

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

Tamara Martins Alves

**ANÁLISE DE ATENDIMENTO DE CARGAS ISOLADAS POR
SISTEMAS FOTOVOLTAICOS COM ARMAZENAMENTO DE
ENERGIA**

Santa Maria, RS
2020

Tamara Martins Alves

**ANÁLISE DE ATENDIMENTO DE CARGAS ISOLADAS POR SISTEMAS
FOTOVOLTAICOS COM ARMAZENAMENTO DE ENERGIA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Engenheira Eletricista**.

Orientador: Prof. Dr. Daniel Pinheiro Bernardon

Santa Maria, RS
2020

Tamara Martins Alves

**ANÁLISE DE ATENDIMENTO DE CARGAS ISOLADAS POR SISTEMAS
FOTOVOLTAICOS COM ARMAZENAMENTO DE ENERGIA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Engenheira Eletricista**.

Aprovado em 16 de outubro de 2020:

Daniel Pinheiro Bernardon, Dr. (UFSM)
(Presidente/Orientador)

Émerson Rafael da Silva, Me. (UFSM)

Mauro dos Santos Ortiz, Me. (UFSM)

Santa Maria, RS
2020

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Hamilton e Maria Eliza, que nunca mediram esforços para me dar apoio e suporte durante os longos anos da graduação. Obrigada pela compreensão, pela paciência, pelo incentivo e pelo amor de vocês, se cheguei até aqui, foi unicamente por vocês. Agradeço também a Deus, por ter me presenteado com pais tão maravilhosos.

Ao meu irmão Raul, por ser meu exemplo e inspiração, por acreditar em mim e, mesmo distante, está sempre presente contribuindo no meu crescimento e formação.

À minha colega e amiga Michele, por toda parceria ao longo desses anos, não só pelas incontáveis madrugadas de estudo, mas pelas risadas, conversas e lanchinhos. Tua amizade e companheirismo foram fundamentais para que eu conseguisse chegar até aqui. Também, Fernanda e Renata, que, apesar da distância, estiveram presentes, obrigada pela amizade, apoio e torcida de vocês. Ao meu colega/amigo/vizinho Kevin, por todas as palavras de incentivo e cervejinhas geladas nos momentos difíceis. Mais do que colegas, vocês todos se tornaram minha família na engenharia.

Às minhas amigas do coração e da vida, Paloma e Geovana, por nunca terem desistido de mim, apesar da minha ausência muitas vezes. Obrigada por toda a parceria, amizade, risadas e momentos únicos que vocês me proporcionaram.

Ao meu amigo, e agora meu amor, Júlio, pela paciência, pelo apoio e por acreditar em mim mais do que eu mesma.

Ao professor orientador Daniel Bernardon, pela orientação no desenvolvimento deste trabalho.

[...] temos nosso próprio tempo.

(Renato Russo)

RESUMO

ANÁLISE DE ATENDIMENTO DE CARGAS ISOLADAS POR SISTEMAS FOTVOLTAICOS COM ARMAZENAMENTO DE ENERGIA

AUTORA: Tamara Martins Alves
ORIENTADOR: Daniel Pinheiro Bernardon

Tendo conhecimento das vantagens econômicas que envolvem a energia solar fotovoltaica, além dos seus benefícios ao ambiente, e considerando a necessidade de melhoria das condições de vida da população onde a energia elétrica ainda não chegou, devido às dificuldades e aos altos custos que a construção de rede pode acarretar às concessionárias de energia, o presente trabalho apresenta uma análise do atendimento de cargas isoladas, distantes das redes de distribuição existentes, por sistemas fotovoltaicos com armazenamento de energia utilizando baterias. Além disso, o trabalho busca uma relação de custo benefício com a possível extensão de rede. Para isso, fez-se uma revisão quanto aos aspectos construtivos de um sistema de geração fotovoltaico e, depois, fazendo uso do *software* HOMER, foi realizada a análise econômica a partir de dados de perfis de carga propostos com base nos Sistemas Individuais de Geração de Energia Elétrica com Fontes Intermitentes (SIGFIs).

Palavras-chave: Energia solar. Sistema fotovoltaico. Cargas isoladas. Perfis de carga. Software HOMER.

ABSTRACT

ATTENDANCE ANALYSIS OF ISOLATED LOADS BY PHOTOVOLTAIC SYSTEMS WITH ENERGY STORAGE

AUTHOR: Tamara Martins Alves
ADVISOR: Daniel Pinheiro Bernardon

Having knowledge of the economic advantages of photovoltaic solar energy, in addition to its benefits to the environment, and considering the need to improve the living conditions of the population where electricity has not yet arrived, due to the difficulties and high costs that the construction of a network may cause to the energy concessionaires, the present work presents an analysis of the service of isolated loads, far from the existing distribution networks, photovoltaic systems with energy storage using batteries. In addition, the work seeks a cost-benefit ratio with the possible network extension. To this end, a review was made of the constructive aspects of a photovoltaic generation system and then, making use of the HOMER software, economic analysis was carried out using data from proposed load profiles based on the *Sistemas Individuais de Geração de Energia Elétrica com Fontes Intermitentes* (SIGFIs).

Keywords: Solar energy. Photovoltaic system. Isolated loads. Load profiles. HOMER software.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Estrutura de uma célula fotovoltaica.	17
Figura 2 - Estrutura de uma célula fotovoltaica de Silício Monocristalino.....	18
Figura 3 - Estrutura de uma célula fotovoltaica de Silício Policristalino.....	18
Figura 4 - Estrutura de uma célula fotovoltaica de Silício Película Fina.	19
Figura 5 - Componentes de um sistema fotovoltaico autônomo.....	22
Figura 6 - Painel Solar Fotovoltaico 150W.	29
Figura 7 - Controlador de carga Epever.	29
Figura 8 - Bateria Freedom 150 Ah.	30
Figura 9 - Inversor 400W.....	30
Figura 10 - Painel OSD 330W.....	31
Figura 11 - Controlador de carga Epever 30A.....	32
Figura 12 - Bateria Freedom 220Ah.	32
Figura 13 - Inversor 1500W.....	33
Figura 14 - Fluxograma de funcionamento do Homer.	35
Figura 15 - Configuração inicial do Homer.	36
Figura 16 - Perfil 1 - 13 kW/mês.....	37
Figura 17 - Perfil 1 - 80 kW/mês.....	38
Figura 18 - PV perfil 1 - 13 kW/mês.	39
Figura 19 - PV perfil 2 - 80 kW/mês.	40
Figura 20 - Inversor CC/CA perfil 1 - 813 kW/mês.	41
Figura 21 - Inversor CC/CA perfil 2 - 80 kW/mês.	42
Figura 22 - Bateria perfil 1 - 13 kW/mês.....	43
Figura 23 - Bateria perfil 2 - 80 kW/mês.....	44
Figura 24 - Média mensal de radiação solar na região de Santa Maria - RS.	45
Figura 25 - Recursos Econômicos.	46
Figura 26 - Controle do sistema.	47
Figura 27 - Dados de construção de rede por km.	47
Figura 28 - Fluxo de caixa perfil 1.	48
Figura 29 - Curvas do sistema de geração para perfil de carga 1.....	49
Figura 30 - Fluxo de caixa perfil 1.	50
Figura 31 - Curvas do sistema de geração para perfil de carga 2.....	50
Figura 32 - Comparação com a rede - Perfil 1.	51
Figura 33 - Comparação com a rede - Perfil 2.	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Disponibilidades mensais de energia.	27
Tabela 2 - Perfil 1 - SIGFI13.....	27
Tabela 3 - Perfil 2 - SIGFI80.....	27
Tabela 4 - Comparação dos resultados.	52

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
MIGDI	Microssistema Isolado de Geração e Distribuição de Energia Elétrica
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
PWM	<i>Pulse With Modulation</i>
SIGFI	Sistema Individual de Geração de Energia Elétrica com Fontes Intermitentes

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	MOTIVAÇÃO E JUSTIFICATIVA	12
1.2	OBJETIVOS	13
1.2.1	Objetivo geral	13
1.2.2	Objetivos específicos	13
1.3	ORGANIZAÇÃO DOS CAPÍTULOS	13
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	15
2.1	GERAÇÃO DISTRIBUÍDA	15
2.2	ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA	16
2.3	CÉLULAS FOTOVOLTAICAS	16
2.3.1	Células de silício monocristalino	17
2.3.2	Células de silício policristalino	18
2.3.3	Células de silício amorfo	18
2.4	MÓDULOS FOTOVOLTAICOS	19
2.5	SISTEMA FOTOVOLTAICO	20
3	MODELAGEM DO SISTEMA EM ESTUDO	22
3.1	BATERIAS	23
3.2	CONTROLADORES DE CARGA	24
3.3	INVERSORES	25
3.4	SISTEMAS ISOLADOS PARA FORNECIMENTO DE ENERGIA	26
3.5	PERFIS DE CARGAS ANALISADAS	27
3.6	KITS DE PV E BATERIAS PARA ABASTECIMENTO DAS CARGAS	28
3.6.1	Kit para atendimento mensal de 13 kWh/mês	28
3.6.2	Kit para atendimento mensal garantido de 80 kWh/mês	31
3.7	SOFTWARE HOMER	33
4	MODELAGEM E ANÁLISE NO SOFTWARE HOMER	36
4.1	PERFIS DE CARGA (<i>PRIMARY LOAD</i>)	36
4.2	PAINÉIS FOTOVOLTAICOS (<i>PV</i>)	38
4.3	CONVERSOR CC-CA (<i>CONVERTER</i>)	40
4.4	BATERIAS (<i>BATTERY</i>)	42
4.5	CENÁRIOS (<i>SOLAR SOURCE</i>)	45
4.6	RECURSOS ECONÔMICOS (<i>ECONOMICS</i>)	45
4.7	CONTROLE DO SISTEMA (<i>SYSTEM CONTROL</i>)	46
4.8	PARÂMETROS DE CONSTRUÇÃO DE REDE	47
5	RESULTADOS	48
5.1	PERFIL 1 - SIGFI13	48
5.2	PERFIL 2 - SIGFI80	49
5.3	COMPARAÇÃO SISTEMA ISOLADO x CONSTRUÇÃO DE REDE	50
5.4	COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS	52
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	53
	REFERÊNCIAS	54

1 INTRODUÇÃO

A energia solar fotovoltaica teve origem no ano de 1839, quando o físico francês Alexandre Edmond Becquerel observou pela primeira vez o efeito fotovoltaico enquanto realizava experiências com eletrodos. Foi observado que havia uma diferença de potencial nas extremidades de uma estrutura semicondutora, quando se dava a incidência de luz sobre ela (CRESESB, 2006).

Impulsionadas pelas novas descobertas da microeletrônica, em 1956, foram construídas as primeiras células fotovoltaicas. Após seu surgimento, a energia solar foi vista como uma tecnologia futurista, cujo uso se restringiria exclusivamente aos cientistas e suas pesquisas, por possuir um custo muito alto. Acreditava-se que a energia solar não chegaria a ser utilizada de maneira geral; no entanto, ocorreram muitos avanços que foram responsáveis pela concretização dessa energia como uma maneira de produzir energia limpa (NASCIMENTO, 2004).

Nos últimos anos, as vantagens econômicas envolvendo a energia solar passaram a ter um peso considerável, além de benefícios ao meio ambiente. O mercado de energia proveniente do sol também sofreu grandes quedas no preço de equipamentos, o que resultou em maior acessibilidade na instalação de sistemas solares pela população. Os sistemas fotovoltaicos oferecem diversas vantagens, representando uma excelente alternativa para geração de energia em lugares isolados, que muitas vezes ainda utilizam geradores a diesel, um combustível altamente poluente, como fonte de energia ou, até mesmo, ainda vivem no escuro (PORTAL SOLAR, 2016).

Cerca de 10% da população do mundo ainda vive sem acesso à energia elétrica, o que corresponde a aproximadamente 840 milhões de pessoas, segundo divulgação do Banco Mundial em 2019. No Brasil, estima-se que cerca de 2 milhões de brasileiros ainda não têm acesso à energia, este valor é calculado a partir de dados obtidos pelas distribuidoras de energia. A maior parte dessa população se encontra em comunidades isoladas com restrição ou até sem nenhum acesso a serviços básicos, onde dificilmente a rede elétrica chegará (G1 ECONOMIA, 2019). Sabe-se que a extensão de redes de distribuição de energia elétrica para regiões isoladas e com baixo perfil de consumo de energia torna-se, muitas vezes, inviável para as concessionárias, devido ao elevado custo de implantação, manutenção e demora no retorno do investimento.

O atendimento energético dessas comunidades isoladas ainda é um desafio para as administrações governamentais. Embora o Brasil já tenha tido êxito com os programas de eletrificação, como o “Luz para todos”, ainda existem inúmeras localidades em que a oferta de energia elétrica não chega e, se chega, nem sempre a todos, devido à distância da rede ou até mesmo dispersão da comunidade (INCARNAÇÃO, 2012).

Visando a necessidade da melhoria das condições de vida da população, onde a energia elétrica é fundamental, seja no aspecto de conforto, aumento de produtividade ou até mesmo acesso a serviços de comunicação, o avanço da utilização da energia fotovoltaica contribui para o atendimento às populações das regiões isoladas. Isso torna o processo mais viável para as concessionárias de energia e uma alternativa menos poluente ao meio ambiente.

O presente trabalho busca fazer uma análise do atendimento de cargas isoladas/rurais, distantes das redes existentes, por sistemas fotovoltaicos com armazenamento de energia utilizando banco de baterias, buscando uma relação de custo benefício com a possível construção de rede. Para isso, será feita uma análise econômica a partir do software HOMER com base nos perfis de carga baseados nos Sistemas Individuais de Geração de Energia Elétrica com Fontes Intermitentes (SIGFIs).

1.1 MOTIVAÇÃO E JUSTIFICATIVA

A demanda de energia elétrica está associada não só ao desenvolvimento socioeconômico, mas também à melhoria significativa das condições de vida da população, onde a energia elétrica é fundamental, proporcionando maior conforto, aumento de produtividade e acesso a serviços básicos de comunicação.

O problema da falta de fornecimento de energia para comunidades isoladas, ou rurais mais afastadas, nem sempre é resolvido. Isso se deve à burocracia dos órgãos públicos tornarem o processo mais lento ou por desinteresse das distribuidoras em solucionar o problema, pois nem sempre a oferta de energia é um processo rentável economicamente.

O não fornecimento de energia elétrica nas regiões mais pobres e de difícil acesso constitui um problema a ser resolvido pela sociedade. Assim, a ampliação da capacidade de geração e distribuição de energia de um modo menos poluente, para

atender essa parcela da população ainda prejudicada, consiste na motivação do desenvolvimento desse projeto.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Este trabalho tem como objetivo analisar a simulação de atendimento de cargas residenciais isoladas, por meio de kits fotovoltaicos, utilizando armazenamento de energia por meio de um banco de baterias, comparando com o custo-benefício de uma possível construção de rede.

1.2.2 Objetivos específicos

Como objetivos específicos, tem-se:

- a) analisar o atendimento de cargas residenciais isoladas com baixo perfil de consumo, por meio de kits fotovoltaicos baseados nos Sistemas Individuais de Geração de Energia Elétrica com Fontes Intermitentes (SIGFIs), utilizando armazenamento de energia por meio de banco de baterias;
- b) propor uma alternativa simples de expansão da rede até o consumidor afastado dos centros de distribuição, comparando com o custo-benefício da instalação de um sistema de geração de energia fotovoltaico.

1.3 ORGANIZAÇÃO DOS CAPÍTULOS

O presente trabalho está dividido em 6 capítulos. No primeiro capítulo, é apresentada uma introdução e um breve histórico acerca do assunto estudado. Além disso, é apresentada uma pequena discussão quanto ao cenário atual dos sistemas fotovoltaicos e também quanto à necessidade de se igualar o fornecimento de energia no país.

O segundo capítulo corresponde à uma fundamentação teórica acerca dos sistemas de geração distribuída e o histórico da energia solar, além do funcionamento e composição dos módulos e dos sistemas fotovoltaicos.

No terceiro capítulo, apresenta-se o tipo de sistema estudado no tipo de atendimento em questão. Também, é feita uma descrição dos equipamentos utilizados

para atendimento das cargas selecionadas, bem como o detalhamento das suas informações construtivas e funcionais. Ademais, são demonstrados os perfis de carga a serem analisados e é realizada uma breve descrição do software utilizado para efetuar as simulações dos sistemas.

No quarto capítulo, são apresentados os dados de simulação dos sistemas estudados.

O quinto capítulo abrange os resultados das simulações para o cenário escolhido com as cargas analisadas.

No sexto e último capítulo, apresentam-se as considerações finais proporcionadas pelo desenvolvimento do trabalho.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

A geração distribuída, como o próprio nome diz, é a geração de energia feita em pontos diversos, através de sistemas geradores que ficam próximos ou até mesmo na própria unidade consumidora. O conceito envolve, ainda, equipamentos de medida, controle e comando que articulam a operação dos geradores e o eventual controle de cargas (ligamento/desligamento) para que estas se adaptem à oferta de energia. Essa modalidade difere diretamente da geração centralizada, onde as grandes usinas geradoras produzem a energia e a enviam aos consumidores através das linhas de transmissão e redes de distribuição, chegando até eles pelas distribuidoras locais (FONTES, 2018).

Desde 17 de abril de 2012, quando entrou em vigor a Resolução Normativa Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) nº 482/2012, o consumidor brasileiro pode gerar sua própria energia elétrica a partir de fonte renováveis ou cogeração qualificada e, inclusive, fornecer excedente para a rede de distribuição de sua localidade. Trata-se da micro e da minigeração distribuídas de energia elétrica. Essas inovações podem aliar economia financeira, consciência socioambiental e autosustentabilidade (ANEEL, 2012).

Através dessa resolução, a ANEEL também estabeleceu a diferenciação entre a micro e a minigeração distribuída, as quais, segundo Fontes (2018), ficaram estabelecidas da seguinte forma:

- a) microgeração: sistema gerador de energia elétrica através de fontes renováveis com potência instalada inferior ou igual a 75 kW;
- b) minigeração: sistema gerador de energia elétrica com potência instalada superior a 75 kW menor ou igual a 5 MW para fontes renováveis, como a solar.

A geração distribuída oferece grandes vantagens ao setor elétrico, visto que uma unidade de geração próxima à carga permite a diminuição das perdas associadas ao transporte de energia elétrica, reduz o carregamento das redes e promove o adiamento de investimentos em expansão de redes de distribuição pela concessionária (NARUTO, 2017).

2.2 ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

A energia solar fotovoltaica é obtida através da conversão direta da radiação solar em eletricidade, por meio do efeito fotovoltaico. Esse processo de conversão se dá por meio da célula fotovoltaica, que é um dispositivo fabricado com material semicondutor, ou seja, um material com características intermediárias entre condutor e isolante. O semicondutor mais utilizado em aplicações fotovoltaicas é o silício (BRAGA, 2008).

As células solares fotovoltaicas convertem diretamente a energia solar em eletricidade. O processo de geração não produz cinzas nem outros resíduos e, por não liberar calor residual, não altera o equilíbrio da biosfera, assim como não envolve queima de combustíveis, evitando o efeito estufa.

Os níveis de radiação solar em um plano horizontal na superfície terrestre variam com as estações do ano, devido à inclinação do eixo de rotação em relação ao plano da órbita da terra em torno do Sol. Também, variam com a região, devido principalmente às diferenças de latitude, altitudes e condições meteorológicas.

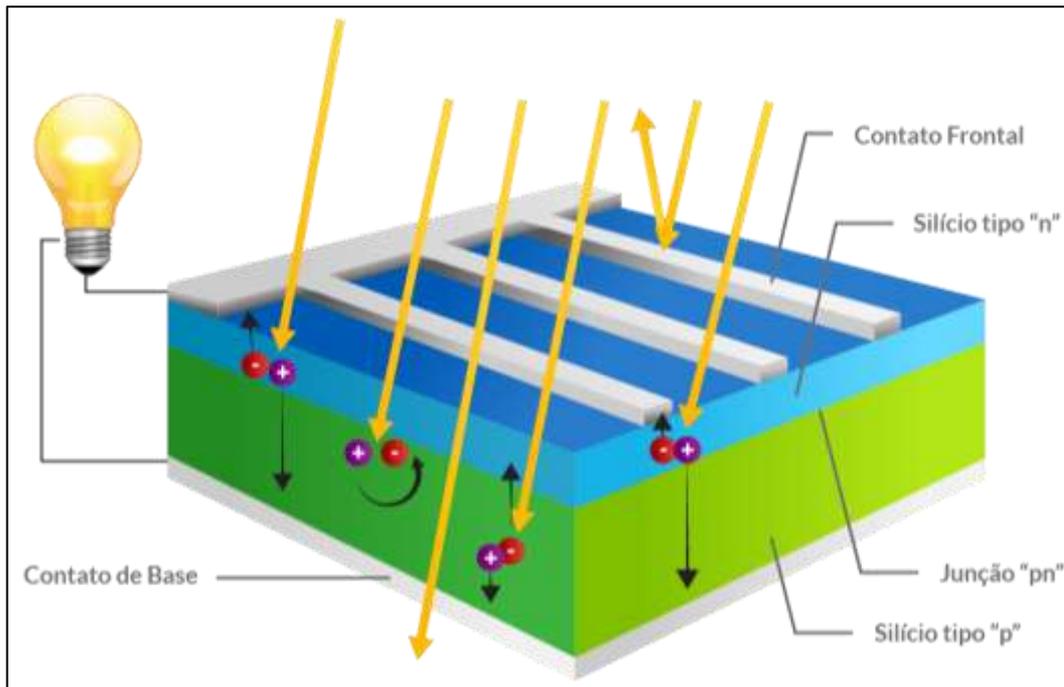
Sabendo que grande parte do território brasileiro se encontra próximo à linha do Equador, há uma pequena variância na duração da luz solar durante o dia nas diferentes regiões. Para maximizar o aproveitamento da irradiação solar, deve-se ajustar a posição do painel solar de acordo com a latitude de cada local e período do ano que se quer mais energia. É importante destacar, também, que, por menor que seja o índice de radiação da região, todo o território brasileiro apresenta um grande potencial de aproveitamento energético, tornando esse tipo de sistema utilizável em praticamente qualquer parte do país (GADO, 2015).

2.3 CÉLULAS FOTOVOLTAICAS

O elemento do sistema fotovoltaico que realmente faz a conversão da forma luminosa para a forma elétrica é o módulo (ou painel) fotovoltaico, e a sua menor unidade são as células fotovoltaicas. Uma célula fotovoltaica é responsável pela conversão da radiação solar em eletricidade. Como uma única célula não é suficiente para gerar potência maiores, são associadas várias células, que são encapsuladas formando um módulo fotovoltaico. O semicondutor mais usado na fabricação das células é o silício.

A célula solar clássica de silício cristalino é composta de duas camadas de silício contaminadas com diferentes impurezas. A camada orientada para o Sol, de maior espessura, é dopada com fósforo e, na camada inferior, de menor espessura, acrescenta-se boro (Figura 1) (BRAGA, 2008).

Figura 1 - Estrutura de uma célula fotovoltaica.



Fonte: Souza (2017a).

Existem três tipos básicos de células fotovoltaicas que diferem basicamente pelo seu método de construção, são elas: a de silício monocristalino, silício policristalino e a de silício amorfo, descritas a seguir.

2.3.1 Células de silício monocristalino

As células de silício monocristalino são células obtidas a partir de barras cilíndricas de silício cristalino produzidas em fornos especiais, mergulhadas em silício fundido. São células mais eficientes, possuem formato circular, contudo, são cortadas para deixá-las levemente quadradas e depois fatiadas em lâminas (chamadas de *waffers*) (Figura 2). A eficiência dos módulos produzidos com essas células fica em torno de 18% e a vida útil, considerando 80% da eficiência inicial, fica em torno de 25 anos (FREIRE, 2017; SOUZA, 2017a).

Figura 2 - Estrutura de uma célula fotovoltaica de Silício Monocristalino.

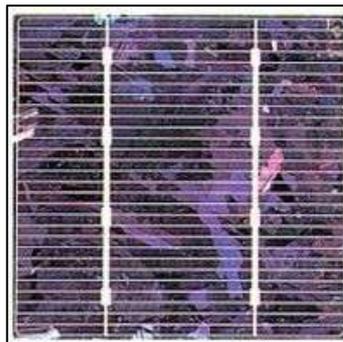


Fonte: Souza (2017a).

2.3.2 Células de silício policristalino

O silício purificado é fundido e moldado em forma de cubo, depois é resfriado lentamente para que solidifique, produzindo o silício policristalino. Esse processo resulta na formação de uma célula composta por mais de um cristal, e com uma eficiência de conversão inferior à do silício monocristalino, ficando em torno de 15%, tendo um custo menor e mesma expectativa de vida útil. Outra diferença está no formato, as células policristalinas tem formato retangular (Figura 3) (FREIRE, 2017; SOUZA, 2017a).

Figura 3 - Estrutura de uma célula fotovoltaica de Silício Policristalino.



Fonte: Souza (2017a).

2.3.3 Células de silício amorfo

As células de silício amorfo são normalmente produzidas aplicando diferentes camadas de material semiconductor em diferentes substratos, tais como plásticos ou vidro. Essas células são compostas de películas bastante finas (Figura 4). Mesmo com custo reduzido para a sua produção, o uso de silício amorfo apresenta duas desvantagens: a primeira desvantagem é a baixa eficiência de conversão, comparada

às células mono e policristalinas de silício, que fica em torno de 10%. A segunda desvantagem é que as células são afetadas por um processo de degradação logo nos primeiros meses de operação, reduzindo a sua eficiência ao longo de sua vida útil (REIS, 2017; SOLEN, 2019).

Figura 4 - Estrutura de uma célula fotovoltaica de Silício Película Fina.



Fonte: Energías Renovables (2014).

2.4 MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

Os principais fatores que influenciam na operação de um módulo são a intensidade da radiação solar e a temperatura de operação. A corrente que o módulo pode fornecer depende diretamente da intensidade de radiação solar que incide sobre as células. Como a intensidade da radiação solar muda a cada instante em função da rotação e translação da terra, a corrente gerada pelo módulo será máxima durante a máxima incidência de radiação solar. Com menores intensidades de radiação, como em dias nublados ou chuvosos, a corrente diminuirá proporcionalmente (PINHO; GALDINO, 2014).

Além disso, um módulo sujeito a uma sombra, causada por algum tipo de obstáculo, pode deixar de produzir energia. O efeito de sombreamento é prejudicial ao sistema fotovoltaico. Dessa forma, a localização dos módulos deve ser cuidadosamente escolhida.

A temperatura tem influência na tensão que o módulo fornece a seus terminais e, conseqüentemente, na potência fornecida. Em temperaturas muito baixas, as tensões são maiores que em temperaturas muito altas (FADIGAS, 2004).

Os módulos podem ser associados em série ou em paralelo, formando os chamados Arranjos Fotovoltaicos, de forma a se obter uma única saída de tensão e

corrente. Quando os módulos são conectados em série, a tensão de saída do conjunto corresponde à soma da tensão fornecida por cada um dos módulos, já a corrente é a mesma em todos os módulos. Quando ligados em paralelo, ligação mais comum em sistemas autônomos, a tensão de saída do conjunto de módulos é a mesma tensão fornecida por um módulo individual, porém a corrente fornecida pelo conjunto será a soma das correntes dos módulos do conjunto (PARMINONDI, 2018; VILLALVA; GAZOLI, 2014).

2.5 SISTEMA FOTOVOLTAICO

Sistemas fotovoltaicos não fazem uso de nenhum tipo de combustível, não possuem partes móveis e, portanto, exigem menor manutenção. Durante o funcionamento, não emitem nenhum tipo de gás poluente e quase não possuem ruídos.

Basicamente, o sistema fotovoltaico é composto pelos módulos mais uma série de equipamentos complementares, como inversores, controladores de carga e baterias. A necessidade desses componentes varia de acordo com a aplicação do sistema, onde equipamentos podem ser retirados ou mais equipamentos podem ser incluídos.

Quando uma carga necessita ser alimentada em corrente alternada, é colocado um inversor para a transformação da corrente contínua produzida pelos módulos em alternada. Além disso, um sistema fotovoltaico pode ou não conter armazenamento de energia (BLUESOL, 2016).

Os sistemas fotovoltaicos podem ser classificados em duas categorias principais: conectados a rede e isolados. Em ambos os casos, podem operar a partir da fonte fotovoltaica e também combinando uma ou mais fontes de energia, que são os chamados sistemas híbridos (PINHO; GALDINO, 2014).

Os sistemas fotovoltaicos conectados à rede (*on grid*) injetam energia nas redes de distribuição. O potencial gerado é enviado para a rede, que age como uma carga, absorvendo essa energia. Os sistemas *on grid* não utilizam sistemas de armazenamento e, por isso, são mais eficientes que os sistemas autônomos, além de, geralmente, serem mais baratos (SOUZA, 2017b).

O sistema fotovoltaico híbrido trabalha em conjunto com outro sistema de geração de energia elétrica, podendo ser um sistema com geração eólica, um gerador

a combustível ou até mesmo conectado à rede. Pode, ou não, possuir um sistema de armazenamento de energia, o qual geralmente tem autonomia de dois dias (PINHO; GALDINO, 2014).

Esses tipos de sistemas fotovoltaicos, com armazenamento de energia e também conectados à rede, são encontrados na Europa e nos EUA. No entanto, no Brasil, para casos de micro e minigeração, regulamentadas pela Resolução Normativa ANEEL nº 482/2012, não está previsto esse tipo de operação. Além disso, as concessionárias de energia não o aceitam, exigindo, inclusive, proteção para o desligamento da geração em casos de ilhamento (PINHO; GALDINO, 2014).

O sistema isolado ou sistema autônomo (em inglês *off grid*), tem como principal característica o seu “auto sustento” por meio das baterias. Esse tipo de sistema não tem contato com a rede elétrica da concessionária. Atualmente, a utilização dos sistemas fotovoltaicos *off grid* tem como objetivo levar energia elétrica a localidades isoladas que não são atendidas pela rede elétrica.

A energia produzida por sistemas *off grid* alimenta as cargas existentes de forma instantânea e a energia excedente produzida é armazenada em baterias para ser utilizada em momentos de pouca ou nenhuma incidência de sol, como os períodos noturnos, dias nublados ou chuvosos. Dessa forma, como as baterias são a fonte de energia reserva do sistema, deve ser feito um dimensionamento de baterias com espaço de armazenamento suficiente para suprir a demanda de energia da residência, sempre levando em consideração as condições climáticas locais (PINHO; GALDINO, 2014).

3 MODELAGEM DO SISTEMA EM ESTUDO

Os sistemas isolados foram regulamentados inicialmente pela RN ANEEL Nº 83/2004, a qual teve papel importante na inserção dos sistemas fotovoltaicos nos programas de eletrificação rural do país. Já em 2012, devido o potencial uso das diferentes configurações usando fontes intermitentes e à demanda por atendimentos isolados, a ANEEL publicou a Resolução nº 493/2012, que substitui a anterior e estabelece os procedimentos e as condições de fornecimento por meio de Microssistema Isolado de Geração e Distribuição de Energia Elétrica (MIGDI), além do Sistema Individual de Geração de Energia Elétrica com Fontes Intermitentes (SIGFI), o qual já havia sido regulamentado pela resolução anterior (PINHO; GALDINO, 2014).

Um sistema fotovoltaico autônomo é composto por um conjunto de módulos fotovoltaicos, um controlador de carga, uma bateria e um inversor (Figura 5). Os módulos fotovoltaicos produzem corrente contínua, sendo necessário converter essa corrente em corrente alternada para alimentar lâmpadas, aparelhos eletrodomésticos, computadores ou qualquer outro equipamento que normalmente é alimentado pelas redes elétricas em corrente alternada, para isso usa-se o inversor. Para fazer o armazenamento de energia, é necessário o uso de um banco de baterias, sempre em conjunto com um controlador de carga (VILLALVA; GAZOLI, 2014).

Figura 5 - Componentes de um sistema fotovoltaico autônomo.



Fonte: Matheus (2015).

3.1 BATERIAS

Nos sistemas autônomos, a geração de energia elétrica e o consumo nem sempre coincidem, devido às condições climáticas e radiação solar ao longo dos dias. O uso de dispositivos de armazenamento de energia se faz necessário para atender a demanda nesses períodos em que a geração é nula ou insuficiente para suprir toda a carga, como em dias chuvosos, nublados ou durante a noite (PINHO; GALDINO, 2014).

Um banco de baterias é constituído por uma quantidade calculada de elementos conectados em série ou paralelo, que fornecerão a potência demandada pelas cargas, durante o período de autonomia em que devem funcionar sem receber recarga de energia do arranjo fotovoltaico nos períodos em que não há insolação (BLUESOL, 2016).

As baterias para uso fotovoltaico costumam ser de chumbo-ácido ou de níquel-cádmio. Baterias de níquel-cádmio suportam descargas maiores e tem maior vida útil, mas seu alto custo diminui sua disponibilidade e as tornam viáveis apenas para sistemas específicos que necessitam de alta confiabilidade. É a relação custo-benefício que faz com que as baterias de chumbo ácido sejam, na maioria das vezes, as escolhidas para sistemas fotovoltaicos isolados.

Os módulos fotovoltaicos sofrem uma grande variação de tensão, de acordo com a radiação recebida. A conexão das cargas diretamente aos módulos poderia expô-los a tensões muito altas ou muito baixas para o seu funcionamento adequado. As baterias possuem uma faixa de tensão mais estreita que os módulos, garantindo uma faixa de operação mais uniforme para as cargas (BLUESOL, 2016).

Para carregar baterias de chumbo-ácido, que atuam com tensões próximas a 12 V, é necessária uma tensão mínima de aproximadamente 14 V. Assim, os módulos devem produzir tensões em torno dos 16 V, já que ocorrem perdas nos cabos de proteção e também devido ao efeito da temperatura.

Desse modo, a escolha entre a adoção de módulos de 36, 60, 72 ou mais células deve ser avaliada, considerando também o aspecto econômico e levando em conta o tipo de controlador de carga (PWM ou MPPT) que irá operar em conjunto com o arranjo fotovoltaico (ELETROBRAS, 2017). O grande inconveniente das baterias é a sua vida útil curta, entre 2 e 6 anos (até 15 anos para baterias fotovoltaicas especiais). Os motivos da vida útil reduzida são os processos de envelhecimento

sofridos pelos elementos, como a corrosão, sulfatação, sedimentação e etc. Esses processos, reversíveis ou não, podem se influenciar ou intensificar mutuamente (BLUESOL, 2016).

3.2 CONTROLADORES DE CARGA

Os sistemas fotovoltaicos autônomos, obrigatoriamente, necessitam de baterias, portanto, há necessidade de um controlador de carga, onde sua principal função é fazer a correta conexão entre o painel fotovoltaico e a bateria, evitando que a bateria seja sobrecarregada ou descarregada excessivamente (MATHEUS, 2015). O controlador de carga aumenta o rendimento do sistema fotovoltaico e a vida útil (quantidade de ciclos) das baterias. Em sistemas autônomos, a tensão do arranjo fotovoltaico deve ser compatível com a tensão nominal do banco de baterias. Um controlador de carga mede a tensão das baterias e as protege de sobrecargas indevidas, desconectando o arranjo fotovoltaico quando sua tensão ultrapassa a tensão limite para recarga, aplicando um curto-circuito no arranjo através de um controlador *shunt*, ou ajustando a tensão do arranjo, como fazem os controladores com MPPT (BLUESOL, 2016).

Quando o nível de radiação solar é baixo, o nível de tensão do arranjo será inferior ao das baterias, fazendo com que elas “descarreguem” nos módulos. Para evitar isso, os controladores utilizam diodos de bloqueio integrados (BLUESOL, 2016).

Alguns controladores podem controlar o desempenho do sistema (corrente e tensão de carregamento da bateria ou da carga) e acionam alarmes quando ocorre algum problema. Para melhorar o desempenho do controlador de carga, este pode ainda ser composto de um sensor de temperatura, com a função de compensar o efeito da variação da temperatura nos parâmetros das baterias (PINHO; GALDINO, 2014).

Os controladores suportam correntes limitadas, tanto de entrada (do arranjo fotovoltaico), quanto de saída (das cargas CC). Possuem fusíveis de proteção para os componentes sensíveis contra o excesso de corrente e, geralmente, possuem o mesmo limite tanto na entrada quanto na saída. Para arranjos fotovoltaicos maiores, podem ser utilizados vários controladores em paralelo ou os painéis são divididos em arranjos menores ligados ao mesmo banco de baterias. Essa última configuração dá

mais segurança e flexibilidade ao sistema, dado que, no caso de falha de um dos painéis, os demais continuam fornecendo potencial (BLUESOL, 2016).

A especificação de um controlador de carga deve, primeiramente, estar condizente com o tipo de bateria a ser utilizada e o regime de operação do sistema. Os controladores modernos utilizam uma tecnologia chamada PWM (*Pulse With Modulation*) para assegurar que a bateria possa ser carregada até atingir sua capacidade máxima. A reposição dos primeiros 70% a 80% da bateria são facilmente obtidos, porém, os 20% ou 30% finais requerem circuitos integrados mais complexos (GADO, 2015).

3.3 INVERSORES

O inversor é um dispositivo eletrônico e outro equipamento necessário para o funcionamento do sistema, convertendo corrente contínua em corrente alternada. Esse dispositivo geralmente incorpora um seguidor de ponto de máxima potência necessário para otimização da potência final produzida. O inversor está presente nos sistemas fotovoltaicos para alimentar equipamentos em corrente alternada, onde a maior parte dos equipamentos eletroeletrônicos é construída para trabalhar com rede elétrica de 127 Vac ou 220 Vac a uma frequência de 60 Hz (MATHEUS, 2015).

Um inversor é um dispositivo eletrônico que fornece energia elétrica em corrente alternada (CA) a partir de uma fonte de energia elétrica em corrente contínua (CC). A energia CC pode ser proveniente, por exemplo, de baterias, células a combustível ou módulos fotovoltaicos. A tensão CA de saída deve ter amplitude, frequência e conteúdo harmônico adequados às cargas a serem alimentadas (PINHO; GALDINO, 2014).

As características desejáveis para a escolha de um bom inversor para um sistema fotovoltaico autônomo são:

- a) a boa eficiência na conversão elétrica - é recomendado que o inversor tenha eficiência acima de 80%. A eficiência máxima de um inversor acontece geralmente quando este está fornecendo entre 50% e 70% de sua capacidade nominal.
- b) a capacidade alta de sobrecarga, onde um inversor deve ser capaz de fornecer uma potência instantânea bem maior que a potência nominal, o que

permitirá a partida de dispositivos elétricos que consumam alta corrente de partida.

- c) a tolerância para as flutuações de tensão nas baterias, dado que, durante o processo de carga e descarga, a tensão varia nas baterias, podendo causar danos a dispositivos mais sensíveis.

Sistemas fotovoltaicos autônomos residenciais podem se beneficiar do uso de vários inversores, dividindo as cargas de acordo com o perfil de uso e simultaneidade, por exemplo, poderia todo o circuito do sistema de iluminação estar concentrado em um único inversor de menor capacidade, assim como os demais equipamentos eletrônicos da casa poderiam estar ligados em diferentes inversores especificamente calculados para atender suas necessidades. Tal configuração pode tornar o sistema mais confiável, além de mais barato em alguns casos (BLUESOL, 2016).

3.4 SISTEMAS ISOLADOS PARA FORNECIMENTO DE ENERGIA

O acesso à energia facilita a integração aos serviços de saúde, educação, abastecimento de água, saneamento básico e programas sociais do Governo Federal. O principal programa de eletrificação rural do governo brasileiro, o programa “Luz para Todos”, além de levar a energia à população isolada, tem como objetivo oferecer soluções para utilizá-las no desenvolvimento social e econômico em comunidades de baixa renda. Tais fatores, além de contribuírem para uma melhor qualidade de vida do beneficiário, fornecendo o acesso a aparelhos eletrodomésticos e aparelhos elétricos que geram até mesmo uma oportunidade de aumento em sua renda, também favorece a permanência das famílias no campo (GADO, 2015).

O atendimento de sistemas isolados, conforme o Manual para Atendimento às Regiões Remotas dos Sistemas Isolados, deverá ser feito por meio de Microssistema 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 RN nº 493 (ANEEL, 2012).

Sistemas MIGDI são microssistemas isolados de geração e distribuição de energia elétrica com potência instalada total de geração de até 100 kW. Já os sistemas SIGFI são sistemas de geração de energia elétrica, utilizados para o atendimento de uma única unidade consumidora, cujo fornecimento se dá, exclusivamente, por meio de fonte de energia intermitente (ELETROBRAS, 2017).

As unidades consumidoras atendidas por meio de MIGDI ou SIGFI devem ser enquadradas conforme as disponibilidades mensais de energia explicitadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Disponibilidades mensais de energia.

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

Fonte: ANEEL (2012).

3.5 PERFIS DE CARGAS ANALISADAS

Com base nos padrões determinados pela Resolução Normativa nº 493, de 5 de junho de 2012, foram determinados 2 perfis de carga a serem analisados, sendo eles o de menor (13 kWh/mês UC) o de maior (80 kWh/mês UC) disponibilidade mensal de energia por unidade consumidora (ANEEL, 2012). A partir dessas classes, foram propostos conjuntos de eletrodomésticos típicos residenciais (Tabelas 2 e 3), com suas respectivas horas de utilização diárias e potências específicas, que somadas consomem o padrão definido na normativa.

Tabela 2 - Perfil 1 - SIGFI13.

Equipamento	Quant.	Pot. Instalada (kW)	Util. Diária (h)	Cons. Diário (kWh)	Cons. Mensal (kWh)
Lâmpada incandescente	3	0,06	3	0,18	5,4
Aparelho de rádio pequeno	1	0,08	1	0,08	2,4
TV 20"	1	0,06	2	0,12	3,6
Parabólica	1	0,025	2	0,05	1,5
Total				0,43	12,9

Fonte: ELETROBRAS (2020).

Tabela 3 - Perfil 2 - SIGFI80.

Equipamento	Quant.	Pot. Instalada (kW)	Util. Diária (h)	Cons. Diário (kWh)	Cons. Mensal (kWh)
Lâmpada incandescente	5	0,06	4	0,24	7,2
Aparelho de rádio pequeno	1	0,08	2	0,16	4,8
TV 20"	1	0,09	2	0,18	5,4

(Continua)

					(Conclusão)	
Equipamento	Quant.	Pot. Instalada (kW)	Util. Diária (h)	Cons. Diário (kWh)	Cons. Mensal (kWh)	
Parabólica	1	0,025	2	0,05	1,5	
Chuveiro	1	3,5	0,25	0,875	26,25	
Ventilador	1	0,065	1	0,065	1,95	
Geladeira	1	0,09	10	0,9	27	
Torradeira	1	0,8	0,2	0,16	4,8	
Total				2,63	78,9	

Fonte: ELETROBRAS (2020).

Os dados de potência de cada equipamento foram definidos com base na tabela de consumo de energia disponibilizada pela Eletrobras. Para abastecer essas cargas, foram utilizados kits selecionados considerando a potência instalada na residência e a energia disponibilizada pelo sistema. O kit correspondente a cada perfil e suas configurações serão descritas na seção seguinte.

3.6 KITS DE PV E BATERIAS PARA ABASTECIMENTO DAS CARGAS

Todas as informações sobre os kits de gerador fotovoltaico, para abastecimento das cargas analisadas e também as informações dos inversores, que não compunham o kit, foram retiradas do site da empresa Neosolar.

3.6.1 Kit para atendimento mensal de 13 kWh/mês

O primeiro kit gerador fotovoltaico apresentado tem capacidade de gerar 488 Wh/dia ou 14,6 kWh/mês, considerando 5 horas de sol por dia, além de suportar um consumo de carga de até 3 dias sem sol. Este kit contém:

- a) 1 Painel Solar Fotovoltaico 150W - Resun RS6E-150P;
- b) 1 Controlador de Carga Epever LS1024E de 10A;
- c) 1 Bateria Estacionária Heliar Freedom DF2500 de 150 Ah;
- d) 1 Inversor Unitron iVolt de 400W.

O Painel Solar de 150W da marca Resun possui 36 células de silício policristalino e pode gerar até 506Wh/dia, com garantia linear de produção de 25 anos.

Os painéis solares nessa faixa de potência são largamente utilizados para diversas aplicações *off grid* em locais remotos de difícil acesso (Figura 6). Seu tamanho facilita o transporte e manuseio na hora da instalação, tornando esse painel

um dos mais desejados para sistemas de energia solar com bateria (*off grid*). O custo desse painel é de **R\$449,00** (NEO SOLAR, 2020g).

Figura 6 - Painel Solar Fotovoltaico 150W.



Fonte: Neo Solar (2020g).

O controlador de carga PWM 10A Landstar LS1024E da marca Epever é bastante utilizado em sistemas de energia solar fotovoltaica de pequeno porte (Figura 7). Ele é capaz de aproveitar a energia captada pelo painel fotovoltaico e armazená-la na bateria para, posteriormente, alimentar os equipamentos elétricos da residência. É capaz de trabalhar tanto em sistemas 12Vcc como 24Vcc, com reconhecimento automático da tensão do sistema. O valor do controlador de carga é de **R\$109,00** (NEO SOLAR, 2020c).

Figura 7 - Controlador de carga Epever.



Fonte: Neo Solar (2020c).

A Bateria Estacionária Heliar Freedom DF2500 (150 Ah) possui capacidade 150Ah em 20h (Figura 8). Sua vida útil projetada de 4 anos, em uma temperatura de 25°C e descarga de 20%. O custo dessa bateria é de **R\$1249,00** (NEO SOLAR, 2020a).

Figura 8 - Bateria Freedom 150 Ah.



Fonte: Neo Solar (2020a).

Além disso, para alimentar equipamentos em corrente alternada, como são a maioria dos eletrodomésticos, é necessário o uso de um Inversor Solar (Figura 9). Eles são o cérebro do sistema e são responsáveis por transformar os 12/24/48 V de corrente contínua (CC) das baterias em 110 ou 220 V de corrente alternada (AC), ou outra tensão desejada (NEO SOLAR, 2020f).

Figura 9 - Inversor 400W.



Fonte: Neo Solar (2020f).

O Inversor Unitron iVolt de 400W e 60Hz geram 220 V a partir de baterias de 12 V, possibilitando a alimentação da maioria dos aparelhos eletrodomésticos residenciais alimentados pela rede elétrica. Seu valor é **R\$619,00** (NEO SOLAR, 2020f).

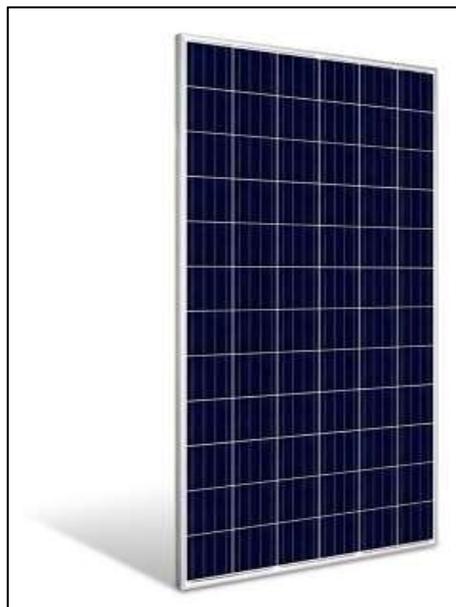
3.6.2 Kit para atendimento mensal garantido de 80 kWh/mês

O segundo kit gerador fotovoltaico apresentado tem capacidade de gerar 3.119 Wh/dia ou 93,6 kWh/mês, considerando 5 horas de sol por dia, além de suportar um consumo de carga de até 3 dias sem sol. Esse kit contém:

- a) 3 Painéis Solares Policristalino OSDA Solar de 330W;
- b) 1 Controlador de Carga Epever LS3024EU de 30A;
- c) 4 Baterias Estacionária Heliar Freedom de 220Ah;
- d) 1 Inversor Senoidal Epever IPower IP1500-12 - 1500W 12/220V.

O Painel Solar de 330W da marca OSDA possui 72 células de silício policristalino e pode gerar até 1113 Wh/dia (Figura 10). Possui alta eficiência (em torno de 16%) e bom custo-benefício. Os painéis solares nessa faixa de potência geram mais energia e podem economizar dinheiro e espaço na instalação, se comparados aos modelos com menor quantidade de células. Eles são amplamente utilizados em sistemas de energia solar conectado a rede (*on grid*), além de também serem usados em sistemas isolados (*off grid*) acompanhados de um controlador de carga adequado. Devido ao seu tamanho, necessitam de maiores cuidados no transporte e instalação. O valor de cada painel é de **R\$719,00** (NEO SOLAR, 2020h).

Figura 10 - Painel OSD 330W.



Fonte: Neo Solar (2020h).

O controlador de carga PWM de 30A da marca Epever com tensão de operação de 12/24V é simples e fácil de instalar, tem excelente custo-benefício, além de dispor de sistema de LED que indica os status das baterias, assegurando o monitoramento da capacidade de carga (Figura 11). O controlador Landstar LS3024EU opera em até 30 amperes de corrente e trabalha tanto em 12Vcc quanto 24Vcc, sendo ideal para sistemas fotovoltaicos *off grid* com bateria. O valor do controlador de carga é de **R\$299,00** (NEO SOLAR, 2020d).

Figura 11 - Controlador de carga Epever 30A.



Fonte: Neo Solar (2020d).

A Bateria Estacionária Heliar Freedom DF4100 possui capacidade de 220Ah em 20h (C20) (Figura 12). A linha de baterias estacionárias Heliar Freedom possui vida útil projetada de 4 anos, a uma temperatura de 25° e descarga de 20%. O custo de cada bateria é de **R\$1429,00** (NEO SOLAR, 2020b).

Figura 12 - Bateria Freedom 220Ah.



Fonte: Neo Solar (2020b).

Além disso, para alimentar os equipamentos em corrente alternada, é necessário o uso de um Inversor Solar (Figura 13), responsável por transformar os 12/24/48 V de corrente contínua (CC) das baterias em 110 ou 220 V de corrente alternada (AC).

Figura 13 - Inversor 1500W.



Fonte: Neo Solar (2020e).

O Inversor Senoidal 1500W 12/220V Ipower IP1500-12 da marca Epever é um equipamento de design industrial com isolamento nas entradas e saídas para evitar choques elétricos. Ele possui um forte sistema de proteção, evitando danos contra tensão baixa e tensão alta, e conta com 93% de eficiência, garantindo menores perdas para o sistema fotovoltaico *off-grid*. O Inversor Off Grid Ipower IP1500-12 da Epever trabalha com tensão de entrada 12Vcc e saída de 220/230Vca, fornecendo 1200W de potência contínua e 2400W de potência de surto. O valor desse inversor é de **R\$2.500,00** (NEO SOLAR, 2020e).

3.7 SOFTWARE HOMER

O HOMER (*Micropower Optimization Model*) é um programa de computador desenvolvido pela empresa *U.S. National Renewable Energy Laboratory* (NREL) para ajudar na análise de sistemas de geração distribuída (microgeração) e facilitar a comparação de tecnologias de geração de energia através de variadas aplicações (de geração). O HOMER trata de modelos compostos que calculam o projeto com o seu custo de ciclo de vida (Valor presente líquido - VPL), que é o custo total de instalação e operação do sistema ao longo do seu tempo de vida. HOMER permite que o

modelador possa comparar muitas opções de diferentes projetos com base em seus métodos técnicos econômicos (HOMER ENERGY, 2020).

O software Homer é bastante utilizado para implementar e analisar sistemas de geração com diferentes elementos, como turbinas eólicas, painéis fotovoltaicos, geradores hidráulicos, baterias, inversores, dentre outros. O programa possibilita que tanto sistemas conectados à rede elétrica, quanto sistemas que operam isoladamente sejam simulados. O fluxograma da Figura 14 a seguir mostra as etapas de funcionamento do Homer.

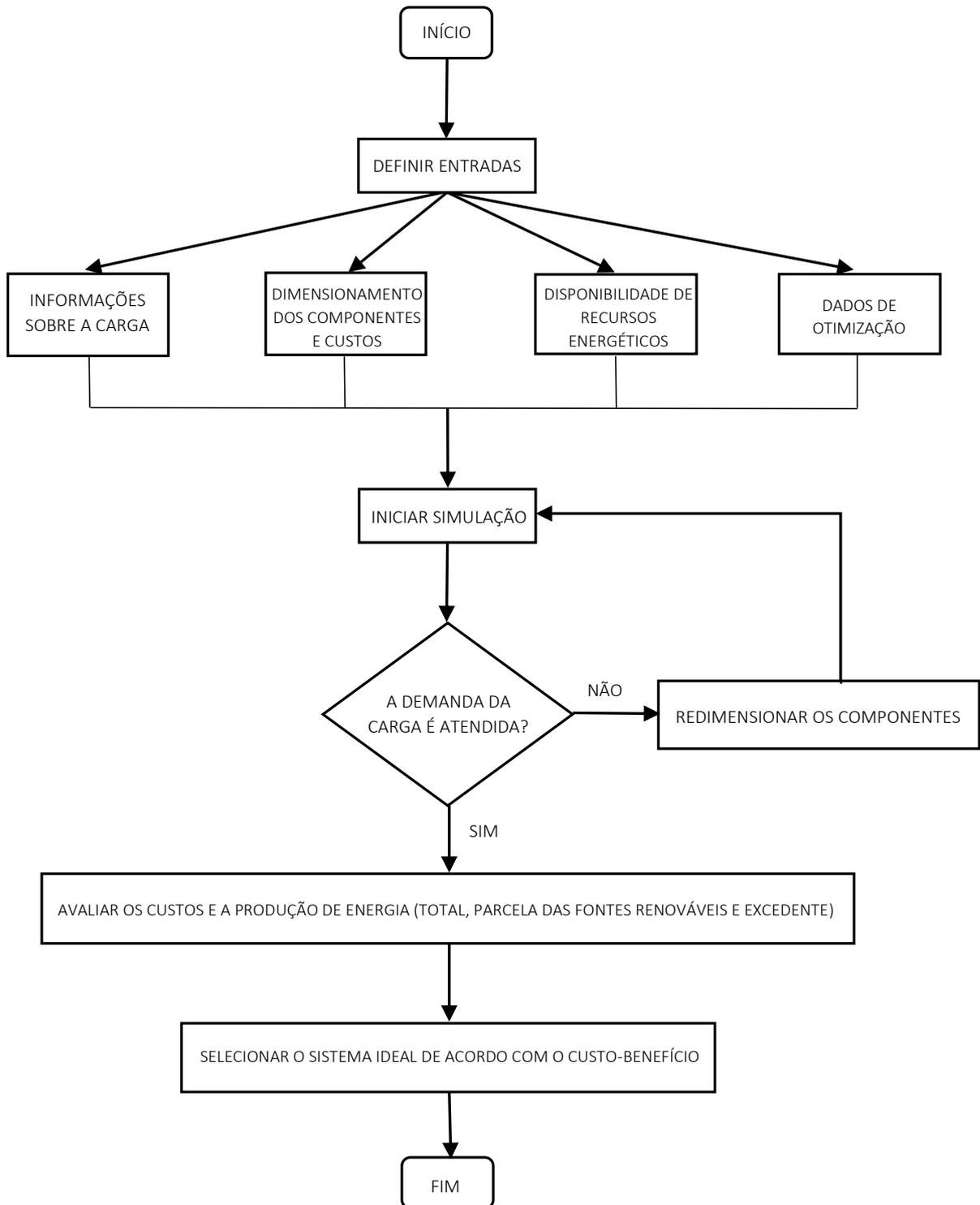
Inicialmente, definem-se algumas variáveis de entrada, como informações sobre a carga, dimensionamento dos componentes e seus respectivos custos, disponibilidade dos recursos energéticos e dados utilizados na otimização do sistema. O Homer usa essas entradas para simular diferentes configurações dos sistemas, podendo alterar, também, a combinação de componentes, sendo que os modelos obtidos são relacionados conforme o valor presente líquido.

Posteriormente, realiza-se a simulação a fim de verificar se a demanda necessária para atender à carga é atingida. Caso essa condição seja satisfeita, os custos e produção de energia são avaliados, e o sistema que possui melhor custo-benefício é escolhido. Caso contrário, os componentes utilizados são redimensionados e inicia-se novamente o processo de simulação (MELO; NOBREGA, 2017).

O Homer possui descrições de modelos simplificados de sistemas e realiza cálculos em base de tempo para centenas de configurações, apresentando-os de acordo com o custo, além de permitir a otimização de parâmetros técnicos específicos, bem como resultados detalhados de cada configuração. Entre os resultados, o Homer apresenta gráficos de estado de carga das baterias, tensão, energia produzida e consumida, etc. ao longo do tempo de simulação que é feita com base anual (PINHO; GALDINO, 2014).

Como mencionado anteriormente, o Homer foi o software escolhido para simular o sistema proposto no presente trabalho, considerando os perfis de cargas descritos, tendo como cenário a cidade de Santa Maria - Rio Grande do Sul.

Figura 14 - Fluxograma de funcionamento do Homer.



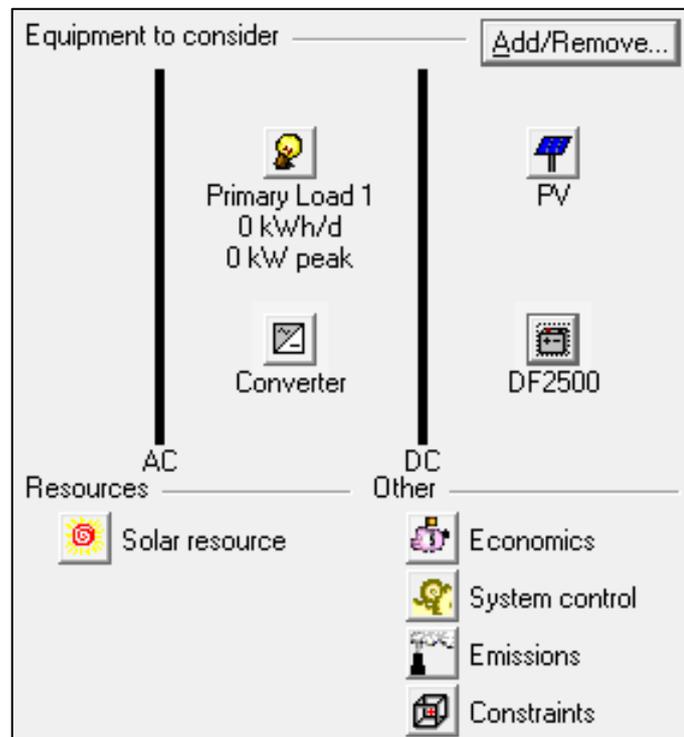
Fonte: Melo e Nobrega (2017, p. 10).

4 MODELAGEM E ANÁLISE NO SOFTWARE HOMER

Primeiramente, foi feita a seleção dos elementos a serem utilizados na simulação, adicionando as especificações dos equipamentos e recursos disponíveis. Esse ajuste é feito diretamente nas configurações gerais de cada elemento. A Figura 15 mostra a tela de configuração inicial do sistema a ser simulado. Esse sistema não tem ligação à rede elétrica e consiste em uma matriz fotovoltaica de potência que varia conforme o perfil de carga a ser estudado. Nota-se que o Homer não permite a colocação simultânea do inversor e controlador de carga, portanto, esse último não foi considerado nos equipamentos, mas seu custo foi somado ao custo do inversor a fim de aproximar os resultados do custo real do sistema.

Nos subcapítulos seguintes serão descritas as configurações de cada um dos equipamentos adicionados em cada item para a simulação.

Figura 15 - Configuração inicial do Homer.



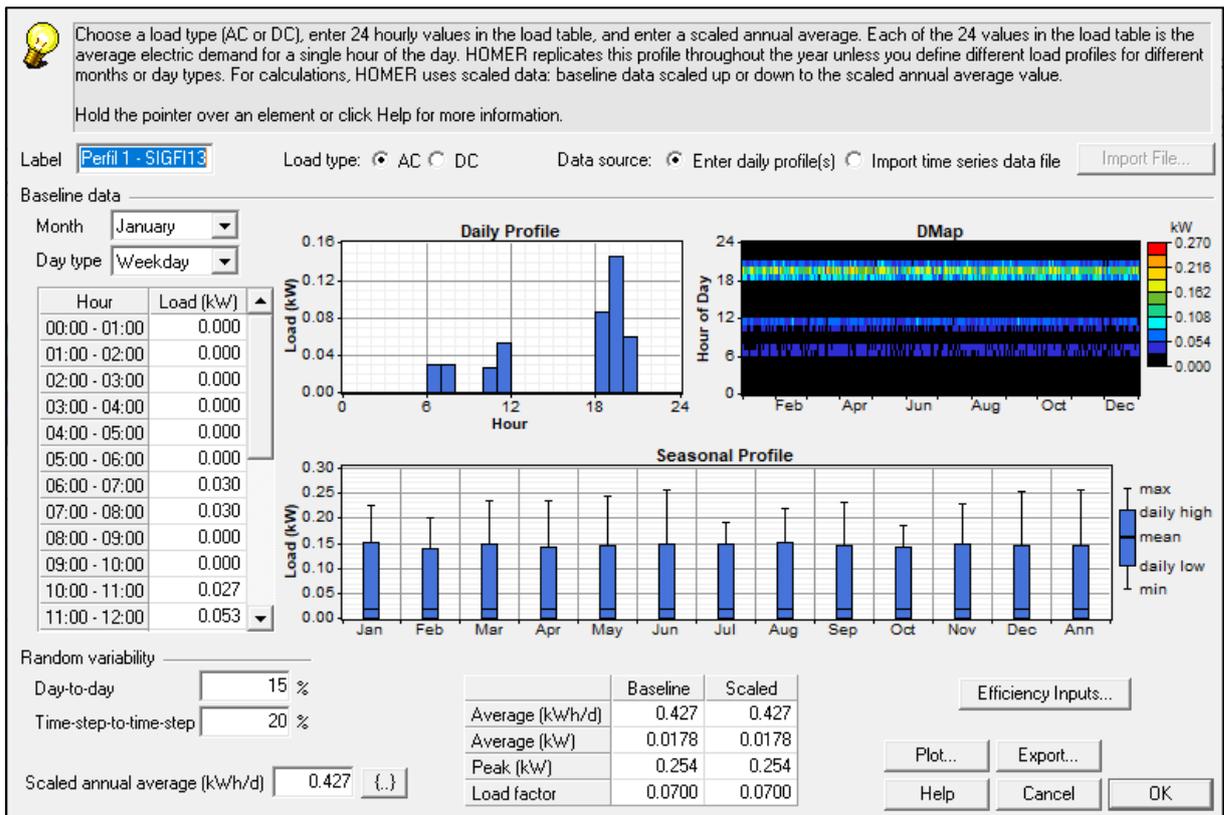
Fonte: A autora (2020).

4.1 PERFIS DE CARGA (*PRIMARY LOAD*)

A partir das potências instaladas determinadas anteriormente, as quais tiveram como base os padrões de atendimento SIGFI, foram realizadas as distribuições dos

consumos ao longo dos dias tendo como referência o formato da curva de carga diária residencial regional, onde o pico de consumo ocorre a noite, entre 18h e 21h. Como os perfis apresentam cargas relativamente baixas, foram utilizados os mesmos dados diários para todos os dias da semana e meses do ano. A Figura 16 refere-se ao perfil de carga com disponibilidade mensal de 13kWh - SIGFI 13.

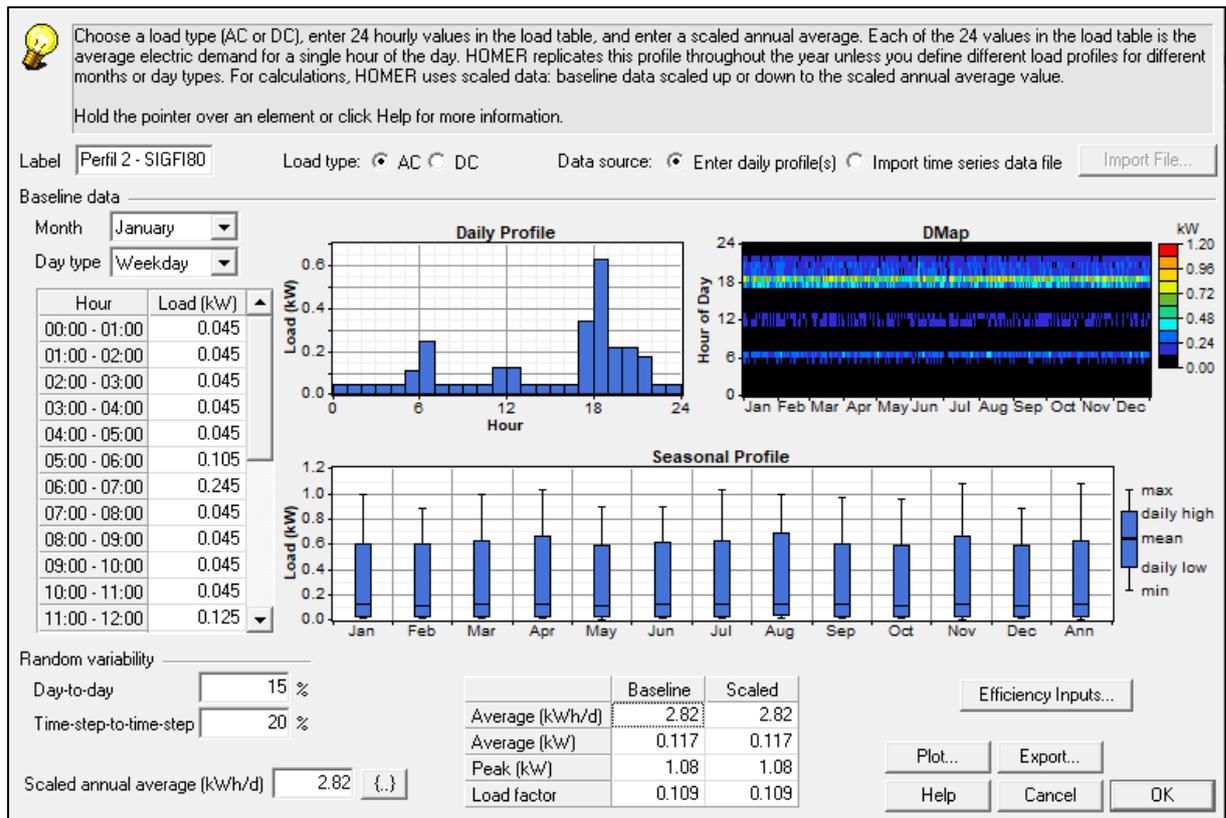
Figura 16 - Perfil 1 - 13 kW/mês.



Fonte: A autora (2020).

A Figura 17 refere-se ao perfil de carga com disponibilidade mensal de 80kWh - SIGFI 80.

Figura 17 - Perfil 1 - 80 kW/mês.



Fonte: A autora (2020).

4.2 PAINÉIS FOTOVOLTAICOS (PV)

Na janela referente aos painéis fotovoltaicos, os parâmetros necessários para a simulação são a potência nominal do painel, seu custo unitário, custo reposição e custo de manutenção. Os custos de reposição e manutenção foram desprezados, visto que o tipo de sistema apresenta baixa manutenção.

O tipo de corrente, gerada pelo painel, que foi selecionada, foi a corrente contínua. O tempo de vida estimado para os painéis foi de 25 anos de funcionamento, com 80% de desgaste. Além disso, deve-se considerar o efeito de temperatura nas simulações, adicionando os coeficientes de temperatura do painel e grau de eficiência do mesmo; os dados são retirados do *datasheet* do equipamento. Os demais fatores são preenchidos automaticamente pelo software baseado nos recursos naturais inseridos.

São incluídas também variações da potência unitária do painel, obedecendo a multiplicidade da potência nominal do equipamento, para serem consideradas na simulação, a fim de que o software possa calcular o número de painéis necessários

para atender à carga inserida. A Figura 18 refere-se aos parâmetros inseridos do painel correspondente à carga de disponibilidade mensal de 13 kWh - SIGFI13.

Figura 18 - PV perfil 1 - 13 kW/mês.

Enter at least one size and capital cost value in the Costs table. Include all costs associated with the PV (photovoltaic) system, including modules, mounting hardware, and installation. As it searches for the optimal system, HOMER considers each PV array capacity in the Sizes to Consider table.

Note that by default, HOMER sets the slope value equal to the latitude from the Solar Resource Inputs window.

Hold the pointer over an element or click Help for more information.

Costs

Size (kW)	Capital (\$)	Replacement (\$)	O&M (\$/yr)
0.150	449	449	0

{.} {.} {.}

Sizes to consider

Size (kW)
0.000
0.150
0.300
0.450
0.600

Cost Curve

Properties

Output current AC DC

Lifetime (years) {.}

Derating factor (%) {.}

Slope (degrees) {.}

Azimuth (degrees W of S) {.}

Ground reflectance (%) {.}

Advanced

Tracking system ▾

Consider effect of temperature

Temperature coeff. of power (%/°C) {.}

Nominal operating cell temp. (°C) {.}

Efficiency at std. test conditions (%) {.}

Help Cancel OK

Fonte: A autora (2020).

Já a Figura 19 refere-se aos parâmetros inseridos do painel correspondente à carga de disponibilidade mensal de 80 kWh - SIGFI180.

Figura 19 - PV perfil 2 - 80 kW/mês.

Enter at least one size and capital cost value in the Costs table. Include all costs associated with the PV (photovoltaic) system, including modules, mounting hardware, and installation. As it searches for the optimal system, HOMER considers each PV array capacity in the Sizes to Consider table.

Note that by default, HOMER sets the slope value equal to the latitude from the Solar Resource Inputs window.

Hold the pointer over an element or click Help for more information.

Costs			
Size (kW)	Capital (\$)	Replacement (\$)	O&M (\$/yr)
0.330	719	719	0

(.) (.) (.)

Sizes to consider	
Size (kW)	
0.330	
0.660	
0.990	
1.320	
1.650	
1.980	

Cost Curve

Cost (\$)

Size (kW)

— Capital — Replacement

Properties

Output current AC DC

Lifetime (years) (.)

Derating factor (%) (.)

Slope (degrees) (.)

Azimuth (degrees W of S) (.)

Ground reflectance (%) (.)

Advanced

Tracking system

Consider effect of temperature

Temperature coeff. of power (%/°C) (.)

Nominal operating cell temp. (°C) (.)

Efficiency at std. test conditions (%) (.)

Help Cancel OK

Fonte: A autora (2020).

4.3 CONVERSOR CC-CA (CONVERTER)

Assim como nos painéis, os parâmetros inseridos nas configurações do conversor CC-CA são a potência nominal, o custo unitário, custo de manutenção e de reposição. Como a potência do equipamento é capaz de suprir o pico das cargas, não se faz necessário incluir os múltiplos de potência do equipamento. Além disso, o tempo de vida e eficiência são adicionados, os dados são retirados dos *datasheets* dos equipamentos.

Como o Homer não permite a adição do Controlador de Carga na simulação, o custo deste é adicionado aos custos dos inversores, a fim de aproximar o resultado da simulação ao custo real do sistema. A Figura 20 refere-se aos parâmetros inversor utilizados para atender à carga de disponibilidade mensal de 13 kWh.

Figura 20 - Inversor CC/CA perfil 1 - 813 kW/mês.

 A converter is required for systems in which DC components serve an AC load or vice-versa. A converter can be an inverter (DC to AC), rectifier (AC to DC), or both.

Enter at least one size and capital cost value in the Costs table. Include all costs associated with the converter, such as hardware and labor. As it searches for the optimal system, HOMER considers each converter capacity in the Sizes to Consider table. Note that all references to converter size or capacity refer to inverter capacity.

Hold the pointer over an element or click Help for more information.

Costs

Size (kW)	Capital (\$)	Replacement (\$)	O&M (\$/yr)
0.400	728	728	0
(.)	(.)	(.)	(.)

Sizes to consider

Size (kW)
0.000
0.400

Inverter inputs

Lifetime (years) (.)

Efficiency (%) (.)

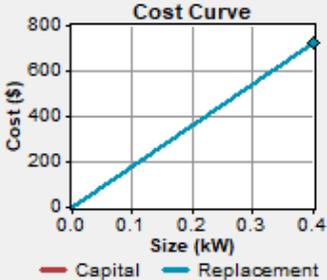
Inverter can operate simultaneously with an AC generator

Rectifier inputs

Capacity relative to inverter (%) (.)

Efficiency (%) (.)

Cost Curve



Cost (\$)

Size (kW)

— Capital — Replacement

Help Cancel OK

Fonte: A autora (2020).

A Figura 21 refere-se aos parâmetros inversor utilizado para atender à carga de disponibilidade mensal de 80 kWh.

Figura 21 - Inversor CC/CA perfil 2 - 80 kW/mês.

 A converter is required for systems in which DC components serve an AC load or vice-versa. A converter can be an inverter (DC to AC), rectifier (AC to DC), or both.

Enter at least one size and capital cost value in the Costs table. Include all costs associated with the converter, such as hardware and labor. As it searches for the optimal system, HOMER considers each converter capacity in the Sizes to Consider table. Note that all references to converter size or capacity refer to inverter capacity.

Hold the pointer over an element or click Help for more information.

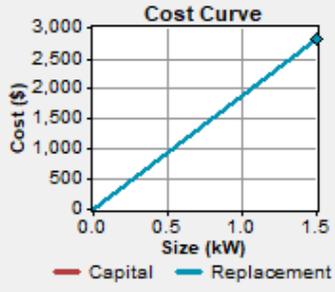
Costs

Size (kW)	Capital (\$)	Replacement (\$)	O&M (\$/yr)
1.500	2799	2799	0

Sizes to consider

Size (kW)
0.000
1.500

Cost Curve



Cost (\$)

Size (kW)

— Capital — Replacement

Inverter inputs

Lifetime (years) (.)

Efficiency (%) (.)

Inverter can operate simultaneously with an AC generator

Rectifier inputs

Capacity relative to inverter (%) (.)

Efficiency (%) (.)

Help Cancel OK

Fonte: A autora (2020).

4.4 BATERIAS (BATTERY)

Em sistemas desconectados da rede, as baterias são os equipamentos mais significativos. Elas possuem uma vida útil inferior aos demais equipamentos, além do custo mais elevado. Para a simulação, é necessário inserir no software mais alguns dados além dos custos de compra, reposição e manutenção. É necessário inserir também alguns dados de capacidade nominal da bateria, tensão nominal e eficiência, além da curva de capacidade dada em A/Ah, a curva que é referente ao seu tempo de vida. Todos os dados foram retirados dos manuais técnicos do fabricante.

A Figura 22 refere-se aos dados que foram inseridos para a bateria que atende a necessidade da carga com disponibilidade mensal de 13 kWh. Já a Figura 23 aos dados que foram inseridos para a bateria que atende a necessidade da carga com disponibilidade mensal de 80 kWh.

Figura 22 - Bateria perfil 1 - 13 kW/mês.

Choose a battery type and enter at least one quantity and capital cost value in the Costs table. Include all costs associated with the battery bank, such as mounting hardware, installation, and labor. As it searches for the optimal system, HOMER considers each quantity in the Sizes to Consider table.

Hold the pointer over an element or click Help for more information.

Battery type: **Heliar Freedom DF2500** [Details...] [New...] [Delete]

Battery properties

Manufacturer: Heliar
Website: www.heliar.com.br

Nominal voltage: 12 V
Nominal capacity: 150 Ah (1.8 kWh)
Lifetime throughput: 416 kWh

Costs

Quantity	Capital (\$)	Replacement (\$)	O&M (\$/yr)
1	1249	1249	0.00

[{}]

Sizes to consider

Batteries
0
1

Advanced

Batteries per string: (12 V bus)

Minimum battery life (yr): [{}]

Cost Curve

Help [Cancel] [OK]

The properties of this battery appear below. Once a battery is created you cannot edit its properties. To change a battery's properties, create a copy (click New in the Battery Inputs window) and modify the properties of the copy.

Hold the pointer over an element name or click Help for more information.

General

Description: Heliar Freedom DF2500
Abbreviation: DF2500
Manufacturer: Heliar
Website: www.heliar.com.br
Notes: www.heliar.com.br

Nominal capacity: 150 Ah
Nominal voltage: 12 V
Round trip efficiency: 80 %
Min. state of charge: 20 %
Float life: 10 yrs
Max. charge rate: 11 A/Ah
Max. charge current: 840 A
Lifetime throughput: 416 kWh
Suggested value: 416 kWh

Capacity curve

Current (A)	Capacity (Ah)
1.70	165.00
7.50	150.00
13.00	130.00
14.40	129.80
16.20	129.60
18.00	126.00
20.00	120.00
23.00	115.00
25.00	112.50
28.00	112.00

Lifetime curve

Depth of Discharge (%)	Cycles to Failure
10	2,500
20	1,500
30	900
40	600
50	450
60	300
70	250
80	150

Calculated parameters

Maximum capacity: 158 Ah
Capacity ratio, c: 0.405
Rate constant, k: 0.849 1/hr

Capacity (Ah) vs Discharge Current (A) graph

Cycles to Failure vs Depth of Discharge (%) graph

Export XML [Help] [Close]

Fonte: A autora (2020).

Figura 23 - Bateria perfil 2 - 80 kW/mês.

Choose a battery type and enter at least one quantity and capital cost value in the Costs table. Include all costs associated with the battery bank, such as mounting hardware, installation, and labor. As it searches for the optimal system, HOMER considers each quantity in the Sizes to Consider table.

Hold the pointer over an element or click Help for more information.

Battery type: **Heliar Freedom DF4001** [Details...] [New...] [Delete]

Battery properties

Manufacturer: Heliar
Website: www.heliar.com.br

Nominal voltage: 12 V
Nominal capacity: 220 Ah (2.64 kWh)
Lifetime throughput: 840 kWh

Costs

Quantity	Capital (\$)	Replacement (\$)	O&M (\$/yr)
1	1429	1429	0.00
{.}	{.}	{.}	{.}

Sizes to consider

Batteries
0
1
2
3
4
5
6

Advanced

Batteries per string: 1 (12 V bus)
 Minimum battery life (yr): 4 {..}

Cost Curve

Help Cancel OK

The properties of this battery appear below. Once a battery is created you cannot edit its properties. To change a battery's properties, create a copy (click New in the Battery Inputs window) and modify the properties of the copy.

Hold the pointer over an element name or click Help for more information.

General

Description: Heliar Freedom DF4001
Abbreviation: DF4001
Manufacturer: Heliar
Website: www.heliar.com.br
Notes: www.heliar.com.br

Nominal capacity: 220 Ah
Nominal voltage: 12 V
Round trip efficiency: 80 %
Min. state of charge: 20 %
Float life: 10 yrs
Max. charge rate: 1 A/Ah
Max. charge current: 11 A
Lifetime throughput: 840 kWh
Suggested value: 665 kWh

Capacity curve

Current (A)	Capacity (Ah)
2.40	240.00
11.00	229.00
20.00	200.00
21.50	193.50
24.00	192.00
26.50	185.50
30.00	180.00
35.00	175.00
38.00	171.00
41.50	166.00

Lifetime curve

Depth of Discharge (%)	Cycles to Failure
10	2,500
20	1,500
30	900
40	600
50	450
60	300
70	250
80	150

Calculated parameters

Maximum capacity: 252 Ah
Capacity ratio, c: 0.445
Rate constant, k: 0.494 1/hr

Capacity (Ah) vs Discharge Current (A) graph

Cycles to Failure vs Depth of Discharge (%) graph

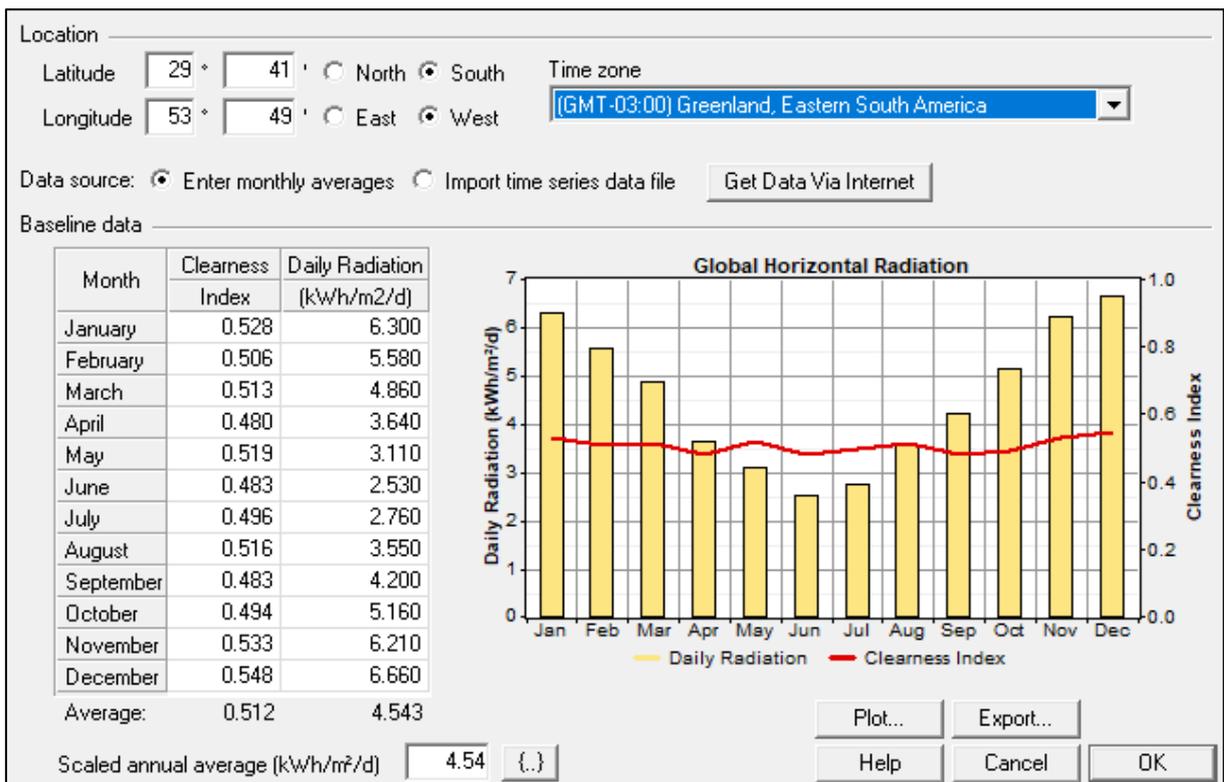
Export XML Help Close

Fonte: A autora (2020).

4.5 CENÁRIOS (SOLAR SOURCE)

Os dados de radiação solar, da região central do estado do Rio Grande do Sul, que o software utilizou para os cálculos da simulação são mostrados na Figura 24 e foram retirados, através da internet, do conjunto de dados de energia solar de superfície da *National Aeronautics and Space Administration* (NASA).

Figura 24 - Média mensal de radiação solar na região de Santa Maria - RS.



Fonte: A autora (2020).

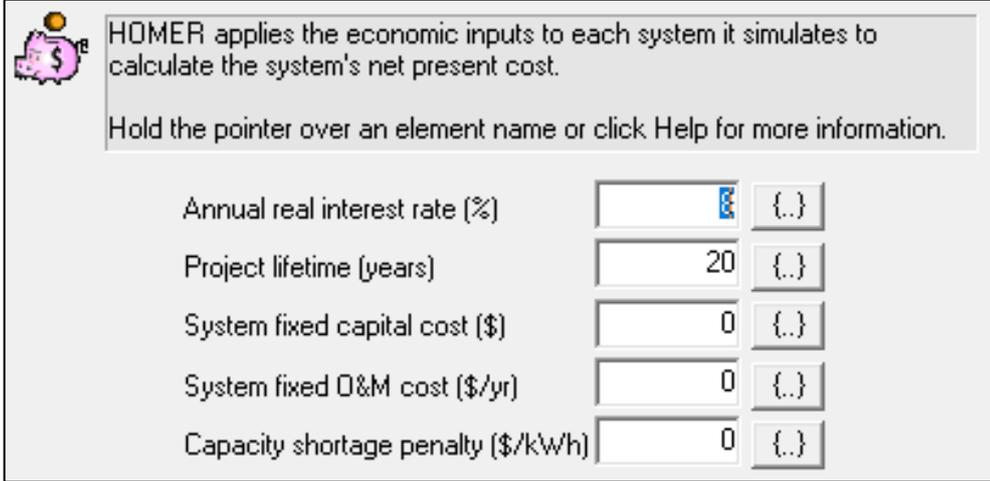
O gráfico de radiação solar foi obtido diretamente no software inserindo-se as coordenadas geográficas da cidade escolhida, neste caso a cidade de Santa Maria - Rio Grande do Sul, e mostra os índices médios de radiação na região em diferentes meses do ano.

4.6 RECURSOS ECONÔMICOS (ECONOMICS)

A janela *Economics* do software permite a entrada de configurações que se referem à taxa de depreciação dos equipamentos, ou seja, o valor deles depois de 1

ano em relação ao valor de equipamentos novos (RIO DE JANEIRO, 2020). Nesse caso foi utilizada uma taxa 8% (Figura 25).

Figura 25 - Recursos Econômicos.



The screenshot shows a dialog box titled "HOMER applies the economic inputs to each system it simulates to calculate the system's net present cost." Below the title is a note: "Hold the pointer over an element name or click Help for more information." The dialog contains five input fields, each with a numerical value and a help button ({}):

Parameter	Value	Help Button
Annual real interest rate (%)	8	{}
Project lifetime (years)	20	{}
System fixed capital cost (\$)	0	{}
System fixed O&M cost (\$/yr)	0	{}
Capacity shortage penalty (\$/kWh)	0	{}

Fonte: A autora (2020).

O “tempo de vida” do sistema também foi determinado, o qual foi fixado um período de 20 anos. Os custos fixos de operação e manutenção e taxas de fator de potência foram considerados zero. Todos esses dados influenciam no cálculo dos custos totais do sistema.

4.7 CONTROLE DO SISTEMA (*SYSTEM CONTROL*)

As configurações da janela *System Control* do software definem o modelo de operação dos geradores de energia e banco de baterias, as simulações foram padronizadas em 60 minutos, para garantir um resultado realista (Figura 26). Outro padrão alterado nessa configuração foi a “estratégia de despacho de carga”, onde, marcando-se a segunda opção (*Cycle Charging*), o software simula que o gerador fotovoltaico gera a máxima potência disponível e recarrega o banco de baterias, ao invés de gerar somente o necessário para o atendimento da carga.

Figura 26 - Controle do sistema.

The system control inputs define how HOMER models the operation of the battery bank and generators. The dispatch strategy determines how the system charges the battery bank.

Hold the pointer over an element name or click Help for more information.

Simulation _____
Simulation time step (minutes) {..}

Dispatch strategy _____
 Load following
 Cycle charging
 Apply setpoint state of charge (%) {..}

Generator control _____
 Allow systems with multiple generators
 Allow multiple generators to operate simultaneously
 Allow systems with generator capacity less than peak load

Other settings _____
 Allow systems with two types of wind turbines
 Allow excess electricity to serve thermal load
 Limit excess thermal output (% of load) {..}

Fonte: A autora (2020).

4.8 PARÂMETROS DE CONSTRUÇÃO DE REDE

Para comparação de uma possível extensão da rede, foram utilizados os dados do cabo 1#4CA, formando uma rede monofásica que apresenta um custo médio de construção de R\$ 20.000,00 por quilômetro (Figura 27). Custos de manutenção e de custo de energia foram desprezados, já que o programa Luz para Todos tem como finalidade fornecer a energia sem custos.

Figura 27 - Dados de construção de rede por km.

HOMER will use these inputs to calculate the breakeven grid extension distance, which is the minimum distance from the grid that makes a stand-alone system cheaper than extending the grid.

Hold the pointer over an element or click Help for more information.

Capital cost (\$/km) {..}

O&M cost (\$/yr/km) {..}

Grid power price (\$/kWh) {..}

Fonte: A autora (2020).

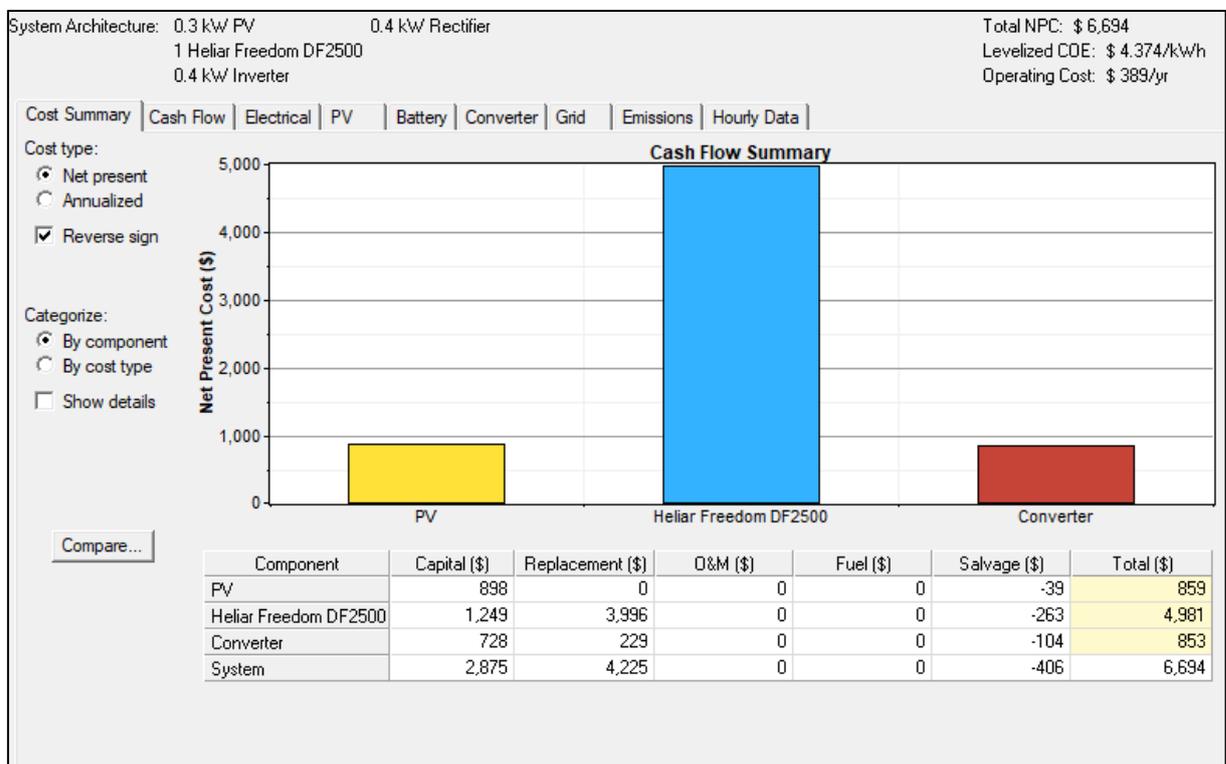
5 RESULTADOS

A partir dos dados adicionados no Homer, o programa apresenta os fluxos de caixa de cada equipamento e detalhes sobre sua utilização. Os fluxos de caixa representam os custos iniciais do investimento e os custos com a reposição dos componentes que possuem tempo de vida inferior ao período total analisado (20 anos). Ademais, o software fornece uma comparação entre o custo da energia a partir dos painéis fotovoltaicos em comparação com a extensão de rede, possibilitando ver a partir de qual distância da rede existente o uso do sistema fotovoltaico se torna mais viável.

5.1 PERFIL 1 - SIGFI13

O fluxo de caixa, bem como as quantidades de equipamentos que o sistema necessita para o funcionamento, obtidos a partir da análise do primeiro perfil de carga, segue o padrão da Figura 28.

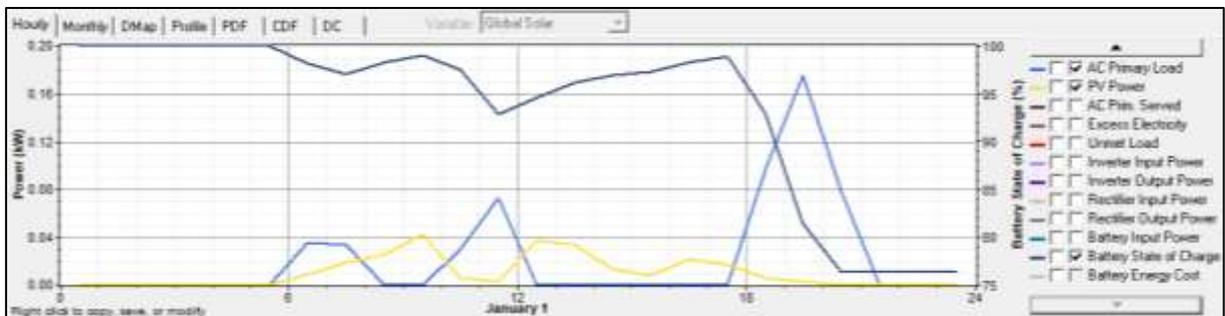
Figura 28 - Fluxo de caixa perfil 1.



Fonte: A autora (2020).

Pode-se observar a quantidade de equipamentos necessários para o abastecimento da primeira carga, que nesse caso são uma bateria de 150Ah, um inversor de 400W e 2 painéis de 150W, que somados resultam na potência resultante na simulação. Os custos estimados desse sistema no período analisado é de R\$ 6.694,00, com custo anual de operação de R\$ 389,00. Na Figura 29, pode-se analisar a curva correspondente à carga analisada (em azul claro), a curva de energia gerada pelos painéis (em amarelo) e o descarregamento da bateria (em azul escuro), em um período de 24h no mês de janeiro.

Figura 29 - Curvas do sistema de geração para perfil de carga 1.

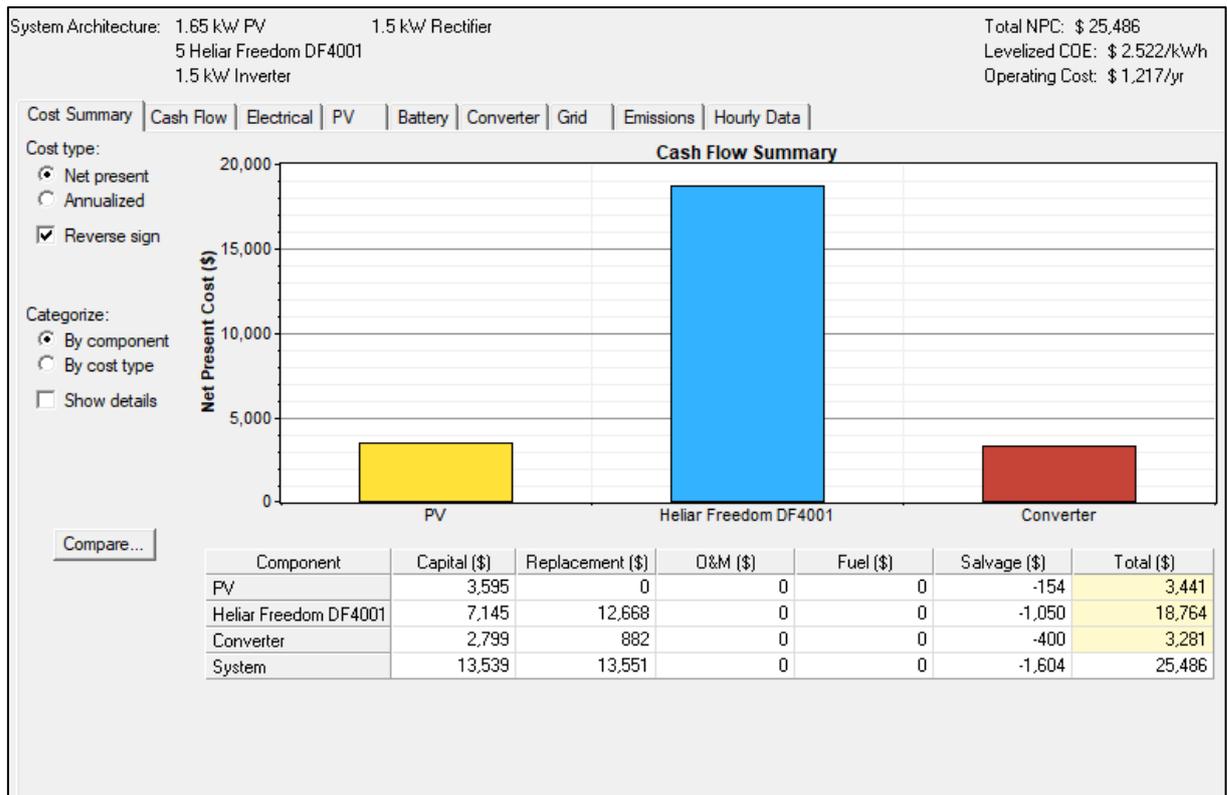


Fonte: A autora (2020).

5.2 PERFIL 2 - SIGFI80

Para o segundo perfil de carga estudado, pode-se observar, conforme os resultados mostrados na Figura 30, a quantidade de equipamentos necessários para o abastecimento da carga. Nesse caso, são cinco baterias de 220Ah, um inversor de 1.5kW e 5 painéis de 330W, que somados resultam na potência mostrada na simulação. O custo estimado desse sistema no período analisado é de R\$ 25.486,00, com custo anuais de operação de R\$ 1.217,00.

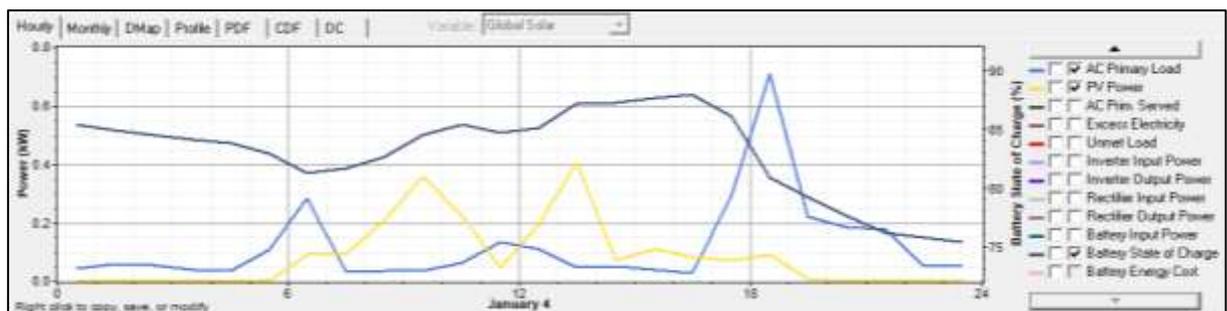
Figura 30 - Fluxo de caixa perfil 1.



Fonte: A autora (2020).

Na Figura 31, pode-se analisar a curva correspondente ao funcionamento do sistema em um período de 24h no mês de janeiro.

Figura 31 - Curvas do sistema de geração para perfil de carga 2.



Fonte: A autora (2020).

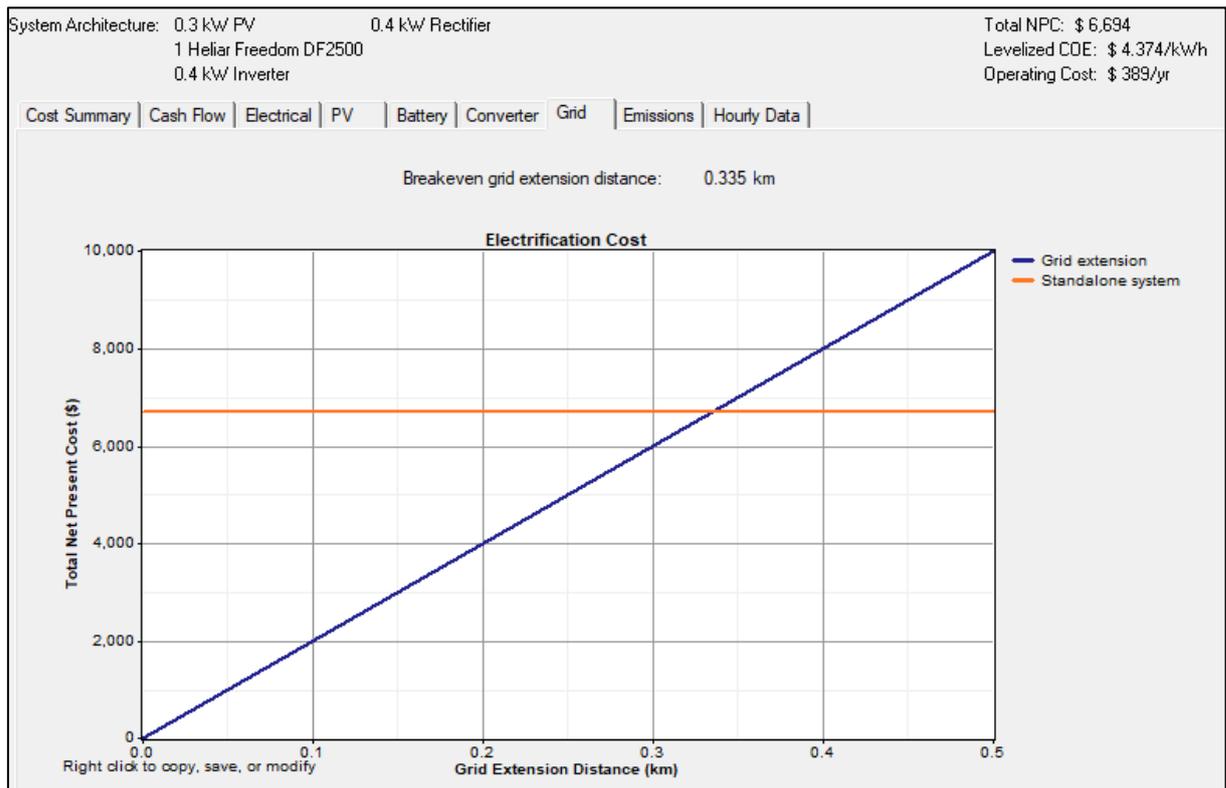
5.3 COMPARAÇÃO SISTEMA ISOLADO x CONSTRUÇÃO DE REDE

Por fim, o software fornece uma comparação entre o custo do sistema fotovoltaico em comparação com a extensão da rede de energia para atendimento das cargas analisadas. Dessa maneira, é possível ver a partir de qual distância da rede existente se torna mais viável o uso do sistema fotovoltaico.

Nas Figuras 32 e 33, pode-se verificar o ponto onde se igualam os custos de extensão da rede em relação à utilização do sistema fotovoltaico.

Para a primeira simulação, o valor se aproxima dos 335 metros, o que indica que, a partir dessa distância, a utilização do sistema fotovoltaico representa a melhor opção para o fornecimento de energia.

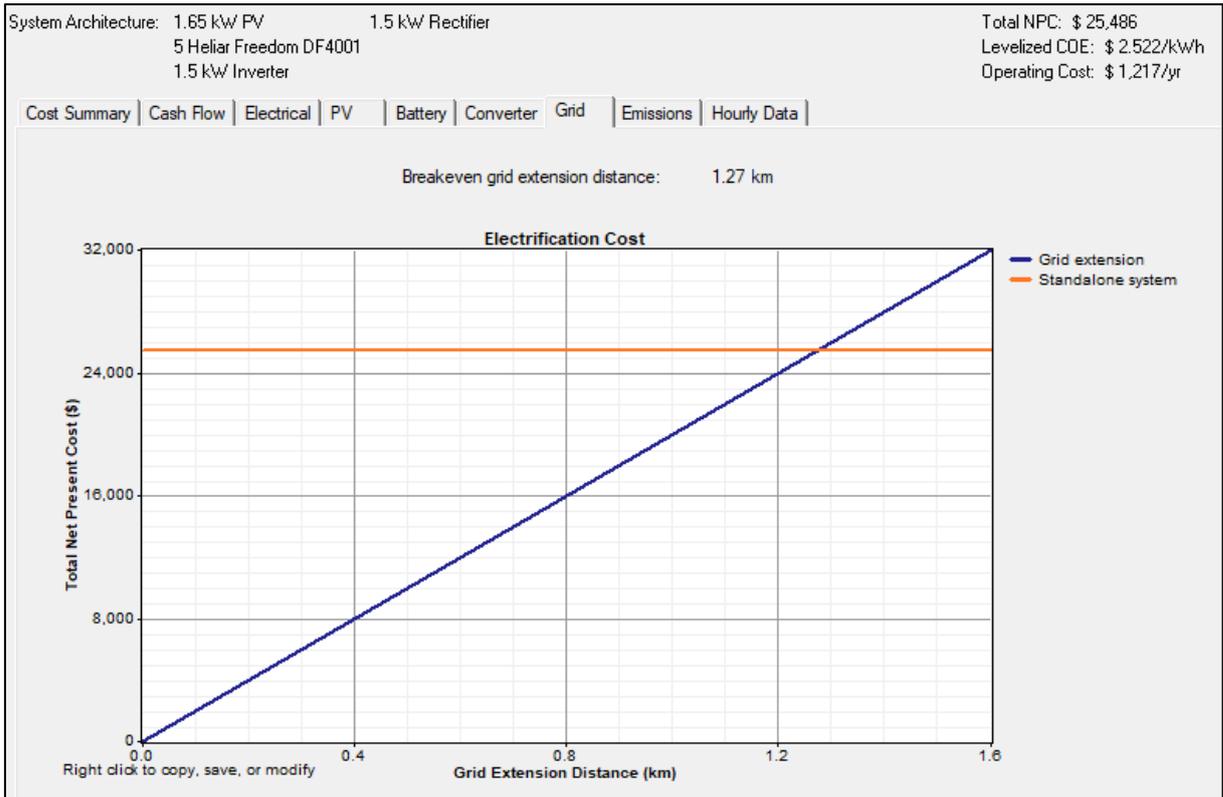
Figura 32 - Comparação com a rede - Perfil 1.



Fonte: A autora (2020).

Para a segunda simulação, o valor se aproxima dos 1,27 km, indicando que, a partir dessa distância, a utilização do sistema fotovoltaico representa a opção mais viável para o fornecimento de energia.

Figura 33 - Comparação com a rede - Perfil 2.



Fonte: A autora (2020).

5.4 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS

A Tabela 4 apresenta um comparativo dos custos de cada sistema para atender as determinadas cargas, além da comparação entre as distâncias da rede que indicam viabilidade na construção dos sistemas fotovoltaicos.

Tabela 4 - Comparação dos resultados.

Unidades consumidoras	Custos totais de construção do sistema (R\$)	Distância que justifica a viabilidade dos sistemas (Km)	Custos de construção da rede (R\$)
Perfil 1 - SIGF113	6.694,00	0,335	6.700,00
Perfil 2 - SIGF180	25.486,00	1,27	25.400,00

Fonte: A autora (2020).

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O uso de fontes alternativas de energia, em especial a energia solar fotovoltaica, se faz absolutamente necessária, já que esse tipo de geração atua na disseminação da inclusão social, além de contribuir com a redução do uso de combustíveis poluentes.

Os sistemas fotovoltaicos oferecem diversas vantagens, sendo uma das melhores alternativas para geração de energia em lugares isolados, que muitas vezes ainda utilizam geradores a diesel como fonte de energia ou até mesmo ainda vivem no escuro. Além disso, sabe-se que a extensão da rede, para residências com baixo perfil de consumo, nem sempre se torna viável para as concessionárias devido aos altos custos de implantação da rede, fazendo com que o investimento demore muito para gerar um retorno ou, até mesmo, o difícil acesso a essas residências seja um fator a ser considerado.

Nos perfis de consumo estudados, os quais foram baseados no Sistema Individual de Geração de Energia Elétrica com Fonte Intermitente (SIGFI), foi possível observar que a distância do ponto de conexão da rede até a residência em questão é relativamente pequena, para ambos os casos estudados. No entanto, as unidades consumidoras que necessitam desse tipo de atendimento geralmente se encontram a distâncias superiores às encontradas nas simulações.

Um fator a ser observado nos resultados é o custo das baterias, que é o item mais caro no sistema. As baterias são itens essenciais em sistemas isolados (ou *off grid*), já que o sistema produz energia para alimentar as cargas apenas durante os períodos de radiação solar. Sendo assim, se faz necessário o uso de bancos de baterias para armazenamento dessa energia gerada nos períodos de radiação solar, possibilitando a posterior utilização da energia em momentos em que não há geração.

A utilização de sistemas fotovoltaicos se torna uma forma cada vez mais aplicável de geração de energia limpa e renovável, com grande potencial para exercer uma significativa participação na matriz energética brasileira.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução Normativa nº 493, de 5 de junho de 2012**. Estabelece os procedimentos e as condições de fornecimento por meio de Microssistema Isolado de Geração e Distribuição de Energia Elétrica – MIGDI ou Sistema Individual de Geração de Energia Elétrica com Fonte Intermitente – SIGFI. Brasília: ANEEL, 2012. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012493.pdf>. Acesso em: 17 ago. 2020.

BATERIA Estacionária Heliar Freedom DF2500 (165Ah / 150Ah). **Neo Solar**, São Paulo, 2020a. Disponível em: <https://www.neosolar.com.br/loja/bateria-estacionaria-freedom-df2500-165ah-150ah.html>. Acesso em: 17 ago. 2020.

BATERIA Estacionária Heliar Freedom DF4100 (240Ah / 220Ah). **Neo Solar**, São Paulo, 2020b. Disponível em: <https://www.neosolar.com.br/loja/bateria-estacionaria-freedom-df4001-240ah-220ah.html>. Acesso em: 20 ago. 2020.

BLUESOL. **Os sistemas de energia solar fotovoltaica**: livro digital de introdução aos sistemas solares. 2016. Disponível em: <https://programaintegradoronline.com.br/wp-content/uploads/2016/03/Livro-Digital-de-Introdu%C3%A7%C3%A3o-aos-Sistemas-Solares-novo.pdf>. Acesso em: 27 abr. 2020.

BRAGA, R. P. **Energia solar fotovoltaica**: fundamentos e aplicações. 2008. 80p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) - Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008. Disponível em: <http://monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10001103.pdf>. Acesso em: 19 fev. 2020.

CENTRO DE REFERÊNCIA PARA ENERGIA SOLAR E EÓLICA SÉRGIO DE SALVO BRITO. **Energia Solar, princípios e aplicações**. Rio de Janeiro: CEPEL/CRESESB, 2006. Disponível em: http://www.cresesb.cepel.br/download/tutorial/tutorial_solar_2006.pdf. Acesso em: 18 fev. 2020.

CONHEÇA os tipos de células fotovoltaicas. **Solen**, São Paulo, 03 abr. 2019. Disponível em: <https://www.solenenergia.com.br/blog/celulas-fotovoltaicas/>. Acesso em: 18 mar. 2020.

CONTROLADOR de Carga PWM 10A 12/24V - Epever Landstar LS1024E. **Neo Solar**, São Paulo, 2020c. Disponível em: <https://www.neosolar.com.br/loja/controlador-carga-pwm-10a-12-24v-epever-landstar-ls1024e.html>. Acesso em: 17 ago. 2020.

CONTROLADOR de Carga PWM 30A 12/24V - Epever Landstar LS3024EU. **Neo Solar**, São Paulo, 2020d. Disponível em: <https://www.neosolar.com.br/loja/controlador-de-carga-solar/controlador-solar-pmw-s-display/controlador-carga-pwm-30a-12-24v-epever-landstar-ls3024eu.html>. Acesso em: 20 ago. 2020.

ELETROBRAS. Consumo de energia dos aparelhos elétricos. **UNESP**, Rio Claro, 2020. http://www.rc.unesp.br/comsupervig/tabela_consumo.pdf. Acesso em: 17 ago. 2020.

ELETROBRAS. **Especificações Técnicas dos Programas para Atendimento às Regiões Remotas dos Sistemas Isolados no âmbito do Programa Luz para Todos**. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2017. Disponível em: https://www.mme.gov.br/luzparatodos/downloads/especificacoes_tecnicas.pdf. Acesso em: 17 ago. 2020.

FADIGAS, E. A. F. A. **Energia solar fotovoltaica: fundamentos, conversão e viabilidade técnico-econômica**. São Paulo: GEPEA/USP, 2004. Disponível em: <https://pt.slideshare.net/alvferreira/apostila-energia-solar-fotovoltaica-fundamentos-converso-e-viabilidade-tnicoeconmica>. Acesso em: 04 mai. 2020.

FONTES, R. Geração distribuída da ANEEL avança com energia solar fotovoltaica. **Bluesol**, [S. l.], 02 abr. 2018. Disponível em: <https://blog.bluesol.com.br/geracao-distribuida-da-aneel/>. Acesso em: 19 fev. 2020.

FREIRE, F. Como funciona a célula fotovoltaica. **Shareenergy**, Belo Horizonte, 01 out. 2017. Disponível em: <https://shareenergy.com.br/como-funciona-celula-fotovoltaica/>. Acesso em: 18 mar. 2020.

GADO, T. A. **Análise de atendimento de cargas isoladas por sistemas fotovoltaicos e construção de rede**. 2015. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2015.

HISTÓRIA da energia solar: como tudo começou. **Portal Solar**, São Paulo, 03 nov. 2016. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/blog-solar/energia-solar/historia-origem-da-energia-solar.html>. Acesso em: 18 fev. 2020.

HOMER ENERGY. 2020. Disponível em: <https://www.homerenergy.com/>. Acesso em: 15 mai. 2020.

INCARNAÇÃO, D. D. **Um sistema fotovoltaico para a comunidade de Santo Antônio Das Varejas, Rio Preto - MG**. 2012. 83p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) - Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012. Disponível em: <http://monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10005065.pdf>. Acesso em: 18 fev. 2020.

INVERSOR Senoidal Epever IPower IP1500-12 - 1500W 12/220V. **Neo Solar**, São Paulo, 2020e. Disponível em: <https://www.neosolar.com.br/loja/inversor/inversor-senoidal-epever-ipower-ip1500-12vcc-220vca.html>. Acesso em: 20 ago. 2020.

INVERSOR Unitron iVolt - 400W / 12Vcc / 220Vac / 60Hz. **Neo Solar**, São Paulo, 2020f. Disponível em: <https://www.neosolar.com.br/loja/inversor-unitron-ivolt-400w-12vcc-220vac-60hz.html>. Acesso em: 20 ago. 2020.

MAIS de 800 milhões de pessoas no mundo não têm acesso a energia elétrica, diz Banco Mundial. **G1 Economia**, São Paulo, 22 mai. 2019. Disponível em: <https://g1.globo.com/economia/noticia/2019/05/22/mais-de-800-milhoes-de-pessoas-no-mundo-nao-tem-acesso-a-energia-eletrica-diz-banco-mundial.ghtml>. Acesso em: 18 fev. 2020.

MATHEUS, F. Sistemas fotovoltaicos autônomos. **Geração de Energia Elétrica Solar**, [S. l.], 04 jun. 2015. Disponível em: <https://fomatheus.wordpress.com/2015/06/04/sistemas-fotovoltaicos-autonomos/>. Acesso em: 07 ago. 2020.

MELO, N. R.; NOBREGA, R. V. T. Dimensionamento e simulação de uma microrrede utilizando geração conjunta eólica/solar aplicada em um condomínio residencial na cidade de Janaúba/MG. **ForScience**, Formiga, v. 5, n. 3, jul./dez. 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.29069/forscience.2017v5n3.e283>. Acesso em: 16 abr. 2020.

NARUTO, D. T. **Vantagens e desvantagens da geração distribuída e estudo de caso de um sistema solar fotovoltaico conectado à rede elétrica**. 2017. 97p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) - Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012. Disponível em: <http://www.monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10020290.pdf>. Acesso em: 12 fev. 2020.

NASCIMENTO, C. A. **Princípio de funcionamento da célula fotovoltaica**. 2004. 21p. Monografia (Especialização em Fontes Alternativas de Energia) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2004. Disponível em: https://www.solenerg.com.br/files/monografia_cassio.pdf. Acesso em: 18 fev. 2020.

PAINEL Solar Fotovoltaico 150W - Resun RS6E-150P. **Neo Solar**, São Paulo, 2020g. Disponível em: <https://www.neosolar.com.br/loja/painel-solar-fotovoltaico-150w-resun-rs6e-150p.html>. Acesso em: 17 ago. 2020.

PAINEL Solar Fotovoltaico 330W - OSDA - ODA330-36-P. **Neo Solar**, São Paulo, 2020h. Disponível em: <https://www.neosolar.com.br/loja/painel-solar/placa-solar-acima-de-300w/painel-solar-fotovoltaico-330w-osda-oda330-36-p.html>. Acesso em: 20 ago. 2020.

PARMINONDI, R. G. **Estudo de viabilidade de um sistema fotovoltaico off grid em UTIs móveis para fornecimento de energia elétrica**. 2018. 53p. Dissertação (Mestrado em Bioengenharia) - Universidade Brasil, São Paulo, 2018. Disponível em: https://universidadebrasil.edu.br/portal/_biblioteca/uploads/20200316143934.pdf. Acesso em: 04 mai, 2020.

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. (Orgs.). **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos**. Rio de Janeiro: CEPEL/CRESESB, 2014. Disponível em: http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Manual_de_Engenharia_FV_2014.pdf. Acesso em: 16 ago. 2020.

REIS, P. Principais tipos de células fotovoltaicas constituintes de painéis solares. **Portal Energia**, [S. l.], 28 nov. 2017. Disponível em: <https://www.portal-energia.com/principais-tipos-de-celulas-fotovoltaicas-constituientes-de-paineis-solares/>. Acesso em: 18 mar. 2020.

RIO DE JANEIRO (Estado). Ministério da Fazenda. **Tabela de Vida Útil e Valor Residual**. 2020. Disponível em: <http://www.fazenda.rj.gov.br/sefaz/content/conn/UCMServer/uuid/dDocName%3AWCC201632>. Acesso em: 07 mai. 2020.

SOUZA, R. Célula fotovoltaica - o guia técnico absolutamente completo. **Bluesol**, [S. l.], 23 fev. 2017a. Disponível em: <https://blog.bluesol.com.br/celula-fotovoltaica-guia-completo/>. Acesso em: 18 fev. 2020.

SOUZA, R. Sistema Fotovoltaico conectado à rede (on grid): o guia 100% completo. **Bluesol**, [S. l.], 10 abr. 2017b. Disponível em: <https://blog.bluesol.com.br/sistema-fotovoltaico-conectado-a-rede-on-grid/>. Acesso em: 03 jun. 2020.

TIPOS de painéis fotovoltaicos. **Energías Renovables**, [S. l.], 25 nov. 2014. Disponível em: <http://www.energiasrenovablesinfo.com/solar/tipos-painéis-fotovoltaicos/>. Acesso em: 20 fev. 2020.

VILLALVA, M. G.; GAZOLI, J. R. **Energia solar fotovoltaica: conceitos e aplicações**. São Paulo: Érica, 2014.