

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CAMPUS ARARANGUÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS, TECNOLOGIAS E SAÚDE
DEPARTAMENTO DE ENERGIA E SUSTENTABILIDADE
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ENERGIA

ALISSON DE MELLO

**ANÁLISE E DIMENSIONAMENTO DE DIFERENTES ARQUITETURAS DE
SISTEMAS FOTOVOLTAICOS**

Araranguá

2024

Alisson de Mello

**ANÁLISE E DIMENSIONAMENTO DE DIFERENTES ARQUITETURAS DE
SISTEMAS FOTOVOLTAICOS**

Trabalho Conclusão do Curso de Graduação Engenharia
de Energia do Centro de Ciências,
Tecnologias e Saúde da Universidade Federal de Santa
Catarina como requisito para a obtenção do título de
Engenheiro/a de energia.

Orientador: Prof. Dr. Leonardo Elizeire Bremermann

Araranguá

2024

Mello, Alisson de

ANÁLISE E DIMENSIONAMENTO DE DIFERENTES ARQUITETURAS DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS /Alisson de Mello ; orientador, Leonardo Elizeire Bermermann, 2024.

69 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Araranguá,
Graduação em Engenharia de Energia, Araranguá, 2024.

Inclui referências.

1. Engenharia de Energia. 2. Fotovoltaica. 3. On grid.
4. Off grid. 5. Híbrido. I. Bermermann, Leonardo Elizeire.
II. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em
Engenharia de Energia. III. Título.

ALISSON DE MELLO

**ANÁLISE E DIMENSIONAMENTO DE DIFERENTES ARQUITETURAS DE
SISTEMAS FOTOVOLTAICOS**

Este Trabalho Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de “Engenheiro de energia” e aprovado em sua forma final pelo Curso Engenharia de Energia.

Araranguá, 05 de julho de 2024.

Profa. Carla D’Aquino, Dra.
Coordenador do Curso
Banca Examinadora:

Prof.(a) Leonardo Elizeire Bremermann, Dr.(a)
Orientador(a)
Instituição UFSC

Prof.(a) Letícia Toretí Scarabeloti, Dr.(a)
Avaliador(a)
Instituição UFSC

Prof.(a) Beatriz Silveira Buss, Me.(a)
Avaliador(a)
Instituição UFSC

Alisson de Mello
Autor
Instituição UFSC

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Fabiano e Suselani, além de minha namorada Ana Elize, que sempre estiveram presentes, me apoiando em todos os passos dessa jornada. Estendo o agradecimento ao corpo docente, em especial aos professores Dr. Leonardo Elizeire Bremermann e Dr. Giuliano Arns Rampinelli, pelo suporte e conhecimento transmitido no decorrer dessa caminhada.

Deixo os agradecimentos também a aos meus amigos e colegas, em especial ao Mestre San Zata Custódio, ao Dr. Graziani Candioto e a Dra. Camila Guindani, que fizeram parte da minha trajetória até o momento.

RESUMO

As perspectivas de aumento na demanda por energia elétrica no Brasil e o encarecimento dos combustíveis fósseis, fazem com que outras fontes de energia sejam necessárias para o abastecimento de energia. Uma das fontes renováveis é o Sol, sua energia pode ser utilizada de diversas formas, sendo as principais a de aquecimento e a fotovoltaica. A energia elétrica obtida por meio de módulos fotovoltaicos está ganhando protagonismo no país que já possui robusta regulamentação para este mercado. Por ser um modelo com longa vida útil e flexibilidade de uso esta fonte energética pode ser utilizada em paralelo com a rede elétrica convencional ou até mesmo em área remotas, onde não há sistema de distribuição de energia. No presente trabalho foi abordado as principais características de diferentes tipos de sistemas fotovoltaicos, sendo eles, ligado à rede (*on grid*), desconectado da rede (*off grid*) e um modelo que é conectado à rede e possui sistema de armazenamento de energia (híbrido). Os diferentes tipos de sistemas foram dimensionados conforme orçamento de R\$ 45.000,00, verba esta disponibilizada pelo Governo Federal do Brasil para a realização do projeto de pesquisa em parceria entre a Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) e o Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC). Inicialmente o presente trabalho estava atrelado a este projeto de pesquisa, a fim de suprir a necessidade energética de uma estufa automatizada localizada na cidade de Santa Rosa do Sul em Santa Catarina. Foi aplicado alguns indicadores de desempenho e retorno financeiro para comparar de forma quantitativa a operação dos sistemas. Conforme os indicadores aplicados o sistema do tipo *on grid* teve melhor desempenho e retorno financeiro, porém há limitações neste sistema no que se refere a necessidade de estar conectado à rede elétrica, não operando em caso de falta da mesma o sistema *on grid* é menos flexível que os outros modelos abordados.

Palavras-chave: Fotovoltaica. *On grid*. *Off grid*. Híbrido.

ABSTRACT

The prospects for an increase in demand for electrical energy in Brazil and the increase in the cost of fossil fuels mean that other energy sources are permitted for energy supply. One of the renewable sources is the Sun, its energy can be used in different ways, the main ones being heating and photovoltaics. Electrical energy obtained through photovoltaic modules is gaining prominence in the country that already has robust regulations for this market. As it is a model with a long useful life and flexibility of use, this energy source can be used in parallel with a conventional electrical network or even in remote areas, where there is no energy distribution system. In this work, the main characteristics of different types of photovoltaic systems were addressed, namely, connected to the grid (on grid), disconnected from the grid (off grid) and a model that is connected to the grid and has an energy storage system (hybrid). The different types of systems were sized according to a budget of R\$ 45,000.00, funds made available by the Federal Government of Brazil to carry out the research project in partnership between the Federal University of Santa Catarina (UFSC) and the Federal Institute of Santa Catarina (IFSC). Initially, this work was linked to this research project, in order to meet the energy needs of an automated greenhouse located in the city of Santa Rosa do Sul in Santa Catarina. Some performance and financial return indicators were applied to quantitatively compare the operation of the systems. According to the indicators applied, the grid-type system had better performance and financial return, however there are limitations in this system, not referring to the need to be connected to the electrical grid, not operating in case of lack of it, the grid system is less flexible than the other models involved.

Keywords: Photovoltaic. On grid. Off grid. Hybrid.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Evolução da demanda de energia elétrica.	15
Figura 2 – Ilustração do efeito fotovoltaico.....	19
Figura 3 – Composição de um módulo fotovoltaico típico.....	20
Figura 4 – Funcionamento de um inversor CC-CA.	21
Figura 5 – Esquema de ligação de um controlador de carga.....	23
Figura 6 – Esquema de arquitetura de um sistema fotovoltaico <i>on grid</i>.....	25
Figura 7 – Esquema de arquitetura de um sistema <i>off grid</i>.	26
Figura 8 – Operação de um inversor híbrido (a) conectado à rede (b) desconectado.....	27
Figura 9 – Entrada de dados no software PVSyst.	50
Figura 10 – Gráfico comparação entre o modelo teórico e PVSyst.	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores de Irradiância inclinada para Florianópolis obtidos com o software RADIUSOL 2.	33
Tabela 2 – Valores de PR obtidos com o auxílio do software PVSYST.....	34
Tabela 3 – Orçamentos realizados com empresas integradoras.	36
Tabela 4 – Preço médio dos módulos utilizados no estudo.	37
Tabela 5 – Valores médios obtidos para os controladores de carga selecionados.	38
Tabela 6 – Valores médios obtidos para as baterias selecionadas.	38
Tabela 7 – Parâmetros elétricos dos inversores Solis.....	40
Tabela 8 – Parâmetros elétricos do módulo JA Solar.	40
Tabela 9 – Parâmetros Ld e NMP para os módulos selecionados.....	43
Tabela 10 – Potência do sistema e valor dos módulos do sistema.	44
Tabela 11 – Capacidade do banco conforme diferentes autonomias.....	44
Tabela 12 – NBP conforme baterias e dias de autonomias selecionados.....	45
Tabela 13 – Valor do Banco de Baterias para diferentes tempos de autonomia.	45
Tabela 14 – Valor dos componentes do sistema <i>off grid</i> definido.	46
Tabela 15 – Características do sistema <i>on grid</i> atrelado a cada sistema <i>off grid</i>	46
Tabela 16 – Sistemas com inversores híbridos.....	47
Tabela 17 – Parâmetros elétricos dos inversores Growatt.	49
Tabela 18 – Energia gerada estimada teórica para cada tipo de sistema estudado.	49
Tabela 19 – Energia gerada estimada pelo PVSyst para cada tipo de sistema estudado.	51
Tabela 20 – Geração estimada por kWp.	51
Tabela 21 – Economia mensal estimada para cada sistema estudado.....	53
Tabela 22 – Indicadores de desempenho obtidos para os sistemas analisados.	54

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CELESC	Centrais Elétricas de Santa Catarina S.A.
EPAGRI	Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
FDI	Fator de Dimensionamento do Inversor
GD	Geração Distribuída
IFSC	Instituto Federal de Santa Catarina
MME	Ministério de Minas e Energias
MPPT	Rastreador de Ponto de Máxima Potência
NTEEL	Núcleo Tecnológico de Energia Elétrica da UFSC
PCH	Pequena Central Hidrelétrica
PID	Degradação por Potencial Induzido
PNE	Plano Nacional de Energia
PR	<i>Performance Ratio</i>
PWM	Modulação por Largura de Pulso
UC	Unidade Consumidora
UHE	Usina Hidrelétrica

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	OBJETIVOS	17
1.1.1	Objetivo Geral.....	17
1.1.2	Objetivos Específicos	17
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1	EQUIPAMENTOS DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO	18
2.1.1	Célula Fotovoltaica	18
2.1.2	Módulo Fotovoltaico.....	19
2.1.3	Inversor.....	20
2.1.4	Controlador de Carga	22
2.1.5	Bateria.....	23
2.2	SISTEMA <i>ON GRID</i>	24
2.3	SISTEMA <i>OFF GRID</i>	25
2.4	SISTEMA HÍBRIDO	26
2.5	DIMENSIONAMENTO.....	28
2.5.1	Dimensionamento do sistema <i>on grid</i>.....	28
2.5.2	Dimensionamento do sistema <i>off grid</i>	29
2.5.3	Dimensionamento do sistema híbrido.....	31
2.5.4	Compatibilidade módulo e inversor	31
3	MATERIAIS E METODOLOGIA.....	32
3.1	SISTEMAS PROPOSTOS	32
3.2	SOFTWARE RADIASOL 2.....	32
3.3	SOFTWARE PVSYST	34
3.4	INDICADORES DE DESEMPENHO	34
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	35
4.1	ORÇAMENTOS.....	36
4.1.1	Orçamentos sistema <i>on grid</i>.....	36
4.1.2	Orçamentos sistema <i>off grid</i>	37
4.1.3	Orçamentos sistema com inversor híbrido.....	38
4.2	DIMENSIONAMENTO DOS SISTEMAS	39
4.2.1	Dimensionamento do sistema <i>on grid</i>.....	39

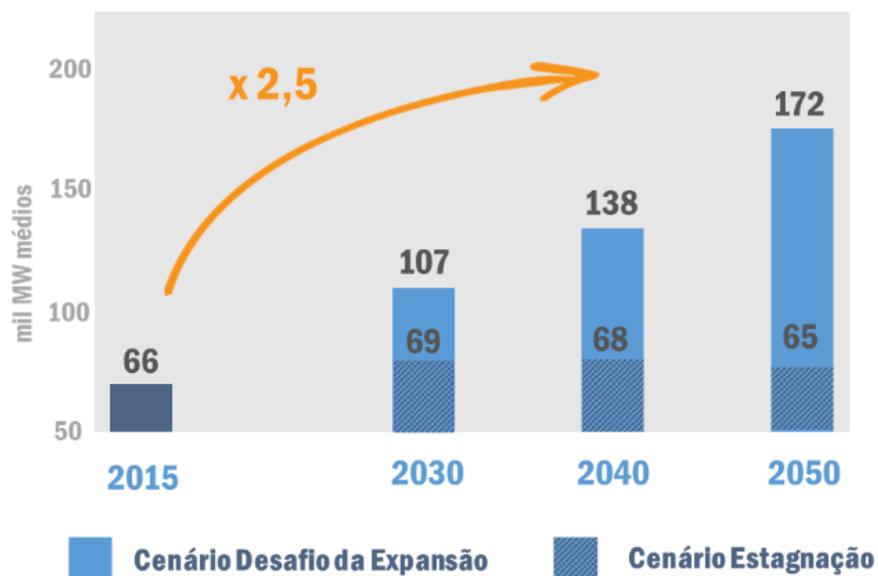
4.2.2	Dimensionamento do sistema híbrido <i>on + off grid</i>	42
4.2.3	Dimensionamento do sistema com inversor híbrido	47
4.3	SIMULAÇÕES	48
4.3.1	Simulações teóricas	48
4.3.2	Simulações PVSyst	49
4.4	DESEMPENHO E RETORNO	51
5	CONCLUSÃO	55
	REFERÊNCIAS	57
	ANEXO A – Datasheet módulo fotovoltaico Risen RSM144-7-450M	62
	ANEXO B – Datasheet módulo fotovoltaico Sunova SS-460-60-MDH	63
	ANEXO C – Datasheet módulo fotovoltaico OSDA ODA280-30-P	64
	ANEXO D – Datasheet módulo fotovoltaico ZNSHINE RSM144-7-450M	65
	ANEXO E – Datasheet módulo fotovoltaico Resun RS6E-155M	66
	ANEXO F – Datasheet módulo fotovoltaico Luxen LNVU-550M	67
	ANEXO G – Datasheet controlador de carga EPEVER 10A, 20A,30A,45A,60A	68
	ANEXO H – Datasheet baterias Freedom	69

1 INTRODUÇÃO

Com o fomento dos dispositivos eletrônicos, aumento da população, difusão da robótica e crescimento do mercado de veículos elétricos, a demanda mundial por energia elétrica tende a crescer. Neste cenário os combustíveis fósseis se tornam a principal opção para abastecimento quase instantâneo da rede elétrica, contudo há vários reveses na utilização destes combustíveis. Como alternativa, as fontes renováveis ganham protagonismo nessa corrida pelo abastecimento de energia.

O Brasil, não diferente de outros países, tem como perspectiva um grande aumento na demanda por energia elétrica. Conforme o Ministério de Minas e Energia (MME) e a Empresa de Pesquisa Energética (EPE) em seu Plano Nacional de Energia (PNE) realizado em 2020, a demanda de geração centralizada poderá atingir patamares de 172 mil MW médios no ano de 2050, cerca de 2.5 vezes a mais que no ano de 2015, estes números podem ser ainda maiores caso o mercado de Geração Distribuída (GD), autoprodução e eficiência energética não acompanhem a demanda.

Figura 1 – Evolução da demanda de energia elétrica.



Fonte: MME & EPE (2020).

Com a estimativa de aumento da demanda e a busca por fontes de energia mais limpas a energia solar se torna uma opção cada vez mais atrativa. Segundo MME & EPE (2020)

divergente a outras fontes, a energia solar possui um recurso que é disperso em todo o território brasileiro de forma relativamente homogênea e a disponibilidade do recurso é virtualmente infinita. Conforme Rampinelli & Machado (2021) a radiação mínima exigida para que um projeto fotovoltaico seja viável é de 3 a 4 kWh/(m².dia).

Da Rosa & Gasparin (2016) comparam que:

[...] a média diária de irradiação ao longo de um ano que incide em qualquer parte do território brasileiro irá variar de 4.1 a 6,5 kWh/m². Uma comparação interessante é com outros países que são lideranças na geração de energia através da fonte solar, por exemplo, a Alemanha, que possui uma incidência entre 900 a 1.250 kWh/m² ao ano, ou seja, entre 2,5 a 3,5 kWh/m² de média diária e a Espanha que varia de 1.200 a 1.950 kWh/m² ao ano, correspondendo a 3,28 e 5,3 kWh/m².

Kemerich et al. (2016) apontam que a energia solar fotovoltaica é também uma boa solução para prover o acesso à energia elétrica em localidades isoladas, pois não há a necessidade de grandes linhas de transmissão. Este tipo de sistema pode ser utilizado em bombeamento de água, iluminação pública, eletrificação de edificações de uso coletivo e atendimento domiciliar.

Conforme ANEEL (2024), a matriz elétrica brasileira é contemplada com cerca de 55% de energia proveniente das hidrelétricas. Figueiredo (2021), comenta que as fontes renováveis, como hídrica, eólica e solar, desconsiderando seus impactos, geram uma energia com o custo bastante baixo para a rede, divergindo da energia oriunda de combustíveis fósseis.

Como citado acima, a matriz energética brasileira é constituída majoritariamente de fonte hídrica, o que torna o sistema elétrico brasileiro suscetível a volatilidade da disponibilidade hídrica. Caso ocorra uma crise hídrica no país ocorrerá, conseqüentemente, uma crise energética. Porém a energia solar fotovoltaica pode ser utilizada para mitigação destes cenários, um exemplo é cobrir parte do reservatório de Usinas hidrelétricas (UHEs) e Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCHs) com painéis fotovoltaicos flutuantes (Levy Neto, 2020).

Segundo Levy Neto (2020) a UHE de Itaipu que possui uma área alagada de 1.350 km² e potência instalada de 14 GW (Gigawatts), produziu uma média de 93,6 TWh/ano (Terawatt-hora/ano) entre 2010 e 2016. O autor ainda indica que se cerca de 40% desta área alagada fosse preenchida com painéis fotovoltaicos de potência nominal de 140 watt por m² (W/m²), seriam gerados os mesmos 93,6 TWh/ano.

Neste caso, a energia elétrica produzida por fonte fotovoltaica na UHE de Itaipu serviria para que, em períodos de seca, fosse possível diminuir a vazão das turbinas e economizar água. Outra opção é adaptar a UHE de Itaipu para UHE reversível e utilizar a

energia proveniente dos painéis fotovoltaicos para bombear a água que passa pelas turbinas de volta ao reservatório (Levy Neto, 2020).

A energia elétrica oriunda de fonte solar fotovoltaica tem se firmado como uma boa opção para diversificar a matriz energética dos países, principalmente tropicais como o Brasil. Segundo MME & EPE (2020), a parcela de participação da energia de fonte solar fotovoltaica na capacidade instalada total do Brasil pode chegar a cerca de 16% no ano de 2050.

1.1 OBJETIVOS

Esta seção apresenta o objetivo geral e objetivo específico perseguidos para a elaboração do trabalho.

1.1.1 Objetivo Geral

Este trabalho de conclusão de curso tem por objetivo geral modelar, simular e analisar diferentes configurações e modelos construtivos de sistemas fotovoltaicos através de diferentes topologias de dimensionamento e base de dados.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Estudar conceitos presentes na literatura a respeito do dimensionamento e compatibilidade de diferentes modelos de sistemas fotovoltaicos;
- Estimar e tratar dados do sistema fotovoltaico, comparando tais valores com resultados obtidos através de *software*;
- Dimensionar o sistema fotovoltaico utilizando formulário teórico e dados de irradiação solar disponíveis em referências como o *software* RADIASOL 2;
- Modelar, simular e analisar os diferentes modelos de sistemas fotovoltaicos utilizando o *software* PVsyst.
- Aplicar e comparar diferentes indicadores de desempenho e financeiros, como: Taxa Interna de Retorno (TIR) e *PayBack*.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta seção será abordado os conceitos gerais utilizados para a elaboração do trabalho, passando pelos equipamentos de um sistema fotovoltaico, as diferentes arquiteturas de sistemas fotovoltaicos e seus devidos dimensionamentos.

2.1 EQUIPAMENTOS DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO

Um sistema fotovoltaico é formado por pela junção de diversos equipamentos que mudam de acordo com o dimensionamento e arquitetura do mesmo. Nesta seção serão apresentados os principais equipamentos dos sistemas fotovoltaicos cujas arquiteturas serão abordadas neste trabalho.

2.1.1 Célula Fotovoltaica

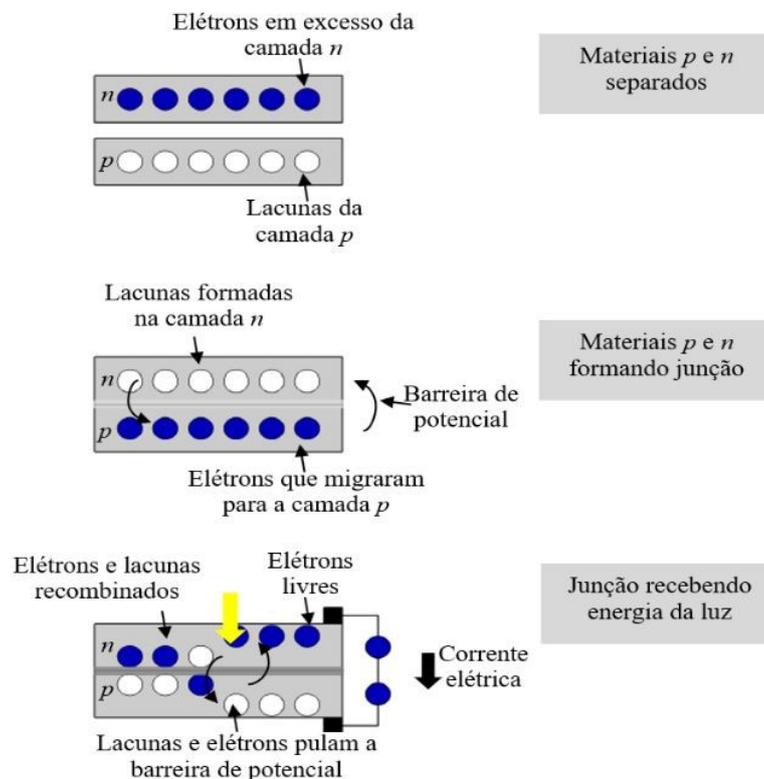
As células fotovoltaicas são os componentes básicos de um sistema de geração solar fotovoltaico elas são constituídas principalmente por semicondutores e estão presentes em todos os módulos fotovoltaicos. Elas são as responsáveis por transformar a energia que irradia do Sol em energia elétrica (Ferioli et al., 2014).

Segundo Rampinelli & Machado (2021), atualmente existem múltiplas tecnologias para a fabricação de células fotovoltaicas, como silício, que representa 90% da produção atual, filmes finos, multijunção, sensibilizadas a corante, células orgânicas e outras. Os diferentes materiais utilizados para a produção formam células com eficiências variáveis, as células de silício possuem eficiência de até 27,6%, as de filmes finos tem eficiência de até 23,4 % e a células de multijunção possuem eficiência de até 47,1% (NREL, 2022).

As células fotovoltaicas podem ser classificadas em três gerações, onde a primeira é caracterizada por células de silício cristalino e arseneto de gálio, ela corresponde as primeiras tecnologias que obtiveram uso comercial. A segunda geração se caracteriza pelos filmes finos, que são materiais aproximadamente 100 vezes mais fino que as lâminas de silício. Por fim a terceira geração onde é utilizado materiais orgânicos, células sensibilizadas por corante e células de multijunção, a terceira geração possui tecnologias cujo objetivos principais são o aumento da eficiência, redução no custo de fabricação e adesão de características para usos específicos. (Bühler et al., 2018).

Conforme Villalva (2015), as células fotovoltaicas são formadas pela união de duas camadas de semicondutores, uma do tipo P e outra do tipo N. O material do tipo P é caracterizado pela falta de elétrons e o material do tipo N apresenta excesso de elétrons e, devido este desequilíbrio de elétrons, os da camada F tendem a fluir em direção à camada P, criando então um campo elétrico no interior da zona de depleção, chamada também de barreira de potencial. A figura 2 ilustra este efeito, chamado de efeito fotovoltaico.

Figura 2 – Ilustração do efeito fotovoltaico.



Fonte: Rampinelli & Machado (2021).

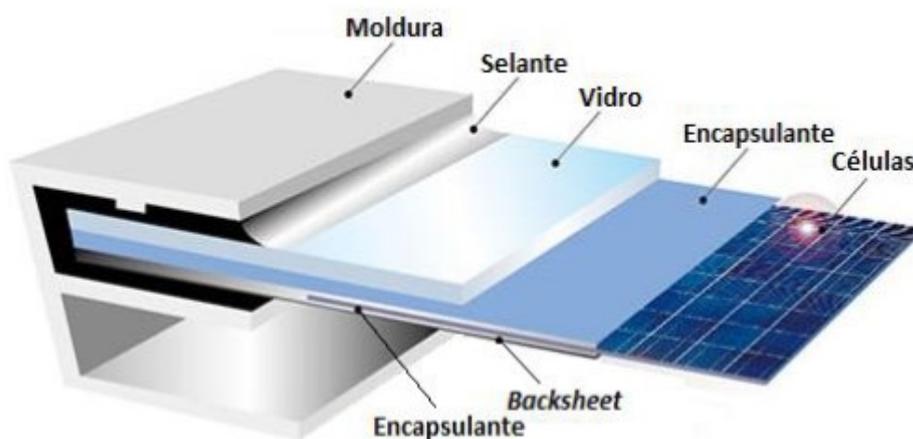
2.1.2 Módulo Fotovoltaico

Segundo Tolmasquim (2016), o elemento principal em um sistema de geração fotovoltaico é a célula fotovoltaica, porém para uso em escala comercial deste modo de obtenção de energia elétrica é necessário o agrupamento e revestimento das células, formando assim os módulos fotovoltaicos (Figura 3).

Os módulos são formados de moldura, selante, vidro, encapsulante, células e backsheet. A moldura é tipicamente feita de alumínio onde através dela é feita a fixação do

módulo. O selante é utilizado para unir as camadas internas dos módulos, o proteger contra choques mecânico e impedir a entrada de gases e umidade. O vidro serve para proteger as células do ambiente, ao mesmo tempo permitir a entrada de radiação solar, ele geralmente é feito com baixo teor de ferro e com uma camada antirreflexiva (Tolmasquim, 2016).

Figura 3 – Composição de um módulo fotovoltaico típico.



Fonte: Tolmasquim (2016).

O encapsulante é um filme, tipicamente de EVA, que protege as células da umidade e materiais externos. As células, como tratado no item anterior, são o componente que transformam a luz solar em energia elétrica. Por fim o *backsheet* é a parte inferior dos módulos, que protege contra umidade e elementos externos, além de oferecer uma isolação elétrica adicional (Tolmasquim, 2016).

Conforme MME & EPE (2020), com o passar dos anos os módulos aumentaram de tamanho, passando de 1,6 m² para 2 m², houve um incremento no número de células e novas configurações surgiram, com o *backsheet* sendo substituído por um outro vidro, isso permite que as células aproveitem a radiação nesta outra face, podendo aumentar sua geração em até 50%.

2.1.3 Inversor

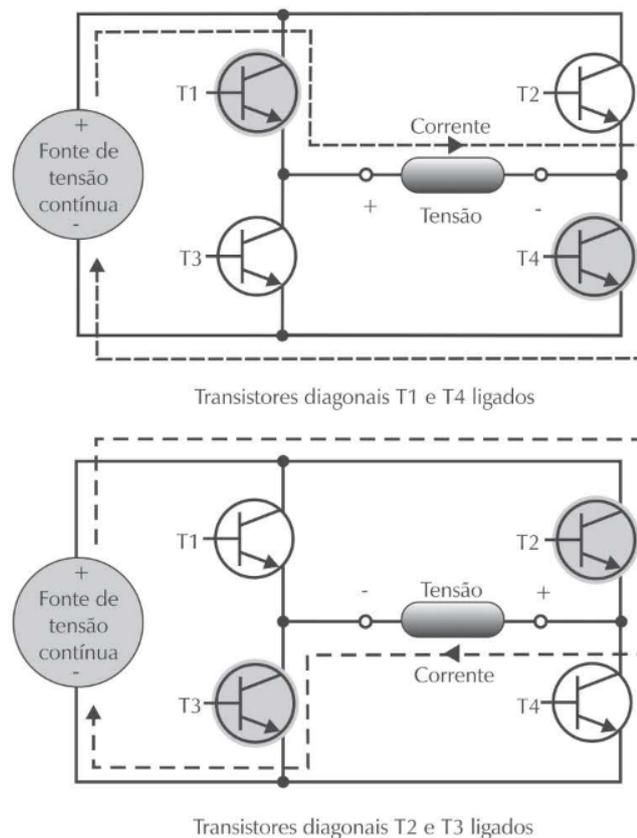
Conforme Villalva (2015), o inversor é dispositivo eletrônico responsável por converter a energia elétrica de tensão e corrente contínuas (CC) em tensão e corrente alternadas (CA). O inversor é essencial em sistemas fotovoltaicos para alimentar tanto os dispositivos de

corrente alternada com a energia elétrica em corrente contínua produzida pelo módulo fotovoltaico ou proveniente do banco de baterias.

A maioria dos aparelhos eletrodomésticos são fabricados para funcionar em conformidade com a rede elétrica de tensão alternada, por exemplo, em tensões de 127 V ou 220V e frequência de 60 Hz. Portanto para alimentar estes aparelhos a partir de um sistema solar fotovoltaico se faz necessário a utilização de um inversor CC-CA (Villalva, 2015).

O princípio de funcionamento de um inversor é baseado em quatro transistores que serão abertos ou fechados para permitir que a tensão e a corrente elétrica, proveniente de fonte contínua, siga para os terminais de saída do inversor (Figura 4). Os transistores são chaves eletrônicas que interrompem ou permitem a circulação da corrente elétrica conforme seu estado desligado ou ligado (Villalva, 2015).

Figura 4 – Funcionamento de um inversor CC-CA.



Fonte: Villalva (2015).

Além da eletrônica básica apresentada acima, Rampinelli & Machado (2021) afirmam que os inversores possuem também sistemas de controle, softwares, múltiplos circuitos, capacitores, indutores, comutadores e outros componentes. Conforme Faranda et al., (2015), os inversores ligados a rede (*on grid*) devem funcionar em conformidade com a rede elétrica e possuírem controles dinâmicos, garantindo a qualidade da energia elétrica injetada e estabilidade sob rápidas oscilações na rede.

Dbeiss et al. (2017) afirmam que o inversor é considerado o dispositivo mais suscetível a falhas em um sistema solar fotovoltaico. Portanto, é de suma importância verificar a compatibilidade entre o módulo, o arranjo dos módulos e o inversor. Para isso são verificados os materiais mais passíveis de sofrer degradação por potencial induzido (PID), o PID é diretamente relacionado à degradações dos módulos e perda de potência (Rampinelli & Machado, 2021).

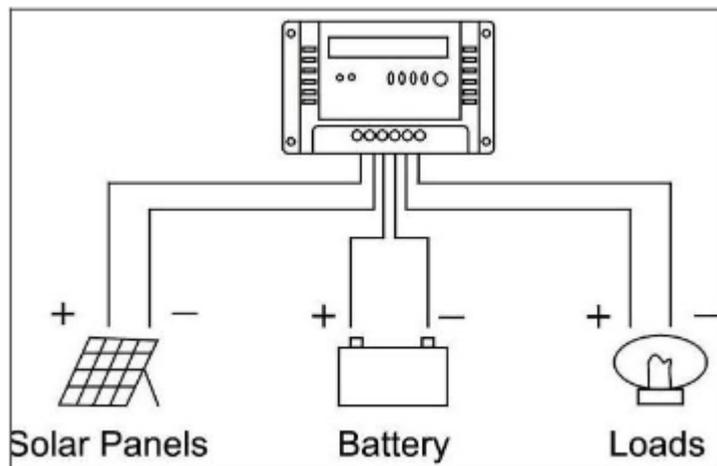
Conforme Rampinelli & Machado (2021), os inversores mais comuns possuem o sistema MPPT, que é um seguidor de máxima potência, o que ocasiona em um maior aproveitamento energético em função da temperatura e irradiância solar, o rastreamento realizado pelo MPPT deve ser em tempo real, onde o ponto de operação deve ser continuamente testado e ajustado.

2.1.4 Controlador de Carga

Um controlador de carga é essencial para sistemas fotovoltaicos desconectado da rede (*off grid*). O controlador de carga é responsável por garantir que os painéis fotovoltaicos não danifiquem o banco de baterias conectado a eles. Existem várias tecnologias empregadas em controladores de carga, as mais simples seria utilizar diodo entre o painel fotovoltaico e a bateria, garantindo que a bateria não descarregue no módulo fotovoltaico durante a noite. Os controladores de carga mais modernos desconectam o módulo fotovoltaico quando as baterias estão completamente carregadas (Reiter et al., 2014).

Conforme Reiter et al. (2014), os sistemas *off grid*, que tipicamente possuem sistema de armazenamento de energia em banco de baterias devem utilizar controladores de carga a fim de proteger o banco de baterias de sobrecarga excessiva, principalmente no período de término da carga quando as baterias necessitam de menor corrente.

Figura 5 – Esquema de ligação de um controlador de carga.



Fonte: (Singh et al., (2017).

Os dois tipos de controladores de carga mais comuns são o tipo PWM e o tipo MPPT. Os controladores de carga tipo PWM alteram a corrente proveniente do módulo fotovoltaico de acordo com a condição da bateria e necessidade de carregamento. Controladores com sistema MPPT buscam sempre a máxima potência do painel fotovoltaico e transformam esta potência para suportar a variação de tensão de carregamento da bateria (Singh et al., 2017).

2.1.5 Bateria

Conforme Almeida et al., (2016), um banco de baterias é importantíssimo em um sistema solar *off grid*. São as baterias que armazenarão parte da energia gerada pelos módulos fotovoltaicos e fornecerão energia no período noturno ou em dias nublados. Uma bateria pode ser definida como:

[...] um conjunto de células ou vasos eletroquímicos, conectados em série e/ou em paralelo, capazes de armazenar energia elétrica na forma de energia química por meio de um processo eletroquímico de oxidação e redução (redox) que ocorre em seu interior. Quando uma bateria carregada é conectada a uma carga elétrica, ocorre o processo reverso, ou seja, uma corrente contínua é produzida pela conversão de energia química em energia elétrica (Pinho & Galdino, 2014).

Conforme Segura-Salas et al., (2023) , existem vários tipos de baterias, formados por diferentes compostos químicos, porém a historicamente utilizada é a de Chumbo-ácido (Pb-ácido), as baterias de Lítio (LiFPO4), mesmo com tecnologia mais moderna e melhor custo-benefício inicial, apresenta defeitos e inchaços em curtos períodos de tempo, aumentando o custo manutenção e troca do banco de baterias. Visto isso, no presente trabalho será utilizado banco de baterias composto por baterias de Chumbo-ácido.

Segundo Pinho & Galdino, (2014), as baterias Chumbo-ácido possuem diferentes classes conforme sua necessidade de manutenção, podendo ser baterias abertas, baterias sem manutenção e baterias seladas. Pinho & Galdino, (2014) completam que as baterias seladas são as mais utilizadas, pois não necessitam de nenhuma manutenção além de não haver risco de contato com o eletrólito.

Dias et al., (2022) afirmam que a vida útil de uma bateria depende do modo de construção e do modelo da mesma, sendo que as mais comuns, chumbo-ácido (Pb-ácido), possuem vida útil mínima em torno de 3 anos.

2.2 SISTEMA *ON GRID*

Os sistemas fotovoltaicos *on grid* são aqueles em que a energia produzida por eles pode ser consumida diretamente pela carga, ou injetada na rede elétrica convencional para ser consumida por outras unidades consumidoras que estão conectadas a rede de distribuição. Este sistema não necessariamente é utilizado com acumuladores e apresenta uma fonte complementar ao sistema de distribuição em que está conectado (Pinho & Galdino, 2014).

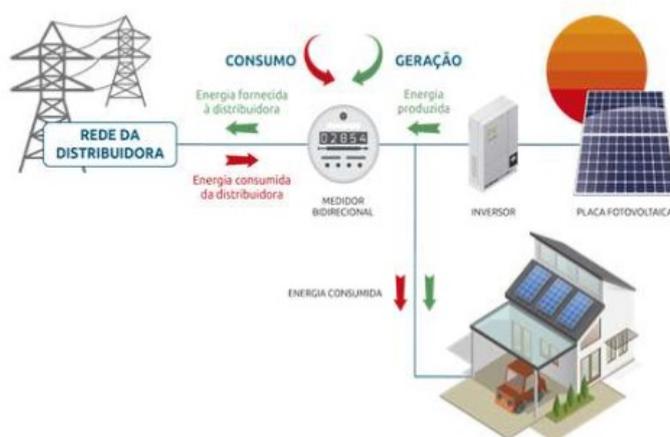
Segundo Pinho & Galdino (2014), os sistemas fotovoltaicos no Brasil, são mais comumente enquadrados como sistemas de Geração Distribuída (GD), estes sistemas são divididos em micro ou minigeradores, os quais são regulamentados pela Resolução Normativa Aneel N°482/2012 e a Lei 14.300 de 06 de janeiro de 2022, que instituiu o marco legal da micro e minigeração distribuída com as seguintes definições:

[...] **microgeração distribuída:** central geradora de energia elétrica, com potência instalada, em corrente alternada, menor ou igual a 75 kW (setenta e cinco quilowatts) e que utilize cogeração qualificada [...], ou fontes renováveis de energia elétrica, conectada na rede de distribuição de energia elétrica por meio de instalações de unidades consumidoras; [...] **minigeração distribuída:** central geradora de energia elétrica renovável ou de cogeração qualificada que não se classifica como microgeração distribuída e que possua potência instalada, em corrente alternada, maior que 75 kW (setenta e cinco quilowatts), menor ou igual a 5 MW (cinco megawatts) para as fontes despacháveis e menor

ou igual a 3 MW (três megawatts) para as fontes não despacháveis, conforme regulamentação da Aneel, conectada na rede de distribuição de energia elétrica por meio de instalações de unidades consumidoras.

Conforme Pinho & Galdino (2014), a energia gerada pelo sistema fotovoltaico *on grid*, que não for instantaneamente consumida pela carga da unidade consumidora, é injetada na rede elétrica e contabilizada pela concessionária de energia por meio de um medidor de energia bidirecional, como na ilustração abaixo.

Figura 6 – Esquema de arquitetura de um sistema fotovoltaico *on grid*.



Fonte: Lima Junior (2019).

2.3 SISTEMA *OFF GRID*

Segundo Lima Junior (2019), o sistema *off grid* se diferencia do anterior por ter o gerador de energia desconectado da rede de distribuição, sendo necessário o consumo instantâneo da energia pela carga, ou o armazenamento em baterias.

O sistema *off grid*, também chamado de sistema isolado é composto por alguns elementos, sendo eles: módulos fotovoltaicos, controlador de carga, baterias e inversor. Este tipo de configuração é ilustrado abaixo (Nascimento, 2019).

O módulo fotovoltaico é responsável pela geração da corrente contínua (CC) que será distribuída pelo sistema. O controlador de carga direciona para qual elemento a corrente deve ir, para o banco de baterias ou para o inversor de tensão. A bateria é um elemento armazenador da corrente, e quando o sistema não está gerando energia elétrica, como acontece à noite, o banco de baterias supre a falta do gerador, fornecendo tensão que alimentará o inversor de tensão e as cargas de forma geral. Por fim, o inversor de tensão é responsável por converter a tensão contínua para uma tensão alternada (Nascimento, 2019).

Figura 7 – Esquema de arquitetura de um sistema *off grid*.

Fonte: Lima Junior (2019).

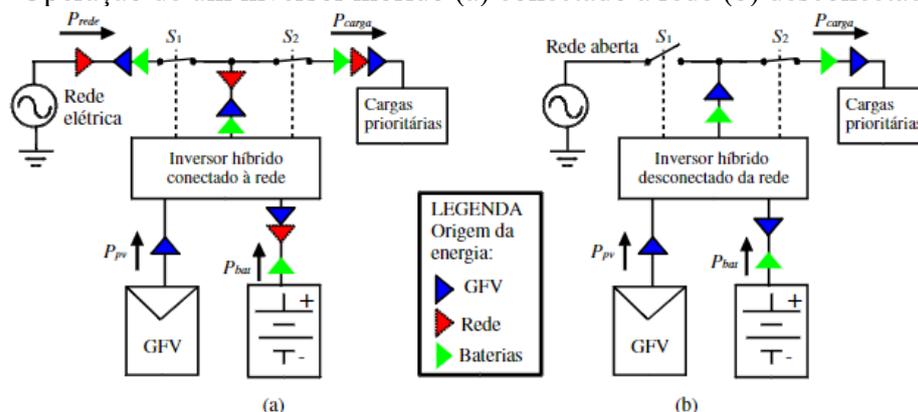
Esta arquitetura de sistema fotovoltaico é comumente utilizada em sistemas de bombeamento de água, geladeiras para armazenamento de vacinas, postes de iluminação, cercas elétricas, entre outras aplicações (Da Silva, 2021).

2.4 SISTEMA HÍBRIDO

Os sistemas híbridos possuem características dos sistemas *on* e *off grid*, funcionam conectados à rede, injetando energia na rede elétrica, mas também podem fornecer energia a cargas primárias em caso de falta da rede elétrica (Bellinaso & Michels, 2016).

Um sistema híbrido pode ser definido como um sistema que possua um sistema *on grid* e um sistema *off grid*, ou um sistema que possua um inversor híbrido. Conforme Bellinaso & Michels (2016), o inversor híbrido pode operar conectado ou desconectado da rede. Seu funcionamento básico é ilustrado na figura 8.

Figura 8 – Operação de um inversor híbrido (a) conectado à rede (b) desconectado.



Fonte: Bellinaso & Michels, (2016).

Segundo Bellinaso & Michels (2016), enquanto conectado à rede o inversor híbrido funciona da mesma forma que um inversor *on grid* convencional, em conformidade com a NBR 16149. O inversor deve adequar a corrente de forma senoidal, reduzir o conteúdo harmônico e não sofrer com distorções de tensão e curto-circuito.

Quando ocorre a falta de rede ou a tensão da mesma se encontra em desconformidade com a NBR 16149, o inversor híbrido trabalhará desconectado da rede elétrica para suprir o consumo das cargas prioritárias. Durante o funcionamento desconectado da rede o inversor híbrido controla a tensão de saída, mas pode apresentar controle e medição de corrente para desligamento em caso de curto-circuito ou sobrecorrente (Bellinaso & Michels, 2016).

Sobre o funcionamento de um sistema com inversor híbrido Pereira & Carvalho (2021) afirmam que:

Nesse sistema, os módulos fotovoltaicos, conectados ao inversor, recebem irradiância solar e produzem sinais elétricos, tensão e corrente contínuas (c.c.). O inversor híbrido, por sua vez, incorpora as funções de controle de carga e descarga do banco de baterias a ele ligado, e de conversão dos sinais de corrente contínua para corrente alternada (c.a.), sincronizando-se com a rede elétrica c.a. A energia é utilizada pelas cargas locais, sendo o excedente armazenado no banco de baterias. Caso as baterias estejam totalmente carregadas, a energia é injetada na rede elétrica da concessionária local.

Bellinaso & Michels (2016) completam que a energia armazenada nas baterias pode ser utilizada para alimentar as cargas ou injetar na rede. Porém injetar na rede a energia armazenada nas baterias não é economicamente viável, pois o custo da energia proveniente da rede é menor que o custo da energia armazenada nas baterias.

2.5 DIMENSIONAMENTO

Conforme Rampinelli & Machado (2021), o bom dimensionamento do sistema solar fotovoltaico é crucial para que o projeto seja confiável e entregue a geração de energia estimada, para realizar o bom dimensionamento primeiramente deve ser levantadas características essenciais como localização de instalação, direcionamento e inclinação do telhado.

Devido as características diferentes entre os tipos de sistemas fotovoltaicos abordadas anteriormente nos itens 2.2, 2.3 e 2.4, cada arquitetura de sistema fotovoltaico possui uma forma de dimensionamento distinta, portanto, nos itens seguintes iremos abordar cada uma delas. Rampinelli & Machado (2021) apontam a existência de vários softwares que fazem este dimensionamento, porém é imprescindível realizá-lo na prática.

2.5.1 Dimensionamento do sistema *on grid*

Rampinelli & Machado (2021) orientam que para iniciar o dimensionamento de um sistema solar *on grid* deve-se primeiramente analisar a fatura de energia da Unidade Consumidora (UC), a partir dela serão retirados os dados de tipo e tensão de fornecimento, grupo tarifário e histórico de consumo. Após analisado estas informações, aliadas a localização, direcionamento e inclinação do local de instalação, deve-se utilizar a seguinte equação para encontrar a potência de pico do sistema fotovoltaico.

$$P_{fv} = \frac{E \cdot P_{sol}}{G_{poa} \cdot PR} \quad [1]$$

Onde:

P_{fv} = potência de pico do sistema fotovoltaico (kWp);

E = Energia consumida diariamente pelas cargas (kWh/dia);

P_{sol} = Irradiância de referência (1 kW/m²);

G_{poa} = Irradiância diária do plano dos módulos (kWh/m².dia);

PR = Performance Ratio, coeficiente de desempenho (adimensional).

Sobre o coeficiente de desempenho (PR) de um sistema solar fotovoltaico Pinho & Galdino (2014) afirmam que:

A Performance Ratio é uma relação entre o desempenho teórico do sistema fotovoltaico e o desempenho real dele. Se não houvesse nenhuma perda no sistema o valor de PR seria 1, porém como há diversas variantes que implicam no desempenho do sistema, como sombreamento, sujeira e perdas elétricas, podemos considerar que o PR varia entre 75 e 80% para sistemas bem dimensionados.

Após obter a potência de pico do sistema solar fotovoltaico para obter a quantidade de módulos necessários basta dividir a potência de pico pela potência nominal de cada módulo. Segundo Pinho & Galdino (2014), para dimensionamento do inversor deve-se verificar o Fator de Dimensionamento de Inversores (FDI), que pode ser obtido pela equação abaixo:

$$FDI = \frac{P_{nom}}{P_{fv}} [2]$$

Em que:

FDI = Fator de dimensionamento de inversores (adimensional);

P_{nom} = Potência nominal do inversor (kW);

P_{fv} = Potência do sistema fotovoltaico (kWp).

Pinho & Galdino (2014) ainda completam que o valor de FDI recomendado deve ficar entre 0,75 e 0,85.

2.5.2 Dimensionamento do sistema *off grid*

Parte do dimensionamento do sistema solar fotovoltaico *off grid* é análogo ao dimensionamento do sistema solar *on grid*, dependerá da finalidade do sistema de geração. Porém as particularidades deste tipo de sistema se encontram no dimensionamento do controlador de carga e do banco de baterias.

Dias et al. (2022) discorrem que para dimensionar o controlador de carga ideal é crucial possuir o número de *strings* em paralelo (N_{string}) e a corrente de curto-circuito (I_{sc}) do módulo a ser utilizado, deste modo pode-se utilizar a equação abaixo para encontrar a corrente mínima que o controlador de carga precisa suportar ($I_{controlador}$).

$$I_{controlador} = 1,25 \cdot N_{string} \cdot I_{sc} [3]$$

Conforme Dias et al. (2022), o dimensionamento do banco de baterias deve iniciar com o levantamento da quantidade de energia armazenada no banco de baterias, para isso utiliza-se a seguinte formula:

$$EA = \frac{ECD.Nautonomia}{Pd} \quad [4]$$

Onde:

EA = Energia armazenada no banco de baterias (Ah);

ECD = Energia diária consumida pelas cargas (Ah/dia);

Nautonomia = Autonomia desejada para o sistema (dia);

Pd = Profundidade de descarga da bateria escolhida.

Dias et al. (2022) completam que para saber o número de baterias em série (NBS) pode-se dividir a tensão do banco de baterias (V_{banco}) pela tensão nominal da bateria ($V_{bateria}$), conforme equação abaixo:

$$NBS = \frac{V_{banco}}{V_{bateria}} \quad [5]$$

Para determinar o número de baterias em paralelo (NBP) utiliza-se a seguinte equação (Dias et al., 2022):

$$NBP = \frac{EA}{Cbateria} \quad [6]$$

Em que:

EA = Energia armazenada no banco de baterias (Ah);

Cbateria = Capacidade da bateria em 20 horas (Ah);

Como abordado anteriormente no item 2.1.3, o inversor *off grid*, por não ser conectado à rede, é um dispositivo mais simples em comparação aos inversores *on grid* ou híbridos.

2.5.3 Dimensionamento do sistema híbrido

O dimensionamento de sistemas solares fotovoltaicos híbridos, sejam eles *off grid* + *on grid* ou com inversores híbridos, são uma junção dos dimensionamentos dos sistemas *on grid* e *off grid*, portanto não possuem nenhuma peculiaridade no seu dimensionamento.

2.5.4 Compatibilidade módulo e inversor

No momento de determinar o inversor a ser utilizado, além do FDI mencionado anteriormente, deve-se verificar alguns outros pontos como tensão CA, número de fases, faixa de tensão CC de operação e corrente máxima CC. Estes parâmetros irão influenciar na compatibilidade entre o módulo e inversor, além de determinarem as dimensões das *strings*, que são ligações em série de módulos.

Vitor et al. (2022) indicam que para determinar a organização das *strings* e suas tensões máximas e mínimas deve-se verificar as tensões de circuito aberto das mesmas em situações de temperatura máxima e mínima em que o sistema será submetido. As tensões de circuito aberto nas temperaturas mínimas e máximas podem ser obtidas com a seguinte equação:

$$Vocprev = Voc. \left(1 - \left(\frac{Ktvoc.\Delta T}{100} \right) \right) \quad [7]$$

Onde:

Vocprev = Tensão de circuito aberto prevista (V);

Voc = Tensão de circuito aberto em situação padrão de teste (STC) (V);

Ktvoc = Coeficiente de temperatura da tensão de circuito aberto (%/°C);

ΔT = Diferença de temperatura máxima e mínima entre a temperatura de célula STC (°C).

Para a determinação da quantidade de módulos que irão compor a *string*, deve-se atentar que a tensão da *string* esteja dentro da faixa de tensão de MPPT indicada na folha de dados (*datasheet*) do inversor pelo fabricante. Pode-se utilizar a seguinte equação para determinar o número de módulos (Pinho & Galdino, 2014):

$$\left(\frac{VMPPTmin}{VocTmax} \right) < Nms < \left(\frac{VMPPTmax}{VocTmin} \right) \quad [8]$$

Em que:

VMPPTmín = Tensão mínima da entrada MPPT (V);

VMPPTmax = Tensão máxima da entrada MPPT (V);

VocTmáx = Tensão de circuito aberto em temperatura máxima (V);

VocTmín = Tensão de circuito aberto em temperatura mínima (V);

Nms = Número de módulos em série.

Verificado e garantido que a tensão das *strings* estão de acordo com a faixa de tensão MPPT do inversor, deve-se atentar a corrente de curto-circuito (I_{sc}) e corrente de máxima potência (I_{mp}) do módulo escolhido e garantir que elas são menores ou iguais que as correntes I_{sc} e I_{mp} informadas pelo fabricante do inversor.

3 MATERIAIS E METODOLOGIA

3.1 SISTEMAS PROPOSTOS

O presente trabalho irá dimensionar, simular e analisar sistemas solares fotovoltaicos de diferentes tipos construtivos, inicialmente, o trabalho fez parte de um projeto de pesquisa e visava suprir a necessidade energética de uma estufa automatizada a ser construída no campus do Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC) no município de Santa Rosa do Sul, este vínculo se perdeu, mas mantém-se o escopo do projeto. Foi considerado a instalação do sistema fotovoltaico em telhado orientado ao Norte, com inclinação de 25° e sem sombreamento. Considerou-se ainda que o local de instalação possuirá uma carga prioritária de 3A na tensão 12V a qual não deve ficar sem alimentação em nenhum momento do dia. Outra peculiaridade deste sistema solar fotovoltaico é que para a aquisição do mesmo fora repassado pelo Governo Federal do Brasil um valor de R\$ 45.000,00, o que torna o dimensionamento do mesmo um pouco diferente, visto que ele partirá de orçamentos realizados com integradores.

3.2 SOFTWARE RADIASOL 2

Para a obtenção de dados sobre a irradiação solar média da cidade de Santa Rosa do Sul foi utilizado o auxílio do software RADIASOL 2. Este *software* faz parte do pacote SOLARCAD, um conjunto de softwares desenvolvidos para auxiliar em projetos de energia solar, tanto térmicos quanto fotovoltaicos. Este software foi desenvolvido pelo Laboratório de Energia Solar (LABSOL) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) e através de modelos matemáticos disponíveis na literatura ou desenvolvidos por integrantes do laboratório fornece dados de irradiação em diversas localidades do Brasil em função do azimute e inclinação do módulo (UFRGS, 2023).

Através deste *software*, foi possível obter dados de irradiação solar média para a cidade de Florianópolis/SC, cidade utilizada como referência para os dados, visto que o desvio entre

os valores da capital do estado de Santa Catarina e Santa Rosa do Sul são considerados pouco relevantes. Foram adicionados no Software o desvio azimutal do sistema (O°) e a inclinação de instalação dos módulos (25°). A Tabela 1 expõem tais valores de irradiância inclinada obtidos com o auxílio do software RADIASOL 2:

Tabela 1 – Valores de Irradiância inclinada para Florianópolis obtidos com o software RADIASOL 2.

Mês	Irradiância (kWh/m²/dia)
Janeiro	5,64
Fevereiro	5,60
Março	5,38
Abril	4,86
Mai	4,24
Junho	3,87
Julho	3,86
Agosto	4,38
Setembro	4,70
Outubro	5,14
Novembro	5,55
Dezembro	5,78

Fonte: Elaborado pelo autor.

É possível notar que o comportamento dos dados é como esperado, com menor incidência solar nos meses entre o final do outono e todo o período de inverno, período em que há menor energia emitida pelo Sol e maior incidência nos meses de verão, período com maior disponibilidade de energia solar. Estes dados são diferentes para cada localidade, de forma que a latitude em que se encontra o local de estudo tem maior influência no resultado obtido.

3.3 SOFTWARE PVSYST

O *software* PVSyst é uma ferramenta amplamente utilizada para a análise e simulação de sistemas de energia solar fotovoltaica. O *software* permite que engenheiros e projetistas dimensionem sistemas solares fotovoltaicos com precisão, levando em consideração vários

parâmetros, como a localização geográfica, inclinação e orientação dos painéis, a eficiência dos módulos solares e as condições climáticas locais. Parâmetros essenciais para garantir que um sistema solar seja dimensionado adequadamente para atender às necessidades de energia de um edifício ou instalação (PVSYST, 2023).

Com o auxílio do *software* foi possível obter o *Performance Ratio* (PR) do sistema analisado. Como dados de entrada no programa utilizou-se a localização, orientação e inclinação do local de instalação do sistema, além de inserir o arranjo fotovoltaico (composição e quantidade de *strings*), modelo dos módulos e inversor. Na Tabela 2 encontra-se os valores de PR médios mensais obtidos com o auxílio do software PVSYST:

Tabela 2 – Valores de PR obtidos com o auxílio do software PVSYST.

Mês	Performance Ratio (PR)
Janeiro	0,812
Fevereiro	0,812
Março	0,822
Abril	0,803
Mai	0,706
Junho	0,661
Julho	0,685
Agosto	0,795
Setembro	0,844
Outubro	0,833
Novembro	0,820
Dezembro	0,811

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os valores de PR obtidos e expostos na Tabela 2 estão de acordo com o esperado para a região, conforme dados construtivos do local de instalação. Vale ressaltar que os parâmetros que mais influenciam no PR seriam o sombreamento sobre os módulos fotovoltaicos e a orientação do sistema.

3.4 INDICADORES DE DESEMPENHO

Conforme Kroth & Rampinelli, (2020), os indicadores de desempenho são capazes de caracterizar e avaliar sistemas, eles são afetados pelas características do mesmo e servem de referência para avaliar ou diagnosticar o seu funcionamento. No caso dos sistemas fotovoltaicos, os indicadores estão relacionados à energia gerada, produtividade esperada e perdas (Prudencio, 2020).

Como o principal indicador de desempenho energético será utilizado o índice de produtividade do sistema fotovoltaico (YF). Esse indicador é definido como a razão entre a energia elétrica gerada pelo sistema fotovoltaico por cada kWp instalado, conforme equação de Rampinelli, (2010):

$$YF = \left(\frac{1}{P_{std}} \right) \cdot \left[\frac{1}{r} \cdot \int_0^r Pca(t) \cdot dt \right] \quad [9]$$

Para análise de viabilidade econômica e comparação entre os tipos de sistemas propostos também serão utilizados indicadores financeiros como o *Payback* e a Taxa Interna de Retorno (TIR). Arco-Verde & Amaro, (2014) definem *Payback* e TIR como:

O período de *payback* é o tempo necessário para retornar o capital investido, ou seja, é o tempo decorrido entre o investimento inicial e o momento no qual o lucro líquido acumulado se iguala a esse valor. [...] A TIR é a taxa de juros que iguala o valor presente dos benefícios ao valor presente dos custos, ou seja, iguala o VPL a zero, podendo ser entendida como a taxa percentual do retorno do capital investido. Se a TIR for maior do que a taxa de desconto exigida pelo investimento, conclui-se pela viabilidade do projeto.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Conforme o valor de R\$ 45.000,00 destinado pelo Governo Federal do Brasil para a aquisição e instalação do sistema solar fotovoltaico, fora realizado o dimensionamento dos componentes do sistema *off grid* conforme orçamentos em plataformas de marketplace e o sistema *on grid* e híbrido com empresas integradoras.

4.1 ORÇAMENTOS

Nesta seção serão apresentados os orçamentos realizados para cada diferente arquitetura de sistema fotovoltaico.

4.1.1 Orçamentos sistema *on grid*

Para os sistemas solares fotovoltaicos *on grid* os orçamentos foram realizados diretamente com as empresas integradoras, para isso foi estipulado um sistema de 10 kWp como base para verificação do preço médio, a seguir é apresentado os valores obtidos com algumas empresas que atendem a cidade de Santa Rosa do Sul.

Tabela 3 – Orçamentos realizados com empresas integradoras.

Empresa Integradora	Valor do sistema referência
A	R\$ 56.000,00
B	R\$ 51.600,00
C	R\$ 55.000,00
D	R\$ 46.000,00
E	R\$ 53.000,00
F	R\$ 49.500,00

Fonte: Elaborado pelo autor.

Conforme tabela acima, para realização do dimensionamento do sistema *on grid* utiliza-se o valor obtido pela média aritmética simples de R\$ 51.850,00 para um sistema de 10 kWp. A partir deste valor consegue-se determinar o valor médio por kWp, obtido dividindo o valor médio pela potência de pico do sistema de referência, obtém-se então o valor de 5.185 R\$/kWp para o sistema *on grid* no primeiro semestre de 2022. Neste mesmo período a Greener, (2022) apontou a média do valor do kWp instalado em sistemas residenciais no Brasil como 4.880 R\$/kWp, portanto o valor médio obtido para a cidade de Santa Rosa do Sul foi aproximadamente 6,25% maior que a média do país no período analisado.

Os orçamentos da Tabela 3 foram obtidos no primeiro semestre de 2022, portanto faz-se necessário uma atualização dos mesmos. Porém por não obter respostas das mesmas empresas durante o primeiro semestre de 2023, fora utilizado a pesquisa de mercado realizada

pela Greener como base para estimativa de preços. Segundo Greener, (2023), o valor médio do kWp no Brasil em junho de 2023 é de 3.680 R\$/kWp, utilizando o mesmo desvio de 6,25% no preço para a cidade de Santa Rosa do Sul verificado no primeiro semestre, estima-se que o valor médio do kWp instalado na cidade de Santa Rosa do Sul em junho de 2023 é de 3.910 R\$/kWp.

A partir do valor obtido anteriormente para o kWp na cidade de Santa Rosa do Sul em 2023, nota-se que o sistema solar fotovoltaico *on grid* de 11,50 kWp pode ser adquirido com o valor de R\$ 45.000,00 destinado a compra do mesmo.

4.1.2 Orçamentos sistema *off grid*

Os orçamentos referentes ao sistema *off grid* foi realizado em ambiente de empresas de marketplaces como Magalu, Mercado Livre, Amazon e Americanas os principais componentes do sistema, que são: módulos fotovoltaicos, baterias, inversor e controlador de carga.

Foram realizados orçamentos de diversos modelos diferentes de módulos, cada um com suas características elétricas diferentes, as fichas técnicas dos módulos estudados se encontram nos anexos A, B, C, D, E, F e na Figura 10. Abaixo segue Tabela 4 com os valores médios obtidos em marketplaces dos módulos selecionados para realização do presente trabalho.

Tabela 4 – Preço médio dos módulos utilizados no estudo.

Fabricante	Modelo	Potência	Preço Médio Unitário
Risen	RSM144-7-450M	450Wp	R\$ 1.286,28
Sunova	SS-460-60-MDH	460Wp	R\$ 1.005,85
OSDA	ODA280-30-P	280Wp	R\$ 687,28
ZNSHINE	ZXP6-HLD144	340Wp	R\$ 709,60
Resun	RS6E-155M	155Wp	R\$ 465,61
Luxen	LNVU-550M	550Wp	R\$ 1.169,63
JA Solar	JAM72D30-540/MB	540Wp	R\$ 880,26

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os orçamentos de controladores de carga, inversor e baterias seguiram a mesma métrica dos orçamentos realizados para os módulos fotovoltaicos, a ficha técnica dos

controladores de carga estudados está presente no anexo G, nas tabelas 5 e 6 seguem os valores médios obtidos para cada um dos componentes.

Tabela 5 – Valores médios obtidos para os controladores de carga selecionados.

Fabricante	Corrente de Carga	Tensão	Preço Médio Unitário
EPEVER	10A	12/24V	R\$ 146,90
EPEVER	30A	12/24V	R\$ 366,90
EPEVER	45A	12/24V	R\$ 472,42
EPEVER	60A	24/24V	R\$ 566,90

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 6 – Valores médios obtidos para as baterias selecionadas.

Fabricante	Modelo	Capacidade	Preço Médio Unitário
Freedom	DF4100	240Ah	R\$ 1.779,90
Freedom	DF2500	165Ah	R\$ 1.643,98
Moura	12ms234	220Ah	R\$ 2.862,82
Moura	12mn150	150Ah	R\$ 1.344,95
Duracell	12TE220	230Ah	R\$ 4.676,38

Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir dos valores expostos nas tabelas 4, 5 e 6 foi possível o dimensionamento do sistema híbrido *on + off*. Não será necessário a utilização de inversor *off grid*, pois o sistema *off grid* será utilizado para alimentar a carga em corrente contínua. O dimensionamento completo do sistema *off grid* será abordado no ítem 4.2.2.

4.1.3 Orçamentos sistema com inversor híbrido

Segundo Camila Figueiredo, Engenheira Eletricista, a partir do primeiro semestre de 2023 houve uma reformulação no mercado oriunda da lei 14.300 e novas tecnologias se tornaram muito mais acessíveis, hoje, por exemplo, diversos fornecedores de kits fotovoltaicos contam com inversores híbridos com potência de até 10 kW a preços competitivos com os inversores *on grid* de mesma faixa de potência. Isso faz com que o cliente final pague o mesmo valor do sistema solar fotovoltaico *on grid*, porém com um inversor híbrido com maior tecnologia empregada e flexibilidade de autonomia.

Para o desenvolvimento do presente trabalho considerou-se que o valor que compreende: módulos, inversor e instalação, do sistema solar fotovoltaico com inversor híbrido seja o mesmo do sistema *on grid*. Todavia para a alimentação da eletrônica básica será necessário a utilização de um banco de baterias, sendo esta possibilidade de autonomia da rede elétrica o principal diferencial do sistema em questão.

4.2 DIMENSIONAMENTO DOS SISTEMAS

A partir do orçamento de R\$ 45.000,00 disponibilizado para compra do sistema solar foram elaborados os dimensionamentos referentes a cada tipo de sistema.

4.2.1 Dimensionamento do sistema *on grid*

O sistema *on grid*, foi dimensionado conforme o valor do kWp calculado no item 4.1.1. O sistema terá potência de pico de 11.50 kWp, a potência de pico (P_{fv}), também pode ser determinada pela multiplicação entre a potência do módulo (P_m) e o número de módulos que compõem o sistema (N_m), conforme equação abaixo:

$$P_{fv} = P_m * N_m \quad [10]$$

A partir da potência de pico do sistema *on grid*, fora utilizado o Fator de Dimensionamento do Inversor (FDI) para encontrar a potência do inversor recomendado para o sistema (P_{nom}), conforme equação 2. Utilizou-se o FDI de 0,80 para selecionar o inversor adequado ao sistema fotovoltaico proposto.

$$P_{nom} = 9,2 \text{ kW}$$

Pinho & Galdino, (2014), indicam que o FDI recomendado deve ficar entre 0,75 a 0,85, portanto conclui-se que o inversor utilizado neste sistema solar fotovoltaico deva possuir potência nominal entre 9 a 10 kW.

Para realização das simulações teóricas e no software PVSyst, fora selecionado o módulo da fabricante JA Solar modelo JAM72D30-540/MB e o inversor da fabricante SOLIS

modelo S5-GR1P9K. Portanto faz-se necessário a verificação de compatibilidade entre módulo e inversor. Os parâmetros elétricos característicos de cada componente seguem abaixo:

Tabela 7 – Parâmetros elétricos dos inversores Solis.

Modelo	S5-GR1P6K	S5-GR1P7K	S5-GR1P8K	S5-GR1P9K
Parâmetros de entrada em Corrente Contínua				
Potência máxima	10.2 kW	11.9 kW	13.6 kW	15.3 kW
Tensão máxima	600 Vcc			
Tensão nominal	330 Vcc			
Tensão de partida	120 Vcc			
Tensão MPPT	90-520 Vcc	100-500 Vcc		
Corrente máxima	14 A/14 A	14 A/14 A/ 14 A		
Corrente Curto-Circuito	22 A/22 A	22 A/22 A/22 A		
MPPT/n° de entradas	2/2	3/3		
Parâmetros de saída em Corrente Alternada				
Potência máxima	6 kW	7.7 kW	8.8 kW	9.9 kW
Potência nominal	6 kW	7 kW	8 kW	9 kW
Tensão nominal	1/N/PE 220 / 230 V			
Frequência nominal	50 / 60 Hz			
Corrente nominal	27.3 A	31.8 A	36.4 A	40.9 A
Corrente máxima	27.3 A	33.7 A	36.6 A	41.3 A

Fonte: Solis, (2023).

Tabela 8 – Parâmetros elétricos do módulo JA Solar.

Modelo	JAM72D30-540/MB
Potência máxima	540 W
Tensão circuito aberto	49.6 V
Tensão máxima potência	41.64 V
Corrente curto circuito	13.86 A
Corrente máxima potência	12.97 A
Eficiência do módulo	20.9 %
Coefficiente Temperatura Isc	+0.045 %/°C
Coefficiente Temperatura Voc	-0.275 %/°C

Fonte: JA Solar, (2023).

A compatibilidade entre módulo e inversor deve ser verificada conforme os parâmetros de corrente, tensão e temperaturas máximas e mínimas. Segundo a Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina (EPAGRI, 2023), a temperatura máxima observada na cidade de Urussanga foi de 42,2°C e a mínima foi de 4,6°C negativos. Por conta da proximidade entre as cidades de Urussanga e Santa Rosa do Sul, o desvio entre estas temperaturas na cidade de Santa Rosa do Sul seria baixo, optou-se então por utilizar estas temperaturas para realização dos cálculos.

Conforme a equação 7 é possível calcular a tensão de circuito aberto prevista (V_{ocprev}). Onde V_{oc} e K_{tvoc} são obtidos no datasheet do módulo disponibilizado pelo fabricante, conforme tabela 8 os valores para os parâmetros são: $V_{oc} = 49,60 \text{ V}$ e $K_{tvoc} = -0,275\%/^{\circ}\text{C}$. Portanto, abaixo segue os resultados obtidos para tensão de circuito aberto em temperatura máxima (V_{ocTmax}) e em temperatura mínima (V_{ocTmin}).

$$V_{ocTmax} = 47,25 \text{ V}$$

$$V_{ocTmin} = 53,63 \text{ V}$$

Para determinação do número de módulos permitido por entrada CC do inversor utiliza-se a equação 8, cujo resultado segue abaixo:

$$(2,11) < N_{ms} < (9,32)$$

Em que $V_{MPPTmin}$ e $V_{MPPTmax}$ são fornecidos pelo fabricante na tabela 7.

Outra verificação necessária é em relação a corrente de curto-circuito que deve ser maior ou igual a corrente máxima de operação do inversor. Conforme a Figura 10 a corrente de curto-circuito (I_{sc}) do módulo é de 13,86A e segundo a tabela 7 a corrente máxima de operação do inversor é de 14A por entrada CC. Portanto, o sistema é compatível desde que seja utilizado o mínimo de 3 e o máximo de 9 módulos por entrada CC.

Sendo que a máxima potência de pico do sistema *on grid* cujo valor de R\$ 45.000,00 seja capaz de adquirir é de 11,50 kWp, é possível determinar o número de módulos (N_{ms}) conforme equação abaixo:

$$N_{ms} = P_p/P_m \text{ [11]}$$

$$Nms = 21,30$$

Portanto o número de módulos do sistema *on grid* é de 21 módulos, conforme figura 9 o inversor selecionado possui três entradas CC, totalizando 7 módulos por entrada CC. Todavia, diante dos cálculos realizados, o sistema é plenamente compatível e possui potência de 11,34 kWp.

4.2.2 Dimensionamento do sistema híbrido *on + off grid*

O sistema *off grid* será utilizado para alimentação da eletrônica básica com carga prioritária de 3A e tensão de 12V em corrente contínua, portanto fora realizado o dimensionamento do sistema *off grid* necessário para suprir esta demanda energética. Optou-se por utilizar o método do mês crítico, conforme necessidade de alimentação da eletrônica básica em todo período do ano.

O consumo diário da eletrônica básica (ECD) pode ser obtido conforme equação abaixo em que “I” é a corrente consumida pela eletrônica básica, “t” é o tempo de consumo em horas e “nbat” é a eficiência da bateria. Segundo Dias et al., (2022), a eficiência média de baterias estacionárias é de 85%.

$$ECD = \frac{I * t}{nbat} \quad [12]$$

$$ECD = 84,71 \text{ Ah/dia}$$

A quantidade de módulos em série (NMS) e em paralelo (NMP) pode ser obtida conforme equações abaixo:

$$NMP = ECD / Ld \quad [13]$$

$$NMS = 1,2 * \left(\frac{Vsist}{Vmpptmax} \right) \quad [14]$$

Onde:

ECD = Consumo diário [Ah/dia];

Vsist = Tensão do sistema [V];

Vmpptmax = Tensão de MPPT do módulo na temperatura máxima de operação [V];

L_d é o parâmetro definido conforme equação abaixo, em que “ I_c ” é a irradiância diária do mês de menor incidência solar e “ I_{mppt} ” é a corrente do ponto de máxima potência (MPPT) do módulo utilizado.

$$L_d = I_c * I_{mppt} \quad [15]$$

Conforme tabela 1 o mês crítico, ou seja, o mês de menor incidência solar analisado é o mês de julho, que possui irradiância média de 3,86 kWh/m²/dia. Diante do valor de irradiância média diária para o mês crítico, foram obtidos os parâmetros L_d e quantidade de módulos em paralelo (NMP) para os módulos analisados, conforme Tabela 4. O valor de I_{mppt} é informado pelo fabricante no datasheet de cada módulo. O valor de $V_{mpptmax}$ pode ser obtido conforme equação 8, a temperatura máxima de operação do módulo é informada pelo fabricante, por padrão de mercado ela é de 85°C. A tensão do sistema foi definida em 12V por ser a tensão de alimentação da eletrônica básica. Na tabela 9 segue os dados obtidos:

Tabela 9 – Parâmetros L_d e NMP para os módulos selecionados.

Módulo	I_{mppt}	$V_{mpptmax}$	L_d	NMP	NMS
Risen-RSM156-6-450M	10,24 A	33,15 V	39,53 Ah/dia	2,14 un	0,43 un
Sunova SS-460-60-MDH	13,17 A	24,55 V	50,84 Ah/dia	1,67 un	0,59 un
OSDA ODA280-30-P	8,77 A	21,08 V	33,85 Ah/dia	2,50 un	0,68 un
ZNSHINE ZXP6-HLD144	8,93 A	25,47 V	34,47 Ah/dia	2,46 un	0,57 un
Resun-RS6E-155M	6,02 A	13,49 V	23,24 Ah/dia	3,65 un	1,07 un
LUXEN LNVU-550M	13,01 A	29,34 V	50,22 Ah/dia	1,69 un	0,49 un
JASolar- JAM72D30-540/MB	12,97 A	29,25 V	50,06 Ah/dia	1,69 un	0,49 un

Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir dos dados expostos na tabela 9 e valores obtidos na tabela 4 é possível calcular o valor de custo em módulos para o sistema *off grid*, os valores obtidos seguem na tabela 10.

Tabela 10 – Potência do sistema e valor dos módulos do sistema.

Módulo	Potência do Sistema	Valor
Risen-RSM156-6-450M	1.350 Wp	R\$ 3.858,84
Sunova SS-460-60-MDH	920 Wp	R\$ 2.011,70
OSDA ODA280-30-P	840 Wp	R\$ 2.061,84
ZNSHINE ZXP6-HLD144	1.020 Wp	R\$ 2.128,80
Resun-RS6E-155M	620 Wp	R\$ 1,862,44
LUXEN LNVU-550M	1.100 Wp	R\$ 2.339,26
JASolar- JAM72D30-540/MB	1.080 Wp	R\$ 1.760,52

Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir das tabelas 9 e 10 verificamos que o módulo JA Solar JAM72D30-540/MB com potência de 540 Wp possui compatibilidade de tensão e corrente com o sistema, além de necessidade de menos módulos e menor custo, o que aumenta sua viabilidade econômica. Portanto, este foi o módulo selecionado para compor o sistema *off grid*.

O dimensionamento do banco de baterias é determinado principalmente pelo tempo de autonomia desejado para o sistema, para a elaboração do presente trabalho foram utilizados como tempo de autonomia um, dois e três dias. Portanto, a capacidade do banco de baterias (EA) em Ah foi definido conforme equação 4, onde “ECD” é o consumo diário da carga em Ah/dia, já obtido o valor de 84,71 Ah/dia, “Nautonomia” é o número de dias de autonomia desejada e “Pd” é a profundidade de descarga da bateria.

Conforme Dias et al., (2022), o valor de profundidade de descarga padrão de uma bateria chumbo-ácido é de 20%, deste modo foram obtidos os valores expostos abaixo na Tabela 11:

Tabela 11 – Capacidade do banco conforme diferentes autonomias.

Nautonomia	1 dia	2 dias	3 dias
EA	424 Ah	847 Ah	1270 Ah

Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir das tabelas 6 e 11 e equação 6 é possível determinar o número de baterias em paralelo (NBP) do banco de baterias. O número de baterias em série (NBS) do banco de baterias é obtido utilizando a equação 5, conforme tensão do banco de baterias definido como 12 V o

sistema terá apenas uma série de baterias. As tabelas 12 e 13 expõem os valores de NBP e preço do banco de baterias (BB) para os diferentes tempos de autonomia, conforme Tabela 6.

Tabela 12 – NBP conforme baterias e dias de autonomies selecionados

Bateria	NBP 1 dia	NBP 2 dias	NBP 3 dias
Freedom 240Ah	1,77	3,53	5,29
Freedom 165Ah	2,57	5,13	7,70
Moura 220Ah	1,93	3,85	5,77
Moura 150Ah	2,83	5,65	8,47
Duracell 230Ah	1,84	3,68	5,52

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 13 – Valor do Banco de Baterias para diferentes tempos de autonomia.

Bateria	Preço BB 1 dia	Preço BB 2 dias	Preço BB 3 dias
Freedom 240Ah	R\$ 3.559,80	R\$ 7.119,60	R\$ 10.679,40
Freedom 165Ah	R\$ 4.931,94	R\$ 9.863,88	R\$ 13.151,84
Moura 220Ah	R\$ 5.725,64	R\$ 11.451,28	R\$ 17.176,92
Moura 150Ah	R\$ 4.034,85	R\$ 8.069,70	R\$ 12.104,55
Duracell 230Ah	R\$ 9.352,76	R\$ 18.705,52	R\$ 28.058,28

Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir das Tabelas 12 e 13 foi selecionado a bateria Freedom DF4100 240Ah, cujo sua ficha técnica se encontra no anexo H, para compor o banco de baterias do sistema *off grid*.

Com a tensão do sistema e módulos definidos, pode-se definir as características mínimas que o controlador de carga deve possuir para ser compatível com o sistema selecionado. O cálculo da corrente do controlador de carga necessária pode ser feito conforme equação 7.

$$I_{\text{controlador}} = 34,65 \text{ A}$$

O controlador de carga definido para compor o sistema, conforme os dados calculados e tabela 5 foi o EPEVER VS4524AU de 45A. Portanto o sistema *off grid* ficou definido conforme Tabela 14:

Tabela 14 – Valor dos componentes do sistema *off grid* definido.

Quant.	Componente	Modelo	Valor
2	Módulos	JA Solar 540Wp	R\$ 1.760,52
1	Controlador de Carga	EPEVER 45A	R\$ 472,42
2	Baterias para 1 dia	Freedom 240 Ah	R\$ 3.559,80
4	Baterias para 2 dias	Freedom 240 Ah	R\$ 7.119,60
6	Baterias para 3 dias	Freedom 240 Ah	R\$ 10.679,40

Fonte: Elaborado pelo autor.

Fábio Birk, eletrotécnico e instalador de sistemas fotovoltaicos, diz que o custo atrelado a instalação de um sistema solar residencial, estrutura de fixação e materiais elétricos tem em média o valor de 75% do valor do material solar fotovoltaico.

Conforme tabela 14 que define e precifica os componentes do sistema *off grid* e acréscimo de 75% do valor total de módulos e controlador de carga referente a instalação, estrutura de fixação e materiais elétricos é possível obter o valor do sistema a partir do tempo de autonomia desejado. Portanto o sistema com um dia de autonomia o sistema terá valor de R\$ 7.467,45, com dois dias de autonomia o valor é de R\$ 11.027,25 e por fim, com três dias de autonomia o sistema *off grid* terá o valor de R\$ 14.587,05. Para determinação da potência do sistema *on grid* atrelado ao sistema *off grid* foi descontado o valor do sistema *off grid* do orçamento de R\$ 45.000,00 destinados a realização do projeto. Portanto, conforme o valor do kWp para a cidade de Santa rosa do Sul, definido no item 4.1.1, o sistema *on grid* atrelado ao sistema *off grid* terá potência conforme tabela 15:

Tabela 15 – Características do sistema *on grid* atrelado a cada sistema *off grid*

Autonomia <i>off grid</i>	1 dia	2 dias	3 dias
Potência <i>on grid</i>	9,18 kWp	8,10 kWp	7,02 kWp
Módulos	JA Solar 540 Wp	JA Solar 540 Wp	JA Solar 540 Wp
Inversor	Solis 8 kW	Solis 7 kW	Solis 6 kW

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para determinação do inversor foi utilizado a equação 2. Os dados técnicos dos inversores e módulos selecionados estão respectivamente expostos nas tabelas 7 e 8.

4.2.3 Dimensionamento do sistema com inversor híbrido

O dimensionamento do sistema com a utilização de inversor híbrido é análogo ao dimensionamento realizado para o sistema *on grid*, porém este tipo de inversor permite a utilização do banco de baterias, visto isso, será descontado do valor de R\$ 45.000,00, disponibilizado para a compra do sistema fotovoltaico, o montante referente a compra dos bancos de baterias, expostos na Tabela 14, abaixo segue a Tabela 16 com as características dos sistemas com inversores híbridos.

Tabela 16 – Sistemas com inversores híbridos.

Autonomia	1 dia	2 dias	3 dias
Potência de Pico	10,80 kWp	9,72 kWp	8,64
Módulos	JA Solar 540 Wp	JA Solar 540 Wp	JA Solar 540 Wp
Inversor Híbrido	Growatt 8 kW	Growatt 8 kW	Growatt 7 kW

Fonte: Elaborado pelo autor.

A potência do inversor híbrido foi determinada conforme equação 2. O datasheet dos módulos está presente na Tabela 8 e o do inversor está exposto na Tabela 17.

Tabela 17 - Parâmetros elétricos dos inversores Growatt.

(continua)

Modelo	SPH 7000TL3 BH-UP	SPH 8000TL3 BH-UP
Parâmetros de entrada em Corrente Contínua		
Potência máxima	10.5 kW	12.0 kW
Tensão máxima	1000 Vcc	
Tensão nominal	600 Vcc	
Tensão de partida	120 Vcc	
Tensão MPPT	120 – 1000 Vcc	
Corrente máxima	13.5 A	
Corrente Curto-Circuito	16.9 A	
MPPT/nº de entradas	2/2	

Tabela 18 - Parâmetros elétricos dos inversores Growatt.

(conclusão)

Modelo	SPH 7000TL3 BH-UP	SPH 8000TL3 BH-UP
Parâmetros de saída em Corrente Alternada		
Potência nominal	7 kW	8 kW
Tensão nominal	1/N/PE 230 / 400 V	
Frequência nominal	50 / 60 Hz	
Corrente máxima	10.6 A	12.1 A
Parâmetros do banco de baterias		
Tensão da Bateria	100 – 550 V	
Corrente de Carga/Descarga	25A	
Potência de Carga/Descarga	7 kW	8 kW
Tipo de Bateria	Lítio/chumbo-ácido	

Fonte: Growatt, (2023).

4.3 SIMULAÇÕES

As simulações de geração de energia dos sistemas fotovoltaicos analisados foram realizadas conforme duas diretrizes. A primeira de forma teórica e a segunda com o auxílio do software PVsyst.

4.3.1 Simulações teóricas

Rampinelli & Machado (2021) determinam que a energia gerada pelo sistema fotovoltaico pode ser obtida conforme manipulação da equação 1, exposto abaixo:

$$E = \frac{P_{fv} \cdot G_{poa} \cdot PR}{P_{sol}}$$

Onde:

P_{pico} = potência de pico do sistema fotovoltaico (kWp);

E = Energia gerada pelo sistema fotovoltaico (kWh/dia);

P_{sol} = Irradiância de referência (1 kW/m²);

G_{poa} = Irradiância diária do plano dos módulos (kWh/m².dia);

PR = Performance Ratio, coeficiente de desempenho (adimensional).

Conforme equação acima, tabela 1 que expõem valores médios do parâmetro G_{poa} para cada mês do ano e tabela 2 onde estão os valores de PR para cada mês do ano, foi possível calcular a expectativa de geração mensal de cada um dos sistemas dimensionados no item 4.2. A tabela 18 apresenta os dados obtidos:

É possível notar, na tabela 18, que a energia gerada pelo sistema solar, independente de qual seja a sua configuração, não é constante no ano todo. Isso é devido a diferença de incidência solar que o local de instalação recebe em diferentes meses e estações do ano. Vale salientar que estes valores de geração podem não ser atingidos ou até serem superados, pois é baseado em um histórico de irradiância solar mês a mês, que varia todos os anos.

Tabela 19 – Estimativa de geração de energia (kWh) teórica para cada tipo de sistema estudado.

Sistema	<i>On grid</i>	<i>On + Off grid 1 dia</i>	<i>On + Off grid 2 dias</i>	<i>On + Off grid 3 dias</i>	Híbrido 1 dia	Híbrido 2 dias	Híbrido 3 dias
Jan	1.609	1.456	1.303	1.149	1.533	1.379	1.226
Fev	1.443	1.306	1.168	1.031	1.375	1.237	1.100
Mar	1.554	1.406	1.258	1.110	1.480	1.332	1.184
Abr	1.327	1.201	1.074	948	1.264	1.137	1.011
Mai	1.052	952	851	751	1.002	901	801
Jun	870	787	704	621	828	745	663
Jul	929	840	752	663	885	796	708
Ago	1.224	1.107	990	874	1.165	1.049	932
Set	1.349	1.220	1.092	963	1.285	1.156	1.028
Out	1.505	1.361	1.218	1.075	1.433	1.290	1.146
Nov	1.548	1.400	1.253	1.105	1.474	1.327	1.179
Dez	1.647	1.490	1.333	1.177	1.569	1.412	1.255
Média	1.338	1.210	1.083	955	1.274	1.146	1.019

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.3.2 Simulações PVSyst

O software PVSyst permite que seja modelado o sistema e retorna a geração estimada do sistema. Como entrada de dados utilizou-se a localização, as características do arranjo

fotovoltaico (número de *strings*, número de módulos em série), modelo dos módulos, modelo do inversor, orientação e inclinação dos módulos. Abaixo segue exemplo de entrada dos dados no software realizada para o sistema *on grid*.

Figura 9 – Entrada de dados no software PVSyst.

The screenshot displays the 'Grid system definition, Variant VC1: "Variant inicial TCC"' interface. It is organized into four main sections:

- Sub-array:** Includes 'Sub-array name and Orientation' (Name: PV Array, Orient.: Fixed Tilted Plane, Tilt: 25°, Azimuth: 0°) and 'Pre-sizing Help' (No sizing selected, Enter planned power: 0.0 kWp, or available area: 0 m²).
- Select the PV module:** Shows 'Available Now' filter, 'All PV modules' filter, and selected module 'JA Solar 540 Wp 35V Si-mono JAM72-D30-540-MB Since 2021 Manufacturer-RETIC'. It also indicates 'Bifacial module' and 'Bifacial system' options. Sizing voltages are listed as Vmpp (60°C) 36.4 V and Voc (-10°C) 54.2 V.
- Select the inverter:** Shows 'Available Now' filter, 'Output voltage 240 V Mono 60Hz', and selected inverter 'Ginlong Technologies 9.0 kW 100 - 500 V 60 Hz Solis-S5-GRIP9K Since 2017'. It specifies 'Nb of MPPT inputs' as 3, 'Operating voltage: 100-500 V', and 'Inverter power used 9.0 kWac'. It also notes 'Use multi-MPPT feature' and 'No power sharing between MPPTs'.
- Design the array:** Includes 'Number of modules and strings' (Mod. in series: 7, Nb. strings: 3, Overload loss: 0.6%, Pnom ratio: 1.26), 'Operating conditions' (Vmpp (60°C): 255 V, Vmpp (20°C): 294 V, Voc (-10°C): 380 V), 'Plane irradiance 1000 W/m²', and 'Array nom. Power (STC) 11.3 kWp'. It also shows 'Max. operating power (at 1072 W/m² and 50°C) 11.2 kW'.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Tabela 20 está exposto os dados obtidos com o auxílio do software PVSyst para os sistemas solares fotovoltaicos estudados.

Tabela 20 – Estimativa de geração de energia (kWh) pelo PVsyst para cada tipo de sistema estudado.

Sistema	<i>On grid</i>	<i>On + Off grid 1 dia</i>	<i>On + Off grid 2 dias</i>	<i>On + Off grid 3 dias</i>	Híbrido 1 dia	Híbrido 2 dias	Híbrido 3 dias
Jan	1.666	1.513	1.351	1.188	1.593	1.429	1.271
Fev	1.509	1.373	1.226	1.079	1.444	1.297	1.154
Mar	1.573	1.433	1.281	1.126	1.507	1.354	1.205
Abr	1.526	1.387	1.233	1.092	1.461	1.317	1.172
Mai	1.265	1.136	991	873	1.210	1.077	967
Jun	948	846	730	633	906	803	712
Jul	1.103	996	861	747	1.063	936	841
Ago	1.385	1.249	1.103	973	1.322	1.183	1.065
Set	1.334	1.213	1.083	952	1.277	1.146	1.020
Out	1.625	1.478	1.320	1.161	1.555	1.396	1.243
Nov	1.657	1.509	1.349	1.186	1.587	1.426	1.269
Dez	1.852	1.686	1.507	1.326	1.775	1.593	1.418
Média	1.454	1.318	1.170	1.028	1.392	1.246	1.111

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.4 DESEMPENHO E RETORNO

Para análise dos sistemas solares fotovoltaicos serão aplicados indicadores de desempenho e financeiros, portanto é importante selecionar o modelo de simulação de energia gerada para aplicar-se estes indicadores.

A partir das médias anuais de geração apresentadas pelo modelo teórico e pelo software PVsyst, conseguimos verificar a geração estimada por kWp, conforme tabela 20.

Tabela 21 – Geração estimada por kWp (kWh/kWp)

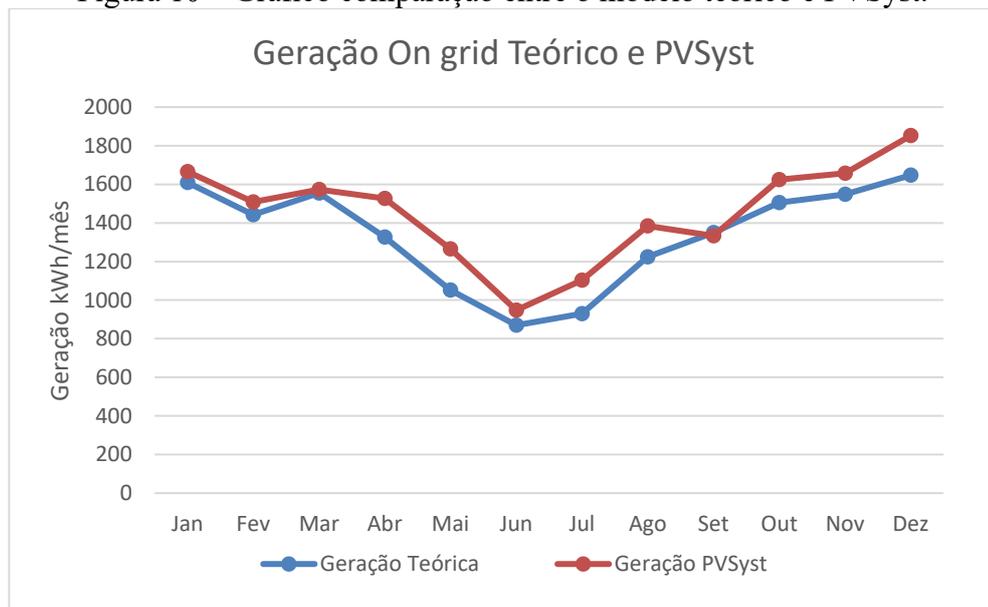
Modelo	<i>On grid</i>	<i>On + Off grid 1 dia</i>	<i>On + Off grid 2 dias</i>	<i>On + Off grid 3 dias</i>	Híbrido 1 dia	Híbrido 2 dias	Híbrido 3 dias
Teórico	117,99	131,81	133,70	136,04	117,96	117,90	117,94
PVsyst	128,22	143,57	144,44	146,44	128,89	128,19	128,58

Fonte: Elaborado pelo autor.

Nota-se que os modelos que obtiveram maior desempenho energético, ou seja, geraram mais energia com menos potência instalada, são os modelos de *On+Off* grid, os modelos de *On Grid* e Híbridos tiveram desempenho bem parecido entre eles. Uma das razões é a diferença de *overload* entre os sistemas, pois o *overload* muito alto faz com que perca muita energia nas horas de pico do sistema e o *overload* muito baixo faz com que o sistema nunca chegue a sua potência nominal, evidenciando um gasto desnecessário com um inversor sobre dimensionado.

O gráfico da figura 13 apresenta a curva de geração mês a mês entre os modelos de estimativa teórico e estimativa realizado pelo software PVSyst. Verifica-se que o modelo mais conservador é o teórico, todavia este modelo será utilizado para auxílio da aplicação destes indicadores.

Figura 10 – Gráfico comparação entre o modelo teórico e PVSyst.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Após a definição do modelo de simulação mais conservador, pode-se calcular a economia gerada pelo sistema solar fotovoltaico. Segundo a Centrais de Elétricas de Santa Catarina S.A. (CELESC, 2023) a tarifa de energia, ou seja, o valor cobrado por cada kWh consumido é de 0,59296 R\$/kWh e a média da flutuação da mesma nos últimos 10 anos foi de 5,88%. Portanto a economia mensal gerada por cada um dos sistemas segue na tabela 21.

Tabela 22 – Estimativa de economia mensal (R\$) para cada sistema estudado.

Sistema	<i>On grid</i>	<i>On + Off grid 1 dia</i>	<i>On + Off grid 2 dias</i>	<i>On + Off grid 3 dias</i>	Híbrido 1 dia	Híbrido 2 dias	Híbrido 3 dias
Jan	954,07	863,34	772,62	681,31	909,00	817,69	726,96
Fev	855,64	774,40	692,57	611,34	815,32	733,49	652,25
Mar	921,45	833,7	745,94	658,18	877,58	789,82	702,06
Abr	786,85	712,14	636,83	562,12	749,50	674,19	599,48
Mai	623,79	564,49	504,6	445,31	594,14	534,25	474,96
Jun	515,87	466,65	417,44	368,22	490,97	441,75	393,13
Jul	550,85	498,08	445,9	393,13	524,76	471,99	419,81
Ago	725,78	656,40	587,03	518,24	690,79	622,01	552,63
Set	799,90	723,41	647,51	571,02	761,95	685,46	609,56
Out	892,40	807,01	722,22	637,43	849,71	764,91	679,53
Nov	917,90	830,14	742,97	655,22	874,02	786,85	699,09
Dez	976,60	883,51	790,41	697,91	930,35	837,25	744,16
Média	793,42	717,77	642,17	566,61	755,67	679,97	604,46

Fonte: Elaborado pelo autor.

Conforme os dados expostos nas tabelas 17 e 19, além das equações 1 e 9, foi possível calcular os parâmetros Y_f , *Payback* e TIR em 20 anos de cada um dos sistemas analisados.

Para realização dos cálculos destes parâmetros foi considerado que toda a energia gerada pelo sistema solar será consumida instantaneamente, não haverá geração de créditos na concessionária. Conforme Dias et al. (2022), a estimativa de vida útil mínima de uma bateria chumbo-ácido é de 3 anos, portanto, para cálculo dos gastos com os sistemas híbridos em 20 anos de operação, foi considerado a troca do banco de bateria a cada quatro anos.

Segundo Camila Figueiredo, engenheira eletricista, os fabricantes de inversores possuem garantia estendida até 20 anos, portanto é prudente assumir que a vida útil deste componente seja em torno de 20 anos. Todavia foi considerado a troca dos inversores híbrido e *on grid* no ano 20. Os dados obtidos estão expostos na tabela 22.

Tabela 23 – Indicadores de desempenho e financeiros obtidos para os sistemas analisados.

Sistema	Geração Média	Economia Média	Yf Médio	PayBack	TIR
<i>On grid</i>	1.338 kWh	R\$ 793,42	117,99	4 anos 5 meses	31% a.a
<i>On + Off 1 dia</i>	1.210 kWh	R\$ 717,77	117,94	5 anos 2 meses	27% a.a
<i>On + Off 2 dias</i>	1.083 kWh	R\$ 642,17	117,98	6 anos	24% a.a
<i>On + Off 3 dias</i>	955 kWh	R\$ 566,61	117,91	9 anos	20% a.a
Híbrido 1 dia	1.274 kWh	R\$ 755,67	117,97	4 anos 11 meses	28% a.a
Híbrido 2 dias	1.146 kWh	R\$ 679,97	117,91	5 anos 8 meses	25% a.a
Híbrido 3 dias	1.019 kWh	R\$ 604,46	117,94	6 anos 8 meses	22% a.a

Fonte: Elaborado pelo autor.

A análise dos indicadores financeiros nos permite dizer que o sistema mais viável em termos de investimento financeiro é o *On grid*. O principal motivo para que ele tenha a melhor atratividade financeira é a dispensa do uso de baterias e outros equipamentos.

Como a vida útil das baterias de chumbo-ácido usuais do mercado é baixa em comparação a vida útil dos inversores *on grid* e painéis fotovoltaicos, a manutenção com mão de obra especializada e gastos com as trocas dos bancos de baterias encarecem significativamente os sistemas híbridos a longo prazo.

5 CONCLUSÃO

O presente estudo buscou dimensionar e orçar diferentes tipos construtivos de sistemas solares fotovoltaicos. Simulou a geração e economia anual dos sistemas conforme base de dados dos softwares RADIASOL 2 e PVSyst, além de extrapolar esta geração para perspectivas até 20 anos conforme dados de degradação da eficiência dos módulos e média histórica da flutuação da tarifa de energia.

Durante o desenvolvimento do estudo foi possível aprofundar o conhecimento nos diferentes modelos construtivos de sistemas solares fotovoltaicos e seus componentes particulares, além de atrelar os conceitos da literatura com a prática e modelamento no software PVSyst e aplicação de diferentes indicadores financeiros e de desempenho.

Os modelamentos foram realizados de formas satisfatórias e mais conservadoras possíveis. É importante salientar que cada um dos softwares utilizados possui base de dados próprias portanto, apresentam resultados diferentes.

No desenvolvimento e aplicação dos indicadores de desempenho ficou evidente que o modelo de sistema solar fotovoltaico com maior retorno financeiro e energético é o *on grid* puro, isso se deve ao fato da não necessidade de um banco de baterias, que ainda é uma tecnologia cara e com pouca eficiência.

Porém é importante verificar as necessidades de cada aplicação, pois em locais onde a rede elétrica é bastante instável, com inúmeras ocorrências de faltas, os modelos híbridos, seja *on + off*, quanto com inversor híbrido, garante uma autonomia crucial para cargas prioritárias. Portanto, o modo de comparação entre estes tipos de sistemas realizado puramente por indicadores de desempenho e/ou financeiros pode não ser o melhor, sendo que cada modelo de sistema fotovoltaico possui aplicações específicas diferentes.

Vale ressaltar que o sistema *on grid* necessita de autorização da concessionária local de energia para sua instalação. Isso pode ser um problema a depender da localidade em que o sistema for instalado, pois caso houver peculiaridades como inversão de fluxo na rede ou necessidade de melhoria de rede a concessionária poderá apresentar um parecer que inviabilize financeiramente a construção do projeto.

De forma técnica o progresso na tecnologia de armazenagem de energia, maior democratização do acesso a estas novas tecnologias atreladas a situações específicas, precarização da qualidade da energia e inviabilizações financeiras por parte das

concessionárias, são fatores que irão fazer com que os modelos híbridos sejam mais atrativos para os consumidores.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, E. *et al.* **Energia Solar Fotovoltaica: Revisão Bibliográfica**. FUMEC. Belo Horizonte, 2016.

ANEEL. **Matriz Elétrica Brasileira Alcança 200 GW**. 2024. Disponível em: <<https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/noticias/2024/matriz-eletrica-brasileira-alcanca-200-gw>>. Acesso em: 11 jul. 2024.

ARCO-VERDE, M. F., AMARO, G.. **Cálculo de Indicadores Financeiros para Sistemas Agroflorestais**. *Documentos 57*, p. 1981-6103. Boa Vista: EMBRAPA, 2014.

BELLINASSO, L. V., MICHELS, L.. **Inversores Fotovoltaicos Híbridos com Armazenamento de Energia em Baterias - Classificação, Modos de Operação e Princípios de Funcionamento**. In: VI Congresso Brasileiro de Energia Solar, 2016, Belo Horizonte. Anais do VI CBENS, 2016.

BRASIL. Lei nº 14.300, de 06 de janeiro de 2022. Institui o marco legal da microgeração e minigeração distribuída. **Diário Oficial da União**: seção 5, Brasília, DF, n. 1, p. 4, 07 jan. 2022.

BÜHLER, A. J., DOS SANTOS, F. H., GABE, I. J.. **Uma Revisão Sobre as Tecnologias Fotovoltaicas Atuais**. In: VII Congresso Brasileiro de Energia Solar, 2018, Gramado. Anais do VII CBENS, 2018.

CELESC. **Tarifas de Energia Celesc 2023**. 2023. Disponível em: <<https://www.celesc.com.br/tarifas-de-energia>>. Acesso em: 08 out. 2023.

DA ROSA, A. R. O., GASPARIN, F. P.. **Panorama da Energia Solar Fotovoltaica no Brasil**. *Revista Brasileira de Energia Solar*, v. 7, n. 2, p. 140–147, 2016.

DA SILVA, Eric Valero Carvalho. **Avaliação Econômica Entre Sistemas de Geração de Energia Fotovoltaica On-Grid e Off-Grid em Um Aviário de Uma Propriedade Rural**. 2021. 62 f.

Dissertação (Mestrado) – Curso Engenharia de energia na Agricultura, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2021.

DBEISS, M., AVENAS, Y., ZARA, H.. **Comparison of The Electro-Thermal Constraints on Sic MOSFET and Si IGBT Power Modules in Photovoltaic DC/AC Inverters.** *Elsevier: Microelectronics Reliability*, v. 78, p. 65–71, 2017.

DIAS, B. G. C., *et al.* **Dimensionamento de Sistema Solar Off-Grid com Monitoramento de Energia para Área Rural.** 2022. 16 f. TCC (Graduação) – Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Anhembí Morumbi, São Paulo, 2022.

EPAGRI. **Recordes de Frio em SC.** 2023. Disponível em: <<https://ciram.epagri.sc.gov.br/index.php/recordes-de-frio/>>. Acesso em: 05 out. 2023.

EPAGRI. **Recordes de Calor em SC.** 2023. Disponível em: <<https://ciram.epagri.sc.gov.br/index.php/recordes-de-calor/>>. Acesso em: 05 out. 2023.

FARANDA, R. S., *et al.* **The Optimum PV Plant for a Given Solar DC/AC Converter.** *Energies*, v. 8, p. 4853–4870, 2015.

FERIOLI, K. C. O., *et al.* **Projeto de Sistema Fotovoltaico Isolado (OFF-GRID) para Residência.** IESAM. Belém, 2014.

FIGUEIREDO, F. S.. **Energopolíticas em Crise: Pandemia, Crise Hídrica e Futuros Energéticos no Brasil.** In: VIII Reunião de Antropologia da Ciência e Tecnologia. 2021. Anais do VIII ReACT, 2021.

GREENER. **Estudo Estratégico Geração Distribuída, 1º Semestre 2022.** 2022. Disponível em: <<https://www.greener.com.br/estudo/estudo-estrategico-geracao-distribuida-2022-mercado-fotovoltaico-1-semester/>>. Acesso em: 03 out. 2023.

GREENER. **Estudo Estratégico Geração Distribuída, 1º semestre 2023**. 2023. Disponível em: <<https://www.greener.com.br/estudo/estudo-estrategico-geracao-distribuida-setembro-2023-dados-do-1o-semester-2023/>>. Acesso em: 03 out. 2023.

GROWATT. **SPH4000~10000TL3BH-UP**. Disponível em: <<https://br.growatt.com/products/sph-4000-10000tl3-bh-up>>. Acesso em: 10 out. 2023.

JA SOLAR. **550W MBB Bifacial Mono PERC Half-cell Double Glass Module JAM72D30 525-550/MB**. 2022. Disponível em: <<https://www.jasolar.com/uploadfile/2021/0706/20210706053456650.pdf>>. Acesso em: 10 out. 2023.

KEMERICH, P. D. da C., *et al.* **Paradigmas da Energia Solar no Brasil e no Mundo**. *Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental*, v. 20, n. 1, p. 241-247, 2016.

KROTH, G., RAMPINELLI, G. A.. **Análise de Indicadores de Desempenho de Um Sistema Fotovoltaico com Distintos Fatores de Dimensionamento de Inversor e Diferentes Ângulos Azimutais**. In: VIII Congresso Brasileiro de Energia Solar. 2020, Fortaleza. Anais do VIII CBENS, 2020.

LEVY NETO, F.. **Soluções Integradas para as Crises Hídrica e Energética no Brasil**. *Parcerias Estratégicas - CGEE*, v. 25, n. 50, p. 159–174, 2020.

LIMA JUNIOR, E. M.. **A Energia Fotovoltaica no Agronegócio - Gestão de Custos e Riscos, Diversificação de Receita e Externalidades**. 2019. 62 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Agronegócio, Escola de Economia de São Paulo da Fundação Getúlio Vargas, São Paulo, 2019.

MME, EPE. **Plano Nacional de Energia (PNE) 2050**. 2020. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Plano-Nacional-de-Energia-2050>>. Acesso em: 15 mai. 2022.

NASCIMENTO, M. E. C. do. **Avaliação Econômica de Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede para Empreendimentos do Agronegócio**. 2019. 62 f. Dissertação (Pós-Graduação) – Curso de Engenharia de Energia na Agricultura, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2019.

NREL. **Research Cell Record Efficiency Chart 2022**. 2022. Disponível em: <<https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>>. Acesso em: 15 mai. 2022.

PEREIRA, Á. T. C., CARVALHO, J. J. de. **Análise de Viabilidade Econômica na Geração Distribuída Fotovoltaica Pós Mudanças Propostas na Resolução Normativa 482/2012 e Sistema com Inversor Híbrido - Estudo de Caso**. 2021. 21 f. TCC (Graduação) – Curso de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica de Goiás, Goiânia, 2021.

PINHO, J. T., GALDINO, M. A.. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. Rio de Janeiro, v. 1, p. 47-499, 2014.

PRUDENCIO, B. N.. **Análise e Influência da Distribuição de Temperatura de Inversor no Desempenho Energético de Sistemas Fotovoltaicos de Geração Distribuída com Distintos Fatores de Dimensionamento**. 2020. 68 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Energia, Universidade Federal de Santa Catarina, Araranguá, 2020.

PVSYST. **Features**. Disponível em: <<https://www.pvsyst.com/features/>>. Acesso em: 01 out. 2023.

RAMPINELLI, G. A.. **Estudo de Características Elétricas e Térmicas de Inversores para Sistemas Fotovoltaicos Conectados À Rede**. 2010. 285 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia de Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2010.

RAMPINELLI, G. A., MACHADO, S., **Manual de Sistemas Fotovoltaicos de Geração Distribuída: Teoria e Prática**. 1. Ed. - Curitiba: Brazil Publishing, 2021.

REITER, R. A.; REITER, R. D. O.; PERES, A.. **Controlador de Carga de Acordo com a Portaria 396 do INMETRO**. FURB. Blumenau, 2014.

SEGURA-SALAS, C. S., *et al.* **Off-grid Photovoltaic Systems Implementation for Electrification of Remote Areas: Experiences and Lessons Learned in the Pantanal Sul-Mato Grossense Region of Brazil**. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, v. 66, 2023.

SINGH, A. K., *et al.* **Solar Charge Controller**. *International Journal of Academic Research and Development*, v. 2, n. 6, p. 994-1001, 2017.

SOLIS. **S5-GR1P(7-10)K**. Disponível em: <https://www.solisinverters.com/solarinverter3/7-10kw_s5_br.html>. Acesso em: 10 out. 2023.

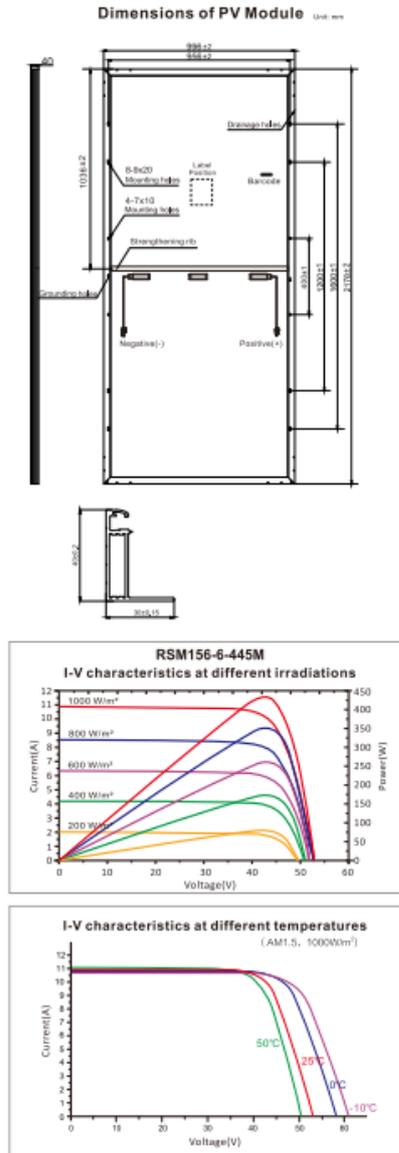
TOLMASQUIM, M. T.. **Energia Renovável Hidráulica, Biomassa, Eólica, solar, Oceânica**. 1. Ed. – Rio de Janeiro: Empresa de Pesquisa Energética (EPE), 2021.

UFRGS. Laboratório de Energia Solar - LABSOL. **Desenvolvimento de Softwares - SOLARCAD**. Disponível em: < <https://www.ufrgs.br/labsol/#softwares>>. Acesso em: 01 out. 2023.

VILLALVA, M. G.. **Energia Solar Fotovoltaica: Conceitos e Aplicações**. 2. Ed. – São Paulo: Érica, 2015.

Vitor, J., *et al.* **Estudo de Viabilidade Técnica e Dimensionamento de Sistema Fotovoltaico On-Grid para Unidade Escolar da Rede Estadual**. 2022. 30 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade São Judas Tadeu, São Paulo, 2022.

ANEXO A – Datasheet módulo fotovoltaico Risen RSM144-7-450M



ELECTRICAL DATA (STC)

Model Number	RSM156-6-430M	RSM156-6-435M	RSM156-6-440M	RSM156-6-445M	RSM156-6-450M	RSM156-6-455M
Rated Power in Watts-Pmax(Wp)	430	435	440	445	450	455
Open Circuit Voltage-Voc(V)	52.38	52.50	52.62	52.72	52.82	52.92
Short Circuit Current-Isc(A)	10.47	10.57	10.67	10.77	10.87	10.97
Maximum Power Voltage-Vmpp(V)	43.60	43.70	43.80	43.90	44.00	44.10
Maximum Power Current-Impp(A)	9.87	9.97	10.06	10.15	10.24	10.32
Module Efficiency (%) *	19.8	20.1	20.3	20.5	20.7	21.0

STC: Irradiance 1000 W/m², Cell Temperature 25°C, Air Mass AM1.5 according to EN 60904-3.

* Module Efficiency (%): Round-off to the nearest number

ELECTRICAL DATA (NMOT)

Model Number	RSM156-6-430M	RSM156-6-435M	RSM156-6-440M	RSM156-6-445M	RSM156-6-450M	RSM156-6-455M
Maximum Power-Pmax (Wp)	321.8	325.5	329.3	332.9	336.6	340.3
Open Circuit Voltage-Voc (V)	48.20	48.30	48.41	48.50	48.59	48.69
Short Circuit Current-Isc (A)	8.59	8.67	8.75	8.83	8.91	9.00
Maximum Power Voltage-Vmpp (V)	39.90	40.09	40.18	40.26	40.33	40.41
Maximum Power Current-Impp (A)	8.06	8.12	8.20	8.27	8.35	8.42

NMOT: Irradiance at 800 W/m², Ambient Temperature 20°C, Wind Speed 1 m/s.

MECHANICAL DATA

Solar cells	Monocrystalline, 9BB
Cell configuration	156 cells (6×13+6×13)
Module dimensions	2178×996×40mm
Weight	25.5kg
Superstrate	High Transmission, Low Iron, Tempered ARC Glass
Substrate	White Back-sheet
Frame	Anodized Aluminium Alloy type 6063T5, Silver Color
J-Box	Potted, IP68, 1500VDC, 3 Schottky bypass diodes
Cables	4.0mm ² (12AWG), Positive(+) 270mm, Negative(-) 270mm
Connector	Risen Twinsel PV-SY02, IP68

TEMPERATURE & MAXIMUM RATINGS

Nominal Module Operating Temperature (NMOT)	44°C±2°C
Temperature Coefficient of Voc	-0.29%/°C
Temperature Coefficient of Isc	0.05%/°C
Temperature Coefficient of Pmax	-0.37%/°C
Operational Temperature	-40°C~+85°C
Maximum System Voltage	1500VDC
Max Series Fuse Rating	20A
Limiting Reverse Current	20A

ANEXO B – Datasheet módulo fotovoltaico Sunova SS-460-60-MDH

120 cells

ELECTRIC CHARACTERISTICS

Model of modules	SS-440-60MDH		SS-445-60MDH		SS-450-60MDH		SS-455-60MDH		SS-460-60MDH	
	STC	NOCT								
Maximum power – P_{mp} (W)	440	328	445	332	450	335	455	339	460	343
Open-circuit voltage – V_{oc} (V)	41.18	38.71	41.27	38.79	41.46	38.97	41.65	39.15	41.85	39.34
Short-circuit current – I_{sc} (A)	13.37	10.83	13.42	10.88	13.47	10.91	13.54	10.97	13.59	11.01
Maximum power voltage – V_{mp} (V)	34.39	31.98	34.46	32.05	34.62	32.19	34.78	32.35	34.95	32.52
Maximum power current – I_{mp} (A)	12.80	10.26	12.92	10.36	13.01	10.41	13.09	10.48	13.17	10.55
Module efficiency – η_m (%)	20.4%		20.6%		20.9%		21.1%		21.3%	
Power tolerance (W)	(0,+5)									
Maximum system voltage (V)	1500									
Maximum rated fuse current (A)	25									
Current operating temperature (°C)	-40~+85 °C									

STC (Standard Testing Conditions): Irradiance 1000W/m², Cell Temperature 25 °C, Spectra at AM1.5

NOCT (Nominal Operating Cell Temperature): Irradiance 800W/m², Ambient Temperature 20°C, Spectra at AM1.5, Wind at 1m/s

STRUCTURAL CHARACTERISTICS

Module dimensions (L*W*H)	1903 x 1134 x 30 mm
Weight	24 kg
Number of cells	120 cells
Cell	PERC Monocrystalline 182x91 mm
Glass	Tempered, 3.2 mm AR, High transmittance, Low iron
Frame	Anodized aluminum alloy
Junction box	IP68
Output wire	4.0 mm ² , wire length: 300 mm or Customized Length
Connector	MC4 Compatible
Mechanical load	Snow load: 5400 Pa / Wind load: 2400 Pa

TEMPERFORMANCE RATINGS

Temperature coefficient (P_{max})	-0.35 %/°C
Temperature coefficient (V_{oc})	-0.28 %/°C
Temperature coefficient (I_{sc})	+0.045 %/°C
Nominal operating cell temperature	45 ± 2 °C

PACKAGING CONFIGURATION

Container	40HQ
Quantity/pallet	36
Pallets/container	24
Quantity/container	864

ANEXO C – Datasheet módulo fotovoltaico OSDA ODA280-30-P

Especificações

* STC: Irradiação 1000 W/m ² , AM 1.5, Temperatura da célula a 25°C	
Potência de Pico (P _{max})	280.00
Tensão em Potência Máxima (V _{mp})	31.94
Corrente em Potência Máxima (I _{mp})	8.77
Tensão de Circuito Aberto (V _{oc})	38.33
Corrente de Curto-Circuito (I _{sc})	9.41
Eficiência da Célula (%)	18.99
Eficiência do Módulo (%)	17.21

* NOCT: Irradiação 800 W/m², AM 1.5G, Temperatura Ambiente 20°C, Velocidade do Vento 1 m/s

Potência de Pico (P _{max})	208.00
Tensão em Potência Máxima (V _{mp})	29.39
Corrente em Potência Máxima (I _{mp})	7.08
Tensão de Circuito Aberto (V _{oc})	35.26
Corrente de Curto-Circuito (I _{sc})	7.64

Tensão máxima de Sistema (V)	1000/1500
Quantidade Máxima de Fusíveis em Serie (A)	20
Tolerância de Potência	0 ~ +3 %
P _{max} Coeficiente de Temperatura (W/°C)	-0.400 %
V _{oc} Coeficiente de Temperatura (V/°C)	-0.300 %
I _{sc} Coeficiente de Temperatura (A/°C)	+0.060 %
NOCT Temperatura Nominal de Operação da Célula (°C)	45±2
Temperatura de Operação e Armazenagem (°C)	-40 ~ +85

Garantia



12
ANOS

Garantia do Material e Produção do Produto.

30
ANOS

Garantia de Potência Linear na Saída (Eficiência)



Características Mecânicas

Tipo de célula	156.75x156.75 Poly
Número de células	60(6x10)
Dimensões	1650x992x35
Peso	18.4kg
Vidro Frontal	Vidro Temperado 3.2mm de Alta Transparência, com baixo teor de ferro
Moldura	Liga de Alumínio Anodizado
Caixa de Junção	IP65/IP67
Cabeamento de Saída	4mm ² cabo 90cm+mc4
Carga Máxima de Vento/Neve	2400Pa/5400Pa

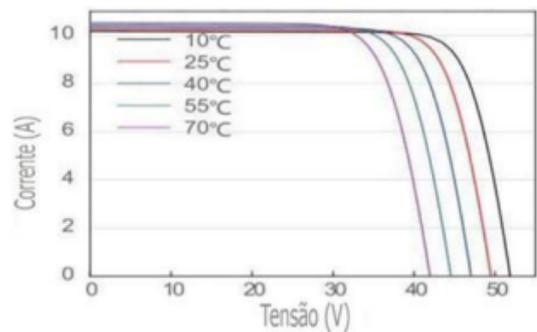
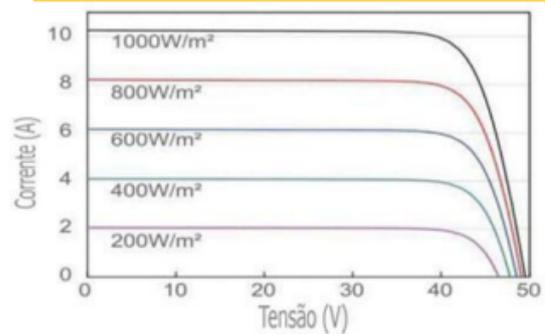
Packing list

20FT Container	14 Embalagem /400pcs
40HQ Container	28 Embalagem /924PCS

Product Standard

Performance do Produto	IEC61215
Segurança do Produto	IEC61730

Curva IV



ANEXO D – Datasheet módulo fotovoltaico ZNSHINE RSM144-7-450M

ELECTRICAL CHARACTERISTICS | STC*

Nominal Power Watt Pmax(W)*	335	340	345	350	355	360
Power Output Tolerance Pmax(%)	0→+3	0→+3	0→+3	0→+3	0→+3	0→+3
Maximum Power Voltage Vmp(V)	37.90	38.10	38.30	38.50	38.70	38.90
Maximum Power Current Imp(A)	8.84	8.93	9.01	9.10	9.18	9.26
Open Circuit Voltage Voc(V)	46.60	46.80	47.00	47.20	47.40	47.60
Short Circuit Current Isc(A)	9.16	9.22	9.28	9.37	9.45	9.53
Module Efficiency (%)	16.89	17.14	17.39	17.64	17.89	18.15

*STC (Standard Test Condition): Irradiance 1000W/m², Module Temperature 25°C, AM 1.5
 *Measuring tolerance: ±3%

ELECTRICAL CHARACTERISTICS | NMOT*

Maximum Power Pmax(Wp)	248.30	252.60	256.40	260.30	264.00	267.70
Maximum Power Voltage Vmp(V)	35.50	35.80	36.10	36.30	36.50	36.70
Maximum Power Current Imp(A)	6.99	7.05	7.10	7.17	7.23	7.30
Open Circuit Voltage Voc(V)	43.00	43.20	43.40	43.50	43.70	43.90
Short Circuit Current Isc(A)	7.42	7.46	7.51	7.59	7.65	7.72

*NMOT(Nominal module operating temperature):Irradiance 800W/m²,Ambient Temperature 20°C,AM 1.5,Wind Speed 1m/s

MECHANICAL DATA

Solar cells	Poly
Cells orientation	144 (6×24)
Module dimension	2000×992×30 mm(With Frame)
Weight	25.5 kg
Glass	2.0 mm+2.0mm, High Transmission, AR Coated Heat Strengthened Glass
Junction box	IP 68, 3 diodes
Cables	4 mm ² , 350 mm
Connectors	MC4-compatible

TEMPERATURE RATINGS WORKING CONDITIONS

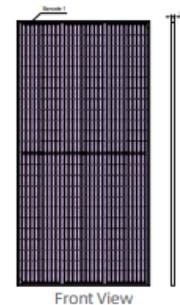
NMOT	45°C ±2°C	Maximum system voltage	1500 V DC
Temperature coefficient of Pmax	-0.39%/°C	Operating temperature	-40°C→+85°C
Temperature coefficient of Voc	-0.31%/°C	Maximum series fuse	15 A
Temperature coefficient of Isc	0.06%/°C	Maximum load(snow/wind)	5400 Pa / 2400 Pa

*Do not connect Fuse in Combiner Box with two or more strings in parallel connection
 *Remark:Electrical data in this catalog do not refer to a single module and they are not part of the offer.They only serve for comparison among different module types.

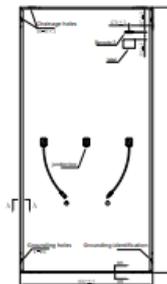
PACKAGING CONFIGURATION

Piece/Box	36
Piece/Container(standard)	792
Piece/Container(with additional small package)	/

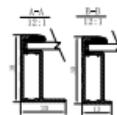
DIMENSIONS(MM)



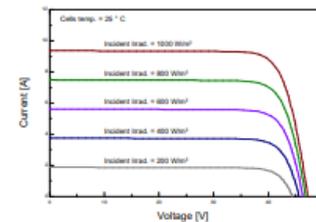
Front View



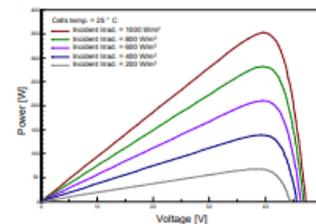
Back View



I-V CURVES OF PV MODULE(350W)

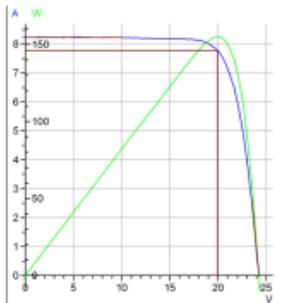
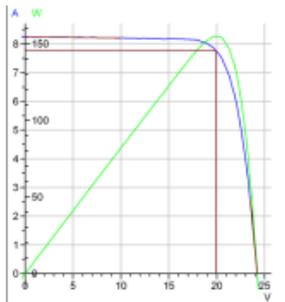
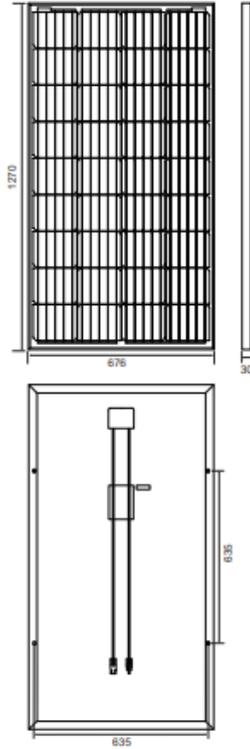


P-V CURVES OF PV MODULE(350W)



ANEXO E – Datasheet módulo fotovoltaico Resun RS6E-155M

Dimension of PV Modules Unit: mm



Room 606, No. 13, Yongshang Garden, Jinfeng Road,
 xdu Town, Wuzhong District, Suzhou, Jiangsu Province, China
 +86 512-66292101
 www.resunsolar.com E: info@resunsolar.com

ELECTRICAL DATA(STC)

Rated Power in Watts-Pmax(Wp)	155W
Open Circuit Voltage-Voc(V)	24.46V
Short Circuit Current-Isc(A)	8.31A
Maximum Power Voltage-Vmp(V)	20.64V
Maximum Power Current-Imp(A)	7.51A
Module Efficiency (%)	18.05%

STC: Irradiance 1000 W/m², Cell Temperature 25°C, Air Mass AM1.5 according to EN 60904-3.

ELECTRICAL DATA(NOCT)

Maximum Power-Pmax (Wp)	115.6W
Open Circuit Voltage-Voc (V)	22.94V
Short Circuit Current-Isc (A)	6.71A
Maximum Power Voltage-Vmp(V)	19.20V
Maximum Power Current-Imp(A)	6.02A

NOCT: Irradiance at 800 W/m², Ambient Temperature 20°C, Wind Speed 1 m/s.

MECHANICAL DATA

Solar cells	Mono-crystalline 157 x132mm
Cell configuration	36 cells(4x9)
Module dimensions	1270x676x30mm
Weight	11KGS
Front Cover	3.2mm Tempered Glass
Frame Material	Anodized Aluminum Alloy
J-BOX	IP65
Cable	4mm ² (IEC)/12AWG(UL),900 mm
Connectors	MC4 or MC4 Comparable
Standard Packaging	

TEMPERATURE & MAXIMUM RATINGS

Nominal Operating Cell Temperature (NOCT)	45°C ± 2°C
Temperature Coefficient of Voc	-0.28%/°C
Temperature Coefficient of Isc	0.048%/°C
Temperature Coefficient of Pmax	-0.35%/°C
Operational Temperature	-40~+85°C
Maximum System Voltage	1000W(IEC)/1000v(UL)
Max Series Fuse Rating	15A
Limiting Reverse Current	15A

PACKAGING CONFIGURATION

Number of modules per container	
Package	
Package Weight	
Package Number	
Package Dimension	

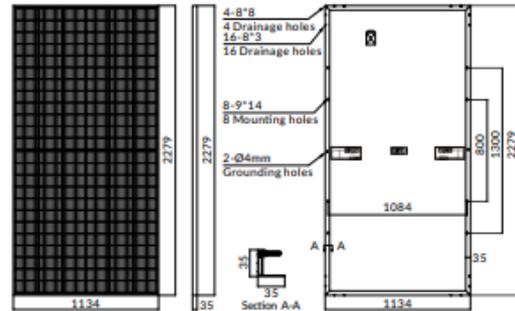
ANEXO F – Datasheet módulo fotovoltaico Luxen LNVU-550M

LUXPOWER® Mono | 550W

Quality Maker

MECHANICAL CHARACTERISTICS

Solar Cells	Mono
No. of Cells	144 (6x24)
Dimensions	2279 x 1134 x 35mm
Weight	27.5kgs
Front Glass	3.2mm coated tempered glass
Frame	Anodized aluminium alloy
Junction Box	Ip68 rated (3 by pass diodes)
	4.0mm ²
Output Cables	300mm (+) / 400mm (-)
	Length can be customized
Connectors	Mc4 compatible
Mechanical load test	5400Pa



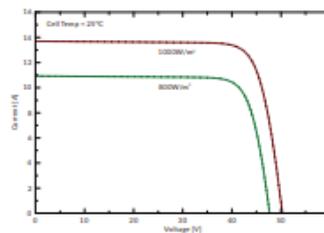
ELECTRICAL PARAMETERS

POWER CLASS	LNVU-550M	
	STC	NOCT
Maximum power (Pmax)	550W	417W
Open Circuit Voltage (Voc)	50.32V	48.10V
Short Circuit Current (Isc)	13.90A	11.07A
Voltage at Maximum power (Vmpp)	42.28V	39.90V
Current Maximum Power (Impp)	13.01A	10.45A
MODULE EFFICIENCY (%)	21.28%	
STC: Irradiance 1000W/m ² , cell temperature 25°C, AM1.5G NOCT: Irradiance 800W/m ² , ambient temperature 20°C, wind speed 1m/s, AM1.5G		

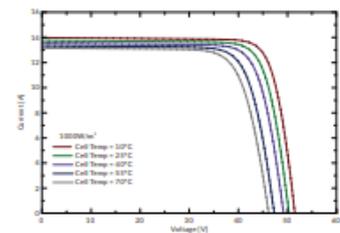
PACKING CONFIGURATION

Container	20' GP	40'HQ
Pieces per pallet	31	31
Pallets per container	5	20
Pieces per container	155	620

I-V CURVE



LNVU-550M/I-V



OPERATING CHARACTERISTICS

Operating Module Temperature	-40°C to + 85°C
Maximum System Voltage	1500 DC (IEC)
Maximum Series Fuse Rating	25A
Power Tolerance	0/+5W

TEMPERATURE CHARACTERISTICS

Nominal Operating Temperature (Noct)	45±2°C
Temperature Coefficient of Pmax	-0.36%/°C
Temperature Coefficient of Voc	-0.28%/°C
Temperature Coefficient of Isc	+0.05%/°C

Note: Due to continuous technical innovation, R&D and improvement, technical data above mentioned may be of modification accordingly. LUXEN SOLAR have the sole right to make such modification at anytime without further notice.

ANEXO G – Datasheet controlador de carga EPEVER 10A, 20A,30A,45A,60A.

Item	VS1024AU	VS2024AU	VS3024AU	VS3048AU	VS4524AU	VS4548AU	VS6024AU	VS6048AU	
Tensão nominal do sistema	12/24VDC Auto			12/24/36/48VDC Auto	12/24VDC Auto	12/24/36/48VDC Auto	12/24VDC Auto	12/24/36/48VDC Auto	
Faixa de tensão de entrada da bateria	9V~32V			9V~64V	9V~32V	9V~64V	9V~32V	9V~64V	
Corrente nominal de carga/descarga	10A@55°C	20A@55°C	30A@55°C		45A@55°C		60A@55°C		
Máx. Tensão de circuito aberto dos módulos	50V			96V	50V	96V	50V	96V	
Tipo de bateria	Sealed / Gel / Flooded								
Equalizar a tensão de carga※	Sealed:14.6V/ Gel: Não/ Flooded:14.8V								
Impulsionar tensão de carregamento※	Sealed:14.4V/ Gel:14.2V/ Flooded:14.6V								
Tensão de carga "Float"※	Sealed/Gel/Flooded:13.8V								
Reconexão por baixa tensão※	Sealed/Gel/Flooded:12.6V								
Desconexão por baixa tensão※	Sealed/Gel/Flooded:11.1V								
Autoconsumo	≤9.2mA/12V;≤11.7mA/24V; ≤14.5mA/36V;≤17mA/48V								
Coefficiente de compensação de temperatura	-3mV/°C/2V (25°C)								
Queda de tensão do circuito de carga	≤0.29V								
Queda de tensão do circuito de descarga	≤0.16V								
Faixa de temperatura do visor	-20°C~+70°C								
Temperatura do ambiente de trabalho	-25°C~+55°C(O produto pode trabalhar continuamente com carga 100%)								
Umidade relativa	≤95%, N.C.								
Proteção contra detritos sólidos e líquidos	IP30								
Aterramento	Positivo								
Interface para entrada USB	5VDC/2.4A(Total)								
Dimensão geral	142x85x41.5mm	160x94.9x49.3mm	181x100.9x59.8mm		194x118.4x63.8mm		214x128.7x72.2mm		
Dimensão de montagem	130x80mm	148x70mm	172x80mm		185x90mm		205x100mm		
Tamanho do orifício de montagem	Φ4.5mm			Φ5mm		Φ5mm		Φ5mm	
Terminais	4mm ² /12AWG	10mm ² /8AWG	16mm ² /6AWG		16mm ² /6AWG		25mm ² /4AWG		
Peso líquido	0.22kg	0.35kg	0.55kg	0.58kg	0.76kg	0.88kg	1.02kg	1.04kg	
Os parâmetros acima são para um sistema de 12V em 25°C. Duplique em um sistema de 24V, triplique em um sistema de 36V e quadruple em um sistema de 48V.									

ANEXO H – Datasheet baterias Freedom.

Principais Características Elétricas

Modelos		DF300	DF500	DF700	DF1000	DF1500	DF2000	DF2500	DF3000	DF4000/DF4001	DF4100
Capacidade @25°C (Ah)	10 h	24	30	41	54	76	94	130	156	200	200
	20 h	26	36	45	60	80	105	150	170	225	220
	100 h	30	40	50	70	93	115	165	185	240	240
Dimensões (mm)	Comprimento	175	175	210	244	330	330	511	511	518	525
	Largura	175	175	175	175	172	172	213	213	274	275
	Altura	175	175	175	175	240	240	230	230	242	250
Peso (Kg)		8,8	9,7	12,5	14,7	23,9	27,1	44,8	48,3	60	60,3
Torque	Mínimo	9 N.m	9 N.m	9 N.m	9 N.m	13,6 N.m	13,6 N.m	9 N.m	9 N.m	9 N.m	9 N.m
	Máximo	11 N.m	11 N.m	11 N.m	11 N.m	20,3 N.m	20,3 N.m	11 N.m	11 N.m	11 N.m	11 N.m
Tensão de Flutuação						de 13,2 a 13,8V @ 25°C					
Tensão de carga / equalização						de 14,4 a 15,5V @ 25°C					
Compensação de temperatura						Para cada 1°C acima de 25°C, subtrair 0,033V Para cada 1°C acima de 25°C, adicionar 0,033V					

Correntes de descarga (A) em diferentes regimes a 25°C (tensão final 10,5V)

Modelo	HORAS																MINUTOS		
	100hs	20hs	10hs	9hs	8hs	7hs	6hs	5hs	4,5hs	4hs	3,5hs	3hs	2,5hs	2hs	1,5hs	1h	45'	30'	15'
DF300	0,3	1,3	2,4	2,6	2,9	3,3	3,8	4,4	4,9	5,4	6	7	8,2	10	12,8	18	21	25	40
DF500	0,4	1,8	3	3,3	3,7	4,2	4,9	5,8	6,2	6,8	7,6	8,6	9,9	12	15	20	25,3	33	52
DF700	0,5	2,3	4,1	4,5	5	5,6	6,5	7,5	8,2	9,2	10	11,5	13,6	16,3	21	27	32	43	65
DF1000	0,7	3	5,4	5,8	6,4	7,3	8,2	9,8	10,5	11,5	12,5	14,5	17	19	25,2	35	42,5	55	84
DF1500	0,93	4	7,6	8,2	9	10	11,5	13,2	14,5	16	18,2	21	25	29,5	38	54	69	90	130
DF2000	1,2	5,3	9,4	10,2	11,5	13	14,5	17	18,4	20,3	22,6	25	29,5	34,5	44	60	75	96	150
DF2500	1,7	7,5	13	14,4	16,2	18	20	23	25	28	31	34	40	47	58	81	99	130	200
DF3000	1,9	8,5	15,6	17	19	21,4	24,7	28	30	33	36	41	48	57	72	95	112	152	231
DF4000 DF4001 DF4100	2,4	11	20	21,5	24	26,5	30	35	38	41,5	46	52	60	72	90	120	145	191	290

Capacidade em ampère-hora (Ah) a 25°C em diferentes regimes de descarga (tensão final 10,5V)

Modelo	HORAS																MINUTOS		
	100hs	20hs	10hs	9hs	8hs	7hs	6hs	5hs	4,5hs	4hs	3,5hs	3hs	2,5hs	2hs	1,5hs	1h	45'	30'	15'
DF300	30	26	24	23,8	23,5	23,1	22,8	22	21,9	21,6	21	21	20,5	20	19,2	18	15,8	12,5	10
DF500	40	36	30	29,9	29,8	29,7	29,4	28,8	27,7	27	26,6	25,8	24,8	24	22,5	20	19	16,5	13
DF700	50	45	41	40,5	40	39,5	39,2	37,5	37,1	36,8	35	34,5	34	32,5	31,5	27	24	21,5	16,3
DF1000	70	60	54	51,8	51,6	51,1	49,2	49	47,3	46	43,8	43,5	42,5	38	37,8	35	31,9	27,5	21
DF1500	93	80	76	73,8	72	70	69	66	65,3	64	63,7	63	62,5	59	57	54	51,8	45	32,5
DF2000	115	105	94	92	91,8	91	87	85	82,8	81,2	79,1	75	73,8	69	66	60	56,3	48	37,5
DF2500	165	150	130	129,8	129,6	126	120	115	112,5	112	108,5	102	100	94	87	81	74,3	65	50
DF3000	185	170	156	153	152	150	148,2	140	135	132	126	123	120	114	108	95	84	76	57,8
DF4000 DF4001 DF4100	240	220	200	193,5	192	185,5	180	175	171	166	161	156	150	144	135	120	108,8	95,5	72