

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**  
**PROGRAMA DE EDUCAÇÃO CONTINUADA**

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

JOSÉ ROBERTO SOARES

**Estudo de caso de Sistema Integrado de Microrrede com fonte solar  
fotovoltaica em Geração Distribuída na Cidade de Itanhaém/SP**

São Paulo

2023

JOSÉ ROBERTO SOARES

**Estudo de caso de Sistema Integrado de Microrrede com fonte solar fotovoltaica em Geração Distribuída na Cidade de Itanhaém/SP**

Monografia apresentada ao Programa de Educação Continuada da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo como forma de avaliação do Curso de Especialização em Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética.

Área de concentração: Energia Solar Fotovoltaica

Orientador: Professor Msc. Alvaro Nakano

São Paulo

2023

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

### Catálogo-na-publicação

SOARES, JOSÉ ROBERTO

Estudo de caso de Sistema Integrado de Microrrede com fonte solar fotovoltaica em Geração Distribuída na Cidade de Itanhaém/SP / J. R. SOARES -- São Paulo, 2023.

133 p.

Monografia (Especialização em Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. PECE – Programa de Educação Continuada em Engenharia.

1.FONTES RENOVÁVEIS DE ENERGIA 2. FONTES ALTERNATIVAS DE ENERGIAS 3.SISTEMAS FOTOVOLTAICOS 4.ILHAMENTO I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. PECE – Programa de Educação Continuada em Engenharia II.t.

## RESUMO

Este trabalho tem por objetivo apresentar um estudo de caso em que são mostrados a evolução do desenvolvimento a partir da definição, projeto, execução, testes, automação de uma instalação onde estão presentes todos os requisitos que qualificam uma microrrede: módulos de geração fotovoltaicos (1,85 kWp), bateria (2,88 kWh), inversor isolado (3,5 kVA), e, um módulo de automação para garantir que a instalação tenha energia de qualquer fonte disponível. No estudo de caso são demonstrados os cálculos para posição dos módulos fotovoltaico e módulo de automação. Os sistemas estão operando. A função No-Break do sistema isolado alimenta como cargas prioritárias: a geladeira, lâmpadas e tomadas. O estudo de caso, além do objetivo de geração de energia para a residência de Itanhaém/SP, também serve de laboratório de experimentação e aprendizado. Como resultado dos cálculos, o sistema supre energia de 22% da necessidade da residência e não gera retorno financeiro. O objetivo é a qualidade no fornecimento de energia que é plenamente atendida.

**Palavras-chave:** energia solar fotovoltaica, microgeração distribuída, microrrede conectada à rede, No-Break solar

## ABSTRACT

*This work aims to present a case study in which the evolution of development from the definition, design, execution, testing, automation of an installation where all the requirements that qualify a microgrid are present: photovoltaic generation modules (1.85 kWp), battery (2.88 kWh), isolated inverter (3.5 kVA), and an automation module to ensure that the installation has energy from any available source. In the case study, the calculations for the position of the photovoltaic modules and the automation module are demonstrated. The systems are operating. The UPS function of the isolated system feeds as priority loads: the refrigerator, lamps and outlets. The case study, in addition to the objective of generating energy for the residence of Itanhaém/SP, also serves as a laboratory of experimentation and learning. As a result of the calculations, the system supplies energy of 22% of the need of the residence and does not generate financial return. The goal is the quality in the energy supply that is fully met.*

**Keywords:** *photovoltaic solar energy, distributed microgeneration, grid-connected, microgrid, solar UPS.*

## LISTA DE SIMBOLOS E ABREVIATURAS

ABNT ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS

ANEEL AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA

*By-Pass* é um termo da língua inglesa que significa contornar, desviar, passagem secundária ou dar a volta.

CC Corrente Continua

CA Corrente Alternada

EPE EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA

GWp Giga Watts pico

MWp Mega Watts pico

Wh/m<sup>2</sup> Watts pico por metro quadrado

GWh/ano Giga Watts hora por ano

LFF Lítio Ferro Fosfato

OFF-GRID Sistema isolado da rede da concessionária de distribuição

ON-GRID Conectado à rede da concessionária de distribuição

RED Recursos Energéticos Distribuídos

SFA Sistema isolado ou em inglês *stand-alone* ou *off-grid*

SFCR Sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica ou em inglês *grid-tie* ou *on-grid*

STC As condições de teste padrão (STC) são condições nas quais os módulos fotovoltaicos são testados em um laboratório. O teste do módulo é realizado nas seguintes condições: intensidade de radiação solar de 1000 W/m<sup>2</sup>, massa de ar de AM 1.5, temperatura da célula de 25 °C e velocidade do vento de 1 m/s.

NOCT É a **temperatura nominal de operação da célula solar** a que o painel solar em laboratório quando submetido a 800 W/m<sup>2</sup> de irradiância (um dia de sol moderado, massa de ar de AM 1.5, a uma temperatura ambiente de 20°C e um vento de 1m/s.

.

CRESESB Centro de Referência para as Energias Solar e Eólica Sérgio S.Brito

TE Tarifa de Energia

TUSD Tarifa de Uso do Sistema de Distribuição

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Áreas aptas para a instalação de usinas fotovoltaicas .....	12
Figura 1.2 - Planilha com dados de Geração Distribuída para a Região Sudeste entre 2009 e 2023 .....	13
Figura 1.3 - Configuração OFF-GRID interativo Growatt.....	14
Figura 2.1 - A fonte da energia Solar. Ciclo carbono-oxigênio-nitrogênio	19
Figura 2.2 - A Estrutura do Sol.....	21
Figura 2.3 - Relação Sol-Terra .....	22
Figura 2.4 (a) e (b) - Órbita da Terra em torno do Sol, com seu eixo N-S inclinado de ângulo de 23,45°, indicando as estações do ano.....	24
Figura 2.5 - Apresentação dos dados do SunData .....	26
Figura 2.6 - Principais energias em estrutura de bandas para sólidos cristalinos.....	27
Figura 2.7 - Geração de elétron-lacuna pela incidência de fótons no semicondutor.	28
Figura 2.8 - Junção PN .....	28
Figura 2.9 - Estrutura de uma célula fotovoltaica .....	29
Figura 2.10 - Estrutura básica de uma célula de silício destacando: (1) região tipo n; (2) região tipo p, (3) zona de carga especial, onde se formou a junção pn e o campo elétrico; (4) geração de par elétron-lacuna; (5) filme antirreflexo; (6) contatos metálicos.....	29
Figura 2.11 - Associação em série de células fotovoltaicas.....	30
Figura 2.12 - Associação em paralelo de células fotovoltaica .....	31
Figura 2.13 - Tabela com eficiência dos módulos fotovoltaicos.....	33
Figura 2.14 - Especificação Técnica Jinko Tiger Pro N-Type TR60M(V) 430-450 Watt.....	34
Figura 2.15 - Características mecânicas do módulos Jinko 430-450 Watt.....	35
Figura 2.16 – Arquitetura: microrrede com o inversor OFF-GRID Growatt interativo	36
Figura 2.17 - Características dos Inversores OFF-GRID Growatt.....	37
Figura 2.18 - Parte do manual de instalação do Inversor OFF GRID SPF3500ES ...	38
Figura 2.19 - Sistema fotovoltaico Growatt Battery Ready .....	39
Figura 2.20 - Família de inversores híbridos Growatt.....	40
Figura 2.21 - Características Gerais dos inversores híbridos Growatt.....	41
Figura 2.22 - Ficha de dados dos inversores híbridos Growatt.....	42
Figura 2.23 - Arquitetura do inversor híbrido Deye.....	43
Figura 2.24 - Inversor híbrido Deye.....	44

Figura 2.25 - Diagrama de ligação do inversor híbrido DEYE .....	45
Figura 2.26 - Características técnicas dos inversores híbridos Deye .....	46
Figura 2.27 - Menu de configuração dos modos de trabalho do inversor Deye .....	47
Figura 2.28 - Menu de produção .....	48
Figura 2.29 - Bateria Moura chumbo-carbono Série MS .....	49
Figura 2.30 - Powerfree Cube 48V lítio 10kWh Energia Solar Smart 4.000 ciclos ....	52
Figura 2.31 - Especificações Técnicas Bateria Energy Source .....	53
Figura 3.1 - Imagem do Google mostrando a Baixada Santista .....	54
Figura 3.2 - Imagem do Centro Histórico de Itanhaém/SP .....	55
Figura 3.3 - Dados Climatológicos de Santos .....	56
Figura 3.4 - Gráfico para o Plano Inclinado da Estação Itanhaém.....	57
Figura 3.5 – Gráfico da demanda de energia suprida pelo inversor OFF-GRID .....	58
Figura 3.6 - características técnicas do módulo Jinko 440Wp .....	60
Figura 3.7 - Sistema de energia E <sub>GFV</sub> x NoBreak .....	63
Figura 3.8 - Quadro verificação de limites do sistema .....	64
Figura 3.9 - Quadro verificação de limites do sistema .....	65
Figura 3.10 - Tela da configuração do kit fotovoltaico utilizado no estudo de caso...	67
Figura 3.11 - Quadro com componentes do kit fotovoltaico.....	67
Figura 3.12 - Interfaces da bateria Dyness B3 .....	68
Figura 3.13 - Arquitetura do sistema OFF-GRID Interativo final .....	69
Figura 3.14 - Equipamentos que compõe o sistema OFF-GRID Interativo .....	70
Figura 3.15 - Inversor OFF-GRID Interativo SPF 3500 ES .....	71
Figura 3.16 - Instalação da bateria Dyness B3.....	72
Figura 3.17 - String Box ABB .....	73
Figura 3.18 - Sistema de transferência semiautomática solar x rede .....	74
Figura 3.19 - Sistema de transferência semiautomática.....	77
Figura 3.20 - Disjuntor DC para proteção da bateria. ....	78
Figura 3.21 - Estabilizador TSHARA .....	79
Figura 3.22 - Monitoramento ShinePhone do inversor OFF-GRID Growatt.....	80
Figura 4.1 - Planilha de cálculo da potência do projeto .....	81
Figura 4.2 - Explicação dos resultados financeiros do projeto.....	82
Figura 4.3 - Detalhe da análise financeira do projeto .....	84
Figura 4.4 - Detalhe da análise financeira do projeto .....	84

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	11
1.1 OBJETIVO GERAL .....	16
1.1.1 Objetivos Específicos .....	16
1.2. METODOLOGIA .....	16
2. REVISÃO DA BIBLIOGRAFIA .....	19
2.1 A fonte da energia solar .....	19
2.1.1 A estrutura solar .....	20
2.1.2 A constante solar.....	22
2.1.3 Movimento da Terra, estações .....	22
2.2 Avaliação do potencial solar.....	26
2.2.1 Software CRESESB – Potencial Solar – SunData V.3.0.....	26
2.3 Física da célula fotovoltaica .....	27
2.3.1 A célula fotovoltaica.....	28
2.4 O sistema fotovoltaico .....	31
2.4.1 Módulo fotovoltaico.....	33
2.4.2 O Inversor Growatt OFF-GRID interativo.....	35
2.4.3 O Inversor HÍBRIDO .....	38
2.4.4 Sistemas de baterias .....	49
3 Estudo de Caso .....	54
3.1 Cálculo dos ângulos de posicionamento de uma superfície em relação ao Sol referente ao estudo de caso.....	54
3.2 Cálculo dos valores de projeto .....	57
3.2.1 A Demanda de energia das cargas prioritárias .....	58
3.2.2 Cálculo de Horas de Sol Pleno (HSP) pelo CRESESB.....	59
3.2.3 Energia Disponibilizada pelo GFV para a rede .....	59
3.2.4 Estimativa de cálculo do número de módulos usando $E_{REDE}$ .....	61
3.2.5 Procedimento usando como referência $E_{GFV}$ .....	62
3.2.6 Estimativa de energia que o GFV deve entregar ao inversor .....	62

3.2.7 Verificação dos limites que o GFV deve entregar ao inversor .....	63
3.2.8 Análise dos dados resultantes dos cálculos.....	66
3.3 Escolha e compra do material do estudo de caso .....	67
3.4 Montagem dos equipamentos do estudo de caso .....	69
3.4.1 Arquitetura do sistema OFF-GRID interativo .....	69
3.4.2 Arranjo físico do sistema OFF-GRID interativo .....	70
3.4.3 O Inversor Growatt OFF-GRID interativo .....	71
3.4.4 Bateria de Lítio LIFEPO4 Dyness B3 48V.....	72
3.4.5 String Box ABB.....	73
3.4.6 Sistema de transferência semiautomática SOLAR x REDE .....	74
3.4.6 Estabilizador 220V/120V TSHARA .....	78
4 ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	81
4.1 Energia gerada pelo sistema fotovoltaico OFF-GRID Interativo .....	81
4.2 Resultado e Contribuições para o Mercado.....	85
5 CONCLUSÃO .....	86
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	87
APÊNDICE 1 – PLANILHA DE CÁLCULO FINANCEIRO DO PROJETO .....	90
ANEXO 1 – FORMULÁRIO DE EXPRESSÕES PARA AVALIAÇÃO DO POTENCIAL SOLAR .....	91
ANEXO 2 - ANEEL – INFOGRÁFICO GERAÇÃO DISTRIBUÍDA.....	94

## 1. INTRODUÇÃO

A Empresa de Pesquisa Energética (EPE) elaborou para consulta pública documento Plano Nacional de Energia (PNE 2050). No recorte publicado estão as páginas de 108 a 115. São mencionados os avanços da tecnologia Fotovoltaica (FV) no mundo e o potencial do Brasil na geração tanto centralizada em grandes usinas quanto a geração distribuída. Foi realizado levantamento das áreas onde sejam mais favoráveis e possível a instalação de usinas de geração para despacho. Foram consideradas somente áreas úteis com tamanho maior que 0,5 km<sup>2</sup> com declive inferior a 3%, o potencial de radiação acima de 6 kWh/m<sup>2</sup>.dia o que permite a instalação de 307 GWp, áreas mostradas na Figura 1.

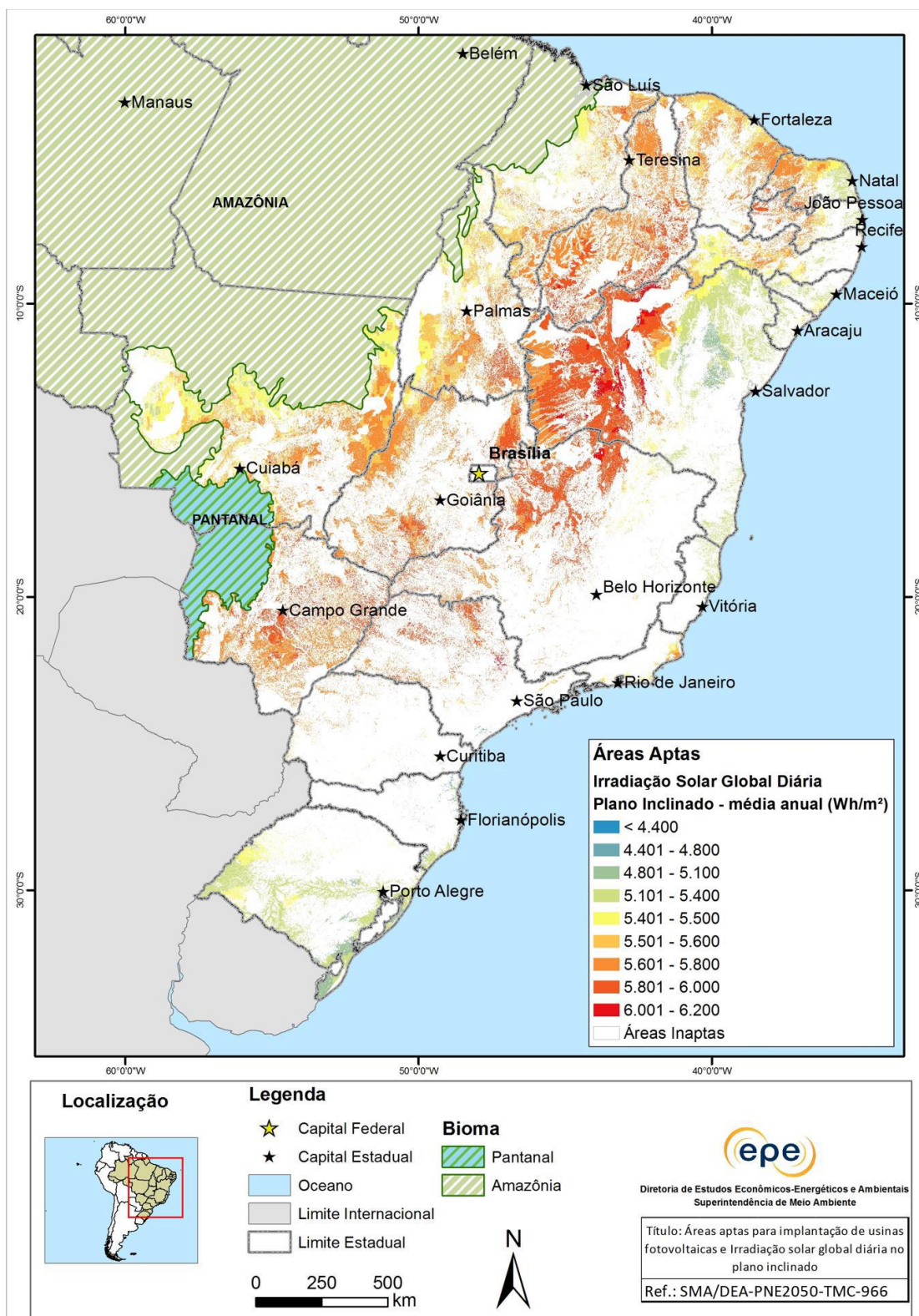
A EPE (2020, pg.148) define o termo Recursos Energéticos Distribuídos (RED) *"...como tecnologias de geração, armazenamento de energia elétrica e redução do consumo localizados dentro dos limites da área de uma determinada concessionária de distribuição, normalmente junto a unidades consumidoras, atrás do medidor"*.

Ainda a EPE (2020, pg.152-5) destaca como grande contribuição a Eficiência Energética na introdução de melhores práticas na geração e consumo de eletricidade no Brasil ou no mundo. Vê como grande aliada na transição do setor energético mundial, juntamente com as energias renováveis, padrões de consumo e captura de carbono (CO<sub>2</sub>).

Na Figura 1.1, a EPE considerou apenas áreas propícias para instalação de usinas fotovoltaicas centralizadas (potencial de radiação acima de 6 kWh/m<sup>2</sup>.dia) que poderão fazer parte do SIN (Sistema Integrado Nacional) e ofertadas em leilão pela Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE). Entretanto a vasta superfície do território brasileiro permite a instalação de usinas sobre telhados com grande aproveitamento da luz solar.

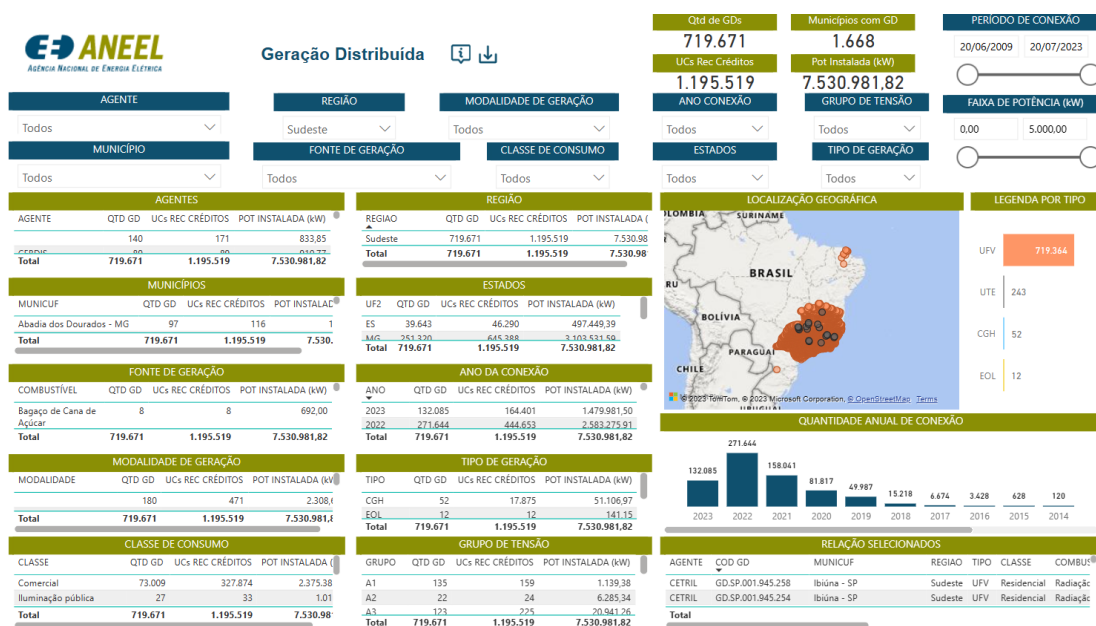
Segundo Moreira Júnior & Souza (2020), num estudo comparativo entre os níveis de radiação anuais existentes na Europa, principalmente, na Alemanha, mostraram que os menores índices de radiação global no plano horizontal no Brasil atingem cerca de 1.500 kWh/m<sup>2</sup> superiores aos maiores índices de radiação presentes na Alemanha que recebe cerca de 1.200 kWh/m<sup>2</sup>.

Figura 1.1 - Áreas aptas para a instalação de usinas fotovoltaicas



Fonte – EPE (2020, p. 152).

Figura 1.2 - Planilha com dados de Geração Distribuída para a Região Sudeste entre 2009 e 2023



Fonte – ANEEL<sup>1</sup> (2023).

A planilha mostrada na Figura 1.2, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2023) divulga o crescimento dos diversos setores de energia, a seleção dos números para Geração Distribuída, referente à energia fotovoltaica, em particular, para a Região Sudeste entre 2009 e 2023 (potencial de radiação média de 4,55 kWhm<sup>2</sup>.dia), concentrou os maiores investimentos em usinas tanto de grande porte quanto para as micro e minigeração distribuídas.

A Figura 1.2 também mostra que, para a Geração Distribuída no Sudeste entre 2009 e 2023, foram instaladas 719.671 unidades em 1.668 municípios, sendo que, 1.195.519 unidades consumidores receberam créditos e a potência total instalada de 7,5 GW.

Com o advento da popularização da energia fotovoltaica o desejo de gerar sua própria energia e mantê-la funcionando quando falta a energia, por exemplo, durante uma tempestade, motivou muitas pessoas a fazerem um investimento na instalação da sua própria usina. Os locais onde não existe conexão com a rede de energia, que são isoladas, também fazem uso dessa tecnologia, chamada de *OFF-GRID* (do inglês isolado da rede).

<sup>1</sup> Melhor visualização no ANEXO 4

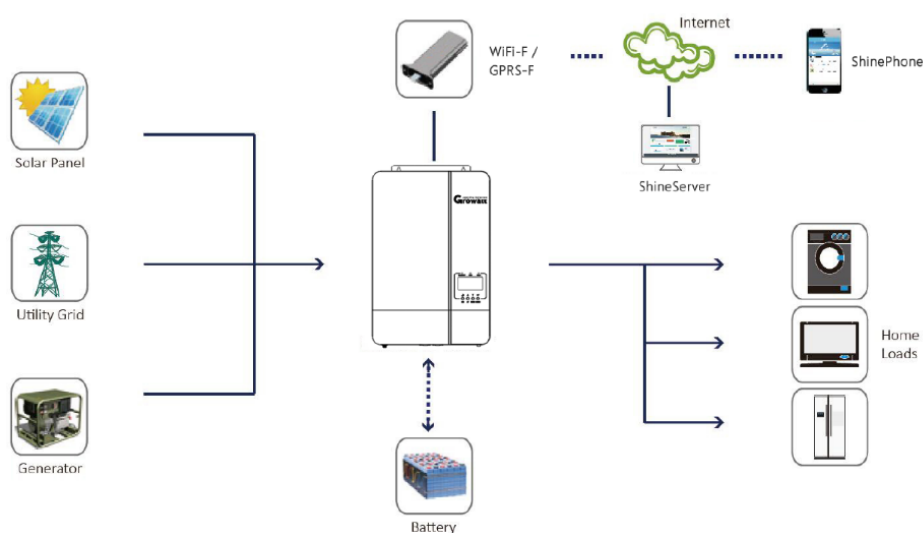
Este estudo de caso trata dessa tecnologia, *OFF-GRID*, como um recurso adicional ao fornecimento de energia da concessionária com a função de ser um **nobreak solar**.

Esta função de **nobreak solar** é bastante aceita no mercado. Atualmente várias opções estão sendo ofertadas e os custos estão caindo. É muito útil para pequenos escritórios que dependem da internet ou em residência onde a interrupção de energia é frequente.

O inversor *OFF-GRID*, além da entrada de geração fotovoltaica e bateria, tem como entrada secundária a rede da concessionária de energia, que vem a proporcionar uma opção de fonte unidirecional, somente para consumo, sem a possibilidade de injeção à rede

Por ser interativo, gera somente o necessário para alimentar cargas prioritárias, basicamente: geladeira e algumas lâmpadas e poucas tomadas. O Diagrama 1 mostra uma configuração típica do inversor OFF-GRID interativo. No lado esquerdo estão presentes as possíveis entradas de energia, no lado direito a utilização típica de alimentação de cargas prioritárias e, na ausência das fontes primárias de energia, tem a presença da bateria para suprir a demanda das cargas por um tempo limitado pela capacidade de carga armazenada na bateria.

Figura 1.3 - Configuração OFF-GRID interativo Growatt



Fonte: Growatt (2021).

O conjunto de equipamentos instalados fazem parte de uma microrrede de energia.

Definição microrrede:

Integração de vários recursos de geração distribuída, armazenamento de energia elétrica e cargas em sistema de distribuição secundário capaz de operar conectado a uma rede principal de distribuição de energia elétrica e, também de forma isolada, controlando os parâmetros de eletricidade e provendo condições para ações de recomposição e de autorrestabelecimento. (BRASIL. Lei nº 14.300, 2022)

Com o amadurecimento das microrredes, o grau de automação e sofisticação dos controles permitem a operação das microrredes de forma local ou remoto.

## 1.1 OBJETIVO GERAL

Este trabalho apresenta um estudo de caso de um Sistema Integrado de Microrrede com uso de fonte de energia solar fotovoltaica em Geração Distribuída na Cidade de Itanhaém/SP.

O objetivo é, através de estudo de caso real, estudar o estado da arte para projetar e instalar uma microrrede de geração fotovoltaica distribuída.

### 1.1.1 Objetivos Específicos

- Pesquisa de literaturas e normas

- Dimensionamento do sistema fotovoltaico
- Estudar a evolução do sistema
- Mostrar o monitoramento e a automação do processo de continuidade.

## 1.2. METODOLOGIA

A etapa de preparação abrange atividades de estudos das regulamentações e normas técnicas:

1. ANEEL RN 482/12 e revisão REN 517/12
2. Lei nº 14.300/2022
3. PRODIST – módulo 3 – Resolução Normativa ANEEL Nº 956/2021
4. NORMA ND.64 Revisão 02 – 11/2017 (Neoenergia/Elektro)

Outras normas técnicas, já de conhecimento, que são bases de dimensionamentos técnicos normas técnicas:

5. ABNT NBR 5410: Instalações elétricas de baixa tensão
6. ABNT NBR 5419: Proteção de estruturas contra descargas atmosféricas

Inicialmente foi feita uma pesquisa bibliográfica para embasamento dessa pesquisa. Foram consultadas as bibliografia e normas pertinentes ao tema.

Por se tratar de estudo de caso em que os equipamentos já estão implantados, foram feitos estudos, cálculos e projeções para ratificar o projeto que foi elaborado e implantado ou mostrar as ineficiências e erros propondo o modo correto de projeto e implementação.

Por se tratar de casa de veraneio (uso preferencial) o levantamento de carga foi prejudicado sendo baseado essencialmente na fatura de energia.

Cálculo de consumo diário estimado com base na demanda e no período sem insolação. Cálculos, baseados no livro Simões Moreira et al. (2021), para dias médio por mês e valores de declinação solar por mês, e, mapeamento do CRESESB para a localidade.

O estudo de caso tem como coordenadas:

1. Latitude -24.1577300 S
2. Longitude 46.7736100 W
3. LO 45 graus
4. Local: cidade de Itanhaém/SP

Cálculo da radiação integrada sobre plano inclinado em função da área de coletores: escolha do melhor  $\beta$ , com base no consumo diário calculado.

Cálculo da radiação integrada diária média mensal sobre superfície inclinado de  $\beta$  a partir da radiação integrada diária mensal sobre superfície horizontal obtido da CRESESB.

Determinação dos principais elementos do sistema solar fotovoltaico com suas especificações técnicas, objetivando atender aos requisitos técnicos das normas e regulamentações, bem como suprir as energias demandadas no dimensionamento anterior.

Abrangência:

1. Caracterização de uma microrrede: “*sistema elétrico de pequeno porte com cargas e Recursos Energéticos Distribuídos com capacidade de operar ilhado ou conectado à rede de distribuição*” (PRODIST-MODULO 1, 2021).
2. Coletores fotovoltaicos planos com células monocristalinas,
3. Inversor de frequência *OFF-GRID* Interativo desconectado da rede (não gera crédito) com entrada para rede normal de energia para atender cargas prioritárias com função backup atendido por bateria;
4. Dispositivo de automação com a função de suprir de forma contínua as cargas prioritárias. Faz o By-pass do sistema *OFF-GRID* quando este falhar ou a bateria descarregar revertendo a alimentação para a rede da concessionária caso esteja ativa;

5. Geração Distribuída, desconectado da rede, sem usufruir do SCEE, a geração distribuída pode ser entendida como uma fonte de energia elétrica conectada de forma direta à rede de distribuição. Partindo desse princípio, é possível afirmar que a geração distribuída pode funcionar através de variadas fontes de energia sustentáveis, como a solar, eólica e provenientes de usinas hidroelétricas

Análise de viabilidade econômica do projeto: Pay Back e TIR, considerando variáveis de manutenção, taxas e vida útil.

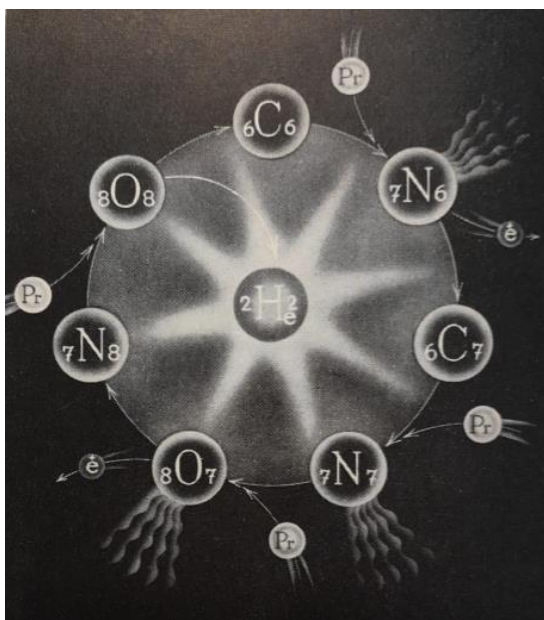
## 2. REVISÃO DA BIBLIOGRAFIA

Por se tratar de um estudo sobre geração de energia fotovoltaica os temas abordados estão ligados aos conceitos de geometria solar e a rotação da Terra.

### 2.1 A fonte da energia solar

O Dr. Fritz Kahn (KAHN, 195?) escreveu o livro O Átomo. É um livro fascinante escrito quando ainda se achava que a energia atômica poderia ser utilizada no dia a dia por pessoas comuns. O livro é muito bem ilustrado e as explicações são altamente compreensivas. Nele, segundo o astrofísico Bethe (Hans Albrecht Bethe 1906-2005, Nobel de Física de 1967) descreve o processo pelo qual é produzida a energia nas estrelas<sup>2</sup>. Na Figura 3 está representada de forma artística o ciclo carbono-oxigênio-nitrogênio descrito por Bethe.

Figura 2.1 - A fonte da energia Solar. Ciclo carbono-oxigênio-nitrogênio



Fonte: O Átomo (KAHN, 195?, pg.146).

<sup>2</sup> De 1935 a 1938 estudou reações nucleares e reações (ciclo carbono-oxigênio-nitrogênio), dirigindo a sua importante contribuição à nucleossíntese estelar.  
[https://pt.wikipedia.org/wiki/Hans\\_Bethe](https://pt.wikipedia.org/wiki/Hans_Bethe)

### Descrição do processo da Figura 2.1.

1. Penetrou um próton no núcleo de um átomo de carbono  $6\text{ C }6$ ; de  $6\text{ C }6$  resulta  $7\text{ N }6$ , nitrogênio (núcleo normal:  $7\text{ N }8$ );
2. O núcleo  $7\text{ N }6$  não é um núcleo normal; contém nêutrons de menos, e, para restabelecer seu equilíbrio, transforma 1 próton em 2 nêutron. Para esse fim, descarrega uma carga positiva, um elétron positivo – chamado pósitron – emitindo ao mesmo tempo raios gama. Essa descarga e essa radiação gama são a primeira contribuição para o aquecimento do Sol fornecida pelo processo circular.
3. No núcleo  $6\text{ C }7$  penetra o 2º próton, elevando o núcleo a  $7\text{ N }7$ , reconvertendo-o assim em nitrogênio ( $7\text{ N }8$ ). Entretanto, também este núcleo está sobrecarregado e radia. Essa radiação é a segunda contribuição para o aquecimento do Sol.
4. No núcleo  $7\text{ N }7$  penetra o 3º próton, dando origem a  $8\text{ O }7$  um isótopo de oxigênio ( $8\text{ O }8$ ), que tem vida breve. Também esse descarrega o excesso de massa e energia na forma de pósitron e radiação, e o nitrogênio elevado ao nível de oxigênio torna a recair ao plano de nitrogênio.
5. Ao termo de uma média de 20 milhões de anos, penetra esse núcleo o 4º próton, transformando  $7\text{ N }8$  em oxigênio  $8\text{ O }8$ .
6. Embora o núcleo  $8\text{ O }8$  seja oxigênio normal, é, contudo, um núcleo dotado de um número desusadamente exíguo de nêutrons para dominar os prótons, sendo por isto lábil. Sob acréscimo da energia trazida pelo próton que nele penetrou, expelle um grupo de fragmentos nucleares, 2 prótons + 2 nêutrons, isto é, **2 He**, um núcleo de hélio; aparece o hélio, produto da síntese.
7. Pela emissão do núcleo de hélio, o núcleo  $8\text{ O }8$  baixa por dois degraus, resultando  $6\text{ C }6$  de carbono – estado esse com que o processo circular havia começado

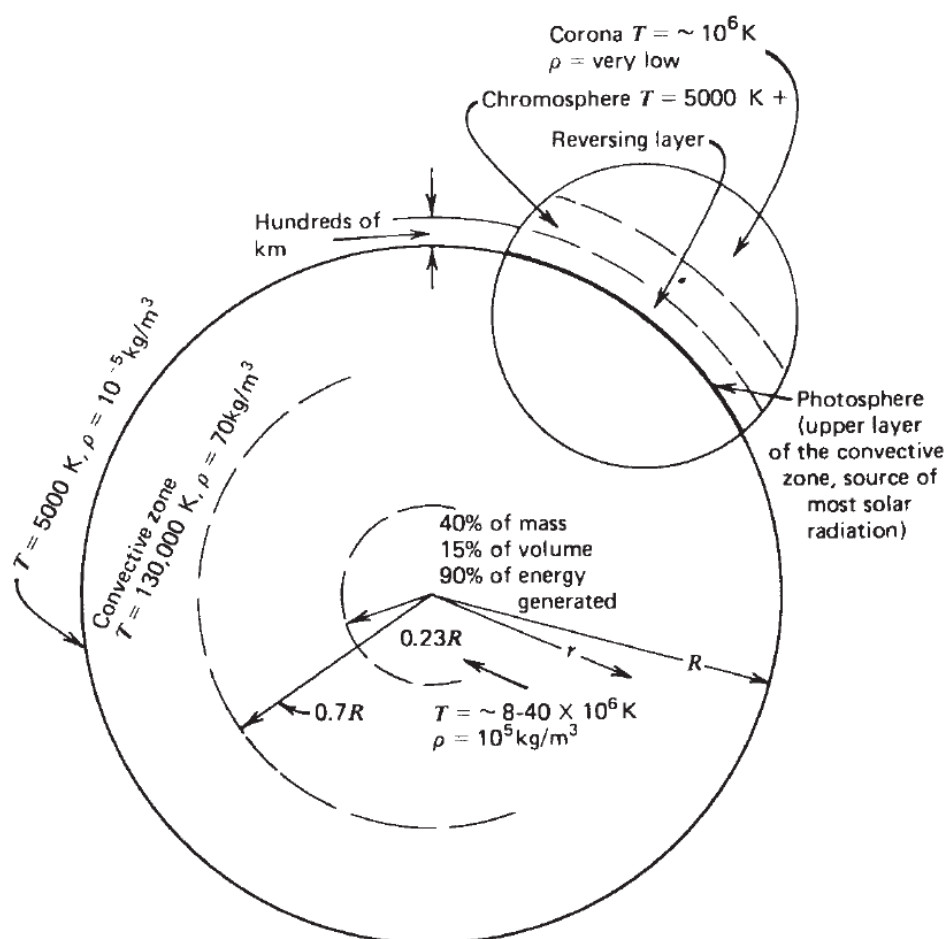
Esse processo de síntese pelo qual o hélio é formado pesa 0,03022 unidades menor que os quatro prótons que participaram do processo circular. Esta perda de massa corresponde a “tara de embalagem” no hélio formado. Essa energia irradia como calor solar e que parte dessa energia chega à Terra. Na época se estimou que essa perda de energia corresponde a 4.000 toneladas de massa, por segundo, do Sol. Entretanto, o Sol atrai uma quantidade grande de massa que compensa essa perda toda.

#### 2.1.1 A estrutura solar

No livro *Solar Engineering of Thermal Processes, Photovoltaics and wind*, Duffie, Beckman & Blair (2020) fazem um estudo sobre a estrutura solar. O Sol é uma esfera de matéria gasosa intensamente quente com um diâmetro de  $1,39 \times 10^9$  m e está, em média, a  $1,5 \times 10^{11}$  m da Terra. Tem uma temperatura efetiva de corpo

negro de 5.777 K. A energia produzida no interior da esfera solar a temperaturas de muitos milhões de graus deve ser transferida para a superfície e então irradiados para o espaço. Uma estrutura esquemática do sol é mostrada na Figura 4. Estima-se que 90% dos a energia é gerada na região de 0 a 0,23R (onde R é o raio do Sol), que contém 40% da massa do Sol. A uma distância de 0,7R do centro, a temperatura caiu para cerca de 130.000 K e a densidade caiu para 70 kg/m<sup>3</sup>; aqui processos de convecção começam a se tornar importantes, e a zona de 0,7 a 1,0R é conhecida como zona convectiva. Dentro desta zona a temperatura cai para cerca de 5.000 K e a densidade para cerca de 10<sup>-5</sup> kg/m<sup>3</sup>.

Figura 2.2 - A Estrutura do Sol

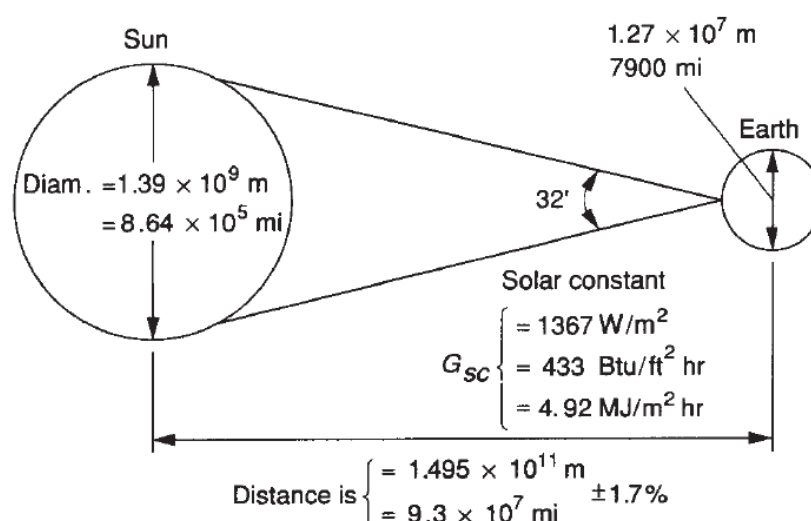


Fonte: DUFFIE, BECKMAN & BLAIR (2020, p.4).

### 2.1.2 A constante solar

A Figura 2.3 mostra uma relação esquemática Sol-Terra. A excentricidade da órbita da Terra é tal que a distância entre o Sol e a Terra varia de 1,7%. A uma distância de uma unidade astronômica,  $1,495 \times 10^{11}$  m a distância média Terra-Sol, o Sol subtende um ângulo de 32'. (DUFFIE, BECKMAN & BLAIR, 2020).

Figura 2.3 - Relação Sol-Terra



Fonte: DUFFIE, BECKMAN & BLAIR (2020, p.5).

Medições realizadas com instrumentos a bordo de aeronaves espaciais se chegou a medida de constante solar  $G_{sc}$  é a energia do Sol por unidade de tempo recebida em uma unidade de área de superfície perpendicular à direção de propagação da radiação em média distância Terra-Sol fora da atmosfera. Estima-se que a radiação recebida na Terra seja  $1.367$  W/m<sup>2</sup>. Esse valor é adotado por Duffie, Beckman & Blair (2020).

### 2.1.3 Movimento da Terra, estações

A Terra tem dois movimentos principais: rotação, a Terra gira em torno do seu próprio eixo e o movimento de translação, caminho que o planeta percorre ao redor do Sol (órbita elíptica). O movimento de rotação dura 23 horas, 56 minutos e 14

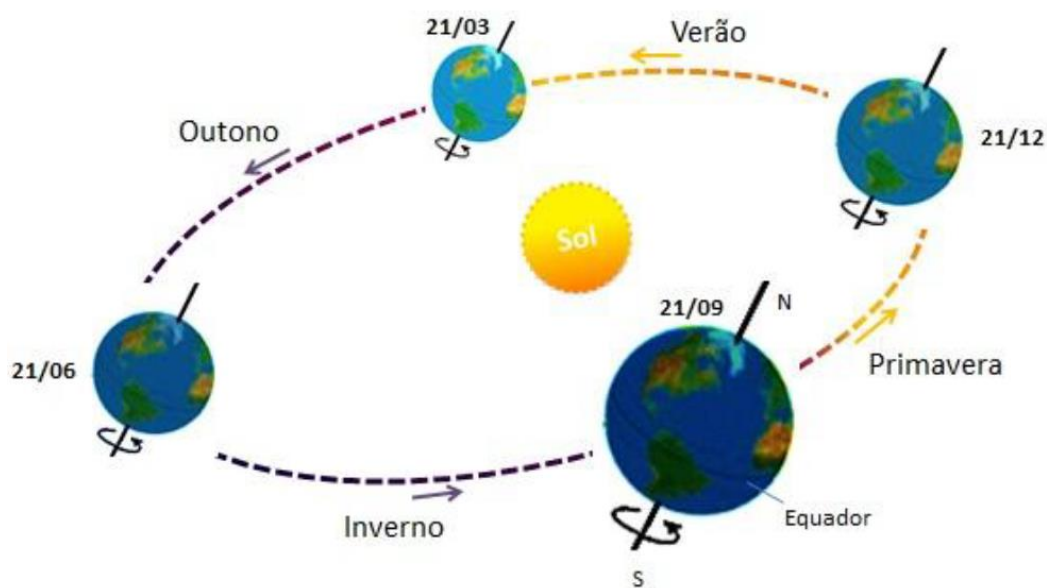
segundos que dura um dia. Enquanto o movimento de translação percorre o caminho em torno do Sol numa velocidade de aproximadamente 107.000 km/h. Dura 365 dias, 5 horas e 48 minutos que corresponde a um ano. Por convenção o chamado ano civil tem duração de 365 dias. A cada quatro anos se faz uma correção com o ano tendo 366 dias e chamado bissexto. Esse vagar pelo espaço ao redor do Sol tem duas situações. Quando está mais próximo, aproximadamente 147 milhões de quilômetros a velocidade é maior e esse ponto chama-se Periélio. No ponto mais distante, aproximadamente 152 milhões de quilômetros a velocidade é menor e este ponto se chama Afélio (UOL, 2013<sup>3</sup>).

Pinho & Galdino (2014) organizadores do livro Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos fazem extensa referência ao sistema solar e suas características. Na seção sobre a Geometria Sol-Terra (Capítulo 2.2, pg. 69) discorrem que a Terra descreve um movimento em torno do Sol numa trajetória elíptica com pequena excentricidade ( $\varepsilon \approx 0,017$ ). O seu eixo em relação ao plano normal à elipse tem inclinação aproximada de  $23,45^\circ$ . O movimento de translação em torno do Sol e com essa inclinação dá origem às estações do ano. Ao longo do ano observa-se que o ângulo formado pelos raios solares no plano do Equador varia entre  $+23,45^\circ$  no inverno (em torno do dia 21 de junho no hemisfério Sul) e  $-23,45^\circ$  no verão (em torno do dia 21 de dezembro). Esse ângulo é denominado Declinação Solar ( $\delta$ ) positivo no ao Norte e negativo o Sul do Equador. No equinócio da primavera (21 de setembro) e equinócio de outono (21 de março) os raios solares iluminam os dois hemisférios de forma igual ( $\delta = 0$ ). A Figura 2.4 (a) mostra o movimento da Terra em torno do Sol e as estações do ano para o hemisfério Sul e a Figura 2.4 (b) mostra a Declinação Solar ( $\delta$ ) em quatro posições ao longo do ano (PINHO & GALDINO, 2014).

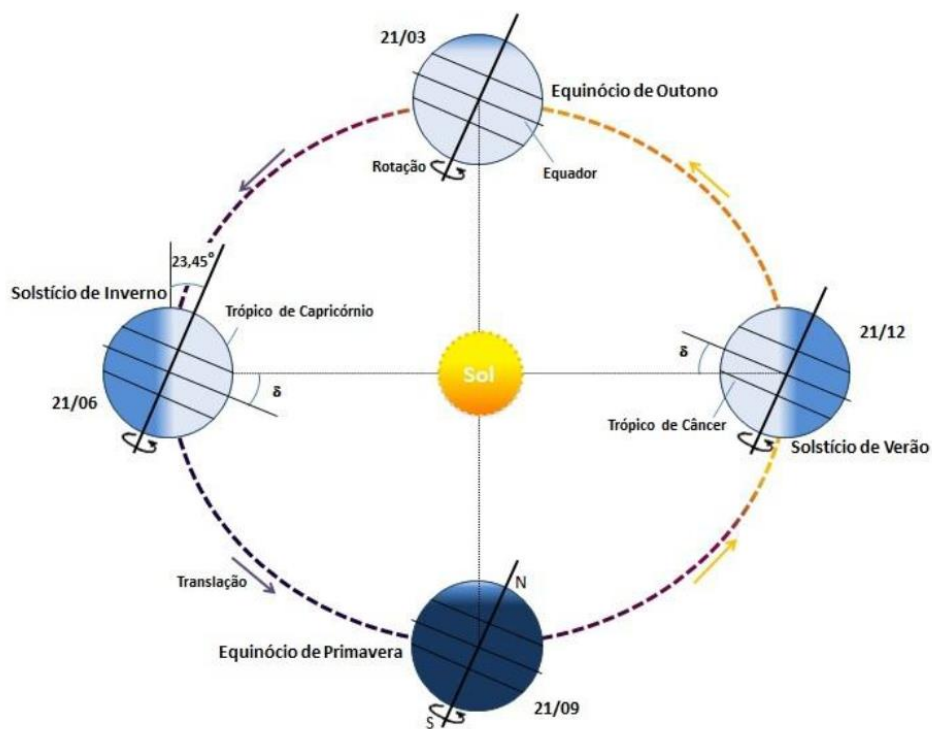
---

<sup>3</sup> <https://mundoeducacao.uol.com.br/geografia/movimentos-terra.htm>

Figura 2.4 (a) e (b) - Órbita da Terra em torno do Sol, com seu eixo N-S inclinado de ângulo de  $23,45^\circ$ , indicando as estações do ano.



(a)



(b)

Segundo Souza (2023) a Terra tem uma inclinação axial de aproximadamente  $23^{\circ}26'$  (vinte e três graus e vinte e seis minutos de arco). Essa inclinação é mostrada na Figura 2.4. Devido a essa inclinação, durante o movimento de translação da Terra ao redor do Sol, partes da superfície não recebem a mesma quantidade de calor (ou luz solar). Essa diferença de temperatura caracteriza as mudanças de estações ao longo do ano (Souza, 2023).

- Na posição chamada de **Equinócio**, a superfície voltada para o Sol recebe a mesma incidência de raios solares nos hemisférios Sul e Norte. Incide diretamente sobre a linha do Equador. Ocorre duas vezes no ano, entre os dias 21-22 de março (outono no hemisfério sul e primavera no hemisfério norte), e 22-23 de setembro (primavera no hemisfério sul e outono no hemisfério norte).
- O posicionamento mais afastado tem o nome **Solstício**, raios do Sol incide na vertical da latitude  $23,5^{\circ}$  N entre os dias 21-22 de junho (verão no hemisfério norte e inverno no hemisfério sul) e, também, incide na vertical da latitude  $23,5^{\circ}$  S entre os dias 21-22 de dezembro (verão no hemisfério sul e inverno no hemisfério norte).

Ainda segundo Souza (2023) outros movimentos relacionados com o posicionamento da Terra e do Sol:

- **Precessão**: conhecido também como precessão dos equinócios, corresponde ao movimento em que há deslocamento circular realizado pelo planeta em torno do seu eixo. Esse movimento é realizado no sentido horário e é provocado pelas forças gravitacionais da Lua e do Sol.
- **Nutação**: corresponde ao movimento realizado pela Terra em que há uma variação em seu eixo de rotação a cada 18,6 anos. É provocado pela força gravitacional que a Lua exerce sobre a Terra.
- **Deslocamento do periélio**: corresponde o movimento em que há variação da órbita terrestre em torno do Sol, havendo uma repetição cíclica de 21 mil anos.

## 2.2 Avaliação do potencial solar

Pacheco (2021, p.222-59) no capítulo 9, a Tabela 9.1 (pg.223-5, reproduzida no **Anexo 1**) traz o resumo do formulário para avaliação do potencial solar.

### 2.2.1 Software CRESESB – Potencial Solar – SunData V.3.0

O CRESESB<sup>4</sup> desenvolveu um software para calcular a irradiação média mensal especificamente para o território brasileiro. São utilizados dados levantados de algumas fontes tais como: Atlas Brasileiro de Energia Solar (2ª Edição); Atlas Solarimétrico do Brasil (2000); Atlas Solarimétrico de Minas Gerais (2012); Energia Solar Paulista: Levantamento do Potencial (2013); Atlas de Energia Solar do Paraná (2017).

O programa fornece os dados de irradiação de no mínimo três localidades próximas ao ponto de interesse. Os dados fornecidos abrangem 12 meses do ano referente à irradiação solar, em kWh/m<sup>2</sup>.dia no plano horizontal. A Figura 2.5 traz uma apresentação dos dados disponibilizados pelo programa SunData.

Figura 2.5 - Apresentação dos dados do SunData

#### ☐ Apresentação dos Dados

Os dados são apresentados no seguinte formato:

Município:XXXXXX

Estado:XX

Latitude: XX,XX° N|S

Longitude:XX,XX° O

Distância do ponto de ref. (XX,XX° N|S; XX,XX° O) : XX,X Km

		Irradiação diária média [kwh/m2.dia]													
Ângulo	Inclinação [°]	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Média	Delta
Ângulo igual a latitude	XX	X,xx	X,xx	X,xx	X,xx	X,xx	X,xx	X,xx	X,xx	X,xx	X,xx	X,xx	X,xx	X,xx	X,xx
Maior média anual	XX	X,xx	X,xx	X,xx	X,xx	X,xx	X,xx	X,xx	X,xx	X,xx	X,xx	X,xx	X,xx	X,xx	X,xx
Maior mínimo mensal	XX	X,xx	X,xx	X,xx	X,xx	X,xx	X,xx	X,xx	X,xx	X,xx	X,xx	X,xx	X,xx	X,xx	X,xx

No título da tabela é mostrado o nome da localidade, o Estado da Federação (ou o país a que pertence, se não for o Brasil), suas coordenadas geográficas, e a distância (km) em linha reta do ponto de interesse pesquisado.

Os dados da tabela mostram a irradiação solar diária média mensal (kWh/m<sup>2</sup>.dia) para todos os meses do ano, a partir de Janeiro.

Adicionalmente são mostrados o valor da menor irradiação diária média mensal (**Mínimo**), da maior irradiação diária média mensal (**Máximo**), da irradiação diária média anual (**Média**) e da diferença entre a máxima e a mínima (**Delta**).

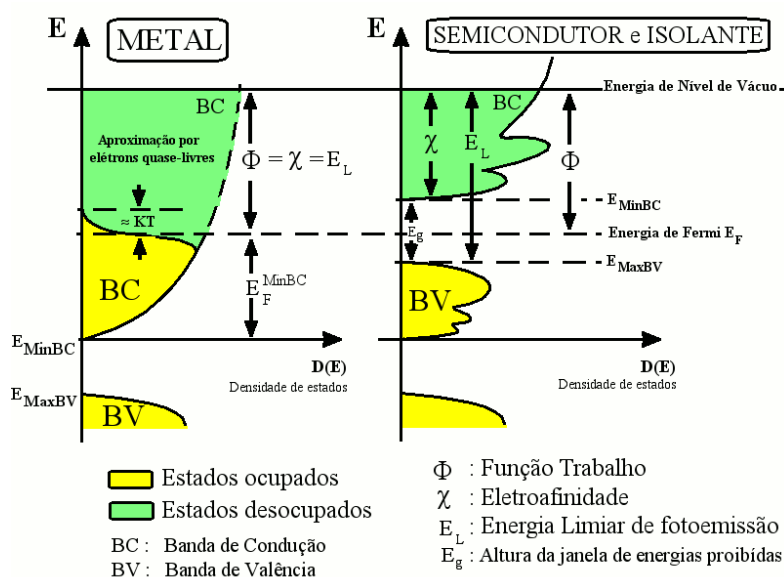
Fonte: CRESESB (2018).

<sup>4</sup> <http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=sundata&>

### 2.3 Física da célula fotovoltaica

As fotocélulas ou foto resistores que formam uma célula fotovoltaica é feita de material semicondutor. Os tipos de células fotovoltaicas são conhecidos de há muito tempo. O módulos do presente estudo de caso são construídas com silício monocristalino. O silício é um material tetravalente que formam ligações covalente com os vizinhos. Enrico Fermi foi um brilhante físico que trabalhou no projeto da bomba atômica Manhatan. Também fez enorme contribuição para a física do estado sólido.

Figura 2.6 - Principais energias em estrutura de bandas para sólidos cristalinos.

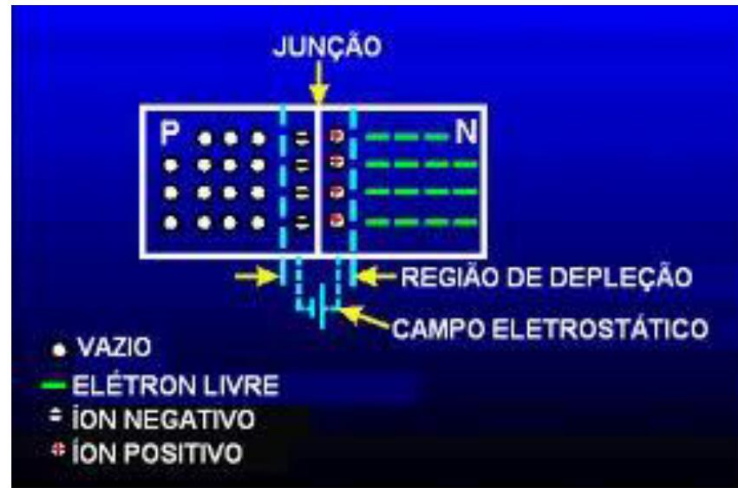


Fonte: Energia de Fermi<sup>5</sup>(2023)

A Figura 2.6 mostra duas junções: metálica e semicondutor e isolante. Na junção metálica a passagem de elétrons pela junção é quase livre. Exemplo: interruptor de lâmpada. Na junção de semicondutor a passagem dos elétrons depende do rompimento (depleção) da camada de condução. No caso da fotocélula a injeção de fótons é suficiente para fazer com que a camada de condução escoe os elétrons da banda e condução para a banda de valência.

<sup>5</sup> [https://pt.wikipedia.org/wiki/Energia\\_de\\_Fermi](https://pt.wikipedia.org/wiki/Energia_de_Fermi)

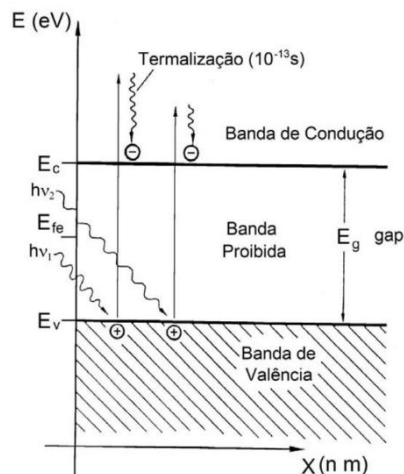
Figura 2.7 - Geração de elétron-lacuna pela incidência de fótons no semicondutor.



Fonte: CRESEB (2015 p.107)

O material que compõe o semicondutor é dopado com átomos que doadores de elétrons (tipo n) e doadores de lacunas (tipo p). As Figura 2.7 e 2.8 mostram esquematicamente a formação de um junção PN.

Figura 2.8 - Junção PN



Fonte: PACHECO (2021, notas de aula).

### 2.3.1 A célula fotovoltaica

Um módulo fotovoltaico é composto por dezenas de células fotovoltaicas: 60, 120, 144, dependendo da capacidade de geração, utilização e custo. A Figura 2.9

mostra a foto de uma célula fotovoltaica montada com as ligações de no barramento de alumínio.

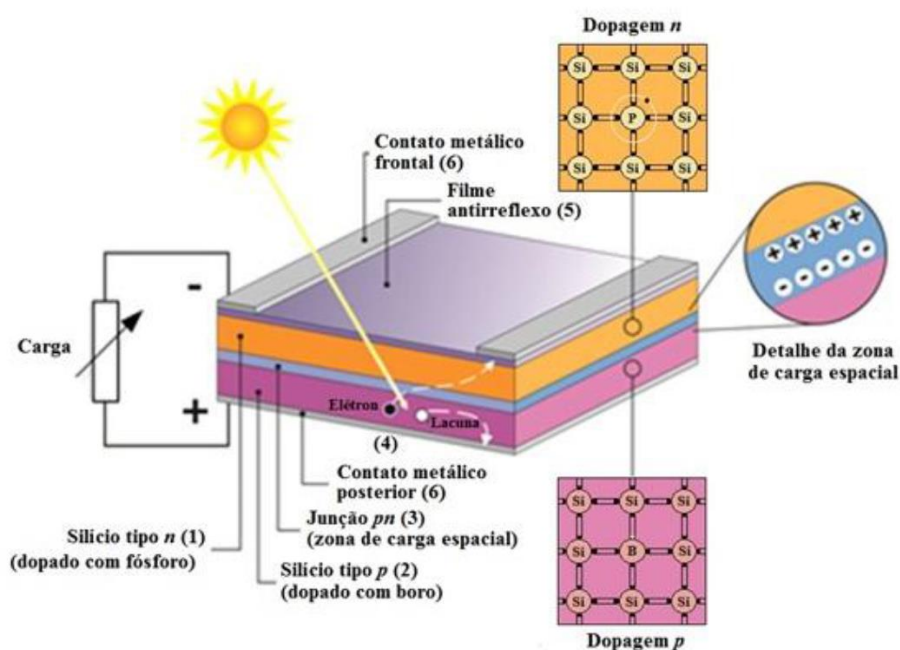
Figura 2.9 - Estrutura de uma célula fotovoltaica



Fonte: PACHECO (2021, notas de aula).

A Figura 2.10 mostra a estrutura básica de uma célula de silício com os diversos componentes para que ela produza energia com a absorção da irradiação solar e transforme em corrente elétrica para alimentar uma carga

Figura 2.10 - Estrutura básica de uma célula de silício destacando: (1) região tipo  $n$ ; (2) região tipo  $p$ , (3) zona de carga especial, onde se formou a junção  $pn$  e o campo elétrico; (4) geração de par elétron-lacuna; (5) filme antirreflexo; (6) contatos metálicos.



Fonte: CRESESB (2015, p.112)

### 2.3.1.2 Associação de células e módulos fotovoltaicos

Os dispositivos fotovoltaicos a exemplo de baterias e capacitores podem ser associados em série ou paralelo ou uma combinação deles. A associação em série e/ou paralelo tem a finalidade de combinar corrente e tensão conforme a necessidade fornecendo uma única saída de corrente e tensão.

#### 2.3.1.2.1 Associação em série

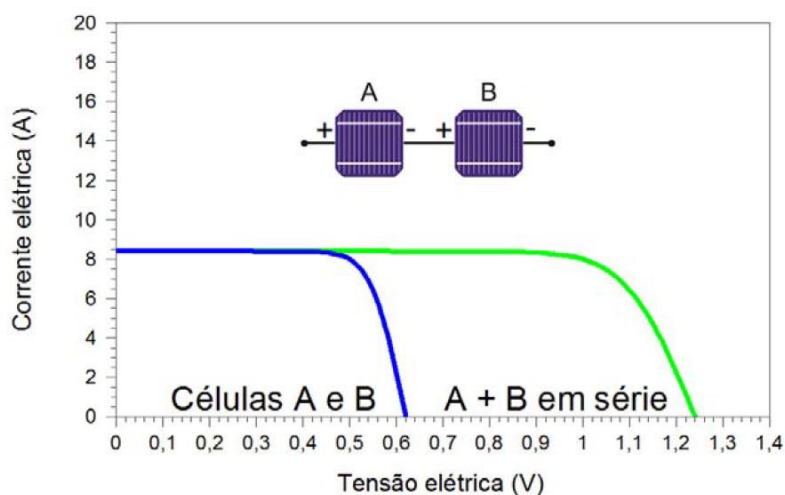
Na conexão em série, um terminal positivo é ligado ao terminal negativo de outro dispositivo fotovoltaico até formar toda a série.

A Figura 2.11 mostra a associação em série. A tensão e corrente final da série será:

$$V = V_1 + V_2 + \dots + V_n \quad 8$$

$$I = I_1 = I_2 = \dots = I_n \quad 9$$

Figura 2.11 - Associação em série de células fotovoltaicas



Fonte: CRESESB (2015, p.124)

### 2.3.1.2.2 Associação em paralelo

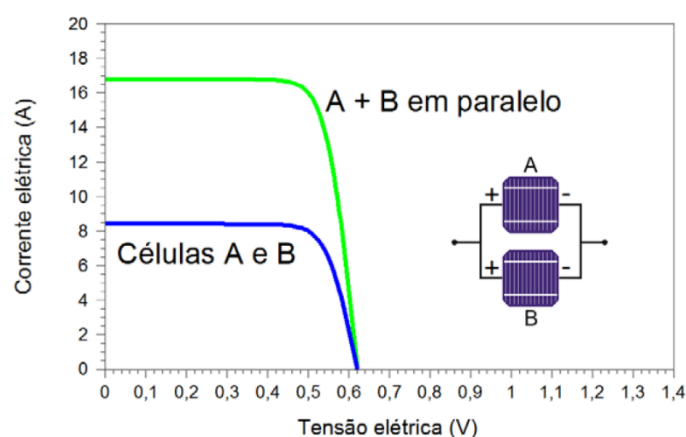
Na conexão em paralelo, um terminal positivo é ligado ao terminal positivo de outro dispositivo, o negativo é ligado ao terminal negativo de outro dispositivo fotovoltaico até formar toda a associação.

A Figura 2.12 mostra a associação em paralelo. Na associação em paralelo as tensões continuam as mesmas e as correntes se somam. A tensão e corrente final da série será:

$$I = I_1 + I_2 + \dots + I_n \quad 10$$

$$V = V_1 = V_2 = \dots = V_n \quad 11$$

Figura 2.12 - Associação em paralelo de células fotovoltaica



Fonte: CRESESB (2015, p.124)

## 2.4 O sistema fotovoltaico

O despertar do uso massivo da energia fotovoltaica ou eólica se deve ao atual cenário catastrófico que se desenha com as mudanças climáticas causadas pelo aquecimento da atmosfera devido aos gases de efeito estufa (GEE).

Tanto a instalação de parques eólicos quanto fotovoltaico dependem quase exclusivamente de espaço para instalação e investidores. A energia gerada já está comprometida desde antes dos projetos serem licitados em leilões.

Quando se trata de energia de pequenas usinas geradoras que trata a Lei 14.300 de 2022 o modo de trabalho é diferente. Obedece ao interesse de uma

família, condomínio, empresa. Segue regras de compensação de energia quando conectada à rede da concessionária local de distribuição.

Há três conceitos da Lei 14.300/2022 que são:

- **XI - microgeração distribuída:** central geradora de energia elétrica, com potência instalada, em corrente alternada (CA), menor ou igual a 75 kW (setenta e cinco quilowatts) e que utilize cogeração qualificada, conforme regulamentação da Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel), ou fontes renováveis de energia elétrica, conectada na rede de distribuição de energia elétrica por meio de instalações de unidades consumidoras;
- **XIII - 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;
- **XIV - Sistema de Compensação de Energia Elétrica (SCEE):** sistema no qual a energia ativa é injetada por unidade consumidora com microgeração ou minigeração distribuída na rede da distribuidora local, cedida a título de empréstimo gratuito e posteriormente compensada com o consumo de energia elétrica ativa ou contabilizada como crédito de energia de unidades consumidoras participantes do sistema

Para essas modalidades de sistemas de geração são utilizados inversores chamados de **On Grid** ou **Grid-Tie** ou **Híbrido**. Eles têm em comum a capacidade de despachar o excedente de geração para a rede de energia da concessionária a título de empréstimo e posterior utilização dessa energia como compensação do crédito para abater os valores da conta de energia. O inversor **híbrido** tem a capacidade de despachar o excedente de energia gerando crédito, como também, na falta ou desconexão da rede, continuar a gerar energia a partir de fonte fotovoltaica ou de bateria.

Um outro conceito presente na Lei 14.300/2022 que é o foco desse trabalho é:

- **XII - microrrede:** integração de vários recursos de geração distribuída, armazenamento de energia elétrica e cargas em sistema de distribuição secundário capaz de operar conectado a uma rede principal de distribuição de energia elétrica e, também, de forma isolada, controlando os parâmetros de eletricidade e provendo condições para ações de recomposição e de autorrestabelecimento;

Nesse conceito de microrrede estão os inversores **OFF-GRID** (isolados), os inversores **OFF-GRID** interativos e os **Híbridos**. Os inversores **OFF-GRID** interativos: se conectam à rede da concessionária como uma segunda fonte de entrada, e não geram crédito na rede da concessionária. Esses inversores **OFF-GRID** interativos isolado ou conectado à rede da concessionária, somente geram energia suficiente para atenderem as cargas prioritárias conectadas a eles. Não geram excedente. Se não tiver carga para alimentar ele praticamente hiberna. Mesmo havendo Sol, se não tiver carga para alimentar ele não gera energia.

#### 2.4.1 Módulo fotovoltaico

Os sistemas de geração de energia fotovoltaica têm como elemento principal de geração módulos fotovoltaicos. Estes existem há muito tempo sendo que o mercado mundial é dominado pela tecnologia de células de silício. Ultimamente os módulos monocristalinos por apresentarem índices de eficiência mais elevados são produzidos em larga escala com capacidade de geração cada vez maiores. Na Figura 2.13 estão listados os módulos mais eficientes que utilizam a tecnologia de silício cristalino, com base na publicação de 2020 (JESUS,2020).

Figura 2.13 - Tabela com eficiência dos módulos fotovoltaicos<sup>6</sup>

	<b>Painéis solares fotovoltaicos</b>	<b>Eficiência</b>	<b>Potência</b>
1	SunPower Maxeon M-Series	22.8%	370-440 W
2	LG NeON R	22.3%	405 W
3	Jinko Solar Tiger Neo	22.3%	620 W
4	REC Solar Alpha	22.2%	405 W
5	Panasonic EverVolt	22.2%	380 W
6	Trina Solar Vertex S	21.6%	670 W
7	Silfab 380-BLK	21.4%	410 W
8	FuturaSun FU M Zebra	21.3%	360 W
9	LONGi Solar Hi-MO 5	21.2%	460 W
10	Q Cells Q.Peak DUO G9+	20.6%	360 W

Fonte: JESUS (2020).

<sup>6</sup> <https://www.portal-energia.com/paineis-solares-mais-eficientes/>

Os módulos fotovoltaico da Jinko Solar Tiger Pro têm alto rendimento e são produzidos na China e largamente comercializados no Brasil. A Figura 2.14 traz as características técnicas dos módulos Jinko.

Figura 2.14 - Especificação Técnica Jinko Tiger Pro N-Type TR60M(V) 430-450 Watt

## ESPECIFICAÇÕES

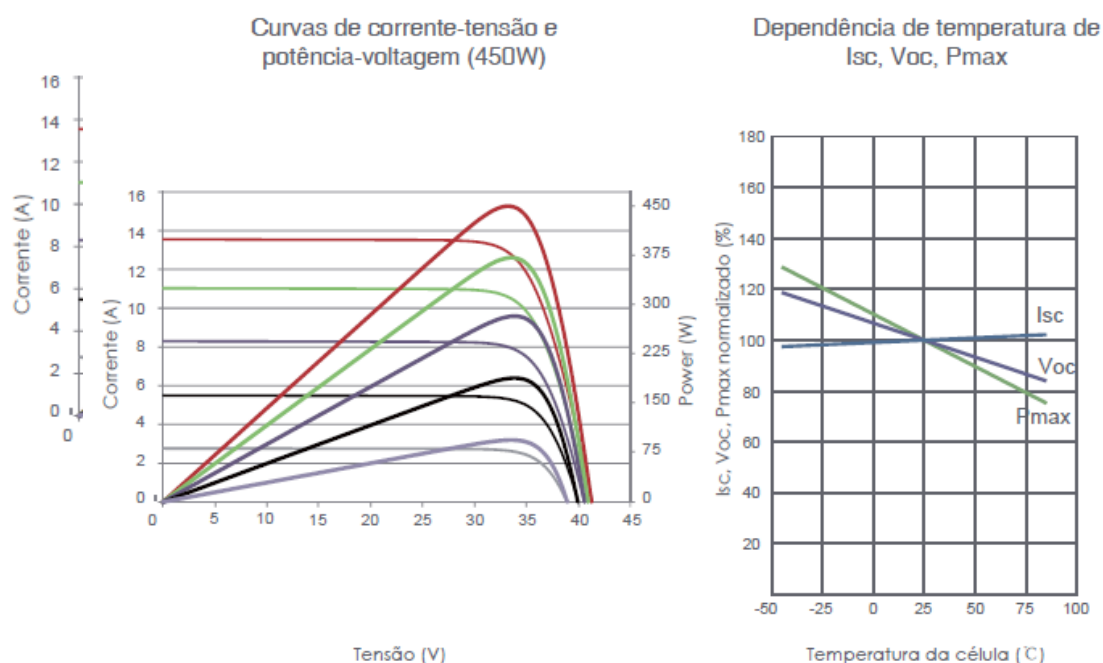
Tipo de módulo	JKM430M-6TL4		JKM435M-6TL4		JKM440M-6TL4		JKM445M-6TL4		JKM450M-6TL4	
	JKM430M-6TL4-V	JKM435M-6TL4-V	JKM435M-6TL4-V	JKM440M-6TL4-V	JKM440M-6TL4-V	JKM445M-6TL4-V	JKM450M-6TL4-V	JKM450M-6TL4-V	JKM450M-6TL4-V	JKM450M-6TL4-V
	STC	NOCT	STC	NOCT	STC	NOCT	STC	NOCT	STC	NOCT
Potência Máxima (Pmax)	430Wp	320Wp	435Wp	324Wp	440Wp	327Wp	445Wp	331Wp	450Wp	335Wp
Tensão de potência máxima (Vmp)	33.47V	31.21V	33.65V	31.37V	33.82V	31.53V	34.00V	31.69V	34.17V	31.86V
Corrente de potência máxima (Imp)	12.85A	10.25A	12.93A	10.32A	13.01A	10.38A	13.09A	10.45A	13.17A	10.51A
Tensão de circuito aberto (Voc)	40.57V	38.29V	40.75V	38.46V	40.92V	38.62V	41.10V	38.79V	41.27V	38.95V
Corrente de curto-circuito (Isc)	13.53A	10.93A	13.61A	10.99A	13.69A	11.06A	13.77A	11.12A	13.85A	11.19A
Eficiência do módulo STC (%)	20.30%		20.54%		20.77%		21.01%		21.24%	
Temperatura de operação (°C)	-40°C~+85°C									
Tensão máxima do sistema	1000/1500VDC (IEC)									
Classificação máxima de fusíveis em série	25A									
Tolerância de potência	0~+3%									
Coefficientes de temperatura de Pmax	-0.35%/°C									
Coefficientes de temperatura de Voc	-0.28%/°C									
Coefficientes de temperatura de Isc	0.048%/°C									
Temperatura operacional nominal da célula (NOCT)	45±2°C									

STC:  Irradiância 1000 W/m<sup>2</sup>  Temperatura da célula 25°C  AM=1.5

Curvas de corrente-tensão e  
potência-voltagem (450W)

Dependência de temperatura de  
Isc, Voc, Pmax

vento 1 m/s



Fonte: Catálogo Jinko (2021).

Os módulos Jinko 430 ao 450 Wp são mais fáceis de instalar pelas características listadas na Figura 2.15. Uma pessoa consegue transportá-los no telhado com algum esforço. Pesam somente 24,2 kg. Módulos maiores necessitam de duas pessoas para o deslocamento e instalação.

Figura 2.15 - Características mecânicas do módulos Jinko 430-450 Watt

Características Mecânicas	
Tipo de Célula	P-Type Monocristalina
N.º de células	120 (2x60)
Dimensões	1868×1134×30mm (73,54×44,65×1,18 polegadas)
Peso	24,2 kg (53,35 lb)
Vidro Dianteiro	3,2 mm, Revestimento antirreflexo, transmissão, baixo teor de ferro, vidro temperado
Moldura	Liga de alumínio anodizado
Caixa de Junção	Classificação IP68
Cabos de Saída	Cabos de saída (+) 1200 mm, (-) 1200 mm ou comprimento personalizado

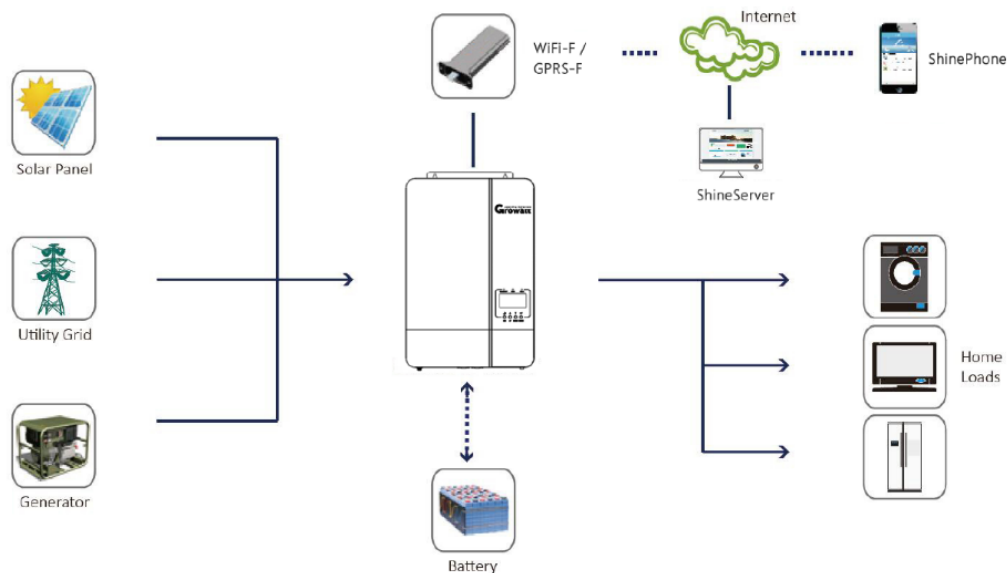
Fonte: Catálogo Jinko (2021).

#### 2.4.2 O Inversor Growatt OFF-GRID interativo

A Figura 2.16 mostra a arquitetura de uma microrrede com o núcleo formado pelo inversor Growatt. Como pode ser visto na arquitetura de microrrede, o inversor aceita vários tipos de entrada. Podendo ser os módulos fotovoltaicos, um gerador mecânico ou a rede da concessionária. Se uma bateria estiver presente, o inversor faz o controle de carga e descarga da bateria através do BMS (*Battery Management System*). A saída CA do inversor é direcionada para alimentar cargas prioritárias compatíveis com a geração fotovoltaica e potência nominal do próprio inversor.

O inversor não gera excedente de energia. Ele opera de forma customizada com a carga prioritária alimentada por ele, portanto, não exporta energia para a rede da concessionária. O modelo SPF3500ES DC48V Painel Carregador 4.5KW Saída AC 3.5KVA 220V Senoidal tem custo de R\$ 4.699,00.

Figura 2.16 – Arquitetura: microrrede com o inversor OFF-GRID Growatt interativo



Fonte: Growatt (2021)

Na Figura 2.17 estão as características dos dois inversores OFF-GRID interativo da Growatt. A diferença dos dois é basicamente a capacidade de potência. Como pode ser visto na folha de especificação, na carga AC, a tensão de entrada é regulada para 230 VAC. Esta entrada serve para, além de carga de bateria de forma programada, “flutuar” o inversor ao fazer um *by-pass* da entrada para a saída AC. O controlador de carga da bateria opera em 48VDC e corrente máxima de 80A.

Figura 2.17 - Características dos Inversores OFF-GRID Growatt



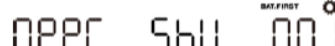

Portuguese	SPF 3500 ES	SPF 5000 ES
Tensão da bateria	48VDC	
Tipo de bateria	Lithium/Lead-acid	
<b>Saída do Inversor</b>		
Potência Nominal	3500VA/ 3500W	5000VA/ 5000W
Paralelismo	Sim, 6 unidades	
Regulação da tensão CA (modo bateria)	230VAC ± 5% @ 50/60Hz	
Poder da onda	7000VA	10000VA
Eficiência de pico	93%	
Forma de onda	Onda senoidal pura	
Tempo de transferência	10 ms ( para computadores pessoais ) ; 20 ms (aplicações residenciais )	
<b>CARGA SOLAR</b>		
Matriz FV máxima	4500W	6000W
Faixa MPPT @ tensão operacional	120VDC – 430VDC	
Número de MPP Trackers independentes, strings por rastreadores MPP	1/1	
Tensão máxima de circuito aberto da matriz FV Tensão do circuito	450VDC	
Corrente de carga solar máxima	80A	100A
<b>CARREGADOR AC</b>		
Carga atual	60A	80A
Tensão de entrada AC	230 VAC	
Faixa de tensão selecionável	170-280 VAC ( para computadores pessoais ) ; 90-280 VAC ( para aplicações residenciais )	
Alcance de frequência	50Hz/60Hz (Detecção automática)	
<b>FÍSICA</b>		
Grau de proteção	IP20	
Dimensões (L/A/P)	330/485/135mm	330/485/135mm
Peso líquido	11,5kgs	12kgs
<b>AMBIENTE OPERACIONAL</b>		
Humidade	5% até 95% da humidade relativa ( sem condensação)	
Altitude	<2000m	
Temperatura operacional	0°C - 55°C	
Temperatura de armazenamento	-15°C - 60°C	

Fonte: Growatt (2023)

#### 2.4.2.1 Prioridade da fonte de saída: Configurar a prioridade da fonte de alimentação de carga

Na fase de instalação do inversor tem a função de programar o modo de como priorizar o processo de alimentação da carga ou bateria e uso da rede elétrica e solar (Figura 2.18).

Figura 2.18 - Parte do manual de instalação do Inversor OFF GRID SPF3500ES

Programa	Descrição	Opção de configuração
01	Prioridade da fonte de saída: Configurar a prioridade da fonte de alimentação de carga	Solar primeiro 
		A energia solar fornece energia para as cargas como primeira prioridade. Se a energia solar não for suficiente para alimentar todas as cargas conectadas, a bateria fornecerá energia para as cargas ao mesmo tempo. A rede elétrica fornece energia às cargas somente quando alguma das condições ocorre: - A energia solar não está disponível - A tensão da bateria cai para a tensão de advertência de nível baixo ou ao ponto ajustado no programa 12.
		Rede elétrica primeiro (padrão) 
		A rede elétrica fornecerá energia às cargas como primeira prioridade. A energia solar e a bateria fornecerão energia para as cargas somente quando a energia da rede elétrica não estiver disponível.
		Prioridade SBU 
		A energia solar fornece energia para as cargas como primeira prioridade. Se a energia solar não for suficiente para alimentar todas as cargas conectadas, a bateria fornecerá energia para as cargas ao mesmo tempo. A rede elétrica fornece energia às cargas somente quando a carga da bateria cai para a tensão de advertência de nível baixo ou ao ponto definido no programa 12.
		Prioridade SUB 
		A energia solar fornece energia para as cargas como primeira prioridade. Se a energia solar não for suficiente para alimentar todas as cargas conectadas, a energia solar e a rede elétrica fornecerão energia para as cargas ao mesmo tempo. A bateria fornece energia às cargas somente quando a energia solar não é suficiente e não há rede elétrica.

Fonte: Manual Growatt (2021)

### 2.4.3 O Inversor HÍBRIDO

A principal tarefa de um inversor ON GRID é converter a energia CC gerada a partir do painel fotovoltaico em energia CA utilizável. Os inversores híbridos vão um passo além e funcionam com baterias para armazenar também o excesso de energia.

No mundo em desenvolvimento, os inversores híbridos são mais necessários para compensar as redes fracas ou intermitentes ou a falta de eletricidade na rede.

#### 2.4.3.1 O Inversor Growatt HÍBRIDO

A Growatt desenvolveu um sistema para atender uma residência com o conceito de aproveitamento de energia com eficiência. Na Figura 2.19 estão presentes os elementos de energia utilizados numa residência:

- Inversor híbrido: fornece energia fotovoltaica para carga de bateria e carregador de automóvel elétrico. Trabalha com a energia dos módulos fotovoltaico, da rede da concessionária e, também, aceita a energia de gerador mecânico a combustível;
- Módulo de gerenciamento de energia: gerencia a utilização da energia gerada
- Bateria: bateria que fornece energia nos eventos de falta de energia da rede;
- Carregador de automóvel elétrico

Figura 2.19 - Sistema fotovoltaico Growatt Battery Ready



Fonte: Growatt (2023)

A Figura 2.20 mostra a família de inversores Growatt híbridos. A finalidade dos inversores, é atender pequenas cargas individualmente. Têm capacidade de atender cargas trifásicas ou cargas maiores dependendo da quantidade de inversores e a configuração pretendida. Na Figura 2.21 estão as características dos inversores.

Figura 2.20 - Família de inversores híbridos Growatt



Fonte: Manual Growatt (2023)

Figura 2.21 - Características Gerais dos inversores híbridos Growatt

Ficha de dados	MIN 2500TL-XH	MIN 3000TL-XH	MIN 3600TL-XH	MIN 4200TL-XH	MIN 4600TL-XH	MIN 5000TL-XH	MIN 6000TL-XH
<b>Dados de entrada (CC)</b>							
Máx. potência FV recomendada (para módulo STC)	5000W	6000W	7200W	8400W	9200W	10000W	10000W
Máxima tensão CC	500V	500V	550V	550V	550V	550V	550V
Tensão de partida	100V						
Tensão nominal	360V						
Faixa de tensão MPPT	60V-500V	60V-500V	60V-550V	60V-550V	60V-550V	60V-550V	60V-550V
Número de MPPT Strings por MPPT	2/1						
Máx. corrente de entrada por MPPT	13.5A						
Máx. corrente de curto-circuito por MPPT	16.9A						
<b>Dados de entrada (Bateria CC)</b>							
Bateria compatível	Sistema de Baterias ARK XH (5,12kWh ~ 17,9kWh)						
Faixa de tensão de operação	360-500V			360-550V			
Máx. corrente de operação	17A						
Máx. potência de carregamento	6000W						
Máx. potência de descarregamento	2500W	3000W	3600W	4200W	4600W	5000W	6000W
<b>Dados de saída (CA)</b>							
Potência nominal CA	2500W	3000W	3600W	4200W	4600W	5000W	6000W
Máx. potência aparente CA	2500VA	3000VA	3600VA	4200VA	4600VA	5000VA	6000VA
Tensão nominal CA (faixa*)	220V (180-280V)						
Frequência de rede CA (faixa*)	50/60 Hz (45-55Hz/55-65 Hz)						
Máx. corrente de saída (faixa*)	11.3A	13.6A	16A	19A	20.7A	22.7A	27.2A
Fator de potência ajustável	0.8i-0.8c						
THDi	<3%						
Tipo de conexão de rede CA	Monofásico						
<b>Dados de saída (Backup*)</b>							
Máx. potência aparente	2500VA	3000VA	3600VA	4200VA	4600VA	5000VA	6000VA
Tensão nominal CA	220V						
Frequência de rede CA	50/60Hz						
<b>Eficiência</b>							
Máx. eficiência	98.2%	98.2%	98.2%	98.4%	98.4%	98.4%	98.4%
Eficiência europeia	97.1%	97.1%	97.2%	97.2%	97.5%	97.5%	97.5%
Eficiência europeia	99.9%						
<b>Dispositivos de proteção</b>							
Proteção de polaridade reversa CC	Sim						
Disjuntor CC	Sim						
Proteção contra surtos CC/CA	Tipo II/ Tipo II						
Monitoramento de resistência de isolamento	Sim						
Proteção contra curto-circuito CA	Sim						
Monitoramento de falha de aterramento	Sim						
Monitoramento de rede	Sim						
Proteção de anti-filamento	Sim						
Unidade de monitoramento corrente-residual	Sim						
Proteção AFCI	Sim						
<b>Dados Gerais</b>							
Dimensionamento (C/A/P)	375/350/160mm						
Tensão nominal CA	10.8kg						
Faixa de temperatura de operação	-25°C ... +60°C						
Altitude	4000m						
Autoconsumo noturno	<3W						
Topologia	Sem transformador						
Resfriamento	Convecção natural						
Gráus de proteção	IP65						
Umidade relativa	0%~100%						
Conexão CC	H4/MC4 (Opcional)						
Conexão CA	Conector						
Display	OLED+LED/WIFI+APP						
Interfaces: RS485 / USB/WIFI/ GPRS / RF/LAN	Sim/Sim/Opcional/Opcional/Opcional /Opcional						
Garantia: 5 anos/10 anos	Sim						

CE, IEC62109, AS/NZS 4777.2, CBI 0-21, VDE-AR-N 4105, VDE 0126-1-1, VFR 2019, EN 50549, IEC 62116, IEC 61727, G98/G99, UNE217001, UNE206007, PO12.2

\* A tensão CA e a faixa de frequência podem variar dependendo do padrão de rede específico do país. Todas as especificações estão sujeitas a alterações sem aviso prévio.

A função de energia de backup precisa de um acessório de Caixa de Backup.

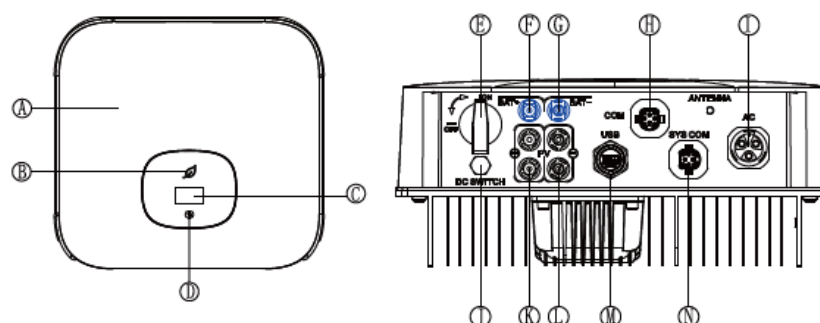
Fonte: Manual Growatt (2023)

Os inversores Growatt OFF GRID híbridos operam com Sistema de Baterias ARK XH (5,12kWh ~ 17,9kWh) com faixa de tensão de operação: 360-550VDC (uma faixa de tensão bem alta e se torna até perigosa).

Na Figura 2.22 é apresentada as interfaces do inversor Growatt híbrido com as entradas fotovoltaico e bateria e saída CA. Mostra as interfaces de comunicação para o sistema de bateria e para conexão de mais de um inversor. O preço atual (2023) do inversor MIN5000TL-XH 5KW Monofásico 220V 2MPPT com monitoramento é de R\$ 6.409,00.

Figura 2.22 - Ficha de dados dos inversores híbridos Growatt

### 3.1 Visão geral do TL- XH



Posição	Descrição	Posição	Descrição
A	Tampa	H**	PORTA DRM
B	LED	I	Saída CA
C	OLED	J	Válvula de ventilação
D	Botão de toque	K	Entrada FV +
E*	Chave CC	L	Entrada FV-
F	Entrada da bateria+	M	Porta USB
G	Entrada da bateria-	N	SYS COM Porta COM

\*Nenhum interruptor CC para alguns modelos da Austrália e do Reino Unido.

\*\*Apenas para o mercado da UE e da Austrália.

Fonte: Manual Growatt (2023).

A principal diferença dos inversores OFF GRID interativo para o híbrido da Growatt é que o interativo não injeta energia na rede. Por ser sistema isolado, pode conectar cargas tanto no modo monofásico como no modo trifásico. O inversor híbrido trabalha conectado à rede da concessionária e se não estiver programado no modo *backup* ele desliga na ausência da rede.

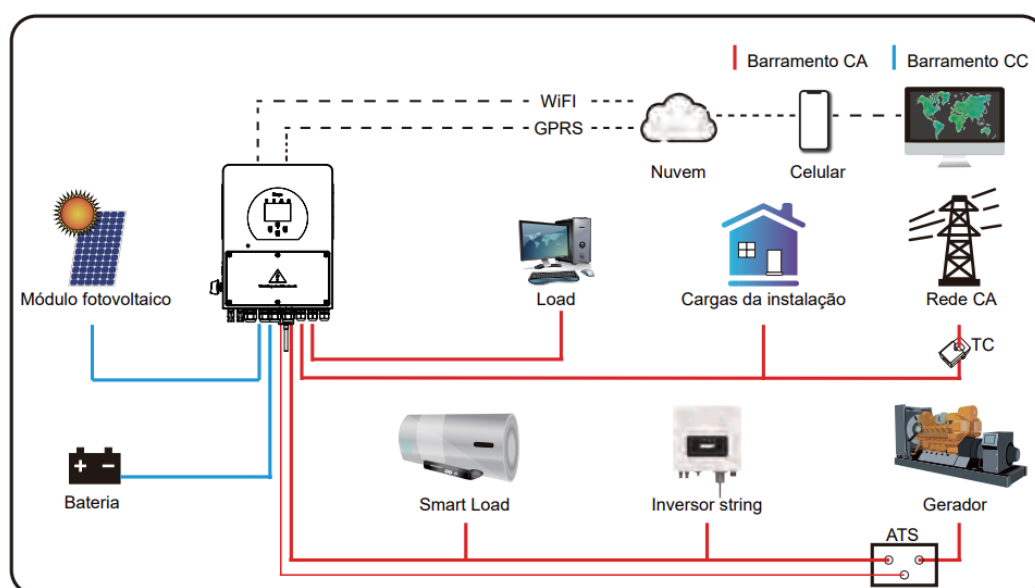
### 2.4.3.2 O Inversor DEYE Híbrido

A Figura 2.23 mostra a arquitetura de funcionamento do inversor híbrido DEYE e as diversas modalidades de funcionamento. Funciona tanto conectado à rede devolvendo energia na forma de crédito ou isolado alimentando somente cargas locais ou prioritárias

Características:

- Injeção na rede e autoconsumo.
- Reinicialização automática enquanto o CA está restabelecendo.
- Fornecimento prioritário programável para bateria ou rede CA.
- Modo de operação múltipla programável: ON GRID, OFF GRID, nobreak.
- Corrente e tensão de carregamento configurável de acordo com a aplicação pelo display LCD.
- Prioridade de carregamento configurável pelo display LCD.
- Compatível com gerador a diesel puramente senoidal.
- Proteção contra sobrecarga, temperatura elevada e curto-circuito.
- Carregamento inteligente da bateria para uma performance otimizada.
- Função zero grid.
- Monitoramento via Wi-Fi.
- Função: *time of use*.
- Função: *smart load*.

Figura 2.23 - Arquitetura do inversor híbrido Deye



Fonte: Manual Deye (2023).

A Figura 2.24 mostra o inversor híbrido DEYE. O *display* mostra o modo de operação do inversor, as interfaces de conexões e a antena WiFi de comunicação. O modelo SUN-5K-SG04LP1-EU 5kW Monofásico 220v 2MPPT com Monitoramento tem custo de R\$ 9.779,00.

Figura 2.24 - Inversor híbrido Deye

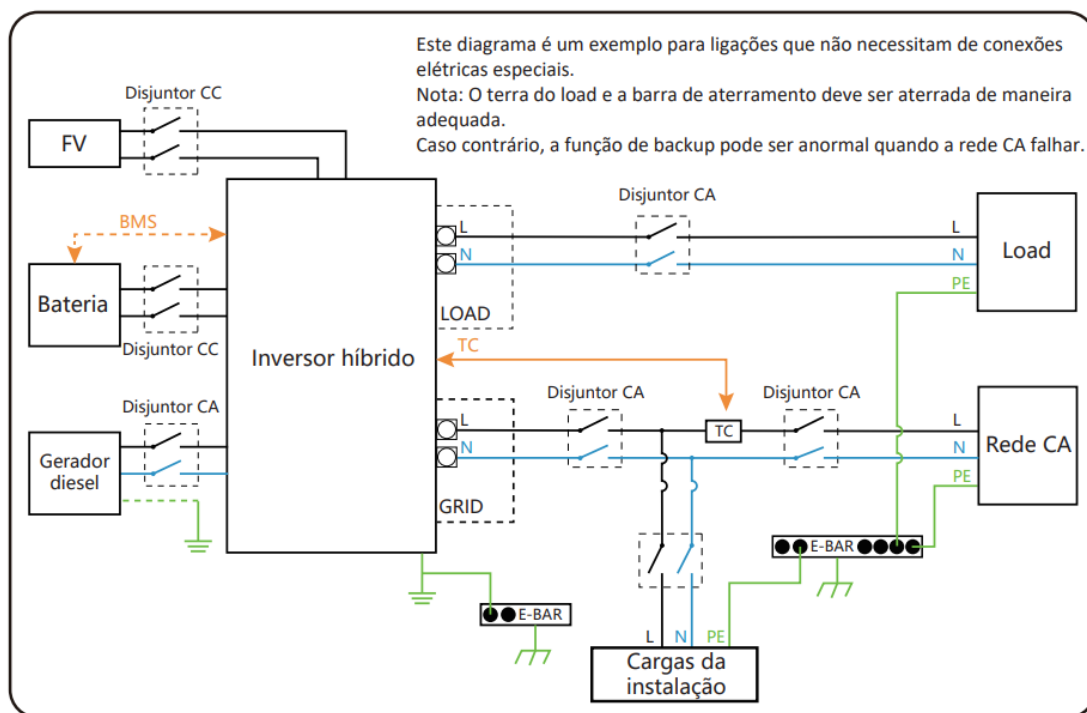


Fonte: Manual Deye (2023).

A Figura 2.25 mostra o diagrama de ligação típica do inversor híbrido Deye e traz observações importantes de conexão do aterramento para o correto funcionamento. A função backup exige um TC (Transformador de corrente) para identificar se a rede da concessionária desconectou. Dessa forma o inversor assume a posição de backup e promove o a função de anti-ilhamento

A Figura 2.26 traz as características técnicas dos inversores híbridos DEYE. A vantagem do uso desses inversos DEYE em relação aos híbridos da GROWATT é a utilização de baterias. No DEYE pode ser utilizada vários tipos de baterias e a corrente e tensão de carga e descarga não são elevadas quanto aos GROWATT.

Figura 2.25 - Diagrama de ligação do inversor híbrido DEYE



Fonte: Manual Deye (2023).

A Figura 2.26 mostra as características técnicas dos inversores híbridos Deye: as potências suportadas de cada um, a tensão e corrente de trabalho, as proteções contra surto.

Figura 2.26 - Características técnicas dos inversores híbridos Deye

Modelo	SUN-3K -SG04LP1-24-EU	SUN-3K -SG04LP1-EU	SUN-3.6K -SG04LP1-EU	SUN-5K -SG04LP1-EU	SUN-6K -SG04LP1-EU
<b>Dados da bateria</b>					
Tipo de bateria	Chumbo ácido ou lítio				
Faixa de tensão da bateria (V)	20~30	40~60	40~60	40~60	40~60
Corrente máxima de carga (A)	140	70	90	120	135
Corrente máxima de descarga (A)	140	70	90	120	135
Sensor de temperatura externo	Sim				
Curva de carregamento	3 estágios / equalização				
Carregamento para baterias de lítio	auto-adaptação ao BMS				
<b>Dados de entrada CC</b>					
Potência máxima de entrada CC (W)	3900	3900	4680	6500	7800
Tensão nominal de entrada CC (V)	370 (125~500)				
Tensão de partida CC (V)	125				
Faixa de operação da MPPT (V)	150~425				
Faixa de tensão CC à plena carga (V)	300~425				
Corrente máxima de entrada CC (A)	13		13+13		
Corrente de curto circuito CC (A)	17		17+17		
Número de MPPT	1		2		
Número de strings por MPPT	1				
<b>Dados de saída CA</b>					
Potência nominal de saída CA (W)	3000		3600	5000	6000
Potência máxima de saída CA (W)	3300		3690	5500	6600
Corrente nominal de saída CA (A)	13.6		16.4	22.7	27.3
Corrente máxima de saída CA (A)	15		18	25	30
Máxima passagem contínua de CA (A)			35		40
Potência de pico	2 vezes a potência nominal por 10 segundos				
Fator de potência	0.8 adiantado a 0.8 atrasado				
Tensão e frequência nominal de saída CA	50/60Hz; L/N/PE 220/230V CA (monofásico)				
Tipo de rede	Monofásico				
Injeção de corrente CC (mA)	THD<3% (em carga linear <1.5%)				
<b>Eficiência</b>					
Eficiência máxima	97.60%				
Eficiência euro	96.50%				
Eficiência da MPPT	99.90%				
<b>Proteção</b>					
Integrado	Proteção contra descargas atmosféricas na entrada CC, proteção de anti-ilhamento, proteção contra polaridade reversa CC, detecção de resistência de isolamento, monitoramento de corrente residual, proteção contra sobrecorrente CA, proteção contra curto-circuito CA e proteção contra surto.				
Proteção contra surto	CC tipo II / CA tipo III				
<b>Certificações e normas</b>					
Padrão de conexão à rede	CEI 0-21, VDE-AR-N 4105, NRS 097, IEC 62116, IEC 61727, G99, G98, VDE 0126-1-1, RD 1699, C10-11				
Segurança EMC e normas	IEC/EN 61000-6-1/2/3/4, IEC/EN 62109-1, IEC/EN 62109-2				
<b>Dados gerais</b>					
Temperatura de operação	-40~60°C, >45°C reduzindo potência				
Refrigeração	Arrefecimento inteligente				
Ruído	<30 dB				
Comunicação com o BMS	RS485; CAN				
Peso (kg)	14			15.1	
Dimensões (mm)	330L x 433A x 238P				
Grau de proteção	IP65				
Tipo de instalação	Montagem na parede				
Garantia	10 anos				

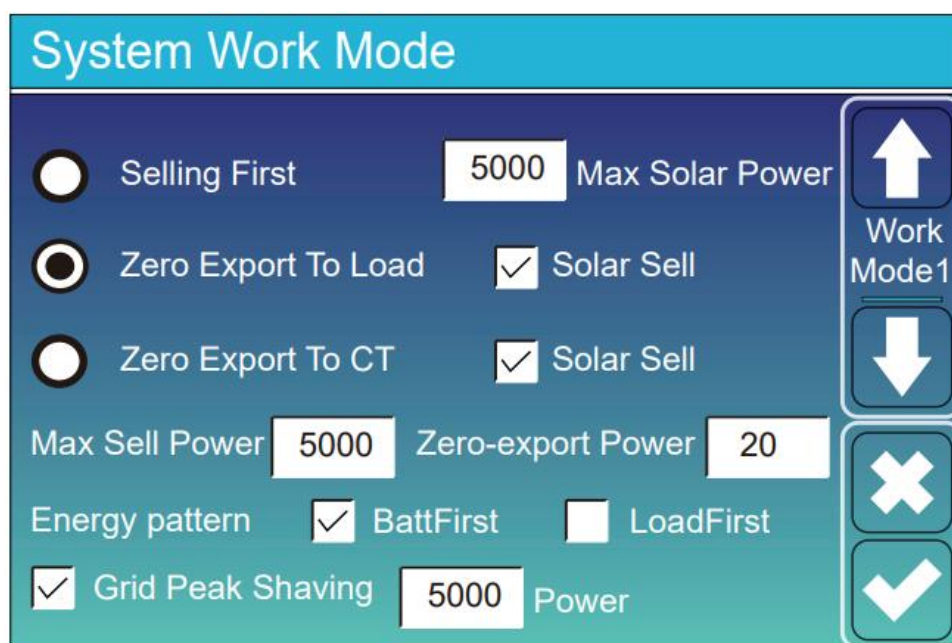
Fonte: Manual Deye (2023).

A Figura 2.27 mostra a tela de configuração dos modos de trabalho do inversor híbrido Deye.

São três modos de operação:

- conectado à rede (*Selling First*) com a exportação de crédito para a rede da concessionária;
- Não exporta energia nem para a rede nem para a carga doméstica (*Zero Export To Load*);
- Utiliza energia das várias fontes, inclusive da rede da concessionária, mas, não exporta energia para a concessionária (*Zero Export To CT*).

Figura 2.27 - Menu de configuração dos modos de trabalho do inversor Deye



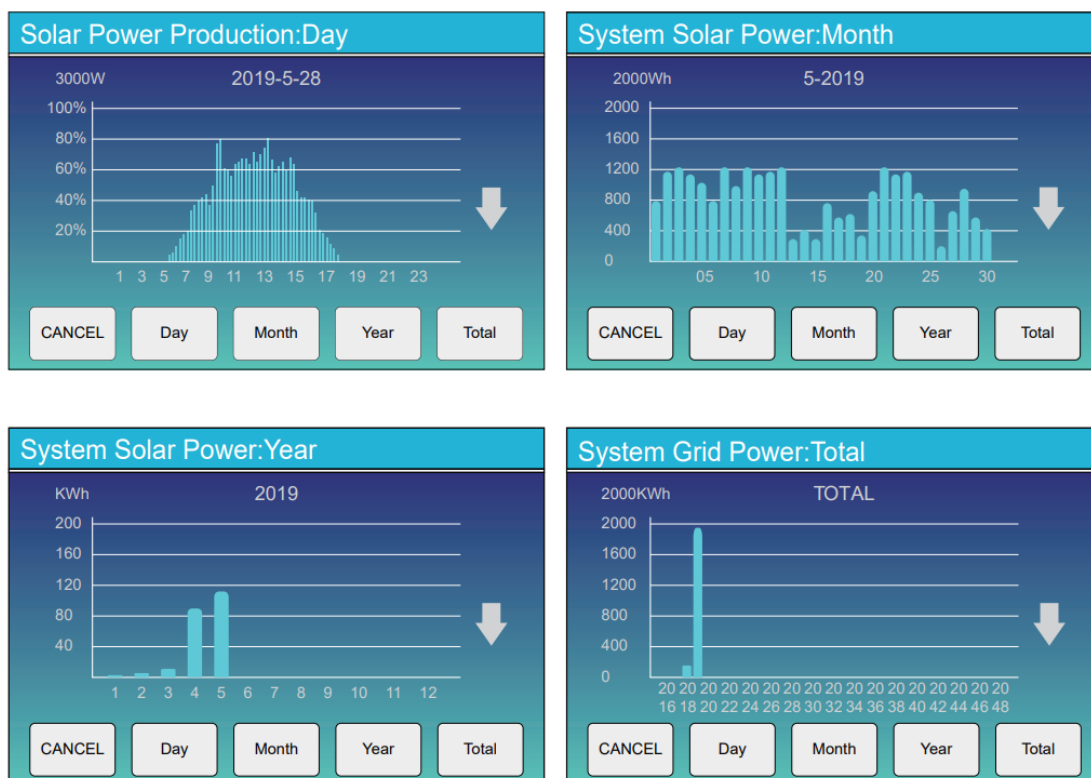
Fonte: Manual Deye (2023).

A Figura 2.28 mostra os gráficos de produção do inversor.

- Produção diária (*Solar Power Production:Day*): mostra a geração diária do inversor com a curva característica do período de insolação desde o amanhecer até o pôr do Sol. Se tiver períodos de nuvens ou chuva, o gráfico mostrara o período de geração prejudicada;
- Produção Mensal (*System Solar Power:Month*): mostra o acumulado mensal da geração. Pode ser recuperado qualquer mês de geração para comparativos;

- Produção Anual (*System Solar Power:Year*): mostra o acumulado do ano de geração.
- Produção Geral (*System Grid Power:Total*) Mostra a energia produzida em anos de funcionamento.

Figura 2.28 - Menu de produção



Fonte: Manual Deye (2023).

## 2.4.4 Sistemas de baterias

As microrredes, por definição, comportam armazenamento de energia em baterias. As baterias são construídas de muitos materiais e formas dependendo da utilização. As mais comuns, para sistemas *nobreak*, são as estacionárias construídas com placas de chumbo e solução ácida, comumente chamadas de chumbo-ácida, que tem vida curta. Devem ser substituídas num prazo de três anos.

### 2.4.4.1 Bateria chumbo-ácido Moura

A Figura 2.29 mostra as características das baterias série MS da Moura. São utilizadas em sistemas de nobreak e sistemas fotovoltaicos.

Figura 2.29 - Bateria Moura chumbo-carbono Série MS



### Série MS

Desenvolvida com a tecnologia chumbo-carbono (PbC), oferece melhor desempenho e durabilidade para sistemas de geração fotovoltaica de pequeno e médio portes. É projetada para suportar três vezes mais ciclos do que o de padrão de mercado para a categoria. Possui uma excelente aceitação de carga, permitindo uma recarga mais rápida e eficiente. Não possui necessidade de reposição de água, tendo seu custo de operação e manutenção próximo a zero, oferecendo mais economia ao seu sistema.

Modelos	Tensão Nominal (V)	Capacidade em Ah a 25°C - 1,80Vpe										Dimensões (mm ±2%)			Peso (kg ±2%)
		C120	C100	C72	C48	C36	C24	C20	C12	C10	C8	Comp.	Larg.	Alt. Total	
12MS32	12	32,1	32,3	31,7	31,0	30,4	30,4	29,6	27,5	26,8	25,8	197	130	184	9,9
12MS38	12	38,2	38,0	37,8	37,0	36,5	36,0	34,6	32,4	31,7	30,4	211	174	174	12,0
12MS48A	12	48,2	47,5	46,9	46,1	45,5	44,7	44,4	41,6	40,7	39,3	211	174	190	13,5
12MS58	12	57,2	56,9	56,1	55,1	54,4	53,5	54,2	50,8	49,6	47,9	245	174	173	15,8
12MS64A	12	64,1	63,4	62,6	61,8	61,2	60,4	58,6	53,9	52,3	51,1	245	174	190	16,3
12MS68	12	67,7	66,5	65,6	64,5	63,7	62,6	62,0	56,5	54,7	52,3	282	174	174	18,6
12MS74	12	74,0	73,5	72,5	71,2	70,4	69,1	68,6	62,8	60,9	59,0	282	174	190	19,9
12MS85	12	84,9	84,5	83,6	82,5	81,7	80,6	76,8	71,1	69,1	65,3	305	172	228	22,4
12MS111	12	111,3	109,7	108,2	106,4	105,1	103,3	103,0	96,3	94,0	90,8	329	172	247	26,0
12MS162	12	159,0	156,8	154,6	151,9	150,1	147,5	147,6	137,3	133,8	127,0	513	209	236	42,6
12MS186	12	185,5	182,9	180,3	177,2	175,0	172,0	171,0	161,3	158,0	151,2	513	209	236	44,9
12MS234	12	234,0	229,9	231,5	227,5	224,7	220,9	212,0	200,1	196,0	190,0	511	270	241	58,2

Fonte: Catálogo Moura (2023).

As baterias estacionárias chumbo-ácido são largamente utilizadas pela sua simplicidade na carga e descarga e substituição ou descarte. A capacidade da bateria é medida em Ah (Ampére-hora) ou quanto de corrente pode fornecer em horas de uso. Os valores C20 ou C100 ou C120 indica o tempo de descarga da bateria. Exemplo: C20 indica que o tempo de descarga é de 20 horas e a bateria 12MS234 irá fornecer de forma constante 234A durante 20 horas, ou  $234A \div 20 \text{ horas} = 11,7Ah$ . Essa conta não é tão simples. Ao se calcular a capacidade da bateria deve-se considerar que não deverá fornecer mais que 20% de sua capacidade. Isso deverá acrescentar mais baterias para se ter o rendimento esperado. Para baterias de 12VDC deve-se colocar quatro baterias em série para atingir os 48VDC exigidos por alguns inversores.

Entretanto, quando utilizados em sistemas fotovoltaicos com inversores OFF GRID ou Híbrido deve-se observar algumas características, para a capacidade de baterias. Alguns inversores suportam baterias de 48VDC.

Para as baterias de 12VDC deve-se instalar quatro baterias em série para atingir os 48VDC. O custo de uma bateria (2023) modelo 12MS234 para 220Ah é de R\$ 2.099,00. Considerando quatro baterias para atingir os 48VDC tem-se investimento de R\$ 8.396,00. Depois de três a quatro anos deve-se substituir as baterias por novas e mais gasto de R\$ 8.396,00.

Entretanto deve-se calcular a capacidade das baterias considerando somente 20% da capacidade. Exemplo: se a carga que as baterias deverão suportar consome 10A por um período de 16 horas (período noturno de sol a sol):

- Bateria de 220Ah x 20% = 44Ah;
- $10A \times 16 \text{ horas} = 160Ah$ , então  $160Ah / 44Ah = 3,6$  baterias
- Arredondando: 4 baterias de 220Ah de 12VDC cada
- Para atingir 48VDC → 4 baterias em série (para atingir os 48VDC) por 4 em paralelo (para atingir os 160Ah)
- Total de baterias:  $4 \times 4 = 16$  baterias
- Custo de 16 baterias:  $R\$ 2.099,00 \times 16 = R\$ 33.584,00$
- Depois de três anos mais 16 baterias a R\$ 33.584,00
- Para um período de 12 anos:  $4 \times R\$ 33.584,00 = R\$ 134.336,00$
- Energia disponível:  $160Ah \times 48VDC = 7.680 \text{ Wh}$  ou 7,68 kWh
- **Custo específico: R\$ 134.336,00 / 7,68 kWh = R\$ 17.491,66/kWh**
- Cada bateria pesa 58,3 kg:  $16 \times 58,3 = 932,80 \text{ kg}$
- Mede 0,511m no comprimento, 0,270 na largura e 0,241m de altura ou  $0,033251m^3$  total de  $0,532 \text{ m}^3$ .

#### 4.4.4.2 Bateria de Lítio

Segundo Faria Junior, Zarpelon & Serna (2014, p.158-64), vários são os tipos de baterias de íon lítio desenvolvidas. As primeira foram as de lítio-cobalto ( $\text{LiCoO}_2$ ) e de lítio-manganês ( $\text{LiMnO}_4$ ) em escala comercial. As de lítio-fosfato ( $\text{LiFePO}_4$ ) são utilizados onde se requer potências mais elevadas e segurança de operação:

- Bateria de Lítio-Polímero: as baterias de íon lítio-polímero são seguras e tem grande versatilidade nos formatos. Utiliza um gel eletrolítico composto por um sal de lítio dissolvido em solvente absorvido numa matriz polimérica de alta massa molar condutora de íons. Como exemplo: filmes de copolímero PVDF-HFP com sal de  $\text{LiPF}_6$  ou  $\text{LiBF}_4$  em solvente carbonato.
- Bateria de Lítio-Cobalto ( $\text{LiCO}_2$ ): estão em uso desde 1994, principalmente em telefones celulares, laptops e câmeras digitais. Tem o potencial de célula de 3,7 V e, como desvantagem, o custo do cobalto e sua associação a riscos tóxicos e ambientais.
- Baterias de  $\text{LiMn}_2\text{O}_4$ : as baterias de íon lítio utilizando óxido de manganês teve o início de comercialização em 1996. Tem vida útil limitada e um potencial maior (3,8-4.0V) quando comparado com as de lítio-cobalto. São mais estáveis e seguras e, apesar da disponibilidade de materiais ainda não são tão comuns.
- Baterias de  $\text{Li}(\text{NiCoMn})\text{O}_2$ : as baterias de lítio-níquel-manganês-cobalto (NMC) têm uma combinação ótima desses materiais e são opção como fonte de energia para ferramentas e na propulsão de veículos elétricos.
- Baterias de  $\text{LiFePO}_4$ : estão em utilização desde 1999, oferece boa performance eletroquímica com baixa resistência interna. Tem boa segurança, estabilidade térmica, boa tolerância ao uso abusivo, alta corrente nominal e ciclos de vida longa. Tem potencial de operação menor (3,3V).
- Baterias de Li-S: as baterias de lítio-enxofre têm o eletrólito composto por um sal de lítio dissolvido em solvente orgânico. Há perdas significativas com reações indesejadas de compostos polissulfetos intermediários com o eletrólito causam perdas irreversíveis no material ativo (enxofre). Esse tipo de bateria ainda não está disponível comercialmente e sua célula fornece um potencial de 2,1 V.
- Baterias de  $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ : baterias de titanato de lítio (LTO) como material anódico são conhecidas desde os anos 1980. Tem a vantagem de suportar temperaturas mais altas de operação, menor impedância interna e vida mais longa. A desvantagem é o potencial de célula de 2,25V. O desenvolvimento da tecnologia de baterias de titanato de lítio tem como interesse a utilização em motores elétricos e em sistemas de armazenamento de energia em larga escala.
- Baterias de lítio-ar: figura como uma das candidatas na busca por baterias menores e mais leves com elevada densidade de energia. Os desenvolvimentos apontam para densidades de energia 5 a 10 vezes maiores que as baterias de íon lítio. Essa vantagem faz dessa bateria menor e promissora na utilização em veículos elétricos. O lítio é oxidado pelo oxigênio durante a descarga; o potencial da célula é de 2,5V. Vários desafios devem ser superados o principal é a

contaminação do ânodo de lítio por parte dos demais materiais presentes no ar.

#### 2.4.4.2.1 Bateria de Lítio de $\text{LiFePO}_4$ (Lítio Ferro Fosfato) da Energy Source

As baterias de Lítio Ferro Fosfato (LFF) da Energy Source foram especialmente desenvolvidas para substituírem as baterias de ácido, gel ou AGM utilizadas atualmente. Com seu design estratégico para cada aplicação permite otimização de espaço, peso e escalabilidade.

A Figura 2.30 mostra a imagem da bateria  $\text{LiFePO}_4$  da Energy Source. Entre as características listadas na Figura 2.31 pode-se destacar:

- Mais energia utilizável - 90% descarga
- Fácil Conexão - conector universal e conexão em paralelo
- Bem durável - vida útil de 4000 ciclos
- Resistente - tolera altas e baixas temperaturas
- Versátil - pode ser empregada em diversos projetos
- Battery Management System (BMS) - Gerenciamento Inteligente da Bateria
- Mais potência menos peso - 70% mais leve que a bateria de chumbo
- Não tóxica - não emite gases
- Inversores compatíveis – Growatt (série SPF) / Deye (híbrido)

#### Especificações de carga e descarga

- Energia utilizável 9,0KWh
- Descarga máxima constante 100A
- Descarga máxima rápida (5min) 120A
- Carga nominal 100A
- Tensão nominal 51,2V
- Tensão de trabalho (operação) 40,0 ~ 58,4 V

Figura 2.30 - Powerfree Cube 48V lítio 10kWh Energia Solar Smart 4.000 ciclos




## Bateria Lítio Ferro Fosfato

Modelo 51,2 V 200 Ah 10 kWh

Fonte: Manual Energy Source (2023).

Figura 2.31 - Especificações Técnicas Bateria Energy Source

<b>ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS</b> 	
<b>ESPECIFICAÇÕES DE CARGA/ DESCARGA DA BATERIA</b>	
Corrente de carga nominal	100 A
Corrente de descarga nominal	100 A
Tensão Nominal	51,2 V
Tensão Máxima - Corte automático	58,4 V
Tensão Mínima - Corte automático	40 V
Tensão de carga	59 V
Profundidade de descarga	90%
<b>TEMPERATURA DE OPERAÇÃO</b>	
Temperatura de carga	0 °C a 50 °C
Temperatura de descarga	-20 °C a 55 °C
<b>CARACTERÍSTICAS FÍSICAS</b>	
Dimensões	65 x 63 x 59 cm (C x L x A)
Peso	149 kg
Proteção IP30	
<b>BMS</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Proteção eletrônica contra curto circuito;</li> <li>✓ Balanceamento interno dos packs;</li> <li>✓ Corte automático tensão máxima e mínima;</li> <li>✓ Comunicação RS485/CAN.</li> </ul>	
<b>DURABILIDADE</b>	
Durabilidade	4.000 - 5.000 ciclos
<b>CARACTERÍSTICAS DE OPERAÇÃO</b>	
Modo de operação	individual ou em paralelo (até 8 un.)
<b>CARACTERÍSTICAS GERAIS</b>	
Inversores compatíveis	Growatt - SPF 5000 ES
Certificações	IEC62619 / IEC60730 / UN38.3
Bateria não poluente e não prejudicial à saúde e ao meio ambiente	
<b>APLICAÇÕES</b>	
Estacionárias, como: energia Solar, energia eólica, UPS/nobreak etc.	
<b>GARANTIA</b>	
5 (cinco) anos.	

Fonte: Manual Energy Source (2023)

O custo de uma bateria LFF da Energy Source é de R\$ 22.489,00 e suporta de 4.000 a 5.000 ciclos de carga/descarga profunda (90%), o que equivale a um período de 11 a 13 anos de uso e fornece energia de 10 kWh. Se considerar que o ciclo de uso não é completo de carga/descarga na função backup, a bateria pode durar 20 anos

O custo específico da bateria de lítio é de R\$ 22.489,00/10 kWh = R\$ 2.248,90/kWh. Comparado com o custo específico das bateria chumbo-ácido de R\$ 17.491,66/kWh (item 4.6.8.1) a bateria de lítio é apenas 12,85% do custo da bateria chumbo-ácido considerando o mesmo período de 12 anos de uso.

### 3 ESTUDO DE CASO

O presente estudo de caso refere-se a uma instalação residencial que, inicialmente, era uma espécie de laboratório e, depois, se firmou como uma instalação típica de Geração Distribuída, no formato de uma microrrede, com todos os requisitos presentes. Foram feitas várias pesquisas de equipamentos que pudesse atender essa demanda de forma plausível e com custo relativamente baixo.

#### 3.1 Cálculo dos ângulos de posicionamento de uma superfície em relação ao Sol referente ao estudo de caso

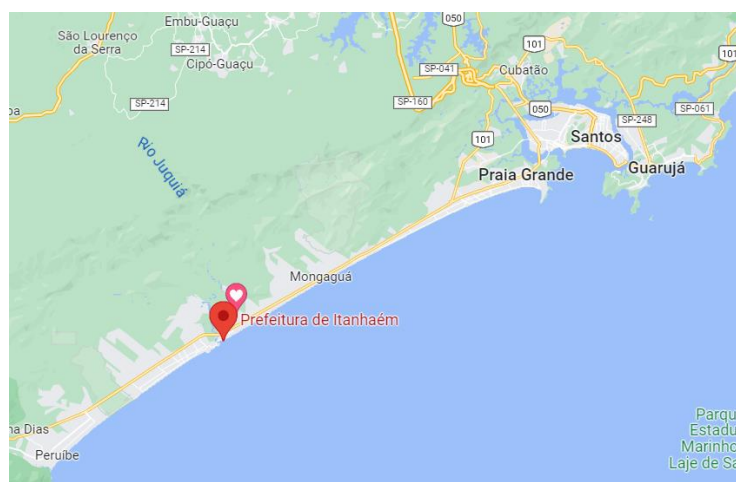
A residência objeto de estudo possui duas meias-águas com coordenadas  $24^{\circ} 9' 27.900''$  S  $46^{\circ} 46' 25.320''$  W, ou  $-24.1577500, -46.7737000$ .

O local do estudo tem as seguintes características. Localização:

- Coordenadas (obtidas pelo Google):
- Latitude:  $24^{\circ} 9' 27.900''$  S  $24.1577500^{\circ}$  S
- Longitude:  $46^{\circ} 46' 25.320''$  W  $46.7737000^{\circ}$  W
- Elevação 7m
- Declinação Magnética:  $21,52^{\circ}$  W
- O telhado tem as seguintes dimensões: Altura da empena 1,90m comprimento 8,5 m resultando numa tangente de 0,223529 o equivalente a inclinação  $\beta = 12^{\circ}$ .

A residência é localizada no município de Itanhaém/SP. Pertence à Baixada Santista. A Figura 3.1 mostra os municípios da Baixada Santista/SP.

Figura 3.1 - Imagem do Google mostrando a Baixada Santista



Fonte: Imagem Google (2023).

A Figura 3.2 mostra foto aérea do centro da cidade. Segundo a Secretaria de Turismo a cidade tem as seguintes características:

- A Estância Balneária de Itanhaém possui uma área de 601,845 km<sup>2</sup>, localizada no Litoral Sul do Estado de São Paulo, na Região Metropolitana da Baixada Santista, fazendo divisas com os Municípios de São Paulo e São Vicente a nordeste, Jujutiba a noroeste, Pedro de Toledo a oeste, Peruíbe a sudoeste, Mongaguá a leste e Oceano Atlântico ao sul. A constituição geológica é de baixada, caracterizada por depósitos quaternários, formada por mangues, jundus e pequenas florestas.
- A latitude é de 24 O 11' 08" sul e longitude 46 O 47' 15" oeste, coordenadas geodésicas norte 7324043,622 e sul 318410,391. O relevo é constituído por uma baixada aproximadamente 3 metros acima do nível do mar, com pequenos morros na faixa litorânea, como os de Sapucaitava ou Itanquanduva, Piraguira, Itaguaçu, Púlpito de Anchieta e o Paranambuco, e com afloramento da Serra do Mar no interior do Município.
- O Oceano Atlântico banha 26 quilômetros de praias, baías, pequenas enseadas e costões rochosos. Destacam-se as ilhas fluviais como Ilha da Volta Deixada e Ilha do Bairro do Rio Acima, bem como as marítimas como Ilha das Cabras, Pedra Meia Praia, Pedra do Carioca e mais ao longo do oceano as ilhas Queimada Grande e Queimada Pequena, além das Lajes Pedro II e da Conceição. A rede fluvial é extensa e o rio Itanhaém é formado por uma grande quantidade de afluentes, onde destacam-se os rios Branco da Conceição, Preto e Aguapeú.

Figura 3.2 - Imagem do Centro Histórico de Itanhaém/SP



Fonte: Imagem Secretaria de Turismo de Itanhaém/SP (2023)<sup>7</sup>.

<sup>7</sup> <https://www2.itanhaem.sp.gov.br/turismo/dados-gerais/#:~:text=A%20Est%C3%A2ncia%20Balne%C3%A1ria%20de%20Itanha%C3%A9m,sudoeste%2C%20Mongagu%C3%A1%20a%20leste%20e>

A característica climática pode ser extraída dos dados referentes à cidade de Santos/SP. A Secretaria de Turismo de Itanhaém/SP informa que o clima é Tropical Marítimo (quente), a temperatura média é 27,1°C, a máxima é de 39°C (ocorre no início ou meio da tarde e a mínima é de 15°C (ocorre entre 04 e 06 horas da manhã). A Figura 3.3 apresenta os Dados Climatológicos de Santos. O qual representa em média as condições climáticas da Baixada Santista. Apresenta temperatura máxima média 27,1°C, temperatura mínima 2°C.

Figura 3.3 - Dados Climatológicos de Santos

### Predefinição:Tabela climática de Santos

[ocultar]

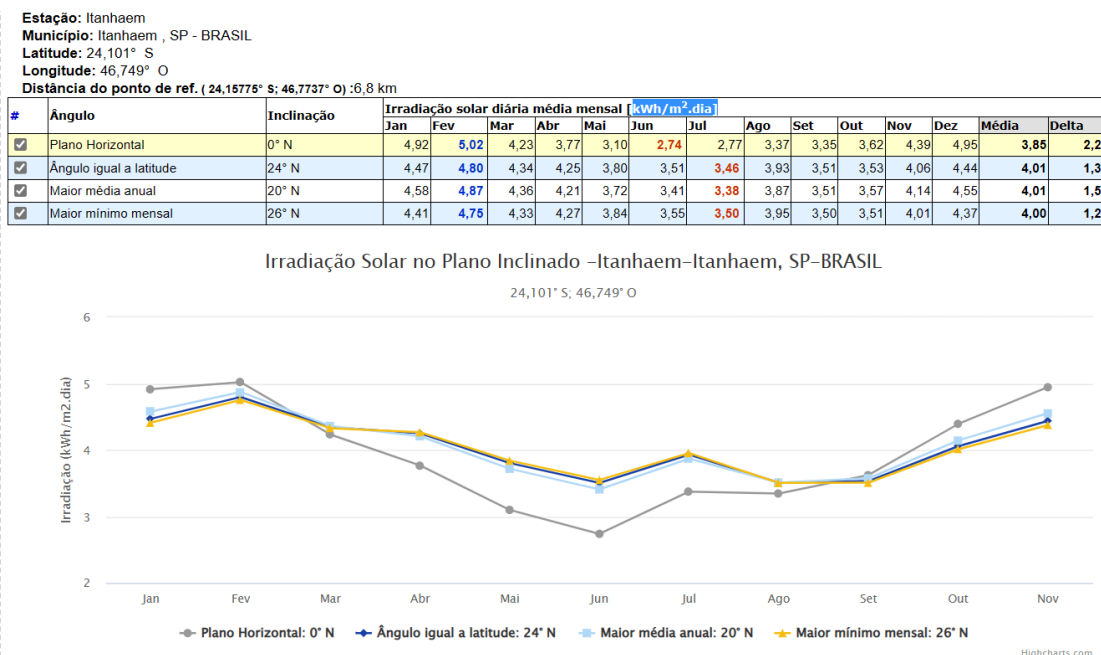
Origem: Wikipédia, a enciclopédia livre.

Dados climatológicos para Santos													[Esconder]
Mês	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Ano
Temperatura máxima recorde (°C)	42	40,3	38,3	37	37	34,5	35,8	38,7	40,8	38,4	40,3	40,7	42
Temperatura máxima média (°C)	30,2	31,1	29,8	28,4	25,8	24,8	23,7	24,3	24,7	25,7	27	29,1	27,1
Temperatura média (°C)	26,2	26,9	25,7	24,4	21,6	20,3	19,4	20,1	21	22,5	23,5	25,2	23,1
Temperatura mínima média (°C)	22,3	22,6	21,7	20,3	17,3	15,8	15	15,8	17,2	19,2	20,1	21,3	19,1
Temperatura mínima recorde (°C)	14,6	14,1	15,3	10	5,8	4,2	2	4,3	7,2	10,4	8,2	13,6	2
Precipitação (mm)	291,4	218,4	229,1	180,5	127,4	92,7	102,6	74,1	134,8	173,6	188,3	240,7	2 053,6
Umidade relativa compensada (%)	80,4	82	82	81	81,8	81,2	82	82,8	83,3	81,9	79,8	79,6	81,5
Horas de sol	130,9	120,9	124,7	127,7	135	118	115,9	95,2	69,9	95,3	122	120,8	1 376,3
<i>Fonte: Centro Integrado de Informações Agrometeorológicas (CIAGRO-SP) (climatologia de temperatura/precipitação: 1996-presente; recordes de temperatura: 10/06/1996-presente)</i> <sup>[1][2][3][4][5]</sup>													
<i>Fonte 2: Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) (umidade compensada e horas de sol: 1981-2010; recordes de temperatura de 1931 a 1996)</i> <sup>[6][7][8]</sup>													

Fonte: Wikipédia, a enciclopédia livre. Adaptado de Centro Nacional de Agro meteorológicas (CIAPRO-SP) (2023)

Na tabela da Figura 3.3 as temperaturas máxima média é 27,1°C, a média é 23,1°C, a mínima média 19,1°C. Em janeiro apresentou temperatura recorde de 42°C e em julho apresentou temperatura mínima recorde de 2°C. A precipitação no ano 2.053,6mm o que dá uma média de 171 mm. A umidade relativa média é de 81,5%. Horas de sol 1.376,3 horas no ano e na média mensal de 114,7 horas. Se considerar mês de 30 dias, a média de insolação diária é de 3,82 horas/dia. O que é um valor bem pequeno e péssimo para a captação de energia solar, tanto para energia fotovoltaica quanto aquecimento para banho e piscina. A Figura 3.4 apresenta a Irradiação solar no Plano Inclinado.

Figura 3.4 - Gráfico para o Plano Inclinado da Estação Itanhaém



Fonte: CRESESB (acesso em 12 abr. 2023).

Do gráfico do Plano Inclinado da Figura 3.4, a irradiação para as inclinações: 0° N (Plano Inclinado) média mensal de 3,85 kWh/m<sup>2</sup>.dia; para inclinação de 24°N (Ângulo igual a latitude) média mensal de 4,01 kWh/m<sup>2</sup>.dia; para inclinação de 20°N (Maior média anual) média anual de 4,01 kWh/m<sup>2</sup>.dia; para inclinação 26°N.

O telhado em estudo tem inclinação  $\beta = 12^\circ$ . A irradiação média para inclinação 0°N é de 3,85 kWh/m<sup>2</sup>.dia e para inclinação 20°N é de 4,01 kWh/m<sup>2</sup>.dia. Se considerar um valor médio linear entre as inclinações pode-se **adotar 3,94 kWh/m<sup>2</sup>.dia para a inclinação de 12°N.**

### 3.2 Cálculo dos valores de projeto

Esse estudo de caso é sobre a instalação e operação de um sistema OFF-GRID Interativo cuja característica principal é manter as cargas prioritárias conectadas a ele. É um sistema Nobreak solar. Diferente dos inversores ON-GRID que, tendo luz solar ele gera energia, esse sistema somente vai gerar energia se, estiver sendo solicitada alguma energia pelas cargas prioritárias, conectadas a ele. Se o Sol estiver “a pino” os módulos irão gerar energia, mas, o inversor somente atenderá ao que for solicitado. Se não tiver nenhuma carga, ele somente irá usar a

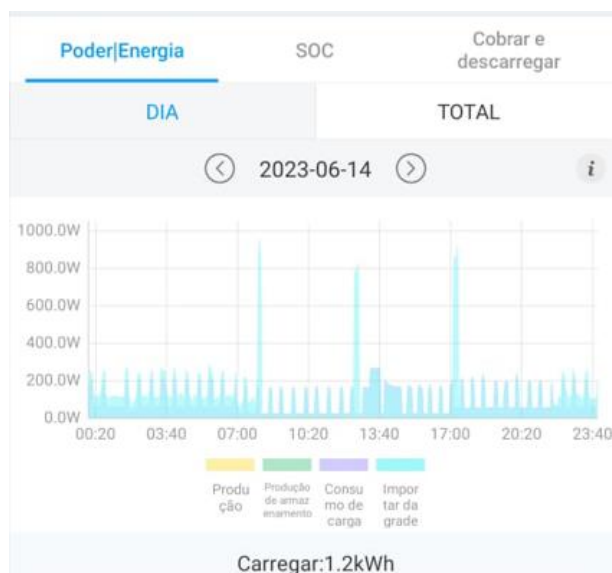
energia que ele precisa para ficar ativo. Como foi mencionado nos objetivos, é um sistema para estudo e compreensão da tecnologia OFF-GRID Interativa.

As metodologias de projeto são voltadas para primeiro: estudar a carga, depois os módulos e inversores para depois dimensionar o melhor sistema para a carga. Nesse estudo de caso, o sistema já está instalado e produzindo. O objetivo dos cálculos é pesquisar um meio de fazer com que os cálculos para um sistema tradicional (ON-GRID) possam ser adaptados para refletir a produção de energia por um inversor OFF-GRID Interativo conectado a módulos fotovoltaicos de mercado, bateria de lítio e a rede de energia da concessionária, numa configuração que atenda a definição de uma microrrede de energia de acordo com a Lei nº 14.300/2022.

### 3.2.1 A Demanda de energia das cargas prioritárias

A residência no qual estão instalados os equipamentos é casa de veraneio com ocupação máxima nos meses de verão e bem esparsa nos outros mês do ano. As cargas críticas são: a geladeira/freezer, a iluminação noturna e o sistema de monitoramento de segurança. Como já mencionado, este sistema já está instalado e produzindo, na Figura 3.5 está o gráfico de monitoramento do inversor. Nele consta que a demanda diária é em torno de 1,2 kWh. No mês o total é de 36 kWh.

Figura 3.5 – Gráfico da demanda de energia suprida pelo inversor OFF-GRID



Fonte: ShinePhone: Software de monitoramento do inversor (2023).

A fatura de energia da concessionária da residência apresenta consumo, em média, de 180 kWh/mês. Em um dia a residência consome em média 6,0 kWh. A Figura 3.5 mostra a dinâmica de funcionamento do inversor por um dia. O sistema OFF-GRID Interativo supre, somente, cargas que conjuntamente consomem 1,2 kWh em um dia ou 20% da energia total.

### 3.2.2 Cálculo de Horas de Sol Pleno (HSP) pelo CRESESB

Segundo Pinho & Galdino (2014) no Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaico (CEPEL – CRESEB), o cálculo de Horas de Sol Pleno (HSP) considera um período em que a irradiação é de  $G_T=1000 \text{ W/m}^2$  "...a energia resultante seja equivalente à energia disponibilizada pelo Sol no local em questão." (PINHO & GALDINO, 2014, pg.300).

Considerando o valor médio linear de **3,94 kWh/m<sup>2</sup>.dia** para a inclinação de 12°, tem-se:

$$H_T = (\text{HSP}) \times G_T \quad 12$$

$$\text{HSP} = H_T / G_T \quad 13$$

$$\text{HSP} = 3,94 \text{ (kWh/m}^2\text{)} / 1,0 \text{ (kWh/m}^2\text{)} = 3,94 \text{ horas/dia} \quad 14$$

### 3.2.3 Energia Disponibilizada pelo GFV para a rede

Segundo Pinho & Galdino (2014) a expressão para estimar a energia disponibilizada pelo Gerador Fotovoltaico para a rede elétrica  $E_{\text{rede}}$  [Wh/dia] é dada por

$$E_{\text{REDE}} = N \times P^{\circ\text{mp}} \times (\text{HSP}) \times (\text{TD}) \quad 12$$

Onde:

- N é o número de painéis fotovoltaicos que constituem o GFV;
- $P^{\circ\text{mp}}$  potência máxima STC do painel fotovoltaico usado [W];
- (HSP) número de Horas de Sol Pleno [h/dia];
- (TD) taxa de desempenho (*performance ratio*) parâmetro experimental.

O parâmetro experimental (TD) taxa de desempenho (*performance ratio*) é definido pela Equação

$$\text{TD} = \frac{\text{(energia real fornecida pelo sistema)}}{\text{(energia máxima teórica possível)}} \quad 13$$

Segundo Pacheco (2021) “(TD) leva em consideração o rendimento do inversor, o rendimento do SPMP, temperatura de operação do PF, diferenças entre módulos de um mesmo modelo, perdas no cabeamento, sujeira na superfície do PF, entre outros. Para o Brasil o CRESESB recomenda a faixa  $0,7 < (TD) < 0,8$  para valores de (TD).”

No projeto foram utilizados quatro módulos de 440 Wp com as características mostradas na Figura 3.6.

Figura 3.6 - características técnicas do módulo Jinko 440Wp

Módulo 440 Wp	STC	NOCT
Potência máxima (Pmax)	440Wp	327Wp
Tensão máxima de energia (Vmp)	33,72V	31,39V
Corrente de potência Máxima (Imp)	13,05A	10,43A
Tensão de circuito aberto (Voc)	41,02V	38,72V
Corrente de curto-circuito (Isc)	13,73A	11,09A
Eficiência do Módulo STC (%)	20,39%	
Temperatura de operação (°C)	-40°C ~+85°C	
Tensão máxima do sistema	1000/1500VDC (IEC)	
Tolerância de potência	0 ~+3%	
Coeficiente de temperatura de Pmax	-0,35%/°C	
Coeficiente de temperatura de Voc	-0,28%/°C	
Coeficiente de temperatura de Isc	-0,0048%/°C	
Temperatura nominal da célula operacional (NOCT)	45±2°C	
Condição STC	Irradiância 1000W/m <sup>2</sup>	
	Temperatura da célula 25°C	
	AM=1,5	
Condição NOCT	Irradiância 800W/m <sup>2</sup>	
	Temperatura da célula 20°C	
	AM=1,5	

Fonte: Manual Jinko adaptado (2023).

Fazendo o cálculo para a energia disponibilizada pelos módulos fotovoltaicos, da equação 12:

$$E_{REDE} = N \times P^{\circ}mp \times (HSP) \times (TD)$$

Onde:

- N = 4;
- P<sup>°</sup>mp = 440 Wp
- HSP = 3,94 horas

- (TD) = 0,72 (adotado).

$$E_{REDE} = 4 \times 440 \text{ (Wp)} \times 3,94 \times 0,72 = 4.992,8 \text{ Wh/dia} \approx 5,0 \text{ kWh/dia.}$$

$$\text{Energia produzida no mês} = 5,0 \times 30 = 150,0 \text{ kWh/mês}$$

$$\text{Energia produzida no ano} = 150,0 \times 12 = 1.800,0 \text{ kWh/ano}$$

A energia de 150 kWh/mês ou a anual de 1.800,0 kWh é correspondente a energia que um inversor ON-GRID entregaria à rede de energia da concessionária.

Nesse estudo de caso os módulos são de 440 Wp, produzem os 150 kWh/mês, porém o inversor OFF-GRID interativo somente aproveita 1,2 kWh/dia ou 36 kWh/mês ou 432 kWh/ano. O que equivale a  $432/1800 = 24\%$  da energia que seria produzida pelo inversor ON-GRID.

Se considerar a média de consumo da residência de 180 kWh/mês, o GFV atenderia  $150/180 = 83,3\%$  do consumo da residência. Considerando o aproveitamento de 36 kWh/mês do inversor OFF-GRID Interativo para atender às cargas prioritárias, seria  $36/180 = 20\%$  do consumo total.

Como já mencionado nos objetivos, o que se pretende é estudar o comportamento de um inversor OFF-GRID Interativo exercendo a função de Nobreak solar na configuração de uma microrrede de energia. Nesse caso as fontes são, por ordem de prioridade: painel solar, bateria estacionária (lítio) e rede de energia da concessionária.

#### 3.2.4 Estimativa de cálculo do número de módulos usando $E_{REDE}$

Usar a equação (12) para calcular o número de módulos empregando o valor de (TD) = 0,75.

Primeiro estimar o número de módulos pela energia entregue à rede 5,0 kWh/dia:

$$E_{REDE} = N \times P^{\circ}_{mp} \times HSP \times TD$$

$$N = E_{REDE} / P^{\circ}_{mp} \times HSP \times TD =$$

$$N = 5,0 \text{ (kWh/dia)} / (0,440 \text{ (kW)} \times 3,94 \text{ (h/dia)} \times 0,75) = 3,84 \text{ PF ou } 4 \text{ PF.}$$

Segundo estimar o número de módulos pela energia utilizada pelo inversor OFF-GRID Interativo 1,2 kWh/dia:

$$E_{\acute{U}TIL} = N \times P^{\circ}_{mp} \times HSP \times TD$$

$$N = E_{\text{ÚTIL}} / P^{\circ}_{mp} \times HSP \times TD =$$

$$N = 1,2 \text{ (kWh/dia)} / (0,440 \text{ (kW)} \times 3,94 \text{ (h/dia)} \times 0,75) = 0,92 \text{ PF ou 1 PF.}$$

Conclui-se que pelos cálculos poderiam ser utilizados apenas um módulo de 440Wp ao invés de quatro.

### 3.2.5 Procedimento usando como referência $E_{GFV}$

De acordo com Pacheco (2021) uma modificação na Equação básica é explicitar o rendimento do inversor, o rendimento do SPMP (seguidor do ponto de máxima potência) e a influência da temperatura  $T_c$ . Assim se usar o valor da temperatura média máxima anual para a cidade de Itanhaém/SP  $T_{\text{amax}} = 27,1^{\circ}\text{C}$  e usar a irradiação de  $G_T = 1000 \text{ W/m}^2$  a  $P_{mp}$  do painel considerado seria:

Utilizando a equação (14):

$$T_c = T_a + \frac{G_T}{800} (T_c^* - 20)0,9$$

$$T_c = 27,1 + [1000/800] * [45-20] * 0,9 = 55,2^{\circ}\text{C}$$

$$P_{mp} = P^{\circ}_{mp} \times G_T / 1000 (1 + \gamma_{mp}(T_c - T^{\circ}_c)) \quad 15$$

$$P_{mp} = 440 \text{ (W)} \times 1000 / 1000 \times (1 - 0,0035 \times (55,2 - 25)) = 393,5 \text{ W}$$

### 3.2.6 Estimativa de energia que o GFV deve entregar ao inversor

O rendimento do inversor SFP 3500 ES é de 93%, portanto a energia que o gerador fotovoltaico deve entregar ao inversor deve ser:

O inversor OFF-GRID Interativo tem rendimento de 93% e a energia entregue às cargas prioritárias é de  $E_{\text{UTIL}} = 1,2 \text{ kWh/dia}$ , portanto a energia entregue ao inversor será:

$$E_{GFV} = \frac{E_{\text{UTIL}}}{\eta_{inv}} \quad 16$$

$$E_{GFV} = 1,2 \text{ (kWh/dia)} / 0,93 = 1,3 \text{ kWh/dia}$$

Portanto (Figura 3.7),

Figura 3.7 - Sistema de energia  $E_{GFV}$  X NoBreak

Gerador Fotovoltaico $E_{GFV}$	Inversor entrega à carga	Perdas
1,3 (kWh/dia)	1,2 (kWh/dia)	0,1 (kWh/dia)

As perdas podem ser causadas por utilização de energia para o próprio inversor funcionar e, pode ser por diferenças entre módulos de um mesmo modelo, ou perdas no cabeamento, sujeira na superfície do PF e outros de mesma natureza.

### 3.2.7 Verificação dos limites que o GFV deve entregar ao inversor

Definição de duas grandezas fundamentais:

- Potência Pico do GFV:  $P_{pGFV}$  [kWp] pela Equação

$$P_{pGFV} = N \times P^{\circ}_{mp} \quad 17$$

- Para os módulos do projeto:

- $P_{pGFV} = N \times P^{\circ}_{mp} = 4 \times 440 \text{ Wp} = 1.760 \text{ Wp}$

Define se Fator de Dimensionamento do Inversor (FDI) como a razão dada pela Equação:

$$(FDI) = \frac{P_{InCA}}{P_{pGFV}} \quad 18$$

Onde

$P_{InCA}$ : [ W] Potência nominal do inversor em corrente alternada

Avaliação do FDI para o inversor OFF-GRID Interativo onde  $P_{InCA} = 3.500\text{W}$ .

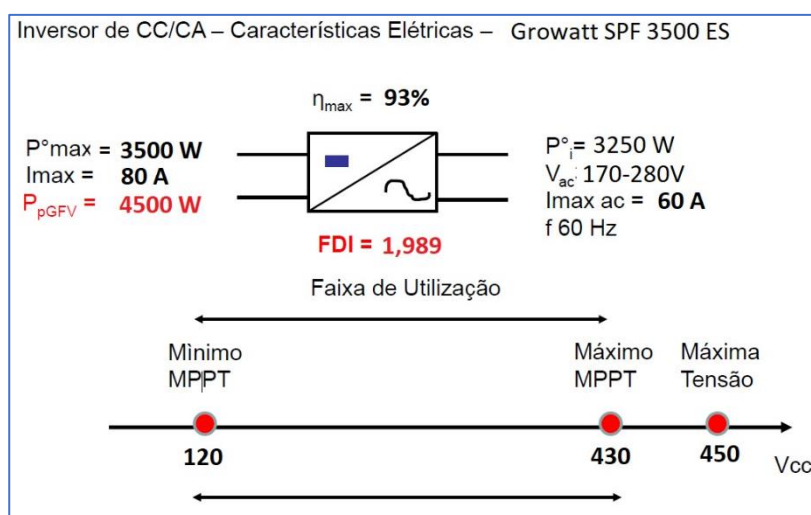
$$(FDI) = 3500 / 1760 = 1,989$$

Pelo critério do (FDI) para escolha do inversor o valor do (FDI) = 1,989 é muito ruim. Entretanto, o inversor foi escolhido para servir de backup de energia (Nobreak) para cargas prioritárias numa configuração de microrrede de energia onde ele é o elemento central de fornecimento com a liberdade de escolha da fonte de energia (solar, bateria ou rede) que melhor supre a demanda da carga.

#### 3.2.7.1 Verificação dos limites que o GFV deve entregar ao inversor

A metodologia de cálculo para verificação de limites introduzida por Pacheco (2021) leva em conta as características dos módulos e do inversor. A Figura 3.8 mostra de forma gráfica as características elétricas do inversor estudado. Do lado esquerdo estão os dados dos módulos e do lado direito o aproveitamento do inversor da energia gerada nos módulos.

Figura 3.8 - Quadro verificação de limites do sistema



Fonte: Pacheco adaptado (2023).

### 3.2.7.1.1 Verificação do limite inferior

O objetivo dessa verificação dentro da metodologia de cálculo é investigar se os limites dos equipamentos estão de acordo com o projetado.

Verificação do limite inferior:  $n \times V_{mp(min)} > (120)V$ :

- $n = n^{\circ}$  de painéis em série
- $V_{mp(min)}$  ocorre na  $T_{max}$  anual  $T_{max} = 42,0$  C (janeiro);  $G_T = 1000$  W/m<sup>2</sup>
- $T_C = 42,0 + [1000/800] \cdot [45 - 20] \cdot 0,9 = 42,0 + 28,1 = 70,1^{\circ}C$
- $V_{mp} = 33,82V \times (1 - 0,0028 (70,1 - 25)) = 33,82 \times 0,8737 = 29,549V$
- $n > (120/29,55) = 4,06$ , ou 4 módulos  $\times 29,55V = 118,2V$  está abaixo do valor mínimo de 120V.

O valor calculado fica abaixo do limite mínimo do valor de 120V para o MPPT para a temperatura recorde máxima de 42°C. Nesse caso o inversor deverá mudar a oferta de energia dos módulos fotovoltaicos para a bateria ou para a rede.

Verificação do limite superior:  $n \times V_{mp(max)} < (430)V$ :

- $n = n^{\circ}$  de painéis em série

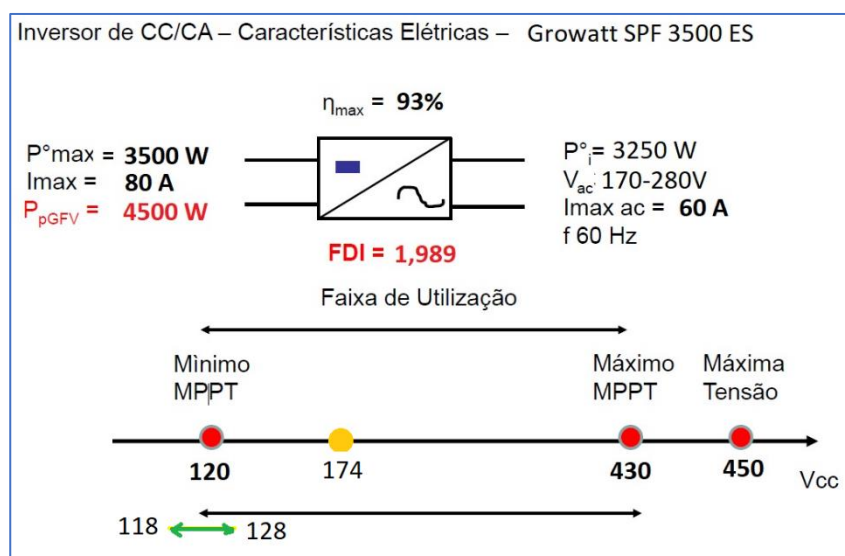
- $V_{mp(max)}$  ocorre na  $T_{min}$  anual  $T_{min} = 15,0$  C (julho);  $G_T = 1000$  W/m<sup>2</sup>
- $T_C = 15,0 + [1000/800]*[45 - 20]*0,9 = 15,0 + 28,1 = 43,1$ °C
- $V_{mp} = 33,82V \times (1 - 0,0028 (43,1 - 25)) = 33,82 \times 0,94932 = 32,11V$
- $N < (430/32,11) = 13,39$ , ou 4 módulos  $\times 32,11V = 128,44V$  está acima do valor mínimo de 120V e abaixo do valor máximo de 430V.

O valor calculado fica dentro do limite mínimo e máximo dos valores de 120-430V, para o MPPT, para a temperatura mínima média de 15°C, registrada em julho. Nesse caso o inversor deverá continuar a oferta de energia dos módulos fotovoltaicos.

Verificação do limite superior noturno  $n \times V_{OCMAX} < 450V$ :

- $n = n^o$  de painéis em série
- $V_{OC(max)}$  noturno ocorre na  $T_{min}$  anual recorde  $T_{min} = 2,0$  C (julho);  $G_T = 0$  W/m<sup>2</sup>
- $T_C = 2,0 + [0/800]*[45 - 20]*0,9 = 2,0 + 0 = 2,0$ °C (julho)
- $V_{OC(max)} = 40,92V \times (1 - 0,0028 (2,0 - 25)) = 40,92 \times 1,0644 = 43,55V$
- 4 módulos  $\times 43,55V = 174,22V$  está acima do valor mínimo de 120V e abaixo do valor máximo de 450V.

Figura 3.9 - Quadro verificação de limites do sistema



Fonte: Pacheco adaptado (2023)

O valor calculado (Figura 3.9) fica abaixo do limite máximo de 450V, para o MPPT, para a temperatura mínima recorde de 2°C, registrada em julho. Nesse caso o inversor deverá continuar a oferta de energia dos módulos fotovoltaicos.

Verificação de  $I_{SCmax}$  por MPPT  $< 13,69A$

- Na temperatura Max de  $T_{max} = 42,0$  C (janeiro);  $GT = 1000$  W/m<sup>2</sup>;  $T_C = 43,1$ °C

- $I_{SC} = 13,69 \times (1 - 0,00035(43,1 - 25 \ 25)) = 13,69 \times 0,93665 = 12,82$   
A

Portanto, a corrente  $I_{SC}$  de 12,82 A fica abaixo da corrente  $I_{SCmax} = 13,69$  A.

### 3.2.8 Análise dos dados resultantes dos cálculos

Os cálculos mostram os limites para o inversor em estudo. Entretanto, a metodologia de cálculo não foi desenvolvida para aplicação em projetos com inversor OFF-GRID interativo. O valor do FDI (Fator de Dimensionamento do Inversor) deveria ficar em torno de 0,7 e foi calculado como 1,969. O motivo principal é que os cálculos foram desenvolvidos para uma aplicação de inversores que geram a quantidade de energia independente da parcela consumida, diferentemente do modelo adotado neste trabalho que abastece somente o consumo demandado.

O inversor OFF-GRID Interativo só disponibiliza a energia que as cargas prioritárias solicitarem. Não entrega nada à rede. O inversor OFF-GRID Interativo utiliza a conexão da rede como entrada secundária de energia. Ele prioriza (dependendo da programação): solar, baterias e a rede de energia somente para consumo. Eventualmente poderia ser utilizado um gerador a combustível para gerar energia e suprir as cargas.

Ficou evidente o cálculo de limite superior de temperatura ambiente recorde de 42°C onde o valor da tensão dos módulos fica abaixo do valor 120VDC da entrada do inversor. Nesse caso ele desconecta os módulos e passa a fornecer energia a partir da bateria, e, se a bateria ficar sem carga, ele supre as cargas com a energia da rede de energia.

O inversor OFF-GRID Interativo tem como característica não interromper a alimentação das cargas. definidas no projeto como prioritárias por meio da supervisão contínua e seleção da fonte mais adequada para cada momento (fotovoltaico, baterias, rede). Essa característica evoluiu para os inversores Híbridos. Que são mais modernos e, além das cargas prioritárias, eles suprem as cargas de uma residência, por exemplo, e devolvem o excedente para a rede na forma de crédito. No caso de interrupção de energia ele se desconecta da rede e passa a operar de forma isolada com o comportamento de um inversor OFF-GRID Interativo. Quando a rede se restabelece, ele volta a operar conectado.

### 3.3 Escolha e compra do material do estudo de caso

O sistema OFF GRID no formato de um kit pré-montado. O valor do kit foi de R\$ 15.272,10. A Figura 3.10 mostra como o kit é ofertado.

Figura 3.10 - Tela da configuração do kit fotovoltaico utilizado no estudo de caso



Fonte: Aldo Solar (2021).

. O inversor Growatt série SPF ES é um OFF GRID interativo. Trabalham com a energia dos módulos fotovoltaicos e, como uma entrada secundária, suportam a entrada da rede da concessionária, ou a energia acumulada numa bateria, pode ser de lítio ou chumbo-acida, e, também, a entrada de um gerador mecânico a diesel ou gasolina.

O conteúdo do quadro apresentado na Figura 3.11 mostra a composição do kit adquirido

Figura 3.11 - Quadro com componentes do kit fotovoltaico

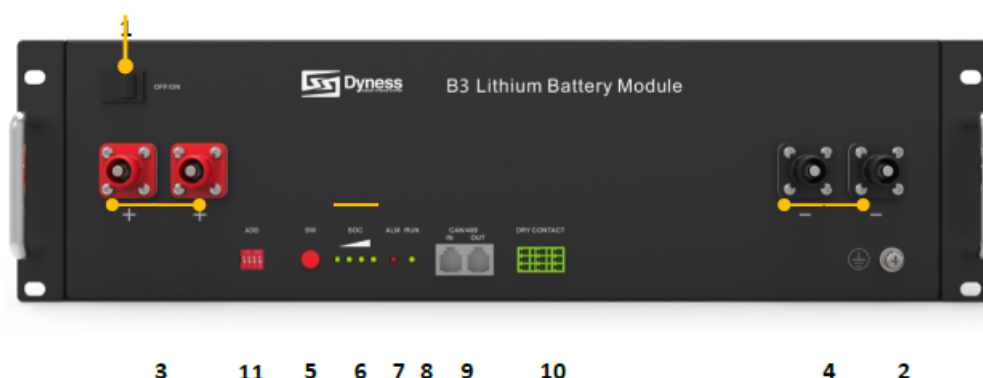
GERADOR DE ENERGIA SOLAR GROWATT OFF GRID ONDULADA ROMAGNOLE OFF GRID (
INVERSOR SOLAR GROWATT OFF GRID SPF3500ES DC48V PAINEL CARREG 4.5KW SAIDA AC 3.5KVA 220V SENOIDAL
4 PAINEL SOLAR JINKO JKM440M-6TL4-V 440W TIGER PRO MONO PERC HALF CEL 20,77% EFIC 120 CELUL
1 BATERIA SOLAR LITIO DYNES B3 48V LITIO LIFEP04 3.6KWH ENERGIA SOLAR SMART 6.000 CICLOS

4 STAUBLI CONECTOR MC4 320016P0001-UR PV-KBT4/6II-UR ACOPLADOR FEMEA
4 STAUBLI CONECTOR MC4 32.0017P0001-UR PV-KST4/6II-UR ACOPLADOR MACHO
50 CABO SOLAR NEXANS 47064 ENERGYFLEX AFITOX 0,6-1KV 1500V DC PRETO
50 CABO SOLAR NEXANS 43221 ENERGYFLEX AFITOX 0,6-1KV 1500V DC VERMELHO
1 ESTRUTURA SOLAR ROMAGNOLE 412011 RS-228 2 PARES PERFIL DE ALUMINIO 2,40 M P/ 4 PAINÉIS TIGER
1 DYNNESS CABO BATERIA INVERSOR PAR BATERIA B3 SOLAR LITIO 25MM
1 STRING BOX ABB 1SLM100200A0000BRA QUADRO 2 ENTRADAS 1 SAIDA 1000V (1 MPPT)
Disjuntor 50A (bateria) + Fusíveis 25A (Stringbox ABB)
1 QDCA AC2P16A
Material [AC] (Dispositivos de proteção, cabos, conexões, etc.)

Fonte: Alto Solar (2021)

Há que se destacar que a bateria oferecida no kit: bateria solar lítio Dyness B3 48V lítio lifepo4 3.6kWh energia solar Smart 6.000 ciclos. Por ser compacta e oferecer um serviço confiável de longa duração, pode trabalhar por 6.000 ciclos de carga/descarga. A capacidade nominal da bateria é de 3,26 kWh, porém, só fornece 2,88 kWh de energia. Uma informação importante refere-se aos 6.000 ciclos completos de carga e descarga. Se considerar o ano de 360 dias os 6.000 ciclos, se fizer a carga e descarga completas, a duração será de 16,7 anos. Se não precisar trabalhar com o ciclo completo, a duração será de muito mais tempo. A Figura 3.12 mostra as interfaces da bateria Dyness.

Figura 3.12 - Interfaces da bateria Dyness B3



Fonte: Catálogo Dyness (2021)

### 3.4 Montagem dos equipamentos do estudo de caso

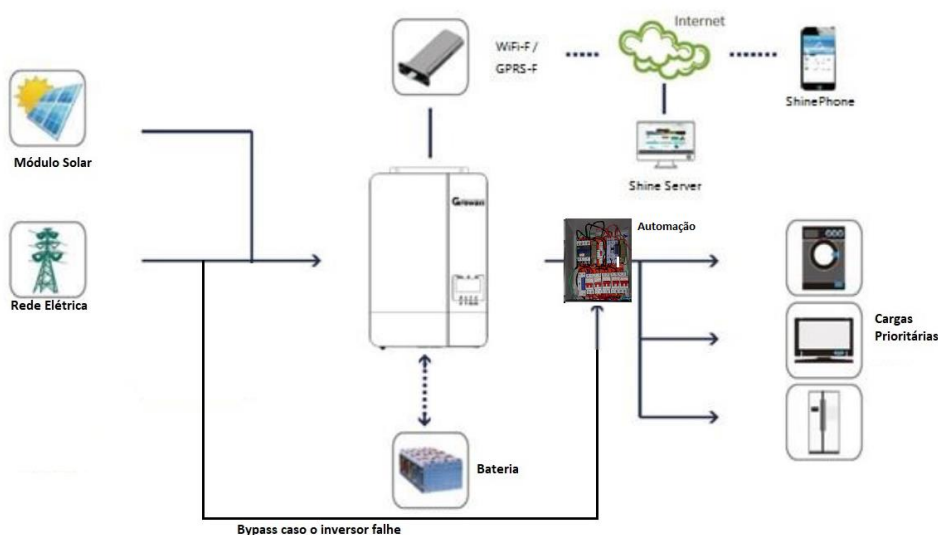
A configuração final dos equipamentos para formar o sistema OFF-GRID Interativo é composta pelos elementos:

- Inversor OFF GRID: Inversor Solar Growatt Off Grid SPF 3500 ES DC48v Painel Carreg 4.5kw Saída AC 3.5kVA 220v Senoidal;
- Bateria Solar Lítio Dyness B3 48V Lifepo4 3.6kWh Energia Solar Smart 6.000 Ciclos
- String Box ABB 1SLM100200A0000BRA Quadro 2 Entradas 1 Saída 1000V (1 MPPT)
- Sistema de automação de controle semiautomático para reversão da alimentação das cargas prioritárias.
- Caixa com disjuntor DC 50A para a bateria.
- Estabilizador 220v/120V.
- Modem WiFi para comunicação do monitoramento
- Módulos fotovoltaicos

#### 3.4.1 Arquitetura do sistema OFF-GRID interativo

A arquitetura do sistema tem a representação na Figura 3.13. Em relação à arquitetura original da Growatt (Figura 2.16) foi feita uma adaptação para conter o módulo de automação de comutação semiautomática no qual a carga recebe a energia do inversor, e, quando este deixa de operar, a carga passa a ser alimentada pela rede de energia, se estiver ativa.

Figura 3.13 - Arquitetura do sistema OFF-GRID Interativo final

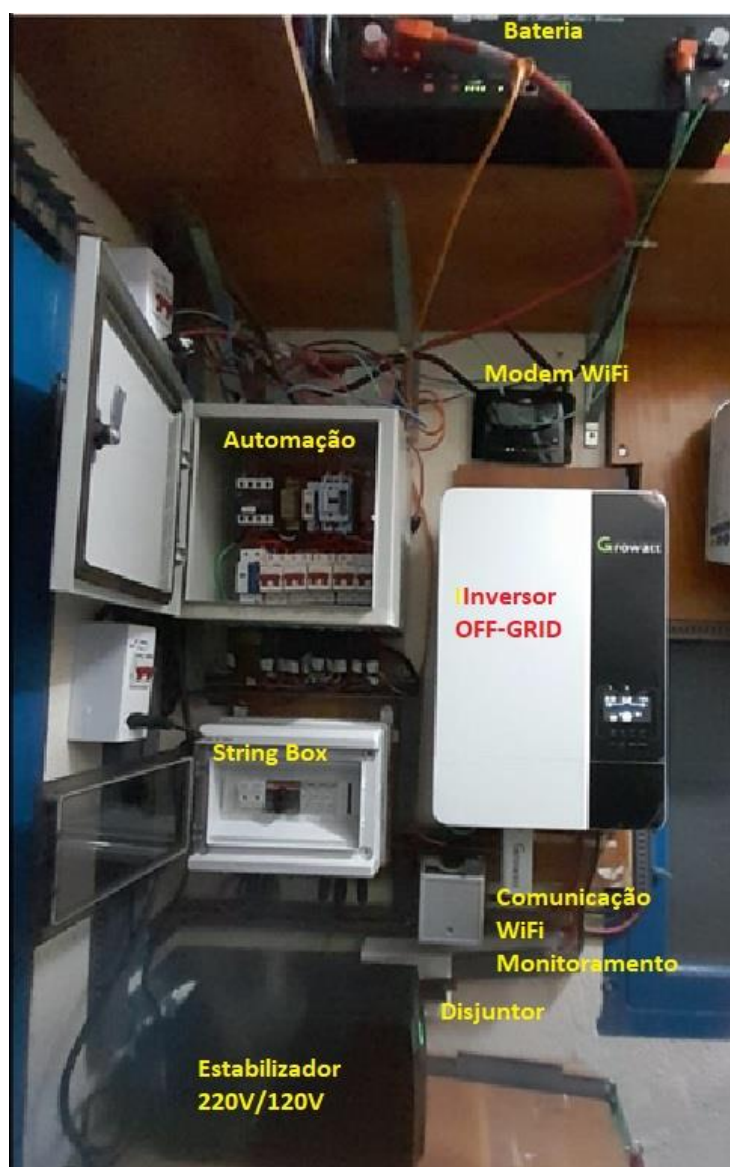


Fonte: Manual Growatt adaptado (2023).

### 3.4.2 Arranjo físico do sistema OFF-GRID interativo

Na Figura 3.14 estão os dispositivos: inversor SPF 3500. ES, a *String Box* ABB, o disjuntor DC 50A da bateria, a caixa com os elementos de automação, o modem WiFi e o estabilizador 220V/120V.

Figura 3.14 - Equipamentos que compõe o sistema OFF-GRID Interativo



Fonte: Fotografia do autor (2023)

### 3.4.3 O Inversor Growatt OFF-GRID interativo

A escolha do inversor OFF-GRID SPF 3500 ES se deu por vários motivos:

- Pesquisar o comportamento do inversor OFF-GRID Interativo;
- A utilização de bateria;
- A interação com a rede elétrica de energia;
- Não necessita de homologação: não devolve energia para a rede de energia da concessionária;

Durante o período que não tem Sol o inversor faz uso da energia da bateria ou, se tiver conectado à rede elétrica (como entrada secundária de energia) ele faz uso da rede elétrica (lembrando que o inversor não devolve energia para a rede). Se a rede elétrica desligar, o inversor continua a fornecer energia para as cargas prioritárias com a geração solar ou com a carga acumulada na bateria. Se as fontes de energia se esgotar, o inversor desliga. Caso contrário ele nunca desliga. A Figura 3.15 mostra o inversor OFF-GRID interativo SPF 3500 ES da GROWATT.

Figura 3.15 - Inversor OFF-GRID Interativo SPF 3500 ES



Fonte: Fotografia do autor (2023).

O inversor OFF-GRID da série SPF tem como padrão a tensão 230V. Pode ser configurada para 220V ou 230V. Na especificação a tensão de saída é 0-230VAC.

Essa função está presente no módulo de automação semiautomática, somente é ativada se, ocorrer alguma falha geral no inversor e este desligar. Para a carga continuar ativa é feita comutação, se a rede de energia estiver presente, para ser alimentada pela rede de energia.

O inversor tem somente um MPPT com intervalo de tensões DC de 120 a 430 VDC podendo suportar até 4.500Wp de geração de módulos fotovoltaicos.

#### 3.4.4 Bateria de Lítio LIFEP04 Dyness B3 48V

A bateria solar litio Dyness B3 48V litio lifepo4 3.6kWh energia solar Smart 6.000 ciclos. Oferece um serviço confiável de longa duração. Tem capacidade nominal de 3,26 kWh, porém, só fornece 2,88 kWh de energia. A Figura 3.16 mostra a bateria o cabo de energia e o cabo do BMS (gerenciamento)

Figura 3.16 - Instalação da bateria Dyness B3



Fonte: Fotografia do autor (2023).

### 3.4.5 String Box ABB

Os módulos fotovoltaicos instalados no telhado descem por cabos fotovoltaico, por cerca de 30 metros, e são conectados na string box ABB. Existe a proteção com fusíveis, uma chave de comutação para ligar e desligar os módulos e DPS fotovoltaicos. Todos para proteção da instalação. A Figura 3.17 retrata a string box da ABB.

Figura 3.17 - String Box ABB

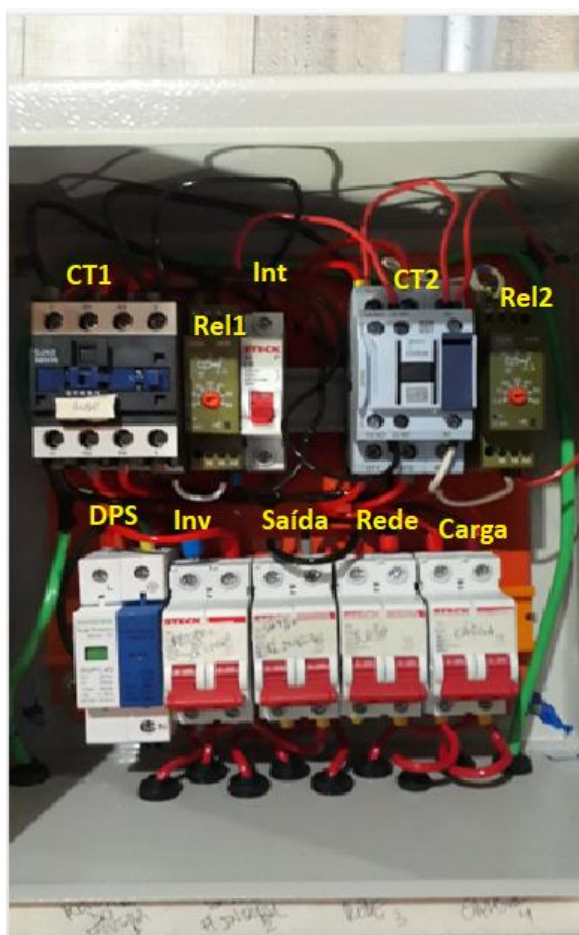


Fonte: Fotografia do autor (2023).

### 3.4.6 Sistema de transferência semiautomática SOLAR x REDE

A Figura 3.18 mostra o sistema de transferência semiautomática solar x rede caso ocorra uma falha no inversor OFF GRID e a rede da concessionária esteja presente no sistema.

Figura 3.18 - Sistema de transferência semiautomática solar x rede



Fonte: Fotografia do autor.

Na Figura 3.18 estão presentes o DPS para proteger a rede de algum surto de tensão. O disjuntor de retorno do inversor (0 a 220VAC); o disjuntor de saída com a tensão 220V, como fonte de entrada alternativa de energia para o inversor; o disjuntor de entrada da rede da concessionária e o último dedicado a alimentar e proteger as cargas prioritárias.

O disjuntor dedicado à alimentação das cargas prioritárias é alimentado pela saída da contatora CT1, quando energizada (contatos NA conectados à rede da concessionária), e, pela saída da contatora CT2 (contatos NA conectados à saída do inversor provenientes dos contatos NF da contatora CT1).

#### *3.4.6.1 – Descritivo da lógica de comutação e intertravamento do sistema de automação*

Estão presentes, na Figura 3.18, dispositivos, entradas e saída de energia:

- 1) Módulos fotovoltaicos instalados no telhado como fonte principal de energia;
- 2) Energia disponível pela rede da concessionária;
- 3) Bateria 48VDC;
- 4) Saída de energia para as cargas prioritárias.

A comutação e o intertravamento de operação do sistema OFF GRID interativo refere-se à Figura 3.18. A tensão de entrada da rede da concessionária é de 220VAC e o inversor fornece na saída 220VAC (0 a 220VAC) para alimentar as cargas prioritárias.

- 1 Bloco de entrada de energia do inversor e da rede da concessionaria: chave contatora (CT1) dois polos NA (Normalmente Aberto: entrada de energia da concessionária) dois polos NF (Normalmente Fechados: entrada de energia do inversor); contatos para energizar bobina (A1 e A2);
- 2 Bloco de entrada/saída de energia: contatora CT2 (contatos NA: saída de para energizar cargas prioritárias;
- 3 Relés temporização ON na subida: relé (Rel1) para acionar a contatora CT1 e relé (Rel2) para acionar a contatora CT2 (evitar causar transitórios nas cargas);
- 4 Interruptor (Int): acionamento manual por motivo de segurança para ativar a contatora (sem causar transitório).

### 3.4.6.2 – Cenários de intertravamento

Os dispositivos descritos nesses cenários estão presente na Figura 3.18:

- 1) Inversor ligado → interruptor (Int) desativado: contatora (CT1) → bobina desenergizada → NF fechado → carga alimentada pelo inversor;
- 2) Inversor desligado → interruptor (Int) ativado: bobina da contatora (CT1) energizada, NA (fechado) → rede alimenta a carga através dos contatos NA de CT1;

### 3.4.6.3 – Cenário no qual a carga está sendo alimentada pela rede e o inversor foi ativado e está pronto para entrar em operação

- 3) Interruptor aberto (disjuntor desligado):
  - i. K1 abre,
  - ii. CT1 cai rede (NA abre, cai a saída da rede que alimenta a carga)
  - iii. Entra NF: inversor ativo em CT1
  - iv. CT2: Fecha K1 (contatos NF 22-23)
  - v. K1 intertrava CT1 (mantém desligada)
  - vi. Relé Rel2 conta 5s
  - vii. Ativa A1 e A2 de CT2
  - viii. Fecha contatos NA (1:2 e 3:4)
  - ix. Carga alimentada pelo inversor.
  - x. Ativar Interruptor (ativar o interruptor (Int) para manter a segurança de comutação do sistema:
- 4) Inversor cai:
  - i. Interruptor ativado
  - ii. Rede ativa
  - iii. K1 fechado
  - iv. Relé Rel1 energizado
  - v. Conta 5s

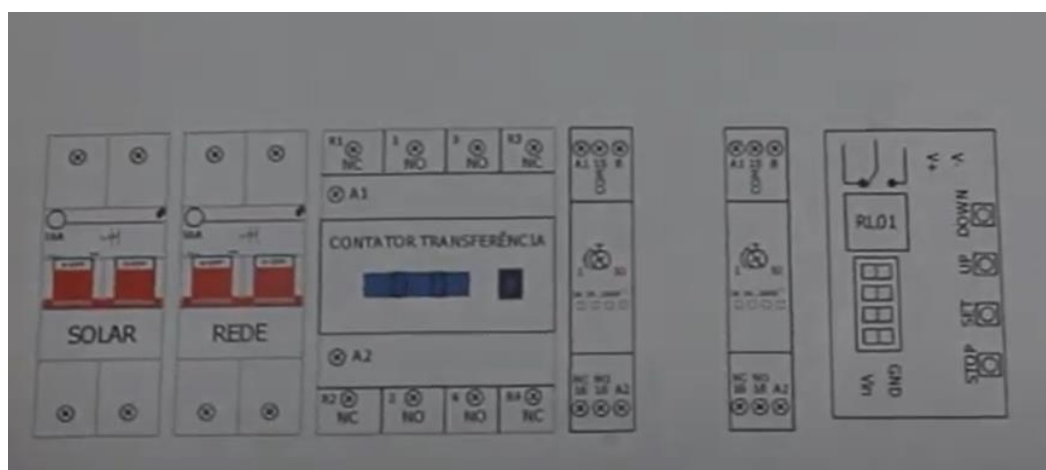
- vi. Entra contatora CT1
- vii. Contatos NA fecha
- viii. Carga é alimentada pela rede

5) Inversor retorna:

- i. Rede ativada (NA fechado) → alimentando a carga
- ii. Desativar interruptor manualmente se o inversor subir corretamente (segurança do inversor);
- iii. Derruba Rel1 → cai CT1 → desenergiza a carga
- iv. Relé Rel2 energizado
- v. Conta 5s
- vi. Ativa CT2
- vii. Saída NA fecha → carga alimentada pelo inversor
- viii. Fecha K1 → intertrava Rel1 e CT1
- ix. Ativar Interruptor (na espera de queda do inversor para subir a rede)

O sistema de transferência semiautomática é baseado no projeto do Engenheiro Sergio Cantreva<sup>8</sup> (Figura 3.19). Foram feitas modificações para melhorar o efeito de “transitório” na passagem da alimentação da carga do inversor para a rede.

Figura 3.19 - Sistema de transferência semiautomática.



Fonte: Sergio Cantreva (2021)

<sup>8</sup> <https://www.youtube.com/watch?v=96qBZbOgLG0>

### 3.4.7 – Caixa com disjuntor DC 50A para a bateria

O inversor fornece para a bateria 2,88 kWh um máximo de 50A para a carga da bateria. A utilização de potência da bateria é no máximo 2.400W. Se for necessária uma maior capacidade tem que dobrar a capacidade de bateria. As baterias Dyness aceita trabalhar com até 40 baterias em paralelo. A Figura 3.20 mostra a caixa de sobrepor com o disjuntor bipolar de 50A.

Figura 3.20 - Disjuntor DC para proteção da bateria.



Fonte: Fotografia do autor.

### 3.4.6 Estabilizador 220V/120V TSHARA

Para alimentar as cargas prioritárias em 120V foi necessário o emprego do estabilizador TSHARA 2000W que aceita entrada 220V e tem a saída em 120V. Ele alimenta tomadas e a geladeira.

A utilização desse estabilizador é bastante trabalhosa. O cabo fase e o cabo de neutro devem sair necessariamente do estabilizador. Não pode ser misturados o neutro da rede elétrica com o neutro do estabilizador e conseqüentemente do inversor. O inversor fornece tensão monofásica com o neutro em zero e a fase em 220V. O estabilizador internamente tem um transformador abaixador da tensão de 220V para 120V e o neutro em

zero é o mesmo. O retorno de corrente necessariamente deve retornar ao inversor. O cabo terra deve ser o mesmo que conecta o inversor, a carga e o estabilizador. A Figura 3.21 mostra o estabilizador TSHARA.

Figura 3.21 - Estabilizador TSHARA



Fonte: Fotografia do autor (2023).

O monitoramento do sistema é feito pelo software ShinePhone. A Figura 3.22 mostra a tela de monitoramento da planta. Há diversas informações sobre a geração e consumo. Também apresenta histórico mensal e anual.

Figura 3.22 - Monitoramento ShinePhone do inversor OFF-GRID Growatt



Fonte: Fotografia do autor (2023).

## 4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

O sistema desse estudo de caso foi planejado para ser um laboratório e, ao mesmo tempo, servir as cargas prioritárias da residência sem a necessidade de se fazer o projeto de homologação junto à concessionária de energia.

### 4.1 Energia gerada pelo sistema fotovoltaico OFF-GRID Interativo

A energia gerada no sistema foi calculada por uma planilha de projeto com algumas adaptações para refletir perdas e custos. São utilizados vários índices para se ter a melhor aproximação dos custos associados e retorno do investimento. São apresentadas duas partes da planilha. A primeira (Figura 68) mostra a visão geral do projeto.

Figura 4.1 - Planilha de cálculo da potência do projeto

Cálc. Potência - Sist. FV	
Tarifa (R\$/kWh)	R\$ 0,69
Consumo Mensal (kWh)	210
	229
	375
	185
	205
	180
	174
	151
	117
	110
Média Anual (kWh)	180
Produção desejada (kWh)	150
Radiação (kWh/m <sup>2</sup> .dia)	3,94
Rendimento (%)	20,77%
Potência do Módulo (W)	440
Potência sugerida (Wp)	1760
Número de Módulos	4
Área Ocupada	8,5 m <sup>2</sup>

Fonte: do autor (2023).

Na Figura 4.1 o valor da Tarifa em (R\$/kWh) de R\$ 0,69 na realidade é a soma dos valores das tarifas TE, TUSD e Adicional de Bandeira Amarela. À época do projeto estava se estava sob restrição hídrica.

O Consumo Mensal (kWh) é feito com base na fatura de energia onde tem o histórico de consumo de um ano, e, a Média Anual (kWh) é para se estimar quanto de energia deverá ser gerada para compensar, em média, o gasto com energia.

Nesse caso o se teria que compensar 180 kWh de energia em média, entretanto, o sistema foi projetado para suprir a carga de uma pequena parte do consumo da residência.

Vale lembrar que as concessionárias cobram no mínimo o custo de disponibilidade. Para ligações monofásica ou bifásica 30 kWh, para as trifásicas residencias 50 kWh e trifásicas comerciais 100 kWh, portanto, não se consegue zerar a conta de energia.

O valor da Radiação (kWh/m<sup>2</sup>.dia) no valor de 3,94 kWh/m<sup>2</sup>.dia é fruto do valor médio obtido no gráfico do CRESESB para a residência.

O rendimento de 20,77% é referente ao módulo utilizado no projeto. Na planilha o rendimento é calculado como: 100% - 20,77% = 79,23% de rendimento.

Potência do módulo é de 440 Wp na condição STC, e, potência sugerida (Wp) 4x440 = 1760 Wp. Os quatro módulos ocupam área (4 x 1,868x1,134) = 8,5 m<sup>2</sup>.

Nesse estudo de caso o objetivo era suprir cargas prioritárias que consomem num mês 36 kWh de energia. Comparado ao consumo médio de 180 kWh, as cargas representam 36/180 = 20,0% do total em média. Se considerar o valor de 150 kWh como meta o percentual das cargas fica em 36/150 = 24% do total.

Esse valor proporcional é utilizado para cálculo financeiro do retorno do investimento feito na instalação. Foi introduzido o valor de geração mensal de 36 kWh para os cálculos financeiros. Na figura 4.2 estão o números desse cálculo.

Figura 4.2 - Explicação dos resultados financeiros do projeto

Simulação de cálculo financeiro do projeto		
Resultado		Explicação
Valor do Investimento	R\$ 17.494,50	Valor do Investimento
Payback Ano	#N/D	Payback do projeto para estimativa de 25 anos.
Valor Presente Líquido (NPV)	R\$ 1.688,18	VPL: Quanto deveria ser o investimento descontados as taxas
Taxa Interna de Retorno	-9,59%	TIR: taxa intena de retorno do investimento
Geração estimada diária (kWh)	1,21	Geração estimada diária
Geração estimada mensal (kWh)	36,74	Geração estimada mensal
Geração estimada anual (Média) (kWh)	440,90	Geração estimada anual
Valor estimado do kWh com solar	R\$ 2,13	Valor a ser comparado com a tarifa de energia

Fonte: do autor (2023).

Conforme observado na planilha, foi considerado como geração mensal 36,74 kWh, no ano ficou em 440,9 kWh. O valor do kWh estimado ficou em R\$ 2,13 contra R\$ 0,69 cobrado na tarifa. O valor de R\$ 2,13 representa três vezes o valor da tarifa.

Como análise financeira, o projeto não tem retorno no prazo de 25 anos. O Valor Presente Líquido (NPV) ficou em R\$ 1.688,18 contra um investimento de R\$ 17.494,50 e a TIR (Taxa interna de Retorno) ficou negativa em -9,59%.

A planilha de cálculo pode ser vista no Apêndice 1.

Como resultado pode-se concluir que esse tipo de projeto não visa retorno financeiro nem econômico. O projeto é para suprir deficiência na qualidade de fornecimento de energia da concessionária.

Na Figura 4.3 estão os índices utilizados para os cálculos: a

- A potência de 387Wp é o valor de 1.760 Wp aplicado um rendimento médio de 22% de geração aproveitada pelo inversor;
- Perdas das de 20,77% é utilizada como  $1 - 20,77 = 79,23\%$  de rendimento;
- Radiação solar: 3,94 (HSP) kWh/m<sup>2</sup>.dia;
- O consumo mensal mínimo não foi considerado como base de dimensionamento;
- O preço de Tarifa R\$ 0,69;
- Degradação dos painéis ao ano 0,005%
- Custo de manutenção ao ano 0,50%
- Inflação projetada ao ano 4,48%
- Inflação energética projetada ao ano 5,60%
- Ano de troca de inversor 13
- Custo do inversor no ano 13 R\$ 4.699,00
- Investimento concorrente ao ano 6,7%

Como resultado, Figura 4.3, foram calculados os Fluxos de Caixa Descontado (FCD) e Fluxo de Caixa Simples (FCS). Na Figura 4.2 foi transportado o valor do Fluxo de Caixa Descontado que reflete melhor a realidade de um investimento.

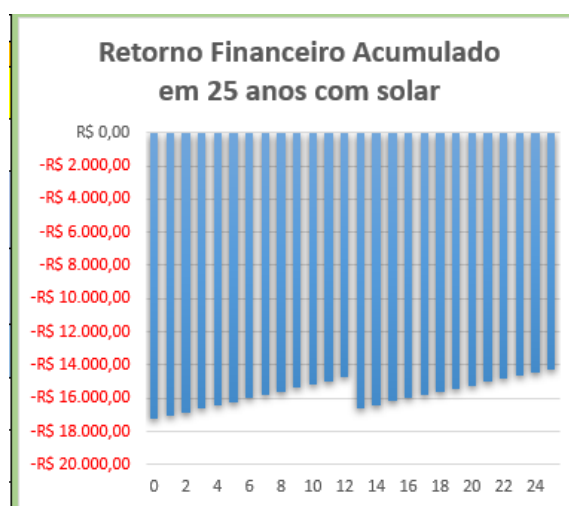
Figura 4.3 - Detalhe da análise financeira do projeto

Dados do Projeto				Fluxo de Caixa Descontado (FCD)	Fluxo de Caixa Simples (FCS)
Características Técnicas		Características Financeiras		Resultados	
Potência (Wp)	387	Preço do kWh ano 0	R\$ 0,69	Valor do Investimento	R\$ 17.494,50
Perdas (%)	20,77%	Degradação dos painéis (%a.a.)	0,005%	Economia já no Primeiro Mês	R\$ 18,19
Radiação Solar (hsp)	3,94	Custo de Manutenção (%a.a.)	0,50%	Payback Ano	#N/D
Consumo Mínimo mensal (kWh)	0	Inflação Projetada (%a.a.)	4,48%	Economia Total Gerada	R\$ 3.206,58
		Inflação Energética Projetada (%a.a.)	5,60%	Valor Presente Líquido (NPV)	-R\$ 13.390,75
		Ano de troca do Inversor	13	Taxa Interna de Retorno	-9,59%
		Custo de Inversor no ano 13	R\$ 4.699,00	Geração estimada diária (kWh)	1,21
		Investimento Concorrente (%a.a.)	6,70%	Geração estimada mensal (kWh)	36,74
				Geração estimada anual (Média) (kWh)	440,90
				Valor estimado do kWh com solar	R\$ 2,13
				Índice de lucratividade	-81,67%
					-153,19%

Fonte: do autor (2023).

A Figura 4.4 mostra o gráfico da evolução do projeto. Por não caracterizar retorno financeiro, os valores ficam todos em negativos (vermelho) e as colunas partem de zero e chegam ao limite do valor negativo não recuperado.

Figura 4.4 - Detalhe da análise financeira do projeto



Fonte: do autor (2023).

## 4.2 Resultado e Contribuições para o Mercado

O estudo de caso mostrou o quão pode ser complexo a determinação correta de projeto fotovoltaico com características particulares.

O Mercado prioriza os inversores ON-GRID conectados à rede do tipo *string*. Onde se calcula a demanda de energia, calcula-se a quantidade e orientações dos módulos o inversor apropriado, e, se tem um payback vantajoso.

No caso de uma instalação onde se prioriza a qualidade de fornecimento de energia para cargas prioritárias, o payback é longo e o investimento não se paga. Porque, o interesse é diferente de se ter uma usina geradora de energia quer seja para cobrir os gastos com energia, ou, seja para gerar créditos para uso local ou em outra instalação dentro da mesma localidade de cobertura da concessionária.

Os inversores dos sistemas OFF-GRID Interativo são mais elaborados com funcionalidades próprias similares a um sistema de controle e automação. A lógica que existe nele e, atrelada à programação, permite uma variação de carga de bateria, uso da energia em horários alternados, mostram a versatilidade desses inversores quando comparados aos inversores ON-GRID. As grandezas que podem ser alteradas num inversor ON-GRID praticamente são os limites de tensão, de frequência tempo e retorno quando desliga da rede de energia e retorno em função dos cuidados do anti-ilhamento.

Na evolução dos inversores OFF-GRID Interativo estão os inversores híbridos que fazem as duas funções. Podem ficar desconectados da rede mantendo as cargas prioritárias e, quando a rede de energia estiver ativa, podem gerar excedente para a rede.

O conceito de microrrede foi explorado e consolidado com essa aplicação. Lembrando que, o objetivo era para ser de pesquisa e estudo para entender o funcionamento do inversor OFF-GRID interativo.

Quanto ao desempenho do sistema nos últimos 12 meses não ocorreu nenhuma interrupção.

## 5 CONCLUSÃO

O sistema desse estudo de caso continua funcionando e cumprindo os planos do projeto inicial. Entretanto já é obsoleto em termos de tecnologia.

As baterias de lítio evoluíram em capacidade de armazenar e fornecer energia, no volume e custo. Os inversores híbridos executam as funções ON-GRID e OFF-GRID como de backup a um custo razoável.

Como resultado do estudo, ficou evidente as funcionalidades presentes nos inversores OFF-GRID Interativo que permitem grande variedade de uso.

A evolução desse sistema OFF-GRID interativo é o sistema híbrido. Este faz todo o processo que o inversor OFF-GRID interativo.

Os inversores híbridos permitem calcular o retorno financeiro do projeto e a utilização, apesar serem mais simples, permite atender grande parte das necessidades de quem precisa de qualidade de fornecimento de energia e economia na fatura da concessionária.

Os sistemas OFF-GRID Interativo quanto os HÍBRIDO visam a qualidade de fornecimento de energia às cargas a eles conectadas.

Quanto aos cálculos dos parâmetros de operação dos inversores híbridos, precisarão de estudos para encontrar uma forma de justificar o cálculos de projetos de forma bem eficiente.

Nesse estudo de caso, além do objetivo de geração de energia para a residência de Itanhaém/SP, também serve de laboratório de experimentação e aprendizado. Como resultado dos cálculos, o sistema supre energia de 22% da necessidade da residência e não gera retorno financeiro. O objetivo é a qualidade no fornecimento de energia que é plenamente atendida.

Ficou evidenciado que o inversor OFF-GRID Interativo não gera excedente de energia. Funciona sob demanda da carga prioritária e não desliga mesmo na ausência do sol.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6023**: informação e documentação: referências: elaboração. Rio de Janeiro, 2002a. 24 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 6024**: informação e documentação: numeração progressiva das seções de um documento. Rio de Janeiro, 2012a. 4 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 6027**: informação e documentação: sumário: apresentação. Rio de Janeiro, 2012b. 3 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 6028**: informação e documentação: resumo: apresentação. Rio de Janeiro, 2003. 2 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 10520**: informação e documentação: citações em documentos: apresentação. Rio de Janeiro, 2002b. 7 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 12225**: informação e documentação: lombada: apresentação. Rio de Janeiro, 2004. 3 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 14724**: informação e documentação: trabalhos acadêmicos: apresentação. Rio de Janeiro, 2011. 11 p

ANEEL AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Geração- relatórios e indicadores relacionados ao segmento de geração de energia elétrica. Disponível em: <[Geração — Agência Nacional de Energia Elétrica \(www.gov.br\)](http://www.gov.br)><**Unidades com Geração Distribuída**>. Acesso em 19 fev. 2023.

\_\_\_\_\_. PRODIST MÓDULO 1 – GLOSSÁRIO DE TERMOS TÉCNICOS DO PRODIST. PROCEDIMENTOS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA NO SISTEMA ELÉTRICO NACIONAL Ren. 956 de 7 de dezembro de 2021.

[https://pt.wikipedia.org/wiki/Hans\\_Bethe](https://pt.wikipedia.org/wiki/Hans_Bethe)

BRASIL. Lei nº 14.300, de 6 de janeiro de 2022. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**. Poder Legislativo, Brasília, DF, 07 jan. 2022. Ed.5, Seção 1, p. 4. 2022.

BRASIL, Ministério de Minas e Energia, **Empresa de Pesquisa Energética Plano Nacional de Energia 2050** / Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. Brasília: MME/EPE, 243p. 2020.

CRESESB - **Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio Brito / CEPEL** - Centro de Pesquisas de Energia Elétrica. Cidade Universitária - Rio de Janeiro – RJ. Disponível em: <<http://www.cresesb.cepel.br/>>. Acesso em 09 mar. 2023.

\_\_\_\_\_. **Potencial Solar - SunData v 3.0**. Atualização: 2018. Disponível em:<<http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=sundata&>> . Acesso em 12 abr. 2023.

DUFFIE, John A. (Deceased); BECKMAN, William; BLAIR, Nathan. **Solar Engineering of Thermal Processes, Photovoltaics and Wind**. 5. ed. New Jersey-USA: John Wiley & Sons, 2020. 905p.

FARIA JUNIOR, Rubens Nunes de; ZARPELON, Lia Maria Carlotti; SERNA, Marilene Morelli. **Baterias recarregáveis: introdução aos materiais e cálculos**. São Paulo: Artliber Editora, 2014.

JESUS, Fernando. Quais os painéis solares fotovoltaicos mais eficientes do mercado? 2020. Disponível em < <https://www.portal-energia.com/paineis-solares-mais-eficientes/> >. Acesso em 01 mai. 2023.

KAHN, Dr. Fritz. **O Átomo**. Princípios fundamentais da ciência atômica explicados para o cidadão da era atômica. Tradução: Francisco José Buechen. Ed.5. São Paulo: Edições Melhoramentos. 195?.

LIVERMORE, P.W., FINLAY, C.C. & BAYLIFF, M. **Recent north magnetic pole acceleration towards Siberia caused by flux lobe elongation**. Nat. Geosci. 13, 387–391 (2020). Disponível em: <<https://doi.org/10.1038/s41561-020-0570-9>>. Acesso em: 23 mar. 2023.

OLIVEIRA FILHO, Kepler de Souza; SARAIVA, Maria de Fátima Oliveira. *Astronomia e Astrofísica*. 2010. Disponível em: <<http://astro.if.ufrgs.br/index.htm#gsc.tab=0>>. Acesso em: 21 mar.2023.

MOREIRA Júnior, Orlando; SOUZA, Celso Correia de. **Aproveitamento fotovoltaico, análise comparativa entre Brasil e Alemanha**. *IN: INTERAÇÕES*, Campo Grande, MS, v. 21, n. 2, p. 379-387, abr./jun. 2020. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/inter/a/t7NryC6KdCmwL4RXL4pjVfN/?format=pdf&lang=pt>>. Acesso em: 09 mar. 2023.

PACHECO, Claudio Roberto de Freitas. **Fundamentos da Utilização de Energia Solar**. In: SIMÕES MOREIRA, José Roberto (Org.); HERNANDEZ neto, Alberto... (Colab. et al.). **Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2021. cap.9, p.222-59.

PINHO, João Tavares (Org.); GALDINO, Marco Antonio (Org.). **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. ed. rev. e atu. Rio de Janeiro: CEPEL - CRESESB, mar. 2014.

SIMÕES MOREIRA, José Roberto (Org.); HERNANDEZ neto, Alberto... (Colab. et al.). **Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2021.

SOUZA JUNIOR, Marcus Evandro Teixeira; FREITAS, Luiz Carlos Gomes de. **Microrredes: Estado da arte, desafios e tendências para geração, distribuição e uso sustentável de energia elétrica**. *IN: Braz. Ap. Sci. Rev*, Curitiba, v. 4, n. 6, p. 3888-3906 nov./dez. 2020. ISSN 2595-3621. Disponível em: <<https://www.researchgate.net/publication/348222533>>. Acesso em: 19 mar. 2023.

SOUZA, Rafaela. **Movimentos da Terra**. 2023. Disponível em: <<https://brasilecola.uol.com.br/geografia/>>. Acesso em: 21 mar. 2023.

VILLALVA, Marcelo Gradella. Energia solar fotovoltaica: conceitos e aplicações. 2. ed. Ver. E atual. São Paulo: Érica 2015.

WATZECK, José Ruiz. **Norte magnético da Terra está se movendo rapidamente em direção da Sibéria na Rússia**. Jornal A Tribuna. Caderno Artigos Científicos Ciências Cultura Educação. De 13/07/2022. Disponível em: <<https://jornaltribuna.com.br/2022/09/norte-magnetico-da-terra-esta-se-movendo-rapidamente-em-direcao-da-siberia-na-russia/>>. Acesso em: 22 mar. 2023.



## ANEXO 1 – FORMULÁRIO DE EXPRESSÕES PARA AVALIAÇÃO DO POTENCIAL SOLAR

Grandeza	Símbolo	Unidade	Expressão
1. Longitude local	L	°	$0^\circ \leq L \leq 360^\circ$
2. Longitude hora lega	$L_0$	°	
3. Latitude	$\Phi$	°	$-90^\circ < \Phi < 90^\circ \quad N > 0$
4. Inclinação da superfície	$\beta$	°	$0^\circ \leq \beta = 180^\circ$ inclinação maior do que $90^\circ$ são superfícies com plano posterior ativo
5. Azimute da superfície	$\gamma$	°	$-180^\circ \leq \gamma \leq 180^\circ$ medido a partir do $S = 0^\circ$ . Sentido anti-horário $E < 0$ , sentido horário $W > 0$ Nota: $N = 180^\circ$
6. Mês	Mês	Mês	1 a 12
7. Dia	Dia	Dia	1 a 28, 29, 30 ou 31
8. Dia do ano: Int = menor inteiro contido	$n$		Se $Mês = 2 \rightarrow Cor = \text{int}(Mês/2)$ Se $2 < Mês = 8 \rightarrow Cor = (\text{int}(Mês/2) - 2)$ Se $Mês > 8 \rightarrow Cor = (\text{Int}(Mês/2 + 1/2) - 2)$ $n = Dia + (Mês - 1) \times 30 + Cor$
9. Hora legal	HL	h	Hora, fração de hora
10. Hora solar	HS	h	hora, fração de hora $HS = HL + Corhora$ $Corhora = (4 \times (L_0 - L) + E) / 60$ $E = 9,87 \times \text{sen}(2B) - 7,53 \times \text{cos}B - 1,5 \times \text{sen}(B)$ $B = \left[ \frac{360}{364} (n - 81) \right]$
11. Ângulo horário	$\omega$	°	$\omega (HS - 12) \times 15$ manhãs $< 0$ tardes $> 0$ (horário)
12. Declinação solar	$\delta$	°	$\delta = 23,45 \times \text{sen} \left[ \frac{360}{364} (284 + n) \right]$ (diário) $-23,45 \leq \delta \leq 23,45$
13. Ângulo Zenital	$\theta_z$	°	$\cos \theta_z = \text{sen} \delta \text{ sen} \Phi + \text{cos} \delta \text{ cos} \Phi \text{ cos} \omega$ (horário) $0^\circ \leq \theta_z \leq 90^\circ$
13* Ângulo do azimute solar	$Y_s$	°	$-180^\circ \leq Y_s \leq +180^\circ$ . A direção S possui $Y_s = 0^\circ$ . Se +, medir no sentido horário a partir de S. Se -, medir no sentido anti-horário a partir de S. Sinal: usar o sinal de $\omega$ Módulo: (horário) $Y_s = \arccos \left[ \frac{\text{cos} \theta_z \text{ sen} \Phi - \text{sen} \delta}{\text{sen} \theta_z \text{ cos} \Phi} \right]$
14. Ângulo de incidência	$\theta$	°	$\text{cos} \theta = \text{sen} \delta \text{ sen} \Phi \text{ cos} \beta - \text{sen} \delta \text{ cos} \Phi \text{ sen} \beta \text{ cos} \gamma + \text{cos} \delta \text{ cos} \Phi \text{ cos} \beta \text{ cos} \omega + \text{cos} \delta \text{ sen} \Phi \text{ sen} \beta \text{ cos} \gamma \text{ cos} \omega + \text{cos} \delta \text{ sen} \beta \text{ sen} \gamma \text{ sen} \omega$
15. Ângulo de incidência para face		°	$\text{cos} \theta = \text{cos}(\Phi - \beta) \text{ cos} \delta \text{ cos} \omega + \text{sen}(\Phi - \beta) \text{ sen} \delta$ (horário)

SUL $\gamma = 0^\circ$			
16. Ângulo de incidência para face NORTE $\gamma = 180^\circ$		o	$\cos\theta = \cos(\Phi+\beta) \cos\delta \cos\omega + \sin(\Phi+\beta) \sin\delta$ (horário)
17. Ângulo horário do pôr do Sol	$\omega_s$	o	$\cos\omega_s = -\tan\Phi \tan\delta$ Nota: o ângulo horário do nascer do Sol é igual em módulo, porém com sinal negativo.
18. Duração da insolação	N	h	$N = \frac{2}{15} \omega_s$
19. Irradiação solar (ver índices)	G	W/ m <sup>2</sup>	$G, G_B, G_D$ plano horizontal total, direta e difusa; $G_{BN}$ direta na direção da incidência solar; $G_T, G_{BT}, G_{DT}$ superfície inclinada com a horizontal, total, direta e difusa.
20. Constante solar	$G_{SC}$	W/ m <sup>2</sup>	1.367
21. Razão entre irradiâncias	$G_B$	$G_{BT}/$ $Rb$	$\frac{\cos\theta}{\cos\theta_z}$
22. Irradiância extraterrestre sobre superfície horizontal	$G_0$	W/ m <sup>2</sup>	$G_{SC} \left(1 + 0,033 \cos \left[ \frac{360n}{365} \right] \right) \cos\theta_z$
23. Irradiação extraterrestre integrada diária sobre superfície horizontal	$H_0$	J/m <sup>2</sup>	$2,75 \cdot 10^4 G_{SC} \left(1 + 0,033 \cos \left[ \frac{360n}{365} \right] \right)$ $[1,75 \cdot 10^{-2} \omega_s \sin\delta \sin\Phi + \cos\delta \cos\Phi \sin\omega_s]$ Nota: media mensal $\bar{H}_0$
24. Irradiação extraterrestre integrada horária sobre superfície horizontal	$I_0$	J/m <sup>2</sup>	$I_0 = 1,38 \cdot 10^4 G_{SC} \left(1 + 0,033 \cos \left[ \frac{360n}{365} \right] \right)$ $[1,75 \cdot 10^{-2} (\omega_2 - \omega_1) \sin\delta \sin\Phi$ $+ \cos\delta \cos\Phi \cos\beta \sin(\omega_2 - \omega_1)]$
25. Irradiação extraterrestre diária sobre superfície horizontal	H	J/m <sup>2</sup>	Medida por piranômetro
26. Índice de claridade diário	$K_T$		$K_T = \frac{H}{H_0}$
27. Irradiação integrada média mensal sobre superfície horizontal	$\bar{H}$	J/m <sup>2</sup>	Calculada a partir de medições por piranômetros
28. Índice de	$\bar{K}_T$		$\bar{K}_T = \bar{H}/\bar{H}_0$

claridade diário média mensal			
29. Irradiação integrada horária sobre superfície horizontal	$I$	$J/m^2$	Medida por piranômetro Direta $I_b$ ; Difusa $I_d$
30. Índice de claridade horário	$k_T$		$k_T = \frac{I}{I_0}$
31. Irradiação sobre superfície inclinada	$I_T$	$J/m^2$	$R = \frac{I_T}{I}$ ; $R_b = \frac{I_{bT}}{I_b}$ ; $R_d = \frac{I_{dT}}{I_d}$
32. Razão $\frac{I_d}{I}$	$I_T$	$J/m^2$	Para $k_T < 0,35$ $\frac{I_d}{I} = 1,0 - 0,249 k_T$ Para $0,35 < k_T < 0,75$ $\frac{I_d}{I} = 0,1557 - 1,84 k_T$ Para $k_T > 0,75$ $\frac{I_d}{I} = 0,177$
33. Razão $\bar{H}_T/\bar{H}$			$\bar{R} = \bar{H}_T/\bar{H} = (1 - \bar{H}_d/\bar{H}) \bar{R}_b + \bar{H}_d/\bar{H} \left[ \frac{1+\cos\beta}{2} \right] + \rho \left[ \frac{1-\cos\beta}{2} \right]$
34. Irradiação sobre superfície inclinada média mensal		$J/m^2$	$\bar{H}_T = \bar{H} (1 - \bar{H}_d/\bar{H}) \bar{R}_b + \bar{H}_d \left[ \frac{1+\cos\beta}{2} \right] + \bar{H} \rho \left[ \frac{1-\cos\beta}{2} \right]$
35. Sup. Hemisfério Norte com ( $\gamma = 0^\circ$ )			$\bar{R}_b = \frac{(\cos(\varphi-\beta)\cos\delta \operatorname{sen}\omega^*_S + (\pi/180)\omega^*_S \operatorname{sen}(\varphi-\beta)\operatorname{sen}\delta)}{(\cos\varphi\cos\delta \operatorname{sen}\omega_S + (\pi/180)\omega_S \operatorname{sen}\varphi \operatorname{sen}\delta)}$
36. Escolha do valor de $\omega^*_S$	$\omega^*_S$		$\omega^*_S = \text{mínimo entre: } \arccos[-\tan\theta \tan\delta] \text{ e } \arccos[-\tan(\theta - \beta) \tan\delta]$
37. Sup. Hemisfério Sul com ( $\gamma = 180^\circ$ )			$\bar{R}_b = \frac{(\cos(\varphi+\beta)\cos\delta \operatorname{sen}\omega^*_S + (\pi/180)\omega^*_S \operatorname{sen}(\varphi+\beta)\operatorname{sen}\delta)}{(\cos\varphi\cos\delta \operatorname{sen}\omega_S + (\pi/180)\omega_S \operatorname{sen}\varphi \operatorname{sen}\delta)}$
38. Escolha do valor de $\omega^*_S$	$\omega^*_S$		$\omega^*_S = \text{mínimo entre: } \arccos[-\tan\theta \tan\delta] \text{ e } \arccos[-\tan(\theta + \beta) \tan\delta]$

## ANEXO 2 - ANEEL – INFOGRÁFICO GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

