumo doméstico em sistemas isolados e conectados à rede. | Modelo analítico; | Satisfazer a demanda; e Redução de custos elétrica; |
| Domenech, Ferrer-Marti e Pastor (2015) | Eólica + Solar | Confiabilidade no fornecimento de energia. | Dificuldade de projeto; Dispersão geográfica; Planejamento da estrutura e conexões entre microredes; Custos relacionados a extensão da rede; Necessidade de um sistema de armazenamento para preencher a lacuna entre a geração e o consumo. | Consumo doméstico, institucional, comercial, hospitalar, etc. | Estrutura básica de três modelos | Minimizar o custo do investimento inicial dos componentes do sistema. |
| Urme e Md (2016) | Solar fotovoltaica | Considera aspectos socioculturais e políticos. | Pode haver desperdício do recurso solar. | Comercial e industrial. | Conceito de difusão da inovação. | Implementação de programas de eletrificação rural bem-sucedidos. |
| Mandelli et al. (2016) | Solar fotovoltaica | Fontes renováveis; reduz a dependência por combustíveis fósseis; modulares e podem ser adaptados a diferentes necessidades energéticas rurais; e Localizados perto de consumidores. | Difícil de implementar; Fonte de energia imprevisível; e Demanda incerta. | Atendimento a serviços modernos de energia. | Probabilidade de Perda de Carga (LOLP). Custo Nivelado de Energia Fornecida e Perdida (LCoSE); e Modelagem matemática. | Dimensionamento de sistema isolado para países em desenvolvimento. |

| Autor / ano | Fonte / Tecnologia | Características | | | Técnica de Otimização | Finalidade |
|--------------------------|--|--|---|---|--|--|
| | | Vantagens | Desvantagens | Aplicação | | |
| Ghaib e Ben-Fares (2017) | Solar fotovoltaica (silício) + Diesel +Baterias (Chumbo-Ácido) | Renovável; limpa e inesgotável; atrativas e disponível; Baixo custo de produção; eficiência energética elevada; as baterias Chumbo-Ácido apresentam capacidades de energia elevadas em relação as tecnologias HES e HPS. | Custos acrescidos ao sistema | Eletrificação rural; Estações de bombeamento de água; Sistemas de dessalinização ; Sistemas de energia solar fotovoltaico autônomo; Sistema de energia hibrida. | Modelo analítico; Modelo Simulink no MATLAB®, e Análise sensibilidade. | Melhor configuração do sistema fotovoltaico autônomo altamente confiável e sustentável. |
| Bordin et al. (2017) | Bateria (Chumbo-Ácido) | Baixo custo de energia; Fonte alternativa para geradores a diesel; Redução da intermitência e aumento das horas de serviço do sistema; Armazenamento de energia excedente; e As baterias Chumbo-Ácido fornecem segurança ao sistema. | Degradação da bateria no processo e carga/descarga. | Sistemas insulares com eletrificação rural fora da rede; Domicílios com energia solar fotovoltaica; Balanceamento o de eletricidade de curto prazo em mercados secundários. | Programação linear; Análises de sensibilidade; e Modelo matemático. | Apresentar as combinações de custos e desempenho da bateria que tornam o sistema mais econômico. |

| Autor / ano | Fonte / Tecnologia | Características | | | Técnica de Otimização | Finalidade |
|-----------------------|--|---|--|---|--|--|
| | | Vantagens | Desvantagens | Aplicação | | |
| Liu et al (2018) | Solar Fotovoltaica + Eólica + Diesel + Baterias. | Competitivos. | Sistema incerto; dependentes de combustíveis fósseis; Escassez de fontes de energia (diesel) e inseguros; Tecnologia limitada e os custos acrescidos ao sistema; intermitente, instável e volátil; requer um sistema de armazenamento de energia gerada para preencher a lacuna entre a geração e o consumo. | Sistemas isolados (ilhas e aldeias remotas). | HRES (Sistemas de Energias Renováveis Hídrica) HOMER (Hybrid Optimization Model for Electric Renewable) | Configuração ótima do sistema. |
| Zhou et al (2019) | Solar Fotovoltaica + Bateria | Funciona de forma isolada; Independes; confiável durante a paralisação da rede mantendo a estabilidade do sistema; Permite o equilíbrio entre a geração de energia e a demanda de carga; e Ecologicamente limpas. | Os tamanhos ótimos FV + Bateria é que determinam a confiabilidade da fonte e a economia do sistema; Custo inicial de investimento elevado; | Sistemas fotovoltaicos isolados (Nova York); | Modelo matemático; Métodos de simulação considerando três métricas de confiabilidade: custo total do sistema, probabilidade de restrição de oportunidades de falhas e a probabilidade de perda de carga. | Fortalecer a resiliência da geração de energia distribuída para reduzir as interrupções de energia em instalações críticas. |
| Narayan et al. (2019) | Solar Fotovoltaica + Bateria (Chumbo-Ácido) | Solução viável para eletrificação rural; Armazenamento do excesso da energia gerada por baterias; Eficiência elevada das baterias Chumbo-Ácido. | Custo elevado da bateria; Tempo de vida inferior em relação aos outros componentes; e Tamanho da bateria define o estado de carga e descarga. | Eletrificação rural fora da rede; Sistemas Domésticos Solares | Estrutura Multicamadas; Método de modelagem dinâmico da saída FV; e Otimização Multiobjetivo baseada em algoritmo genético. | Otimizar o tamanho de SHS (Solar Home Systems) para cada Estrutura Multicamadas; Fornece níveis de confiabilidade do sistema Fotovoltaico + Bateria. |

| Autor / ano | Fonte / Tecnologia | Características | | Técnica de Otimização | Finalidade |
|----------------------|---|--|---|--|--|
| | | Vantagens | Desvantagens | | |
| Proposta do Trabalho | Solar Fotovoltaica + Bateria (Chumbo-Ácido) + Inversor + Controlador de carga | Melhor solução para aplicações rurais; Para atender a demanda de carga; Custo acessível, tecnologia madura e mais disponível no mercado das baterias Chumbo-Ácido; Suporta temperaturas elevadas | Densidade energética baixa; Tempo de vida inferior em relação aos outros componentes; e Tamanho da bateria define o estado de carga e descarga. | Otimização Multiobjetivo baseada em algoritmo genético | Desenvolver um modelo que otimiza a área do painel, a quantidade de baterias, o custo total do sistema e a métrica de confiabilidade LOLP para Estrutura Multicamadas 3 (similar perfil de carga de Corumbá-Pantanal). |

FONTE: A autora (2019)

De acordo com os autores, os sistemas isolados da rede elétrica de distribuição de energia, no geral, têm desempenhado um papel importante atualmente, como uma solução adequada nos processos de eletrificação rural. O uso do dispositivo de armazenamento de energia também se faz necessário para atender a demanda nos períodos de geração de eletricidade nula e ou nos períodos noturnos, chuvosos, e com baixos níveis de irradiação solar.

Foi também considerado por eles a necessidade de desenvolver modelos sofisticados que sejam mais aplicáveis a áreas isoladas, com a consideração de suas características, complexidades e incertezas. O índice de probabilidade de perda de carga foi considerado um parâmetro importante e indispensável no dimensionamento de sistema solar doméstico e *off-grid*.

Apesar de o custo inicial de investimento de um sistema isolado com o uso de energias renováveis na substituição de combustíveis fósseis seja elevado na implementação da energia solar fotovoltaica e baterias para a eletrificação rural em comunidades isoladas e fora da rede elétrica de distribuição de energia torna-se atraente a partir do momento em que seu índice de poluição atmosférica é nulo. O uso da bateria nos sistemas fotovoltaicos isolados é importante para aumentar a confiabilidade e permitir segurança aos usuários.

Na realização deste trabalho, o dimensionamento do sistema fotovoltaico isolado está concentrado em determinar a potência do sistema FV, a quantidade de baterias para o sistema de armazenamento de energia, a potência do inversor e capacidade do controlador de carga, tendo em consideração todos os pontos abordados pelos autores na revisão da literatura. Como foi observado durante a análise da literatura, os autores retratados não focam no dimensionamento do controlador de carga, mas, neste estudo proposto, será um parâmetro a mais a ser estudado por se tratar de um sistema fotovoltaico isolado com armazenamento da energia gerada em baterias. O controlador de carga tem a função de permitir o controle de algumas variáveis de carga/descarga da bateria que podem surgir durante o funcionamento do sistema. O sistema que se deseja otimizar neste trabalho, deve ser capaz de fornecer eletricidade de forma confiável, seguro, ao mesmo tempo que ele deve ser acessível para todos os usuários.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 MATERIAL

O estudo foi realizado no Município de Corumbá, sito no Estado do Mato Grosso do Sul – Pantanal, Brasil, com 64.960,863 km² nas seguintes coordenadas geográficas: Latitude 19°00'32" Sul e Longitude 57°39'10" Oeste, e uma altitude de 112 metros (INMET, 2019). Corumbá tem uma Irradiação Diária Média Anual de 5.12 kWh/m².dia (CRESESB, 2019). A temperatura média anual de 25.4 °C (CLIMATE DATA, 2019). A Figura 16 ilustra o Município de Corumbá, Estado do Mato Grosso do Sul, Pantanal. Os dados apresentados são para conhecimento da região de estudo.

FIGURA 16 – MAPA DE MATO GROSSO DO SUL (PANTANAL)

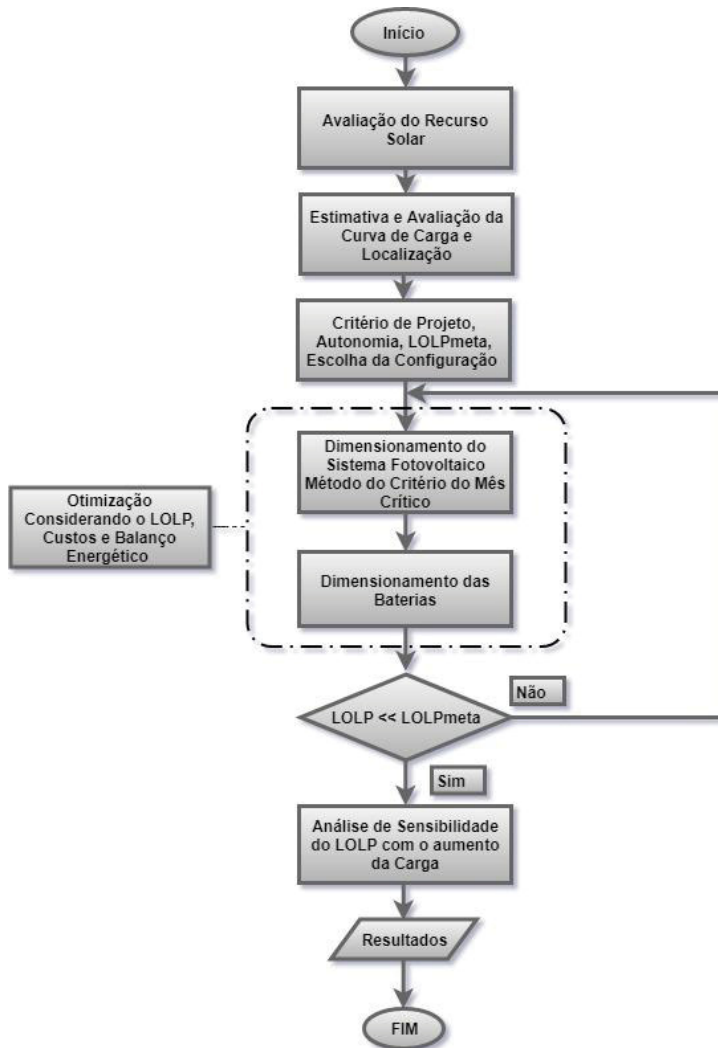


FONTE: Adas (2010)

4.2 MÉTODOS

A metodologia do trabalho é mostrada no fluxograma da Figura 17 que compreende o dimensionamento dos módulos Fotovoltaicos, do banco de baterias, do controlador de carga e do inversor.

FIGURA 17 – METODOLOGIA



FONTE: A autora (2019)

Para saber se a energia solar é um investimento economicamente viável, é necessário aplicar modelos de análise que avaliem tanto os custos do investimento quanto os benefícios derivados do mesmo. Portanto, quando os custos de investimento forem elevados e os benefícios resultantes forem distribuídos em função do tempo como tem se verificado na maioria dos projetos de eletrificação com o emprego da energia solar fotovoltaica, é necessário fazer uma análise econômica sobre a vida útil do equipamento a ser utilizado, antes de se investir, MARINI E ROSSI (2005).

Segundo Pinho e Galdinho (2014), para se projetar um sistema fotovoltaico é necessário que se tenha o conhecimento da carga, as suas características, o perfil de carga ao longo dos dias e meses assim como as características da radiação solar incidente no local. Neste trabalho, o estudo foi realizado para um dia, com uma

resolução de 1 min. As principais etapas de projeto de um sistema Fotovoltaico podem se dividir em:

I. Avaliação do recurso solar

É necessário conhecer a quantidade de radiação global que incide sobre os módulos fotovoltaicos. Para tal determinam-se os ângulos de posição solar para saber qual a melhor posição do sol para maior captação da radiação solar incidente sobre os módulos fotovoltaicos de modo que se tenha maior eficiência na geração de energia (MICHALSKY, 1988).

1. Dados de entrada

Os dados de entrada para o dimensionamento ótimo do sistema fotovoltaico isolado foram às coordenadas geográficas e os dados meteorológicos. O Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) disponibiliza na sua base dados, dados mensais de temperatura do ar e velocidade do vento com discretização horária.

Segundo Smets *et al.*, (2016), para se determinar a posição do sol são necessários a data (ano e dia) e hora UTC (do inglês, *Coordinated Universal Time*), a latitude e a longitude do local. Conhecendo a data e local de estudo, deve-se, em primeiro lugar, expressar o tempo transcorrido desde o meio-dia de Greenwich, tempo terrestre, em 1º de janeiro de 2000, em dias através das equações:

$$JD = 2432916.5 + (ano - 1949) \times 365 + \frac{(ano - 1949)}{4} + dia + \frac{hora}{24} \quad (11)$$

$$D = JD - 2451545.0 \quad (12)$$

Onde:

JD – número de dias solares médios decorridos desde o início da era Juliana, em 1 de janeiro de 4713 a.C; e

D – o tempo D decorrido desde o meio-dia de Greenwich, hora terrestre, em 1º de janeiro de 2000, em [dias].

A data Juliana é utilizada pelos astrônomos para calcular o intervalo de tempo decorrido entre diferentes eventos astronômicos.

A longitude média do sol (q), é dada por:

$$q = 280.459^\circ + 0.98564736^\circ \times D \quad (13)$$

A Anomalia Média do Sol (g) é determinada a partir da equação:

$$g = 357.529^\circ + 0.98560028^\circ \times D \quad (14)$$

A Longitude do Sol nas coordenadas Eclípticas (λ_s) é dada por:

$$\lambda_s = q + 1.915^\circ \times \sin(g) + 0.020 \times \sin(2 \times g) \quad (15)$$

A Latitude Eclíptica (β_s) pode ser aproximada a:

$$\beta_s = 0 \quad (16)$$

A radiação solar e dada pela equação:

$$R = 1.00014 - 0.01671 \times \cos(g) - 0.00014 \times \cos(2 \times g) \quad (17)$$

Onde:

R – radiação solar em unidades astronômicas [AU].

O ângulo Eclíptico ou inclinação axial (ϵ) é obtido através de:

$$\epsilon = 23.429 - 0.00000036^\circ \times D \quad (18)$$

O ângulo horário (h) é dado por:

$$h = \theta_L - \alpha \quad (19)$$

ou

$$h = (dHr - 12) \times 15 \quad (20)$$

$$dHr = \text{tempo. hora} + \text{tempo. minuto.}/60 + \text{tempo. segundo.}/3600 \quad (21)$$

Onde:

q – longitude média do sol em [°];

g – anomalia Média do Sol em [°];

λ_s – longitude do Sol nas coordenadas Eclípticas [°];

β_s – latitude Eclíptica [°];

R – radiação solar [°];

ϵ – ângulo Eclíptico ou inclinação axial em [°];

θ_L – hora sideral média local em [horas];

α – ascensão reta do objeto [°]; e

dHr – hora decimal [adm.].

O tempo sideral médio de Greenwich (GMST) é determinado a partir da expressão:

$$GMST = 18.697374558 \times h + 24.06570982441908 \times h \times D + 0.000026 \times h \times T^2 \quad (22)$$

$$T = \frac{D}{36525} \quad (23)$$

Onde:

T – Número de séculos passados desde o meio-dia de Greenwich, Horário Terrestre, em 1 de Janeiro de 2000.

A Hora Sideral Média Local (θ_L) é dada por:

$$\theta_L = GMST \times \frac{15^\circ}{h} + \lambda_0 \quad (24)$$

Onde:

λ_0 – Latitude do observador em [°].

A declinação solar (δ) é obtida através de:

$$\delta = 23.45^\circ - \sin \times (360/356 - (NDA - 80)) \quad (25)$$

Onde:

δ – declinação solar em [°]; e

NDA – Número de Dias do Ano.

Os parâmetros calculados são usados para determinar a posição do sol são expressos pelo Azimute do sol (As) e Altitude ou Elevação do sol (Es):

$$\tan As = \frac{-\sin(\theta_L) \times \cos(\lambda_s) + \cos(\theta_L) \times \cos(\epsilon) \times \sin(\lambda_s)}{-\sin(\phi_0) \times \cos(\theta_L) \times \cos(\lambda_s) - (\sin(\phi_0) \times \sin(\theta_L) \times \cos(\epsilon) - \cos(\phi_0) \times \sin(\epsilon)) \times \sin(\lambda_s)} \quad (26)$$

$$\sin Es = \cos(\phi_0) \times \cos(\theta_L) \times \cos(\lambda_s) + (\cos(\phi_0) \times \sin(\theta_L) \times \cos(\epsilon) + \sin(\phi_0) \times \sin(\epsilon)) \times \sin(\lambda_s) \quad (27)$$

Onde:

As – Azimute do sol dado em [°]; e

Es – Altitude ou Elevação do sol em [°].

O algoritmo que calcula a posição do sol está disponível na *internet* através do NREL com uma tolerância de $\pm 0.0003^\circ$, num período de 2000anos aC a 6000 anos dC, (MAHOOTI, 2017).

2. Características do recurso solar

As características do recurso solar foram encontradas no CAMS McClear, serviço que fornece séries temporais de Irradiação Normal Direta (DNI), Irradiação Horizontal Difusa (DHI) e Irradiação Horizontal Global (GHI) no intervalo de tempo que varia de um minuto num horizonte de um mês (SODA, 2019).

Os dados de radiação solar disponibilizados foram usados para determinar o Plano de Irradiância do Arranjo Fotovoltaico (G_{POA}), que permite calcular os parâmetros de saída dinâmica do fotovoltaico, a energia solar fotovoltaica, A potência de saída e a eficiência dinâmica nas condições reais de funcionamento, no sistema projetado neste trabalho. De acordo com Reinders *et al.*, (2017), o G_{POA} pode ser determinado a partir de:

$$G_{POA} = E_b + E_g + E_d \quad (28)$$

$$E_b = DNI \times \cos(AOI) \quad (29)$$

$$AOI = \cos^{-1} \times [\cos(\theta_Z) \times \cos(\theta_T) + \sin(\theta_Z) \times \sin(\theta_T) \times \cos(\theta_A - \theta_{Arranjo})] \quad (30)$$

$$E_g = GHI \times albedo \frac{(1 - \cos(\theta_{T.suf}))}{2} \quad (31)$$

$$E_d = DHI \times \frac{(1+\cos(\theta_T))}{2} + GHI \times \frac{(0.012 \times \theta_Z - 0.04) \times (1-\cos(\theta_T))}{2} \quad (32)$$

Onde:

- G_{POA} – Irradiação no Plano do Arranjo Fotovoltaico [Wh/m²];
 E_b – Irradiação do feixe em uma superfície [Wh/m²];
 E_g – Irradiação refletida a terra em uma superfície [Wh/m²];
 E_d – Irradiação Difusa em uma Superfície [Wh/m²];
DNI – Irradiação Normal Direta [Wh/m²];
DHI – Irradiação Horizontal Difusa [Wh/m²];
GHI – Irradiação Horizontal Global [Wh/m²];
AOI – Ângulo de incidência da superfície [°];
albedo – Fração da irradiância horizontal global refletida.
 θ_Z – Ângulo do Zênite do Sol [°];
 θ_T – Ângulo de inclinação horizontal [°];
 θ_A – Ângulo do Azimute do Sol [°];
 θ_{Arrajo} – Ângulo de inclinação do arranjo fotovoltaico [°]; e
 θ_{T_suf} – Ângulo de inclinação da superfície [°].

O G_{POA} foi usado neste trabalho, para quantificar a irradiação solar no incidente sobre os módulos fotovoltaicos no dia 24/07/2019 a cada minuto.

Segundo Photovoltaic-software (2019), a produção de energia para um dia em Wh de um sistema solar fotovoltaico é dada por:

$$E_{SFV} = G_{POA} \times A_{FV} \times r \times T_D \quad (33)$$

Onde:

- E_{SFV} – Energia Solar Fotovoltaica produzida em [Wh];
 A_{FV} – Área do módulo fotovoltaico em [m²];
 r – Rendimento/produção do painel solar ($r = 15\%$);
 T_D – Taxa de desempenho (valor padrão = 75%).

De acordo com Narayan (2013), a potência de saída do sistema fotovoltaico no período de produção é expressa por:

$$P_{FVsaída} = P_{FV} - \frac{k}{100\%} \times (T_{mod} - T_a) \times P_{FV} \quad (34)$$

$$P_{FV} = \frac{E_{SFV}}{H_S} \quad (35)$$

Onde:

- $P_{FVsaída}$ – Potencia total de saída do fotovoltaico corrigida [W];

- P_{FV} – Potência gerada pelo Fotovoltaico [W];
 k – Coeficiente de temperatura a potência máxima [%/°C];
 T_{mod} – Temperatura do módulo [°C]; e
 T_{amb} – Temperatura ambiente [°C].

Reinders *et al.*, (2017) apresentou um modelo que calcula a temperatura do módulo baseado em conceitos simples de transferência de calor, dada por:

$$T_{mod} = T_{amb} + \alpha \times \frac{G_{POA}}{t} \times \frac{(1 - \eta_{STC})}{U_0} + U_1 \times v_w \quad (36)$$

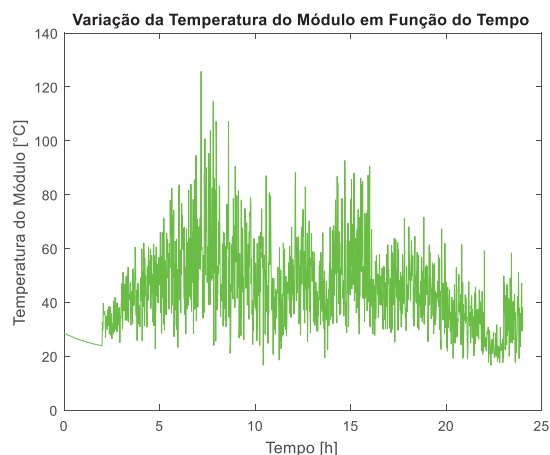
Onde:

- α – Coeficiente de absorção do módulo (adimensional);
 η_{STC} – Eficiência do módulo nas condições STC [%];
 U_0 – Coeficiente de transferência de calor constante [$Wm^2 / ^\circ C^{-1}$];
 U_1 – Coeficiente de transferência de calor convectivo [$Wm^3 / s \ ^\circ C^{-1}$];
 v_w – Velocidade do vento [m/s]; e
 H_S – Horas de Insolação diária no local da instalação do sistema solar fotovoltaico [h].

De acordo com Faiman (2008), a temperatura do módulo é afetada pela irradiação solar do incidente, condições climáticas (como temperatura do ar e velocidade do vento), da estrutura do módulo e das propriedades do material.

A Figura 18 mostra a variação da temperatura do módulo no Município de Corumbá, para a correção da potência de saída do fotovoltaico, devido à exposição do painel no meio externo, nas condições reais de funcionamento.

FIGURA 18 – VARIAÇÃO DA TEMPERATURA DO MÓDULO EM CORUMBÁ



FONTE: A autora (2019)

A eficiência dinâmica do módulo fotovoltaico, de acordo com (NARAYAN, 2013), é dada por:

$$\eta_{dinâmica} = \frac{P_{FVsaída}}{P_{entrada}} \quad (37)$$

$$P_{entrada} = \frac{G_{POA} \times A_{FV} \times \eta_{STC}}{H_S} \quad (38)$$

Onde:

$P_{FVsaída}$ – Potência total de saída do módulo fotovoltaico [W]; e

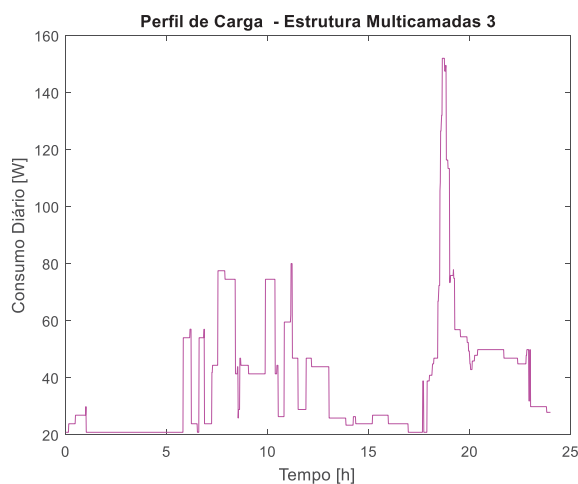
P_{ent} – Irradiância total incidente na entrada do módulo [W].

II. Estimativa e avaliação da curva de carga

A soma do consumo diário de todos os equipamentos indica as sazonalidades mensais e anuais que podem implicar na redução do custo do sistema e também na redução do risco de falha de falta de energia. Neste trabalho foi usado o Perfil de Carga Consumidor da Estrutura Multicamadas 3, pois se aproxima mais do perfil do consumidor de Corumbá, disponível em (NARAYAN *et al.*, 2018).

A Figura 19 ilustra o comportamento diário da carga do consumidor de Corumbá.

FIGURA 19 – PERFIL DE CARGA DIÁRIO DO CONSUMIDOR RURAL



FONTE: Narayan *et al.* (2018)

De acordo com a Figura19 o consumo máximo do sistema se dá no intervalo das 18 h às 20 h apresentando uma potência máxima de pico de 152 W e uma energia de 912 Wh. O levantamento dos aparelhos elétricos usados e as horas do dia ou mês que ficam ligados é mostrado na Tabela 9.

TABELA 9 – APARELHOS ELETRODOMÉSTICOS MAIS USADOS

| Aparelhos | Potência [W] | Dias de uso mensal | Tempo de utilização diária | Consumo mensal [kWh] |
|-----------------------|--------------|--------------------|----------------------------|----------------------|
| Freezer | 400 | 30 | 10h (*) | 120 |
| Geladeira (2 portas) | 300 | 30 | 10h (*) | 90 |
| Geladeira (1 porta) | 200 | 30 | 10h (*) | 60 |
| Boiler elétrica | 1500 | 30 | 2h | 90 |
| Chuveiro elétrico | 3500 | 30 | 40 min | 70 |
| Torneira elétrica | 3500 | 30 | 30 min | 52 |
| Forno elétrico | 1500 | 30 | 1h | 45 |
| Secadora de roupas | 3500 | 12 | 1h | 42 |
| Cafeteira elétrica | 1000 | 30 | 1h | 30 |
| Lavadora de louça | 1500 | 30 | 40 min | 30 |
| Ventilador | 100 | 30 | 8h | 24 |
| Computador | 250 | 30 | 3h | 22 |
| Lâmpada | 100 | 30 | 5h | 15 |
| TV (20 polegadas) | 90 | 30 | 5h | 13 |
| TV (14 polegadas) | 60 | 30 | 5h | 9 |
| Forno de microondas | 1300 | 30 | 20 min | 13 |
| Ferro elétrico | 1000 | 12 | 1h | 12 |
| Aspirador de pó | 1000 | 30 | 30 min | 10 |
| Lavadora de roupas | 1500 | 12 | 20 min | 9 |
| Secador de cabelo | 1000 | 30 | 10 min | 5 |
| Aparelhos de som | 20 | 30 | 4h | 2 |
| Telefone sem fio | 5 | 30 | 24h | 3 |
| TV em stand by | 6 | 30 | 19h | 3 |
| Carregador de celular | 1.5 | 30 | 5h | 0 |
| Rádio relógio | 1.6 | 30 | 24h | 1 |

FONTE: Salas et al. (2015), Villalva (2015) e Narayan et al. (2018).

* Tempo médio de utilização do aparelho.

A equação mostra como é calculada a energia elétrica consumida em Wh:

$$E_C = P \times T \quad (39)$$

Onde:

E_C – Energia elétrica consumida [Wh];

P – Potência do aparelho [W]; e

T – Tempo de uso do aparelho [h].

III. Escolha da configuração do sistema e critério de projeto

Para questões de Eletrificação Rural, devido à distância e isolamento das residências, é utilizado o Sistema Fotovoltaico Isolado com o sistema de armazenamento de energia por baterias.

O critério de projeto foi estabelecer os requisitos mínimos para a elaboração de projetos de eletrificação rural aplicados a este trabalho, como: a energia mensal garantida pelo sistema, área disponível para a instalação dos módulos fotovoltaicos, a autonomia do sistema, entre outros fatores. Segundo Pinho e Galdinho, (2014) a

autonomia de um sistema fotovoltaico isolado com armazenamento de energia é de 48 horas (2 dias) sem geração solar. Foi definido um $LOLP_{meta}$ de 10%.

IV. Dimensionamento dos componentes do sistema

A. Dimensionamento dos módulos Fotovoltaicos

Foi usado trabalho do Narayan *et al.*, (2019) o módulo fotovoltaico policristalino de 265 W da Jinko Solar JKM265P-60, o qual também foi usado neste trabalho para a comparação das áreas dos painéis nas curvas de irradiação solar para uma visão mais ampla sobre o quanto de energia excedente há sistema. Suas características mecânicas e especificações técnicas estão apresentadas na Tabela 10:

TABELA 10 – CARACTERÍSTICAS DO MÓDULO FOTOVOLTAICO POLICRISTALINO DA JINKO SOLAR JKM265P-60

| CARATERÍSTICAS MECÂNICAS DO MÓDULO | |
|--|------------------------|
| Marca | Jinko Solar JKM265P-60 |
| Tipo | JKM |
| Tipo da Célula | Policristalino |
| Dimensões do módulo | 1650×992×40mm |
| ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS | |
| Potência Máxima a STC (P_{max}) | 265 W |
| Tensão de potência máxima (V_{mpp}) | 31,4 V |
| Corrente de potência máxima (I_{mpp}) | 8,44 A |
| Tensão de circuito aberto (V_{OC}) | 38,6 V |
| Corrente de circuito aberto (I_{SC}) | 9,03 A |
| Eficiência do módulo | 16,19 % |
| Temperatura de funcionamento | - 40 °C~ + 85°C |
| Coeficiente de temperatura a P_{max} (k) | - 0,31 % /°C |
| Coeficientes de temperatura de V_{OC} | - 0,31 % /°C |
| Coeficientes de temperatura de I_{SC} | 0,06 % /°C |
| Temperatura da célula de operação nominal NOCT | 45 ±2 °C |
| Tolerância | ±3 % |

FONTE: Adaptado, Catálogo da Jinko Solar (2019)

A energia produzida pelos módulos, neste trabalho, foi calculada pelo método de insolação do mês mais crítico, mas antes faz-se o levantamento das características do módulo, as dimensões físicas (área do módulo) e a eficiência do módulo, caso não seja fornecida pelo fabricante. A energia produzida pelo módulo fotovoltaico diariamente é dada pela equação (33).

B. Dimensionamento do Banco de Baterias

A disposição das baterias no sistema é conhecida determinando se o número de baterias em série e paralelo. O número de baterias em série é dado por:

$$N_{BS} = V_{BANCO}/V_{BAT} \quad (40)$$

Onde:

N_{BS} – Número de baterias em série;

V_{BANCO} – Tensão do banco de baterias [V]; e

V_{BAT} – Tensão da bateria utilizada [V].

O número de baterias em paralelo é determinado da seguinte forma:

$$N_{BP} = C_{BANCO} / C_{BAT} \quad (41)$$

$$C_{BANCO} = E_A / V_{BANCO} \quad (42)$$

Onde:

N_{BP} – Número de baterias em paralelo;

C_{BANCO} – Capacidade de carga do banco de baterias [Ah]; e

C_{BAT} – Capacidade de carga de cada bateria [Ah].

A capacidade da bateria para o armazenamento de Energia gerada é que vai determinar sua autonomia.

C. Dimensionamento do Controlador de Carga

O dimensionamento do controlador de carga deve levar em consideração os limites máximos do controlador, seja ele convencional ou SPPM (Segmento do Ponto de Potência Máxima), em relação à tensão CC do sistema e os níveis de corrente elétrica, tanto na entrada do módulo Fotovoltaico assim como na saída das baterias, além do tipo de bateria a usar (PINHO e GALDINHO, 2014).

A corrente máxima do controlador de carga para um sistema isolado é obtida a partir de:

$$I_C = \frac{P_{Total}}{V_{BANCO}} \quad (43)$$

Onde:

I_C – Corrente do controlador de carga.

D. Dimensionamento do Inversor

De acordo com Pinho e Galdinho (2014), o dimensionamento do inversor depende da potência nominal do gerador fotovoltaico, da tecnologia e das características elétricas do módulo escolhido para compor o gerador, das características ambientais do local, além da topologia da instalação. A potência do inversor deve ser maior ou igual a potência instalada ($P_{inv} \geq P_{FVinstalada}$).

O inversor, num sistema fotovoltaico isolado vai além da função de converter a corrente contínua gerada pelos módulos fotovoltaicos em corrente alternada para

alimentar a carga, pois garante a segurança do sistema e mede a energia produzida pelos módulos fotovoltaicos.

Para o dimensionamento do inversor faz-se necessário o cálculo do Fator de Dimensionamento de Inversores (FDI) que é a relação entre a potência nominal CA do inversor e a potência de pico do gerador fotovoltaico (PINHO e GALDINHO, 2014). O FDI otimiza a relação custo benefício e tem por objetivo compensar as perdas de potência entre o arranjo fotovoltaico e o inversor, e é obtido da seguinte forma:

$$FDI = \frac{P_{NCA}}{P_{FV}} \quad (44)$$

$$P_{inv} = FDI \times P_{\max_módulo\ selecionado} \quad (45)$$

Onde:

FDI – de dimensionamento do inversor, valor entre $(0,75 < FDI < 1,2)$.

P_{NCA} – Potência nominal em corrente alternada do inversor [W]; e

P_{FV} – Potência de pico gerada pelo módulo Fotovoltaico [Wp].

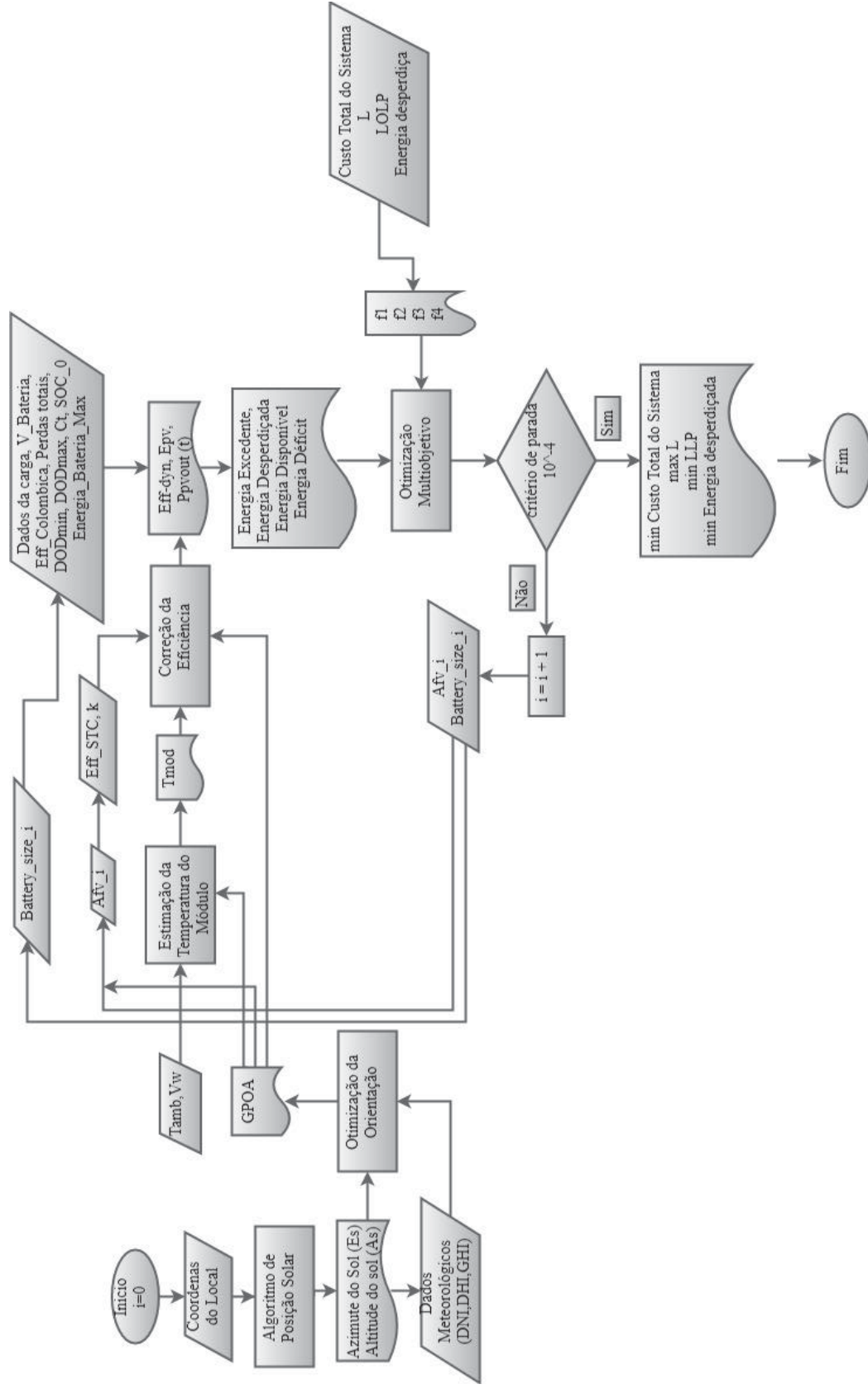
P_{max} – Potência máxima do modulo selecionado [Wp].

O FDI permite que se extraia o máximo da potência e eficiência do sistema, pois contribuem para manter a confiabilidade e qualidade no fornecimento de energia elétrica ao consumidor (AMARAL, 2019).

Foi usado neste trabalho o Inversor Senoidal Epever IPower IP2000-22-2000W 24/220V.

O processo cálculo deste trabalho é mostrado no fluxograma da Figura 20.

FIGURA 20 – PROCESSO DE CÁLCULO DO ALGORITMO



FONTE: A autora (2019)

Conforme a Figura 20 inicialmente são determinados os ângulos do Azimute e Altitude do sol usando o algoritmo de posição solar, tendo como dados de entrada a latitude e longitude do local. Determinados os ângulos de posição solar, são introduzidos no algoritmo os dados meteorológicos (DNI, DHI e GHI) para calcular o GPOA necessário para determinar a temperatura do módulo fotovoltaico, a eficiência dinâmica do módulo, a energia solar fotovoltaica e a potência do sistema fotovoltaico para um dia a cada minuto.

Depois deste processo, são acrescentados ao sistema dados como tensão da bateria, eficiência colômbica (eficiência nas condições de teste padrão) das baterias Chumbo-Ácido (tecnologia de armazenamento usada neste trabalho), as perdas do fotovoltaico, a profundidade de descarga, o estado de carga e a energia máxima da bateria que corresponde a capacidade de armazenamento de energia inicial.

Para o processo de Otimização Multiobjetivo foi necessário obter a energia excedente, desperdiçada, disponível, déficit que são obtidas através das curvas de irradiação solar e o perfil de carga do consumidor, a fim de minimizar o custo total do sistema, LOLP, energia desperdiçada e maximizar da vida útil da bateria. Este processo continua até ser encontrada a solução ótima do problema pela variação das diferentes áreas dos painéis e dos tamanhos da bateria.

Segundo Deb *et al.* (2001) o processo de otimização Multiobjetivo procura encontrar um conjunto de soluções:

- O mais próximo da Fronteira de Pareto; e
- Com maior diversidade de soluções.

A primeira meta a ser atingida é comum para qualquer problema de otimização. Soluções muito distantes da Fronteira de Pareto não são desejáveis. A segunda meta é específica para problemas de otimização Multiobjetivo em que uma boa diversidade de soluções estabelece um forte compromisso entre as funções objetivos desejadas.

i. Função objetivo

A Função objetivo do problema é definida como a função na qual se deseja minimizar o custo total do sistema, o LOLP, Energia desperdiçada ($E_{\text{Desperdício}}$) e maximizar a vida útil da bateria (L) aplicando a técnica de Algoritmos Genéticos (Otimização Multiobjetivo).

$$F_{\text{obj}} = \min \begin{cases} \text{Custo Total do Sistema} \\ -L \\ \text{LOLP} \\ E_{\text{Desperdício}} \end{cases} \quad (46)$$

ii. Restrições

s. a:

$$\text{LOLP} \leq 10 \% \quad (47)$$

$$E_{\text{Desperdício}} \leq E_{\text{Carga anual}} \quad (48)$$

As funções custo neste trabalho foram determinadas a partir das equações:

a) Custo Total do Sistema

$$\text{Custo da Bateria} = n_{\text{bat}} \times E_{\text{Bateria}} \times \text{custo_bateria_unidade} \quad (49)$$

$$\text{Custo do Painel} = n_{\text{fil}} \times P_{\text{max}} \times \text{custo_módulo_unidade} \quad (50)$$

$$\text{Custo de equipamentos} = \text{Custo da Bateria} + \text{Custo do Painel} \quad (51)$$

$$\text{Custo de Instalação} = 0.40 * \text{Custo de equipamentos} \quad (52)$$

$$\text{Custo de O\&M} = 0.10 * \text{Custo de equipamentos} \quad (53)$$

$$\text{Custo Total do Sistema} = \text{Custo do Sistema} + \text{Custo de Instalação} + \text{Custo de O\&M} \quad (54)$$

b) Vida útil da bateria

A vida útil da bateria (L) é dada pela equação:

$$L = n_{\text{ciclo}} \times \text{DOD}_{\text{avg}} \times (2 \times E_{\text{nom}}) / E_{\text{thr,tot}} \quad (55)$$

c) LOLP e a Energia desperdiçada

O LOLP e a energia desperdiçada pelo sistema são determinados pelas equações 3 e 6, respetivamente.

Onde:

n_{fil} – Número fileiras de painéis;

n_{bat} – Baterias em série;

L – Vida útil da bateria.

A codificação do indivíduo engloba as seguintes variáveis de decisão:

- X_1 – Área do painel;
- X_2 – n_{fil} ;
- X_3 – Capacidade do monobloco da bateria (C_{bat}) [Ah];
- X_4 – n_{bat} .

*A área total de painéis é quatro vezes a área do modulo selecionado multiplicada ao número de fileiras do modulo fotovoltaico em [m²];

$$\text{área total} = 4 \times \text{área_painel} \times n_{fil} \quad (56)$$

* A capacidade total de armazenamento de energia é 12 vezes a tensão da bateria multiplicada ao número fileiras de baterias em série em [Wh].

$$E_{total} = V_{bat} \times C_{bat} \times n_{bat} \quad (57)$$

5 ANÁLISE DOS RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 ANÁLISE DE RESULTADOS

O algoritmo foi implementado na ferramenta computacional MATLAB[®] versão R2016a (9.0.0.341360), de 64 bits. Foi considerada para a simulação uma população de 25 indivíduos, e os critérios de convergência do algoritmo foram definidos como o número máximo de gerações de 500 e uma tolerância de 10^{-4} . Inicialmente, os resultados serão analisados com carga constante (caso base) e depois analisados com crescimento de carga (análise de sensibilidade).

As possibilidades de módulos fotovoltaicos a serem envolvidos estão apresentadas na Tabela 11 e na Tabela 12, os dados da bateria Moura Clean.

TABELA 11 – MÓDULOS USADOS PARA O SORTEIO NO TRABALHO

| Variáveis de decisão "X" | Fabricante | Modelo | Potência [Wp] | Dimensões [mm ²] | Tipo de Célula | Custo [R\$] |
|--------------------------|-------------------|----------------|---------------|------------------------------|----------------|-------------|
| 1 | Yingli solar | YL150P-17b | 150 | 1470X680 | Policristalino | 434,90 |
| 2 | Solar Hinergy | DC200M-72 | 200 | 1580X808 | Monocristalino | 582,74 |
| 3 | Canadian solar | CS6U-330 | 330 | 1960X992 | Policristalino | 652,34 |
| 4 | Canadian solar | CS1U-450 MS | 405 | 2078X992 | Monocristalino | 839,00 |
| 5 | Sunway solar | SW500M-96 | 500 | 1956X1310 | Policristalino | 1279,68 |

Fonte: A autora (2019)

TABELA 12 – CAPACIDADES NOMINAIS DA BATERIA MOURA MFV12 250Ah

| Bateria [Ah] | 110 | 165 | 220 | 275 | 330 | 425 | 545 | 920 |
|--------------------------|--------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Variáveis de decisão "X" | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| Custo [R\$] | 822,86 | 1.099,00 | 1.414,55 | 1.768,19 | 2.121,83 | 2.732,65 | 3.504,23 | 5.915,39 |

Fonte: A autora (2019)

Foram simulados neste trabalho três cenários através da combinação das funções objetivos do problema (duas a duas), apresentadas na Tabela 13:

TABELA 13 – COMBINAÇÕES DAS FUNÇÕES OBJETIVOS EM CADA CENÁRIO

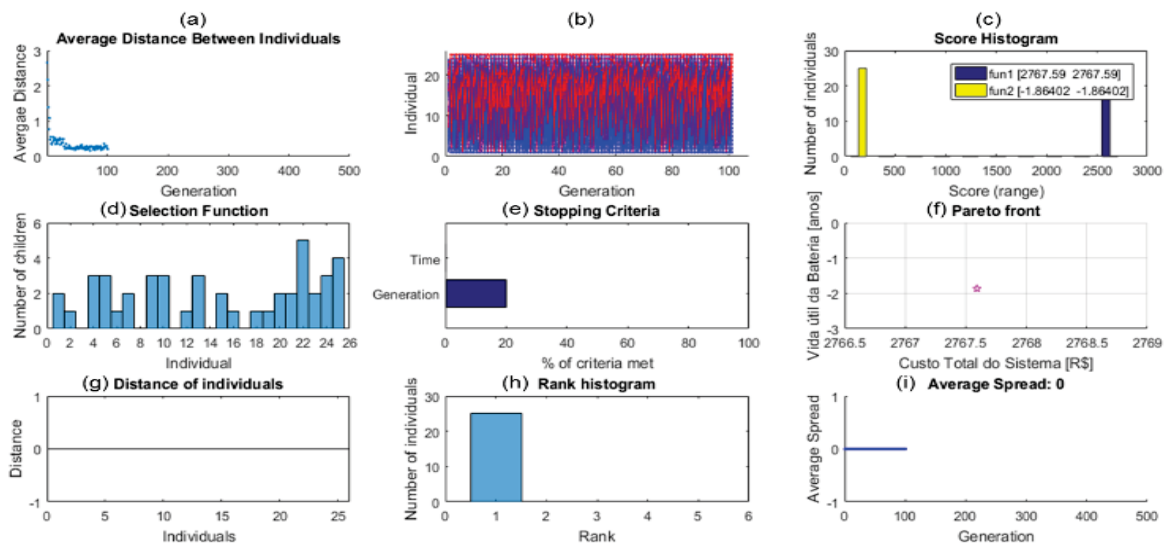
| Cenários | Combinações das Funções Objetivos |
|----------|---|
| 1 | Custo Total do Sistema X Vida útil da bateria |
| 2 | Custo Total do Sistema X LOLP |
| 3 | Custo Total do Sistema X Energia Desperdiçada |

FONTE: A autora (2019)

5.1.1 CENÁRIO 1

No primeiro cenário, foram simuladas as funções Custo Total do Sistema e a Vida Útil da Bateria. Saber qual o comportamento do sistema através destas duas combinações foi importante analisar, apesar de não se considerar o aumento da carga no sistema, pois verificou-se não que não houve variação nessas funções objetivas durante o processo de otimização. Como um dos objetivos do problema é minimizar o custo total do sistema, o algoritmo optou por manter a mesma solução, o que significa que a solução encontrada está mais próxima da frente ótima de Pareto, sendo que não houve necessidade de variar as funções porque ele já encontrou a melhor solução nas condições estabelecidas no problema. Os resultados são mostrados na Figura 21 e Tabela 11, respetivamente.

FIGURA 21 – PROCESSO DE OTIMIZAÇÃO CENÁRIO 1



FONTE: A autora (2019)

Na Figura 22 apresentada a evolução do Algoritmo Genético Multiobjetivo onde:

- (a) ilustra a distância média entre os indivíduos;
- (b) o número de gerações atingidas na população definida;
- (c) variação das funções objetivos durante o processo de otimização;
- (d) seleção das funções objetivos (relaciona a o número de indivíduos e o número de filhos a serem mutadas durante o processo de otimização);

- (e) critério de parada do problema a ser otimizado;
- (f) fronteira de Pareto onde estão apresentadas as funções a ser otimizadas;
- (g) distância dos indivíduos;
- (h) classificação dos indivíduos na população; e
- (i) espalhamento médio dos indivíduos em relação ao número máximo de gerações.

O sinal negativo no valor da função objetivo na Figura 22 (f) referente a vida útil da bateria, representa a maximização através da minimização do negativo dessa função ($f_2 = -$ vida útil da bateria).

Após 102 iterações de processamento o sistema convergiu e obteve os seguintes resultados:

TABELA 14 – RESULTADOS DO PROCESSO DE OTIMIZAÇÃO

| N | Custo Total do Sistema [R\$] | Vida útil [anos] | X ₁ | X ₂ | X ₃ | X ₄ |
|----|------------------------------|------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| 1 | 2.767,5923 | 1,86 | 1,0472 | 1,0 | 1,0 | 1,0 |
| 2 | 2.767,5923 | 1,86 | 1,0472 | 1,0 | 1,0 | 1,0 |
| 3 | 2.767,5923 | 1,86 | 1,0812 | 1,2481 | 1,1148 | 1,04772 |
| 4 | 2.767,5923 | 1,86 | 1,0216 | 1,4699 | 1,2160 | 1,0 |
| 5 | 2.767,5923 | 1,86 | 1,0562 | 1,1909 | 1,0 | 1,0111 |
| 6 | 2.767,5923 | 1,86 | 1,0472 | 1,0 | 1,1131 | 1,0 |
| 7 | 2.767,5923 | 1,86 | 1,0068 | 1,4332 | 1,0108 | 1,0460 |
| 8 | 2.767,5923 | 1,86 | 1,0774 | 1,2011 | 1,0 | 1,0625 |
| 9 | 2.767,5923 | 1,86 | 1,0472 | 1,0 | 1,4332 | 1,0599 |
| 10 | 2.767,5923 | 1,86 | 1,3376 | 1,4195 | 1,2011 | 1,1138 |
| 11 | 2.767,5923 | 1,86 | 1,3821 | 1,3273 | 1,0 | 1,0625 |
| 12 | 2.767,5923 | 1,86 | 1,3376 | 1,4195 | 1,2693 | 1,4195 |
| 13 | 2.767,5923 | 1,86 | 1,0277 | 1,3140 | 1,1450 | 1,1266 |
| 14 | 2.767,5923 | 1,86 | 1,0562 | 1,1909 | 1,1852 | 1,0 |
| 15 | 2.767,5923 | 1,86 | 1,3975 | 1,2791 | 1,4195 | 1,2693 |
| 16 | 2.767,5923 | 1,86 | 1,0642 | 1,1135 | 1,3140 | 1,1450 |
| 17 | 2.767,5923 | 1,86 | 1,2498 | 1,1397 | 1,0086 | 1,1042 |
| 18 | 2.767,5923 | 1,86 | 1,0562 | 1,1910 | 1,1131 | 1,0 |
| 19 | 2.767,5923 | 1,86 | 1,2832 | 1,2892 | 1,0108 | 1,1169 |
| 20 | 2.767,5923 | 1,86 | 1,0812 | 1,2482 | 1,1166 | 1,0028 |
| 21 | 2.767,5923 | 1,86 | 1,0378 | 1,4148 | 1,0514 | 1,0144 |
| 22 | 2.767,5923 | 1,86 | 1,0775 | 1,2013 | 1,2656 | 1,1295 |
| 23 | 2.767,5923 | 1,86 | 1,0472 | 1,0 | 1,1131 | 1,0109 |
| 24 | 2.767,5923 | 1,86 | 1,1850 | 1,0952 | 1,0652 | 1,1405 |
| 25 | 2.767,5923 | 1,86 | 1,0643 | 1,1135 | 1,1149 | 1,0114 |

FONTE: A autora (2019)

Pode-se observar que o valor do custo e a vida útil da bateria mantêm-se inalterados, porque a bateria selecionada tem uma capacidade de armazenamento de energia menor, apesar de suprir a demanda de carga, mas sofrerá mais cargas/ descargas reduzindo assim sua vida útil.

Solução: $X = [1 \ 1 \ 1 \ 1]$. O sistema vai precisar neste cenário de um painel de 150 Wp e bateria de 110 Ah.

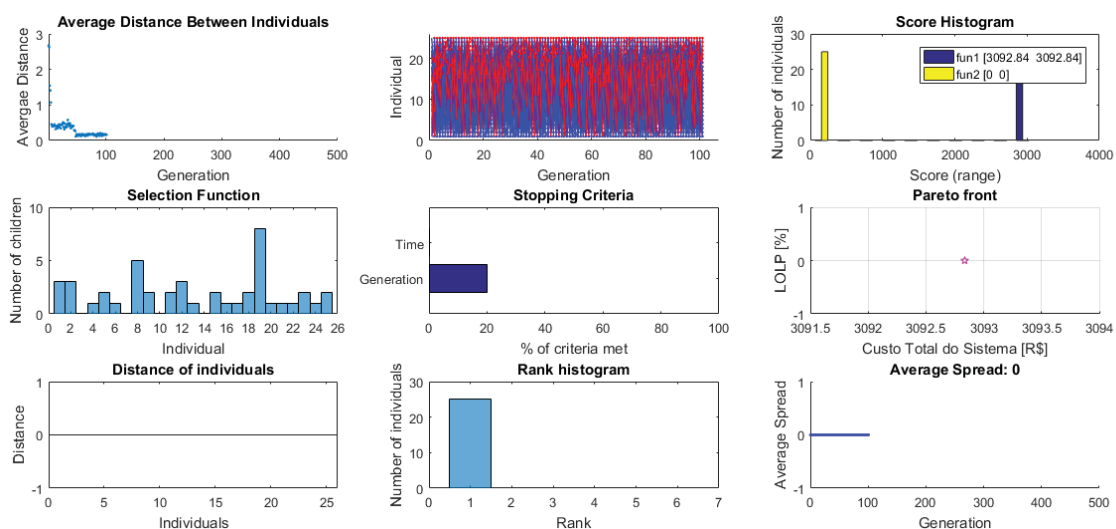
A solução $X = [1 \ 1 \ 1 \ 1]$ significa:

- Área do painel na posição 1 (um) equivalente a 0,9996 m² e potência de 150 Wp;
- Uma fileira de painéis;
- Capacidade do monobloco da bateria na posição 1 (um) equivalente a 110 Ah;
- Uma fileira de baterias, e assim sucessivamente.

5.1.2 CENÁRIO 2

Neste cenário, o comportamento do sistema foi analisado através da combinação das funções Custo Total do Sistema e a Probabilidade de Perda de Carga (LOLP). Observa-se que quando o custo total do sistema é maior o LOLP tende a zero. O custo do sistema torna-se elevado devido ao tamanho maior da bateria, que o sistema irá precisar para suprir a demanda de carga nos momentos em que não houver geração solar ou no período noturno. A Figura 22 mostra o processo de otimização do algoritmo Multiobjetivo referente a este cenário.

FIGURA 22 – EVOLUÇÃO GAMULTIOBJ



FONTE: A autora (2019)

O sistema convergiu após 102 iterações e obteve os resultados da Tabela 15.

TABELA 15 – FRENTE DE PARETO – RESULTADOS DAS FUNÇÕES OBJETIVOS E VARIÁVEIS DE DECISÃO

| N | Custo Total do Sistema [R\$] | LOLP [%] | X ₁ | X ₂ | X ₃ | X ₄ |
|----|------------------------------|----------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| 1 | 3.092,8352 | 0,0 | 1,8455 | 1,0 | 1,4847 | 1,0 |
| 2 | 3.092,8352 | 0,0 | 1,8455 | 1,25 | 1,4847 | 1,0 |
| 3 | 3.092,8352 | 0,0 | 1,7286 | 1,2789 | 1,4875 | 1,0028 |
| 4 | 3.092,8352 | 0,0 | 1,7286 | 1,2789 | 1,4875 | 1,0028 |
| 5 | 3.092,8352 | 0,0 | 1,8455 | 1,25 | 1,4847 | 1,0 |
| 6 | 3.092,8352 | 0,0 | 1,8455 | 1,0176 | 1,4847 | 1,0 |
| 7 | 3.092,8352 | 0,0 | 1,8078 | 1,0141 | 1,4863 | 1,0460 |
| 8 | 3.092,8352 | 0,0 | 1,6656 | 1,4685 | 1,4847 | 1,0 |
| 9 | 3.092,8352 | 0,0 | 1,7286 | 1,1539 | 1,4875 | 1,1278 |
| 10 | 3.092,8352 | 0,0 | 1,7152 | 1,2230 | 1,4855 | 1,0213 |
| 11 | 3.092,8352 | 0,0 | 1,8234 | 1,1981 | 1,4857 | 1,0375 |
| 12 | 3.092,8352 | 0,0 | 1,8078 | 1,0141 | 1,4863 | 1,0460 |
| 13 | 3.092,8352 | 0,0 | 1,7636 | 1,2687 | 1,4864 | 1,0010 |
| 14 | 3.092,8352 | 0,0 | 1,7415 | 1,3999 | 1,4847 | 1,0 |
| 15 | 3.092,8352 | 0,0 | 1,8455 | 1,1265 | 1,4847 | 1,0 |
| 16 | 3.092,8352 | 0,0 | 1,7472 | 1,2315 | 1,4854 | 1,0549 |
| 17 | 3.092,8352 | 0,0 | 1,7833 | 1,4028 | 1,4847 | 1,0 |
| 18 | 3.092,8352 | 0,0 | 1,8455 | 1,1265 | 1,4846 | 1,0 |
| 19 | 3.092,8352 | 0,0 | 1,8225 | 1,2342 | 1,4860 | 1,0352 |
| 20 | 3.092,8352 | 0,0 | 1,7287 | 1,2789 | 1,4875 | 1,0028 |
| 21 | 3.092,8352 | 0,0 | 1,8355 | 1,3551 | 1,4847 | 1,0 |
| 22 | 3.092,8352 | 0,0 | 1,8226 | 1,2343 | 1,4861 | 1,0352 |
| 23 | 3.092,8352 | 0,0 | 1,7233 | 1,2504 | 1,4857 | 1,0154 |
| 24 | 3.092,8352 | 0,0 | 1,8038 | 1,2992 | 1,4863 | 1,0442 |
| 25 | 3.092,8352 | 0,0 | 1,8455 | 1,0 | 1,4847 | 1,0 |

Fonte: A autora (2019)

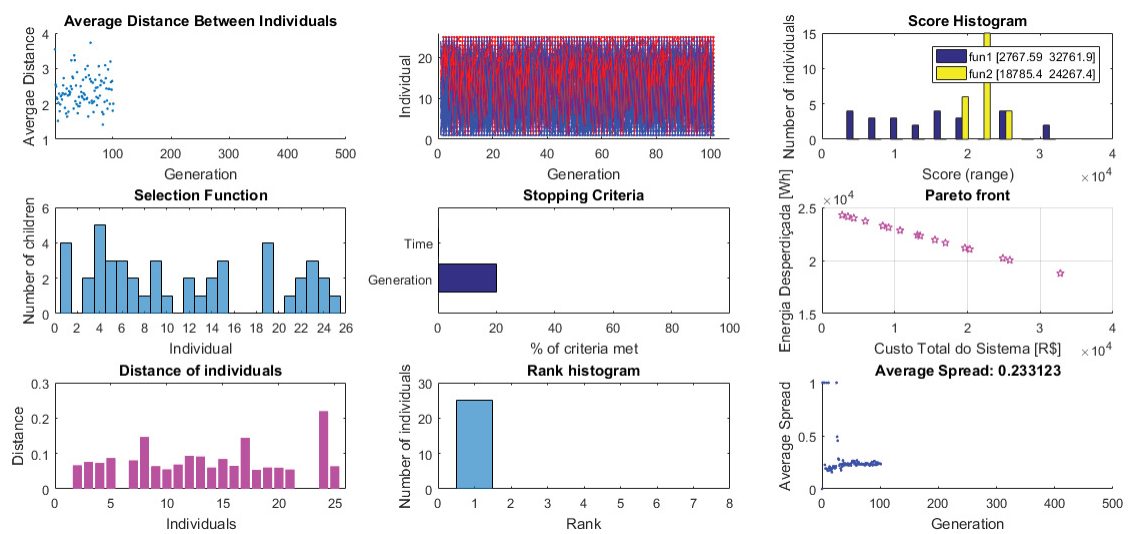
Observa-se que os valores das funções objetivos não variam durante o processo de otimização. Como a carga consumida ainda é muito menor, o sistema não sente necessidade de aumentar o aumento do custo. O algoritmo encontrou um único ponto de Pareto ótimo, que significa que não há diversidade de soluções entre as funções objetivos neste cenário, apesar de se ter diferentes áreas e capacidades de baterias encontradas na otimização. A solução encontrada indica que está mais próxima da frente de Pareto, porém não muito desejada. A carga consumida é muito menor em relação à geração.

Solução: $X = [2 \ 1 \ 1 \ 1]$. Neste cenário, o algoritmo selecionou um módulo fotovoltaico de área 1,2766 m² e uma potência de 200 Wp, para uma bateria de 110 Ah.

5.1.3 CENÁRIO 3

Neste cenário foram analisadas as funções objetivo Custo Total do Sistema e Energia Desperdiçada. Quanto maior a energia desperdiçada pelo sistema maior é o custo. A Figura 23 mostra o processo de evolução do Algoritmo Genético Multiobjetivo, cujos resultados são apresentados na Tabela 16.

FIGURA 23 – PROCESSO DE EVOLUÇÃO DO ALGORITMO GENÉTICO MULTIOBJETIVO



FONTE: A autora (2019)

Convergiu após 102 iterações e obteve os seguintes resultados:

TABELA 16 – RESULTADOS DA OTIMIZAÇÃO

| N | Custo Total do Sistema [R\$] | Energia Desperdiçada [Wh] | X1 | X2 | X3 | X4 |
|----|------------------------------|---------------------------|--------|--------|--------|--------|
| 1 | 2.767,59233 | 24.267,4153 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 |
| 2 | 10.737,0923 | 22.826,0117 | 1,1044 | 1,0143 | 3,3180 | 2,8010 |
| 3 | 13.127,9423 | 22.394,3446 | 1,4516 | 1,2300 | 3,8922 | 2,9369 |
| 4 | 15.518,7923 | 21.939,4717 | 1,4756 | 1,0799 | 5,2440 | 2,7229 |
| 5 | 19.648,4423 | 21.178,3516 | 1,3244 | 1,0154 | 5,7763 | 2,5801 |
| 6 | 32.761,8923 | 18.785,3760 | 1,4139 | 1,0262 | 6,5382 | 3,5544 |
| 7 | 25.806,6923 | 20.035,0668 | 1,4075 | 1,1674 | 6,4009 | 3,5669 |
| 8 | 24.864,8423 | 20.208,6643 | 1,4132 | 1,1481 | 6,5711 | 2,7450 |
| 9 | 16.967,7923 | 21.662,9041 | 1,4037 | 1,0166 | 6,5579 | 2,4242 |
| 10 | 20.300,4923 | 21.054,8016 | 1,3702 | 1,0948 | 5,4896 | 3,5426 |
| 11 | 8.346,2423 | 23.267,7260 | 1,1290 | 1,0229 | 2,3899 | 2,6405 |
| 12 | 16.967,7923 | 21.662,9041 | 1,4137 | 1,0248 | 6,5418 | 2,4726 |
| 13 | 9.143,1923 | 23.101,4089 | 1,3331 | 1,0194 | 4,0725 | 2,4461 |
| 14 | 5.955,3923 | 23.704,8488 | 1,0668 | 1,0014 | 4,6517 | 1,4339 |
| 15 | 10.737,0923 | 22.826,0117 | 1,1976 | 1,1032 | 4,9179 | 2,2633 |
| 16 | 13.490,1923 | 22.320,4006 | 1,3238 | 1,0499 | 5,6029 | 1,6365 |
| 17 | 20.300,4923 | 21.054,8016 | 1,3873 | 1,1026 | 5,4991 | 3,5394 |
| 18 | 5.955,3923 | 23.704,8487 | 1,0408 | 1,0020 | 5,2124 | 1,3801 |
| 19 | 3.564,5423 | 24.132,7463 | 1,0653 | 1,0078 | 2,2368 | 1,3836 |
| 20 | 15.518,7923 | 21.939,4717 | 1,4772 | 1,0821 | 5,2449 | 2,7254 |
| 21 | 4.361,4923 | 23.989,8848 | 1,2187 | 1,0676 | 3,3367 | 1,1411 |
| 22 | 32.761,8923 | 18.785,3761 | 1,4139 | 1,0184 | 6,5443 | 3,5582 |
| 23 | 2.767,5923 | 24.267,4154 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 |
| 24 | 25.806,6923 | 20.035,06679 | 1,4115 | 1,1747 | 6,4087 | 3,5706 |
| 25 | 24.864,8423 | 20.208,66431 | 1,4131 | 1,1481 | 6,5711 | 2,7372 |

FONTE: A autora (2019)

Pode-se observar que neste cenário há diversidade entre as funções objetivas durante a otimização do problema. A frente de Pareto encontrou vários pontos e várias soluções ótimas, cabendo ao projetista encontrar a, melhor entre elas e que satisfaz as condições estabelecidas no problema. Pode-se observar ainda que, o valor do custo é menor quando há menos energia desperdiçada no sistema. Pode-se concluir que o desperdício de energia em sistemas fotovoltaicos contribui para o aumento do custo, pela quantidade de equipamentos como painel e bateria que irá precisar para atender a demanda de carga.

Neste caso, pode-se ter um tamanho da bateria maior, impactando no aumento do custo. Quando há desperdício de energia gerada no sistema, as chances de se sobredimensionar o banco de baterias é maior e às vezes pode ser desnecessário, razão pela qual foi necessário no estudo minimizar o desperdício de energia durante a geração solar, e assim contribuindo para a redução do custo do total do sistema.

Solução: $X = [1 \ 1 \ 7 \ 3]$. Nestas condições o sistema precisará de um módulo de área 0.9996 m^2 , potência de 150 Wp e capacidade de armazenamento de 545 Ah . O custo do sistema é muito elevado devido a capacidade da bateria que é muito maior, para suprir a demanda energética, proveniente do Desperdício de Energia.

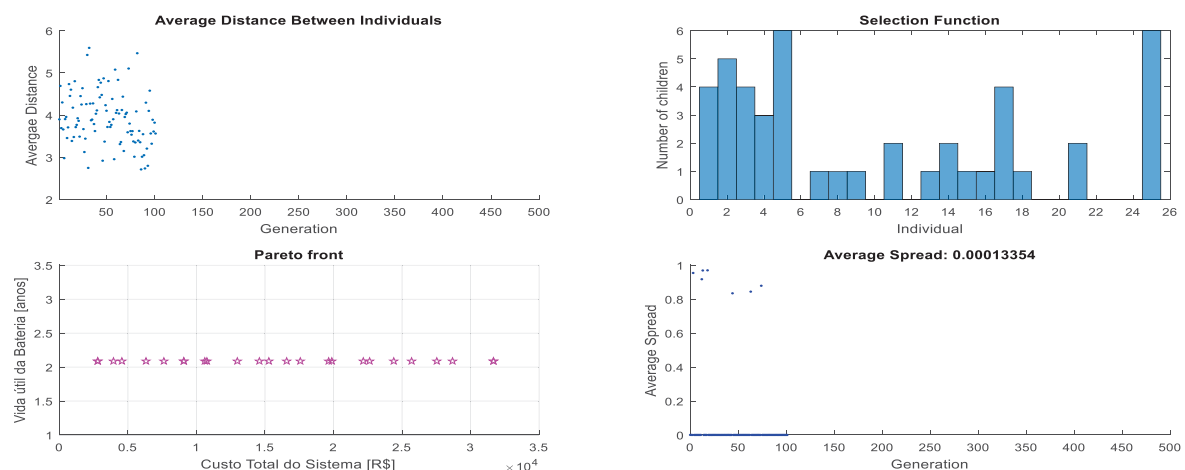
5.2 ANÁLISE SENSIBILIDADE

Nesta seção, é analisado o comportamento do sistema no futuro, quando a demanda de carga aumentar, a fim de se poder projetar o uso do sistema.

5.2.1 CENÁRIO 1

O cenário que considera a vida útil da bateria e custo total do sistema foi analisado novamente, mas com o aumento da carga no sistema (a partir de 6 vezes mais a carga constante).

FIGURA 24 – EVOLUÇÃO DOS RESULTADOS



FONTE: A autora (2019)

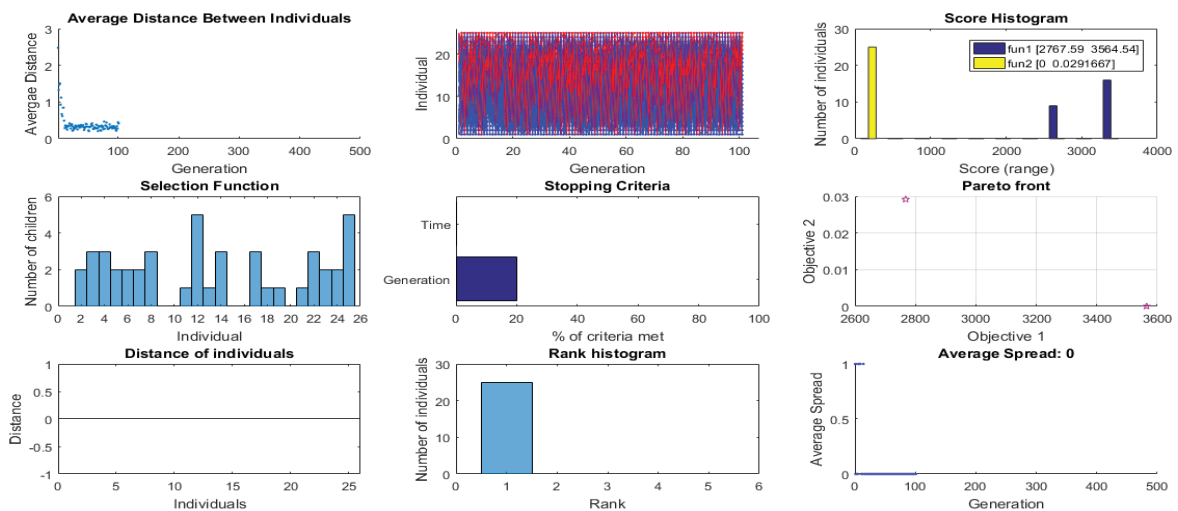
A figura 24 ilustra o processo de evolução da otimização através da combinação Custo Total do Sistema e a Vida útil da Bateria. Apesar de haver variação no valor do custo total do sistema, a vida útil da bateria permanece inalterada em todo o processo de otimização até encontrar o ponto ótimo. O ponto ótimo é o ponto no qual o sistema atende completamente a carga ($LOLP = 0$) a um custo total do sistema de $3.564,54$.

Solução: $X = [1 \ 1 \ 2 \ 1]$. O módulo fotovoltaico necessário é de área 0.9996 m² potência máxima de 150 Wp para uma capacidade de armazenamento de energia de 165 Ah. A vida útil da bateria é de 2,14 anos.

5.2.2 CENÁRIO 2

Ao se avaliar o comportamento do sistema com aumento da carga, observa-se que o valor do LOLP tende sempre a zero e o custo do sistema aumenta. A solução ótima do problema é encontrada quando o valor do LOLP é zero o que significa que a demanda de carga será sempre atendida. O que acontece com o LOLP quando a carga aumenta é apresentado na Figura 25 e Tabela 18.

FIGURA 25 – EVOLUÇÃO DO PROCESSO DE OTIMIZAÇÃO *GAMULTIOBJ*



FONTE: A autora (2019)

Convergiu em 176 iterações e obteve os resultados da Tabela 18:

TABELA 17 – RESULTADOS DA OTIMIZAÇÃO DA RELAÇÃO CUSTO E LOLP COM O AUMENTO DA CARGA NO SISTEMA

| N | Custo Total do Sistema [R\$] | LOLP [%] | X1 | X2 | X3 | X4 |
|----|------------------------------|----------|--------|---------|--------|--------|
| 1 | 3.564,54233 | 0,0 | 1,4073 | 1,34475 | 1,7360 | 1,3816 |
| 2 | 3.564,54233 | 0,0 | 1,4073 | 1,34475 | 1,7360 | 1,3816 |
| 3 | 3.564,54233 | 0,0 | 1,4859 | 1,3463 | 1,8058 | 1,3676 |
| 4 | 2.767,5923 | 0,0292 | 1,3329 | 1,4644 | 1,2599 | 1,1704 |
| 5 | 3.564,54233 | 0,0 | 1,2823 | 1,3447 | 1,7360 | 1,3816 |
| 6 | 3.564,54233 | 0,0 | 1,4073 | 1,34475 | 1,7360 | 1,3816 |
| 7 | 3.564,54233 | 0,0 | 1,4507 | 1,3451 | 1,7540 | 1,3787 |
| 8 | 3.564,54233 | 0,0 | 1,4217 | 1,3658 | 1,7254 | 1,2974 |
| 9 | 3.564,54233 | 0,0 | 1,4083 | 1,3285 | 1,7602 | 1,4128 |
| 10 | 3.564,54233 | 0,0 | 1,4839 | 1,4311 | 1,7931 | 1,3466 |
| 11 | 2.767,5923 | 0,0292 | 1,3563 | 1,4644 | 1,1974 | 1,1704 |
| 12 | 2.767,5923 | 0,0292 | 1,3192 | 1,3622 | 1,3348 | 1,2252 |
| 13 | 3.564,5423 | 0,0 | 1,4487 | 1,3584 | 1,7680 | 1,2995 |
| 14 | 2.767,5923 | 0,0292 | 1,3505 | 1,4644 | 1,2186 | 1,1704 |
| 15 | 2.767,5923 | 0,0292 | 1,3909 | 1,3496 | 1,0553 | 1,0343 |
| 16 | 3.564,54233 | 0,0 | 1,4073 | 1,3447 | 1,7360 | 1,3816 |
| 17 | 3.564,54233 | 0,0 | 1,4073 | 1,3447 | 1,7048 | 1,3816 |
| 18 | 2.767,5923 | 0,0292 | 1,3563 | 1,4331 | 1,1974 | 1,1704 |
| 19 | 3.564,54233 | 0,0 | 1,4839 | 1,4311 | 1,8087 | 1,3466 |
| 20 | 2.767,5923 | 0,0292 | 1,3563 | 1,4800 | 1,2074 | 1,1704 |
| 21 | 2.767,5923 | 0,0292 | 1,3629 | 1,4653 | 1,1985 | 1,1782 |
| 22 | 3.564,54233 | 0,0 | 1,4151 | 1,3516 | 1,7360 | 1,3816 |
| 23 | 3.564,54233 | 0,0 | 1,4377 | 1,4007 | 1,5211 | 1,2036 |
| 24 | 2.767,5923 | 0,0292 | 1,3190 | 1,3622 | 1,3348 | 1,2252 |
| 25 | 3.564,54233 | 0,0 | 1,4074 | 1,3447 | 1,7048 | 1,3815 |

FONTE: A autora (2019)

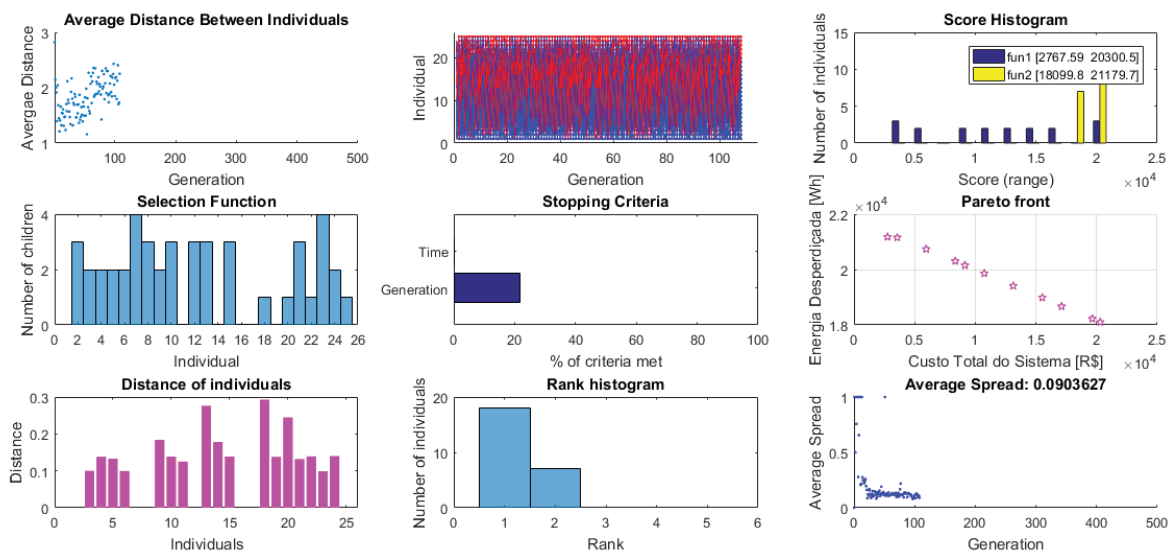
Com o aumento da carga no sistema, observa-se na Tabela 18 que há diversidade entre as funções objetivos do problema. O valor do custo total do sistema é menor quando o valor do LOLP por diferente de zero, o que significa que, nessas condições o sistema não atende totalmente a demanda de carga e há déficit de energia. O ideal é escolher a relação com LOLP igual a zero, apesar de o custo ser maior. A capacidade de armazenamento de energia deve ser maior para suprir a demanda de carga e evitar que haja déficit de energia, para maior confiabilidade do sistema.

A solução neste cenário, com o aumento de carga é: $X = [1 \ 1 \ 2 \ 1]$. A área do painel é de 0.9996 m² de potência máxima 150 Wp da Yingli solar e uma bateria com capacidade de armazenamento de 165 Ah. A vida útil da bateria é de 3,21 anos.

5.2.3 CENÁRIO 3

O cenário 3 analisou o comportamento do sistema através das funções Custo e Energia desperdiçada com o aumento da carga no sistema. O processo de otimização e os resultados são apresentados na Figura 26 e Tabela 19, respectivamente.

FIGURA 26 – EVOLUÇÃO DA OTIMIZAÇÃO EM RELAÇÃO AO CUSTO E ENERGIA DESPERDIÇADA NO SISTEMA COM O AUMENTO DA CARGA



Fonte: A autora (2019)

Após convergir em 109 iterações obteve os resultados da Tabela 19.

TABELA 18 – RESULTADOS DA OTIMIZAÇÃO

| N | Custo Total do Sistema [R\$] | Energia Desperdiçada [Wh] | X1 | X2 | X3 | X4 |
|----|------------------------------|---------------------------|--------|--------|--------|--------|
| 1 | 2.767,5923 | 21.179,6588 | 1,4443 | 1,3357 | 1,3583 | 1,3395 |
| 2 | 10.737,0923 | 19.860,2381 | 1,4102 | 1,4732 | 3,0595 | 2,6846 |
| 3 | 13.127,9423 | 19.411,0419 | 1,4102 | 1,4732 | 3,5595 | 3,1846 |
| 4 | 15.518,7923 | 18.985,7613 | 1,4102 | 1,4732 | 4,5595 | 3,1846 |
| 5 | 17.112,6923 | 18.668,1603 | 1,4102 | 1,4732 | 4,0595 | 3,6846 |
| 6 | 20.300,4923 | 18.099,8098 | 1,4619 | 1,4732 | 4,5213 | 3,6035 |
| 7 | 19.648,4423 | 18.222,8750 | 1,4619 | 1,4732 | 5,5213 | 2,6035 |
| 8 | 5.955,3923 | 20.738,2186 | 1,4302 | 1,4404 | 1,5194 | 1,9385 |
| 9 | 8.346,2423 | 20.301,2105 | 1,4481 | 1,3766 | 2,5693 | 2,9632 |
| 10 | 3.564,5423 | 21.154,8661 | 1,4474 | 1,3389 | 1,5988 | 1,3570 |
| 11 | 9.143,1923 | 20.151,9834 | 1,4628 | 1,3599 | 4,0650 | 2,4871 |
| 12 | 20.300,4923 | 18.099,8098 | 1,4619 | 1,4732 | 4,5213 | 3,6035 |
| 13 | 5.955,3923 | 20.738,2186 | 1,4368 | 1,4434 | 1,7120 | 2,3094 |
| 14 | 10.737,0923 | 19.860,2381 | 1,4457 | 1,4610 | 2,9442 | 2,5567 |
| 15 | 13.127,9423 | 19.411,0419 | 1,4361 | 1,4695 | 4,3050 | 2,6738 |
| 16 | 15.518,7923 | 18.985,7613 | 1,4191 | 1,4732 | 5,0557 | 3,0080 |
| 17 | 17.112,6923 | 18.668,1603 | 1,4215 | 1,4732 | 4,2255 | 3,6839 |
| 18 | 2.767,5923 | 21.179,6588 | 1,4795 | 1,4636 | 1,2498 | 1,4081 |
| 19 | 2.767,5923 | 21.179,6588 | 1,4443 | 1,3357 | 1,3583 | 1,3395 |
| 20 | 10.737,0923 | 19.860,2381 | 1,4101 | 1,4732 | 3,0595 | 2,6846 |
| 21 | 13.127,9423 | 19.411,0419 | 1,4102 | 1,4732 | 3,5595 | 3,1846 |
| 22 | 15.518,7923 | 18.985,7613 | 1,4102 | 1,4732 | 4,5595 | 3,1846 |
| 23 | 17.112,6923 | 18.668,1603 | 1,4102 | 1,4732 | 4,0595 | 3,6846 |
| 24 | 20.300,4923 | 18.099,8098 | 1,4619 | 1,4732 | 4,5213 | 3,6035 |
| 25 | 19.648,4423 | 18.222,8750 | 1,4619 | 1,4732 | 5,5213 | 2,6035 |

FONTE: A autora (2019)

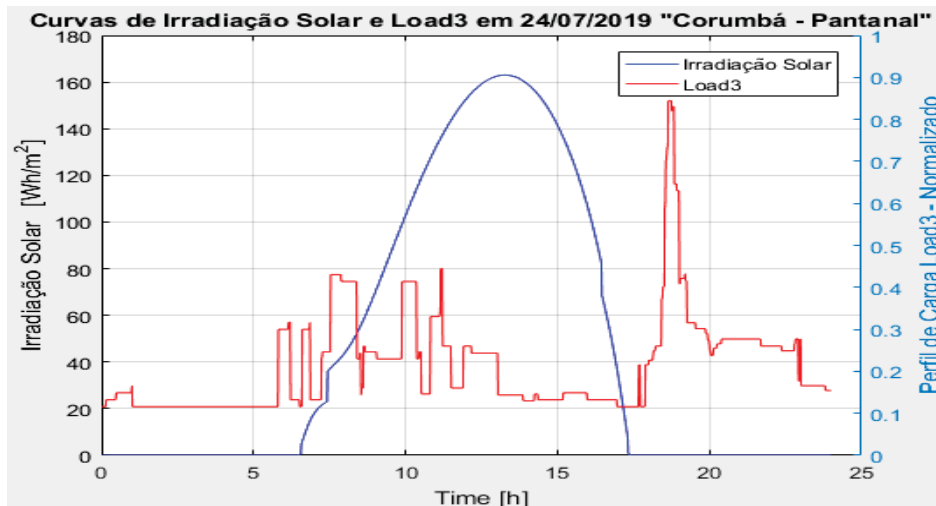
Através da Tabela 19, observa-se que quando a carga aumenta, há uma diminuição da energia desperdiçada no sistema. O valor do custo está em função do aumento ou diminuição da energia desperdiçada, ou seja, quanto maior for a energia desperdiçada, menor é o custo do sistema, devido ao aumento da capacidade de armazenamento de energia da bateria, e vice-versa. Várias soluções podem ser encontradas neste cenário, sendo que a que apresenta maior desperdício e menor custo, de acordo com os objetivos do problema é selecionada como ótima. A solução ótima a ser escolhida neste estudo, para este cenário é: $X = [1 \ 1 \ 6 \ 3]$ com uma área do painel de 0.9996 m^2 e potência máxima de 150 Wp com uma capacidade de armazenamento de energia de 425 Ah e vida útil de $3,21$ anos.

5.3 COMPARAÇÃO DAS CURVAS DE CARGA E IRRADIAÇÃO SOLAR

Observa-se na Figura 27 que há muita energia excedente gerada por m^2 , quando se utiliza um só painel de $1,6368 \text{ m}^2$. Pode-se chegar à conclusão de que

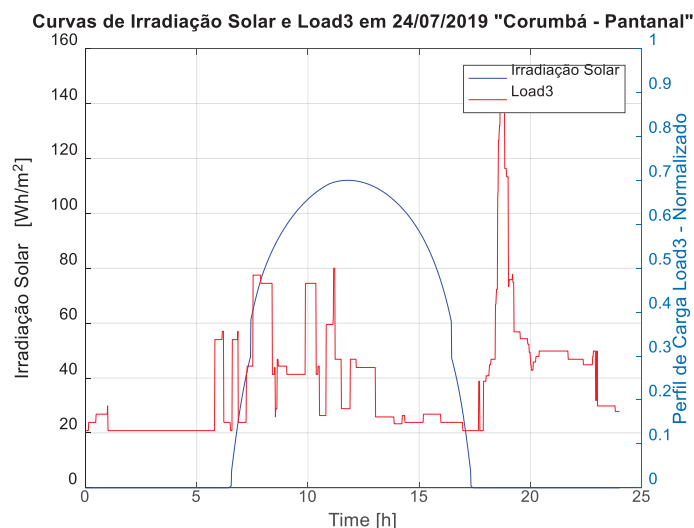
quando maior a área do painel, maior é a energia desperdiçada e o custo total do sistema. Por outro lado, a redução da área do painel por meio da utilização do algoritmo genético, permitiu a diminuição da Energia Excedente pela redução da área do painel de 1.6368 m^2 para 0.9996 m^2 (Figura 28).

FIGURA 27 – CURVAS DE IRRADIAÇÃO SOLAR VS CURVA DE CARGA COM A ÁREA DE 1.6368 m^2



Fonte: A autora (2019)

FIGURA 28 – CURVAS DE IRRADIAÇÃO SOLAR VS CURVA DE CARGA COM A ÁREA DE 0.9996 m^2 DEPOIS DA APLICAÇÃO DO ALGORITMO NO PROBLEMA



FONTE: A autora (2019)

Na Figura 28, são ilustrados o gráfico das curvas de irradiação solar e o perfil de carga com a redução da área do painel, sendo que o sistema ainda tem

capacidade de atender à demanda de carga durante o dia e com o auxílio de baterias, no período noturno e/ou nos dias que houver pouca geração solar.

A Tabela 20 mostra os resultados obtidos no dimensionamento do sistema fotovoltaico através das curvas de irradiação solar e perfil de carga.

TABELA 19 – RESULTADOS GERADOS PELO SISTEMA NO DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA FOTOVOLTAICO

| | Resultados | Unidade |
|------------------------------------|------------|---------|
| Carga consumida | 914,24 | Wh |
| Energia desperdiçada | 8.683,34 | Wh |
| Energia disponível | 1.608,31 | Wh |
| Energia excedente | 9.380 | Wh |
| Energia solar fotovoltaica | 10.300 | Wh |
| Potência do fotovoltaico | 1.716,6 | W |
| Potência do fotovoltaico corrigida | 1.583 | W |
| Eficiência dinâmica | 10,68 | % |
| Temperatura do módulo | 43,98 | °C |

FONTES: A autora (2019)

Com o valor da potência gerada pelo fotovoltaico, pode-se determinar o número de módulos fotovoltaicos necessários no sistema em estudo, a partir de:

O número de módulos fotovoltaicos de acordo com a equação:

$$\text{número de módulos} = \frac{P_{FV}}{P_{\text{max_módulo selecionado}}} \quad (58)$$

São necessários 12 módulos fotovoltaicos de 150 Wp da Yingli solar para geração de eletricidade capaz de atender a demanda de carga diária do consumidor em Corumbá. A potência total gerada é 1.800 W dada pela expressão:

$$P_{\text{Total}} = \text{número de módulos} \times P_{\text{max_módulo selecionado}} \quad (59)$$

Como a potência total gerada pelo sistema é de 1.800 W, o inversor capaz de suportar tal potência e alimentar a carga é de 2.000 W da Fronius Galvo, cujo fator de dimensionamento é de 1,11 determinado pela expressão:

$$FD = \frac{P_{\text{inv_escolhido}}}{P_{\text{Total}}} \quad (60)$$

A corrente máxima que o controlador de carga deve suportar é $I_C = 75 \text{ A}$ Determinada pela equação (43), sendo que foi selecionado o Controlador de Carga MPPT de 60A programável da marca *Schneider Electric* com tensão de operação de 12/24/48/60V e capaz de suportar a potência total gerada pelos módulos.

5.4 TOMADA DE DECISÃO

Durante as simulações verificou-se que ao aumentar a vida útil da vida bateria, a capacidade de armazenamento de energia é maior, tal que, a bateria tem menos cargas/descargas, que também aumenta sua autonomia, no quesito atendimento à demanda de carga, como pode-se observar nos valores mostrados na Tabela 20.

Se for selecionada a solução com um custo menor do sistema, a capacidade de armazenamento de energia é menor, mas haverá déficit de energia, o que não representa uma solução viável para os projetos de eletrificação rural com o emprego de sistemas fotovoltaicos isolados, com o sistema de armazenamento de energia por baterias.

O atendimento à demanda quando não há geração solar e ou no período noturno é fundamental nestes sistemas, sendo também das premissas nos sistemas elétricos de potência, que a demanda seja sempre atendida e sem déficit de energia.

TABELA 20 – RELAÇÕES CUSTO BENEFÍCIO ENTRE AS FUNÇÕES OBJETIVAS E AS VARIÁVEIS DE DECISÃO

| Energia desperdiçada [Wh] | Déficit de Energia [Wh] | LOLP [%] | L [anos] | Custo Total do Sistema [R\$] | Variáveis de decisão [adm.] |
|---------------------------|-------------------------|----------|----------|------------------------------|-----------------------------|
| 31.101,67 | 0 | 0 | 3,21 | 3.889,79 | [2 1 2 1] |
| 24.132,73 | 0 | 0 | 2,14 | 3.564,54 | [1 1 2 1] |
| 31.237,90 | -796,42 | 0,13 | 3,21 | 3.092,84 | [2 2 1 1] |
| 45.535,65 | 0 | 0 | 4,86 | 4.673,77 | [3 1 2 1] |
| 60.147,32 | 0 | 0 | 4,86 | 6.159,75 | [3 2 1 1] |
| 45.123,44 | 0 | 0 | 4,86 | 7.064,62 | [3 1 2 2] |
| 28.276,86 | -141,17 | 0,03 | 1,86 | 3.092,84 | [2 1 1 1] |
| 27.699,71 | 0 | 0 | 4,86 | 6.280,64 | [2 1 2 2] |
| 21.324,18 | -144,52 | 0,03 | 1,86 | 2.767,59 | [1 1 1 1] |
| 18.947,83 | -154,22 | 0,03 | 2,14 | 2.767,59 | [1 1 1 1] |

FONTE: A autora (2019)

Observando a Tabela 17, várias soluções podem ser escolhidas, dependendo daquilo que o projetista achar melhor para o seu sistema. Neste estudo, em particular, a relação que tiver menor custo, onde a demanda de carga é totalmente

atendida e que a bateria tenha capacidade de armazenamento que supra a demanda, é ideal.

Do conjunto de soluções encontradas nos cenários simulados, tendo em consideração as características do pantanal, escolheu-se para o sistema a solução: $X = [1 \ 1 \ 2 \ 1]$. A capacidade de armazenamento é capaz de suprir a demanda de carga e garante uma autonomia de 24h sem radiação solar e uma vida útil de 3,21 anos. A área selecionada foi de 0,9996 m² para um módulo fotovoltaico de 150 W, que contribuirá para a redução da energia desperdiçada pelo sistema, com uma capacidade de armazenamento de energia de 165Ah.

A solução $X = [2 \ 1 \ 2 \ 1]$ também pode ser viável para este projeto se a intenção é aumentar a vida útil da bateria, apesar de um ligeiro aumento do custo do sistema, devido ao aumento da potência do painel de 150 Wp para uma área de 0,9996 m² para 1,2766 m² a uma potência de 200 Wp e aumento da energia desperdiçada no sistema.

No entanto, as soluções que apresentam déficit de energia com valor de LOLP diferente de zero, não são viáveis para projetos de eletrificação rural com o emprego de sistemas fotovoltaicos isolados, pois afeta o desempenho ótimo e a confiabilidade do sistema.

5.5 DISCUSSÃO DE RESULTADOS

A solução ótima do problema foi encontrada minimizando a área do painel e as capacidades do monobloco da bateria. A área do painel foi de 0,9996 m² contra a área de 1,6368 m² usada no trabalho dos Narayan *et al.*, (2019). A redução da área do painel permitiu a redução do excedente de energia e a consequente energia desperdiçada pelo sistema, fato que contribui para a diminuição do custo do sistema total do sistema.

O tamanho da bateria que forma o banco de bateria é de 1.980 Wh, com capacidade de 165 Ah, onde foram avaliados os níveis de carga e descarga com profundidades de descarga de 20%. A bateria selecionada é capaz de atender a demanda de carga num período de 48 h sem geração solar, apesar de o sistema ter sido dimensionado para um dia. No trabalho do Narayan *et al.*, (2019), foi considerado um tamanho da bateria de 1.363 Wh para apenas um dia de autonomia

sem geração solar, com profundidade de descarga de 80%. Quanto maior a capacidade de armazenamento de energia maior é o custo total do sistema.

O custo total do sistema buscou a redução do custo dos equipamentos do sistema (painel e bateria). A função custo mostrou dependência na variação do custo dos equipamentos do sistema e também no quanto de energia desperdiçada há no sistema. Este fato é visível no cenário 3, onde observou-se que quanto maior a energia desperdiçada maior será o custo. Narayan *et al.*, (2019) não avaliaram este cenário, mas mencionou o quanto o sistema perde em função taxas de energia desperdiçada e de carga anual, obtendo uma taxa de dimensionamento de 1,27 ótimo para um rendimento máximo de 96% para $(0,5 \leq RS \leq 1,5)$. Neste caso o custo do sistema mostrou ser mínimo, porque houve uma redução da energia desperdiçada no sistema. No estudo de (BORDIN *et al.*, 2017) para a redução do custo do sistema foi analisado o desempenho da bateria (processos de carga/descarga) para saber em momentos a bateria perde sua vida útil e a implicância disso no custo do sistema, e concluíram que quanto maior a vida útil da bateria menor é o custo.

O valor de LOLP mínimo encontrado foi quando seu valor tendeu a zero, o que significou que o sistema atendeu totalmente a demanda de carga e o déficit de energia foi zero (LOLP = 0, Edéficit = 0 e Custo Total do Sistema = 3.092,84 R\$). Quando o valor de LOLP foi de 0,13 > LOLP meta de 10 % o déficit de energia foi de 796,42 Wh e o custo foi de 3.092,84 R\$, o sistema gerou mais do precisava. E quando o valor do LOLP reduziu para 0,03 o déficit de energia reduziu para 154,22 Wh e um custo de 2.767,59 R\$. Com base nesses resultados, o valor do LOLP escolhido foi aquele em que o sistema atendeu totalmente a carga, apesar de o seu custo ser maior em relação ao valor do LOLP onde há déficit de energia no sistema (não desejável).

Narayan *et al.*, (2019) avaliaram o comportamento do sistema usando a métrica de confiabilidade LOLP que mediu o tempo de inatividade do sistema considerando três categorias diferentes ($LOLP \leq 0,1$; $LOLP \leq 0,05$ e $LOLP \leq 0,02$) fazendo combinações dos tamanhos das baterias e painéis em cada estrutura multicamadas, onde categoria que apresentou menor tamanho da bateria que foi escolhido. Observaram também que nos níveis 4 e 5 onde se exige altos valores de potência e conversores o custo do sistema foi maior e atingiram um valor do LOLP de 1,5 %, o que não aconteceu nos níveis de 1 a 3.

Zhou *et al.*, (2019) usou o LOLP como uma das métricas de confiabilidade para o suprimento de eletricidade durante as interrupções da rede no momento que em que o sistema PV + Bateria não pode atender a demanda, fixando seu valor para 10 % de onde observaram que as capacidades ideais de baterias que atenderam a esta restrição são maiores do que as capacidades da bateria que atingem o menor custo total do sistema. Na análise de sensibilidade os autores concluíram que o a redução do tamanho da bateria não só aumentou drasticamente o custo total do sistema como também piorou a confiabilidade do sistema. Para o autor se, o sistema atingir valores de LOLP de 13% a 12% é necessário aumentar mais capacidade, o que culmina num aumento de custo do sistema.

Por fim Mandelli *et al.*, (2016) também avaliou o índice de confiabilidade LOLP baseada na estimativa no valor econômico de energia fornecida e perdida onde os valores do LOLP foram à saída do processo. O resultado da otimização que melhor se ajustou as condições da população foi escolhido, ou seja, o valor do LOLP ótimo foi aquele que apresentou tamanhos de baterias e painéis solares e um custo do sistema fotovoltaico e gastos de energia mínima.

O inversor encontrado é capaz de suportar toda a potência gerada pelos módulos fotovoltaicos para alimentar a carga. Narayan *et al.*, (2019) considerou o dimensionamento do conversor para cada estrutura multicamadas, onde sua potência teve capacidade suficiente para alimentar a carga e garantir um ótimo desempenho ao sistema com segurança.

Finalmente, foi dimensionado neste trabalho um controlador de carga capaz de suportar a potência gerada pelos módulos fotovoltaicos. Nenhum autor na literatura considerou no seu estudo o dimensionamento do controlador de carga, apesar de este, ser muito importante para o ótimo desempenho do sistema fotovoltaico isolado com baterias para controlar os níveis de corrente na entrada e saída da bateria.

É importante avaliar o comportamento do sistema através da métrica de confiabilidade LOLP, que permitiu saber em que instantes de tempo o sistema atendeu ou deixou de atender a carga e o que representa na função custo total do sistema. O LOLP é uma métrica muito importante no dimensionamento sistema fotovoltaico com armazenamento de energia por bateria.

A minimização da área foi importante para a redução energia desperdiçada no sistema, que vem a aumentar o custo pelo aumento do tamanho da bateria para atender uma demanda de carga que muitas vezes não é necessária.

Para que o sistema atenda totalmente a carga é necessário que a capacidade de armazenamento de energia seja maior, apesar de o custo do sistema aumentar. A vida útil da bateria depende da capacidade de armazenamento de energia.

6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Neste trabalho foi simulado um Sistema Fotovoltaico Isolado referente à região de Corumbá, Pantanal, no Estado Sul Mato-grossense, com o objetivo de minimizar a área do painel, a quantidade do banco de baterias, o Custo Total do Sistema e o LOLP. Pantanal é uma região isolada, remota e com residências geograficamente dispersas entre si, razão pela qual foi dimensionado neste estudo o sistema de para carga individual.

As combinações entre as funções objetivas apresentadas em cada um dos três cenários analisados apresentaram boa relação custo benefício pela redução dos custos dos equipamentos do sistema, associados ao desperdício de energia.

De acordo com os resultados obtidos no sistema, durante o processo de otimização, foi possível encontrar uma área do painel menor quando comparada com a área usada para o dimensionamento do sistema, no caso base, fornecida pelo fabricante nas condições de teste padrão. Isto impacta diretamente na redução do custo do sistema. Quando a área do painel é menor, há menos energia excedente e a conseqüente redução da energia desperdiçada quando ainda há geração solar e a bateria está carregada.

Foi possível também minimizar o valor do LOLP. Obter um LOLP de valor zero permite que demanda de carga seja totalmente satisfeita, apesar de o custo do sistema ser elevado.

A capacidade de bateria selecionada é capaz de atender à carga diária do sistema com uma autonomia de 24 h sem geração solar. Os níveis de carga/descarga da bateria definem a autonomia e sua vida útil.

A fronteira de Pareto encontrou o ponto mínimo entre cada uma das funções e apresentam valores que satisfazem ou condicionam o sistema para um ótimo desempenho ao menor custo e apresenta a escolha da melhor configuração que o sistema deve apresentar.

A otimização Multiobjetivo mostrou ser um ótimo método para a resolução de problemas otimização com múltiplas funções objetivos possibilitando o encontro de soluções dentro de espaço de busca amplo. Nos cenários onde o sistema apresentou várias soluções ótimas para diferentes funções objetivos, possibilita ao projetista alternativas para a tomada de decisão. Dessa forma, é possível escolher a solução que melhor se adapta à realidade do consumidor, com maior segurança e

confiabilidade do sistema. Uma única solução ótima significou que a solução encontrada não está contida da Fronteira de Pareto.

Conclui-se neste trabalho, que foi encontrado um bom resultado para a função objetivo, cumprindo todas as restrições do problema, o que veio a ser vantajosa para a eletrificação rural com o emprego de sistemas fotovoltaicos isolados.

Como trabalhos futuros recomendam-se outras formas de reduzir a energia desperdiçada no sistema, ao invés de dimensionar o sistema para uma única residência, dimensionar duas ou mais residências, cada uma com um sistema armazenamento de energia autônomo, já que a carga consumida é muito menor em relação à geração, que para tal é necessário:

- ✓ Aumentar o valor das perdas, devido principalmente as perdas por condução;
- ✓ Remodelar o código para os diferentes tipos de carga e avaliar os níveis de carga/descarga da bateria para cada residência; e
- ✓ Comparar um único banco de baterias com os bancos individuais

O sistema pode também ser simulado, considerando o uso de baterias íons de lítio para aumentar a vida útil, por serem mais eficientes, apesar de serem muito caras e fazer um estudo de viabilidade econômica.

REFERÊNCIAS

- ADAS. No Title. Disponível em: <<http://opantanalmt.blogspot.com/2010/12/mapa-do-pantanal-matogrossense.html>>. .
- AGECC - ADVISORY GROUP ON ENERGY AND CLIMATE CHANGE. **Energy for a Sustainable Future**. New York, 2010.
- ALMEIDA, E.; ROSA, A. C.; DIAS, F. C. L. S.; et al. Energia solar fotovoltaica: revisão bibliográfica. **Engenharias On-line**, v. 1, n. 2, p. 21–33, 2016. Disponível em: <<http://www.fumec.br/revistas/eol/article/view/3574>>. .
- AMARAL, G. S. Fator de dimensionamento de Inversor. Disponível em: <<https://suporte.plataformasicessolar.com.br/pt-BR/articles/1574993-fator-de-dimensionamento-de-inversor>>. .
- AMAZONAS GT. Livro conta a história do avanço da eletrificação rural no Brasil. Disponível em: <<http://www.eletrabrasamazonasgt.com/cmsgt/livro-conta-a-historia-do-avanco-da-eletrificacao-rural-no-brasil/#more-1851>>. .
- ANEEL- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA; ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Atlas de energia elétrica do Brasil**. 3ª ed. Brasília: ANEEL, 2002.
- ANEEL-AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Atlas de Energia Elétrica do Brasil**. 2ª ed. Brasília: ANEEL, 2005.
- ANEEL. **Atlas de Energia Eletrica do Brasil**. 3 edicao ed. 2008.
- ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Atlas de energia elétrica do Brasil**. 3ª ed. Brasília: ANEEL, 2008.
- ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Programa Nacional de Universalização do Acesso e Uso da Energia Elétrica - LUZ PARA TODOS. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br>>. .
- ANUPHAPPHARADORN, S.; SUKCHAI, S.; SIRISAMPHANWONG, C.; KETJOY, N. Comparison the economic analysis of the battery between lithium-ion and lead-acid in PV stand-alone application. **Energy Procedia**, v. 56, n. C, p. 352–358, 2014. Elsevier B.V. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2014.07.167>>. .
- ASPE - AGÊNCIA DE SERVIÇOS PÚBLICOS DE ENERGIA DO ESTADO DO ESPÍRITO SANTO. **Atlas de Bioenergia do Espírito Santo**. Vitória - ES., 2013.
- BANCO MUNDIAL. **Relatório Anual**. jul. 2017 ed. Washington, DC: Banco Mundial, 2018.
- BAÑOS, R.; MANZANO-AGUGLIARO, F.; MONTOYA, F. G.; et al. Optimization methods applied to renewable and sustainable energy: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, n. 4, p. 1753–1766, 2011.

BANSAL, M.; KHATOD, D. K. K.; SAINI, R. P. P. Modeling and optimization of integrated renewable energy system for a rural site. **Optimization, Reliability, and ...**, p. 25–28, 2014. ieeexplore.ieee.org. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6798289/>. .

BORDIN, C.; ANUTA, H. O.; CROSSLAND, A.; GUTIERREZ, I. L.; ... A linear programming approach for battery degradation analysis and optimization in offgrid power systems with solar energy integration. **Renewable Energy**, 2017. Elsevier. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148116307765>. .

BORTOLINI, M.; GAMBERI, M.; GRAZIANI, A. Technical and economic design of photovoltaic and battery energy storage system. **Energy Conversion and Management**, 2014. Elsevier. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890414004014>. .

CARDOSO, B. F.; OLIVEIRA, T. J. A. DE; SILVA, M. A. D. R. Eletrificação Rural e Desenvolvimento Regional: uma Análise do Programa Luz para Todos. **Desenvolvimento em Questão**, v. 11, n. 22, p. 117, 2013.

CHAUREY, A.; KANDPAL, T. C. Assessment and evaluation of PV based decentralized rural electrification: An overview. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 14, n. 8, p. 2266–2278, 2010. Elsevier. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032110001164>. .

CLIMATE DATA. DADOS CLIMÁTICOS PARA CIDADES MUNDIAIS. Disponível em: <https://pt.climate-data.org/>. .

CRESESB - CENTRO DE REFERÊNCIA PARA A ENERGIA SOLAR E EÓLICA SÉRGIO DE SALVO BRITO. Energia Solar. Disponível em: https://www.google.com/search?q=CENTRO+DE+REFERÊNCIA+PARA+A+ENERGIA+SOLAR+E+EÓLICA+SÉRGIO+DE+SALVO+BRITO+-+CRESESB.+Informe+Técnico,+Rio+de+Janeiro,+v.+2,+n.+1,+jun.+1996&safe=strict&source=Inms&tbn=isch&sa=X&ved=0ahUKEwjz_ubmk-7gAhWQH7kGHb7_BeAQ_AUIECgD&. .

CRESESB - CENTRO DE REFERÊNCIA PARA A ENERGIA SOLAR E EÓLICA SÉRGIO DE SALVO BRITO. Potencial Solar SunData. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/index.php#data>. .

CRUZ, C. N. P.; MOURAD, A. L.; MORÍNIGO, M. A.; SANGA, G. Eletrificação rural: benefícios em diferentes esferas. **5 Encontro de Energia no Meio Rural**, 2004.

DEB, K.; AGRAWAL, S.; PRATAP, A.; MEYARIVAN, T. A Fast Elitist Non-dominated Sorting Genetic Algorithm for Multi-objective Optimization: NSGA-II. **In International conference on parallel problem solving from nature**. p.849–858, 2000. Berlin, Heidelberg: Springer. Disponível em: <http://www.iitk.ac.in/kangal>. .

DEB, K.; MEMBER, A.; PRATAP, A.; AGARWAL, S.; MEYARIVAN, T. A Fast and Elitist Multiobjective Genetic Algorithm : **IEEE TRANSACTIONS ON EVOLUTIONARY COMPUTATION**, v. 6, n. 2, p. 182–197, 2002.

DIOUF, B.; PODE, R. Potential of lithium-ion batteries in renewable energy. **Renewable Energy**, 2015. Elsevier. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148114007885>>. .

DOMENECH, B.; FERRER-MARTÍ, L.; PASTOR, R. Hierarchical methodology to optimize the design of stand-alone electrification systems for rural communities considering technical and social criteria. **Renewable and Sustainable ...**, 2015. Elsevier. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032115005870>>. .

EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balço energético nacional**. 2019.

FAIMAN, D. Assessing the outdoor operating temperature of photovoltaic modules. **Progress in Photovoltaics: Research and Applications**, v. 16, n. 4, p. 307–315, 2008. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1002/pip.813>>. .

GHAIB, K.; BEN-FARES, F. Z. A design methodology of stand-alone photovoltaic power systems for rural electrification. **Energy Conversion and Management**, 2017. Elsevier. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890417305976>>. .

GOLDBERG, D. E. **Genetic Algorithms in Search, Optimization & Machine Learning**. 1 edition ed. USA: Addison-Wesley, 1989a.

GOLDBERG, D. E. David E. Goldberg-Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning-Addison-Wesley Professional (1989).pdf. , 1989b.

HAUPT, R. L.; HAUPT, S. E. **PRACTICAL GENETIC ALGORITHMS**. SECOND EDI ed. JOHN WILEY & SONS, 1998.

HIMAXBATTERY. Reação de sobrecarga da baterias de íons de lítio. Disponível em: <<http://pt.himaxbattery.net/info/overcharge-reaction-of-lithium-ion-batteries-29447439.html>>. .

IEA; IEA - INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Energy Access Outlook 2017**. OECD, 2017.

INMET (INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA). Estação Meteorológica de Observação de Superfície Automática. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=estacoes/estacoesAutomaticas>>. .

IRENA; IRENA - INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY. **Renewable Energy Prospects for the European Union**. February 2 ed. 2018.

JOÃO TAVARES PINHO; MARCO ANTONIO GALDINHO. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. Março 2014 ed. Rio de Janeiro, 2014.

KAUSHIK, A.; VIDYARTHI, D. P. An energy-efficient reliable grid scheduling model using NSGA-II. **Engineering with Computers**, v. 32, n. 3, p. 355–376, 2016. Springer London.

KEMERICH, P.; KEMERICH, P. D. DA C.; FLORES, C. E. B.; et al. Paradigmas Da Energia Solar No Brasil E No Mundo. **Electronic Journal of Management, Education and Environmental Technology (REGET)**, v. 20, n. 1, p. 241–247, 2016. Disponível em: <<https://periodicos.ufsm.br/reget/article/view/16132>>. .

KOLHE, M. Techno-Economic Optimum Sizing of a Stand-Alone Solar Photovoltaic System. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, v. 24, n. 2, p. 511–519, 2009. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/4957580/>>. .

LEE, K. Y.; BAI, X.; PARK, Y. M. Optimization Method for Reactive Power Planning by Using a Modified Simple Genetic Algorithm. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 10, n. 4, p. 1843–1850, 1995.

LIU, Y.; YU, S.; ZHU, Y.; WANG, D.; LIU, J. Modeling, planning, application and management of energy systems for isolated areas: A review. **Renewable and Sustainable Energy ...**, 2018. Elsevier. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S136403211731314X>>. .

MAHOOTI, M. Algoritmo de Posição Solar (SPA) da NREL. Disponível em: <<https://ch.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/59903-nrel-s-solar-position-algorithm-spa>>. .

MANDELLI, STEFANO; BRIVIO, C.; COLOMBO, E.; MERLO, M. A sizing methodology based on Levelized Cost of Supplied and Lost Energy for off-grid rural electrification systems. **Renewable Energy**, v. 89, p. 475–488, 2016. Elsevier. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S096014811530536X>>. .

MANDELLI, S; BRIVIO, C.; COLOMBO, E.; MERLO, M. A sizing methodology based on Levelized Cost of Supplied and Lost Energy for off-grid rural electrification systems. **Renewable Energy**, 2016. Elsevier. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S096014811530536X>>. .

MARINI, J. A.; ROSSI, L. A. Sistematização do dimensionamento técnico e econômico de sistemas fotovoltaicos isolados por meio de programa computacional. **Engenharia Agrícola**, v. 25, n. 1, p. 67–75, 2005.

MATIELLO, S.; CERRI, F.; PAGANI, C. P.; MORET, A. D. S.; CEMIN, A. B. Energia e desenvolvimento : alternativas energéticas para comunidades isoladas da Amazônia. , v. V, n. 1, p. 11–21, 2018.

MATOSINHOS, L. A.; FERREIRA, M. A. M.; DE CAMPOS, A. P. T. I SEMINÁRIO NACIONAL : Família e Políticas Sociais no Brasil - UFV O acesso e o uso da energia elétrica através do Programa “ Luz para Todos ”: uma análise de famílias rurais de Brás Pires-MG I SEMINÁRIO NACIONAL : Família e Políticas Sociais no Brasil -. , p. 1–12, 2017.

MICHALSKY, J. The Astronomical Almanac ’ s algorithm for approximate solar position (1950 –2050). **Solar Energy**, v. 40, n. 3, p. 227–235, 1988.

N. S. NARAYAN. Solar Charging Station for Light Electric Vehicles: A Design and Feasibility Study. , p. 152, 2013.

NARAYAN, NISHANT; CHAMSEDDINE, A.; VEGA-GARITA, V.; et al. 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, n. November 2018, p. 907–917, 2019. Elsevier. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.02.053>>. .

NARAYAN, N.; CHAMSEDDINE, A.; VEGA-GARITA, V.; QIN, Z.; ... Exploring the boundaries of Solar Home Systems (SHS) for off-grid electrification: Optimal SHS sizing for the multi-tier framework for household electricity **Applied Energy**, 2019. Elsevier. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261919303502>>. .

NARAYAN, N.; QIN, Z.; POPOVIC-GERBER, J.; et al. Stochastic load profile construction for the multi-tier framework for household electricity access using off-grid DC appliances. **Energy Efficiency**, , n. 1, 2017, 2018. Energy Efficiency.

OTUMDI, O. C.; KALU, C.; MARKSON, I. Determination of Loss of Load Probability for Stand-Alone Photovoltaic Power System. , v. 2, n. 1, p. 7–12, 2017. Disponível em: <<http://www.sciencepublishinggroup.com/j/ep>>. .

PATEL, A. M.; SINGAL, S. K. Off grid rural electrification using integrated renewable energy system. 2016 IEEE 7th Power India International Conference (PIICON). **Anais...** . p.1–5, 2016. IEEE. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/8077272/>>. .

PEREIRA, T. C. G. **Energias Renováveis: Políticas Públicas e Planejamento Energético**. 2014.

PHOTOVOLTAIC-SOFTWARE. Bancos de dados de radiação solar. Disponível em: <<https://photovoltaic-software.com/principle-ressources/solar-radiation-databases>>. .

PINHEIRO, F. A.; MOREIRA, A. N.; CARDOSO, E. N.; VASCONCELOS, J. A. DE. Algoritmo Genético Aplicado ao Controle de Tensão em Sistemas Elétricos de Potência. **In Anais do 3o Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente**, p. 289–294, 1997.

PINHEIRO, G. F.; RENDEIRO, G.; PINHO, J. T.; NETO, P. C. DE R. Eletrificação rural de consumidores isolados – um modelo de gestão sustentável baseado em biomassa de resíduos. **Revista Brasileira de Energia Solar**, v. 3, n. 1, p. 78–85, 2012. Disponível em: <<https://rbens.emnuvens.com.br/rbens/article/view/81>>. .

PINHO, J. T.; GALDINHO, M. A. **Manual de Engenharia Para Sistemas Fotovoltaicos: GTES - Grupo de Trabalho de Energia Solar Fotovoltaica**. Março 2014 ed. Rio de Janeiro: CEPEL - CRESESB, 2014.

REDIMAX - SISTEMA DE ENERGIA SOLAR. Sistemas isolados – Off Grid. Disponível em: <<https://redimax.com.br/noticias/sistemas-isolado-off-gird/>>. Acesso em: 5/6/2018.

REINDERS, A.; VERLINDEN, P.; SARK, W. VAN; FREUNDLICH, A. **Photovoltaic Solar Energy: From Fundamentals to Applications**. 1º ed. John Wiley & Sons, 2017.

RONTEK. Como Carregar uma Bateria de Lítio-Ion. Disponível em: <<http://www.sta-eletronica.com.br/artigos/baterias-recarregaveis/baterias-de-litio/como-carregar-uma-bateria-de-litio-ion>>. .

SALAS, C. S. S.; SILVEIRA, L. H. S. DA; AOKI, A. R.; et al. **Eletrificação de Regiões Remotas: Estudos de alternativas e aplicação no Pantanal Sul-matogrossense**. Bragança Paulista - SP, 2015.

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

SEBASTIÃO, A. P. O modelo da eletrificação de Moçambique: A importância para o desenvolvimento. **International Business and Economics Review**, , n. 7, p. 153–200, 2016.

SINGH, S. S.; FERNANDEZ, E. Method for evaluating battery size based on loss of load probability concept for a remote PV system. 2014 6th IEEE Power India International Conference (PIICON). **Anais...** . p.1–5, 2014. IEEE. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=7117729>>. .

SME. Fábrica de torres eólicas vai funcionar junto ao Complexo de Santa Vitória do Palmar. .

SMETS, A. H.; JÄGER, K.; ISABELLA, O.; SWAAIJ, R. A. VAN; ZEMAN, M. **Solar Energy_ The Physics and Engineering of Photovoltaic Conversion, Technologies and Systems**. 1^o ed. England: UIT Cambridge Ltd, 2016.

SODA. CAMS McClear Service for estimating irradiation under clear-sky. .

SRINIVAS, N.; DEB, K. Multiobjective Optimization Using Nondominated Sorting in Genetic Algorithms. **Evolutionary Computation**, v. 2, n. 3, p. 221–248, 1994. Disponível em: <<http://www.mitpressjournals.org/doi/10.1162/evco.1994.2.3.221>>. .

SUAREZ, P. A. Z.; MENEGHETTI, S. M. P.; MENEGHETTI, M. R.; WOLF, C. R. TRANSFORMAÇÃO DE TRIGLICERÍDEOS EM COMBUSTÍVEIS, MATERIAIS POLIMÉRICOS E INSUMOS QUÍMICOS: ALGUMAS APLICAÇÕES DA CATÁLISE NA OLEOQUÍMICA. **Fertility and Sterility**, v. 30, n. 3, p. 667–676, 2007.

SULAIMAN, S. I.; RAHMAN, T. K. A.; MUSIRIN, I.; SHAARI, S.; SOPIAN, K. An intelligent method for sizing optimization in grid-connected photovoltaic system. **Solar Energy**, v. 86, n. 7, p. 2067–2082, 2012. Elsevier Ltd. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2012.04.009>>. .

TAVARES, J. M. R. S. Método de segmentação de objectos em imagens baseado em contornos activos e algoritmo genético. , , n. May, 2014.

THERISTIS, M.; PAPAZOGLU, I. A. Markovian Reliability Analysis of Standalone Photovoltaic Systems Incorporating Repairs. **IEEE Journal of Photovoltaics**, v. 4, n. 1, p. 414–422, 2014. IEEE. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/6648639/>>. .

UDHAYAKUMAR, A.; CHARLES, V.; UTHARIARAJ, V. R. Stochastic simulation-based genetic algorithm for chance constrained fractional programming problem. **Int. J. Operational Research**, v. 9, n. 1, p. 23–38, 2010.

UNITED NATIONS. **The Sustainable Development Goals Report**. 2018^a ed. York New: United Nations, 2018.

URMEE, T.; MD, A. Social, cultural and political dimensions of off-grid renewable energy programs in developing countries. **Renewable Energy**, 2016. Elsevier. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148116301410>>. .

VIDAL, A. C. F.; HORA, A. B. Perspectivas do setor de biomassa de madeira para a geração de energia. **Papel e Celulose**, p. 261–314, 2011. Disponível em: <<http://goo.gl/xxTQd3>>. .

VILLALVA, M. G. **Energia Solar Fotovoltaica - Conceitos e Aplicações**. 2^a ed. São Paulo: Érica, 2015.

VITORINO, R. M.; JORGE, H. M.; NEVES, L. P. Multi-objective optimization using NSGA-II for power distribution system reconfiguration. **International Transactions on Electrical Energy Systems**, v. 25, n. 1, p. 38–53, 2015. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1002/etep.1819>>. .

YE, C.-J.; HUANG, M.-X. Multi-Objective Optimal Power Flow Considering Transient Stability Based on Parallel NSGA-II. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 30, n. 2, p. 857–866, 2015. IEEE. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/6866267/>>. .

ZHAO, Z.; LIU, B.; ZHANG, C.; LIU, H. An improved adaptive NSGA-II with multi-population algorithm. **Applied Intelligence**, v. 49, n. 2, p. 569–580, 2019. Applied Intelligence. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s10489-018-1263-6>>. .

ZHOU, J.; TSIANIKAS, S.; BIRNIE, D. P.; COIT, D. W. Economic and resilience benefit analysis of incorporating battery storage to photovoltaic array generation. **Renewable Energy**, v. 135, p. 652–662, 2019. Elsevier Ltd. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.12.013>>. .

ANEXO A – ÂNGULOS DE POSIÇÃO SOLAR

FIGURA 29 – MOVIMENTO APARENTE DO SOL AO REDOR DA TERRA, O EQUADOR CELESTE E A DIRECÇÃO DO EQUINÓCIO VERNAL

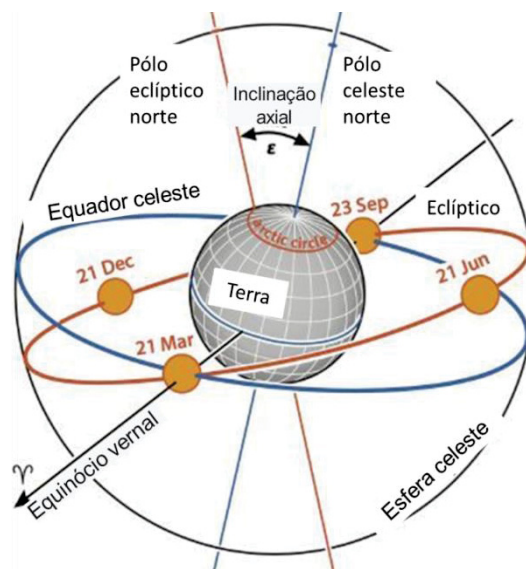


FIGURA 30 – (a) O SISTEMA DE COORDENADAS ECLÍPTICAS E (b) O SISTEMA DE COORDENADAS EQUATORIAIS

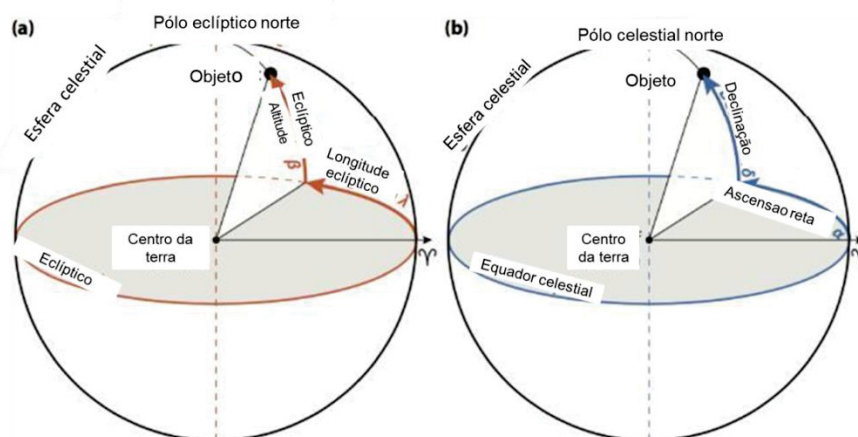


FIGURA 31 – ASCENSÃO RETA α , ÂNGULO DA HORA LOCAL h , O TEMPO SIDERAL MÉDIO DE GREENWICH GMST E O TEMPO SIDERAL MÉDIO LOCAL θ_L

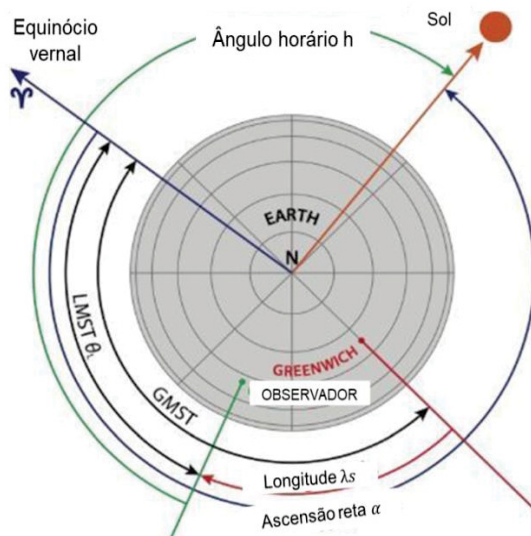
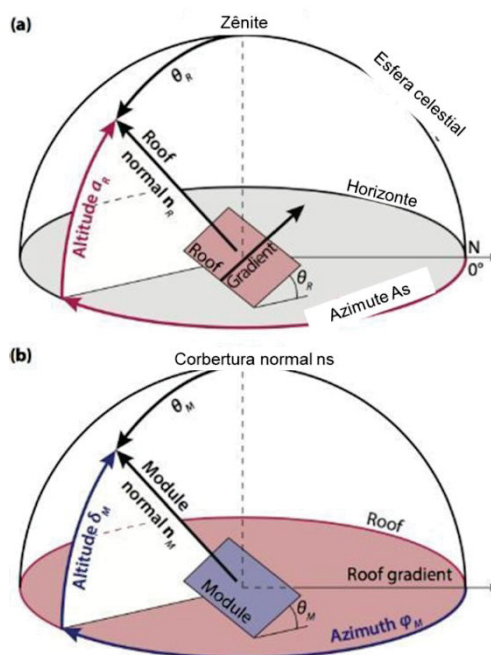


FIGURA 32 – (a) ORIENTAÇÃO DE UM TELHADO EM UM PLANO HORIZONTAL E (b) A ORIENTAÇÃO DE UM MÓDULO MONTADO EM UM TELHADO



FONTE: Smets *et al.* (2016)