

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**

**FERRAZ SOUZA DA SILVA  
VITOR ALEXANDRE DE ANDRADE**

**ANÁLISE DE VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA DE UM SISTEMA  
FOTOVOLTAICO EM UMA FÁBRICA DE PRIMER**

**PONTA GROSSA**

**2023**

**FERRAZ SOUZA DA SILVA  
VITOR ALEXANDRE DE ANDRADE**

**ANÁLISE DE VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA DE UM SISTEMA  
FOTOVOLTAICO EM UMA FÁBRICA DE PRIMER**

**Technical and economic feasibility analysis of a photovoltaic system in a  
primer factory**

Trabalho de conclusão de curso de graduação  
apresentado como requisito para obtenção do título de  
Bacharel em Engenharia Elétrica da Universidade  
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador: Prof. Dr. Marcio Mendes Casaro

**PONTA GROSSA  
2023**



Esta licença permite download e compartilhamento do trabalho desde que sejam atribuídos créditos aos autores, sem a possibilidade de alterá-lo ou utilizá-lo para fins comerciais. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

**FERRAZ SOUZA DA SILVA  
VITOR ALEXANDRE DE ANDRADE**

**ANÁLISE DE VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA DE UM SISTEMA  
FOTOVOLTAICO EM UMA FÁBRICA DE PRIMER**

Trabalho de conclusão de curso de graduação  
apresentado como requisito para obtenção do título de  
Bacharel em Engenharia Elétrica da Universidade  
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 12/dezembro/2023

---

Marcio Mendes Casaro  
Doutorado  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Helio Voltolini  
Doutorado  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Edison Luiz Salgado Silva  
Mestrado  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

**PONTA GROSSA  
2023**

## **AGRADECIMENTOS**

Agradecemos primeiramente a Deus, por nos ter dado força e foco nos nossos objetivos. Também a nossos pais, familiares e amigos que sempre nos apoiaram nessa jornada. Estendemos esse agradecimento ao nosso orientador Prof. Dr. Márcio Mendes Casaro, pela disponibilidade e auxílio neste trabalho.

“Há uma força motriz mais poderosa que o vapor, a  
eletricidade e a energia atômica: a vontade”.  
(Albert Einstein)

## RESUMO

O presente trabalho visa a resolução de um problema enfrentado em várias indústrias, porém é voltado especificamente para uma fábrica de Primer, localizada no interior de Santa Catarina. O problema em questão, é o alto custo de energia elétrica. Levando em consideração a crescente demanda por novas fontes de geração de energia elétrica, umas das alternativas com maior potencial é a energia solar fotovoltaica. Observando essa realidade, este trabalho ocupa-se em analisar a viabilidade técnica e econômica da implantação de um sistema fotovoltaico em uma determinada unidade consumidora em baixa tensão. O trabalho apresentará, inicialmente, o referencial teórico da tecnologia fotovoltaica e perspectivas de desenvolvimento. Em seguida, o local escolhido para a instalação das placas, onde considerou-se aspectos técnicos e estruturais da planta. Ao final, será realizada a análise econômica para a implantação do sistema. O principal objetivo do presente estudo, é a diminuição da fatura de energia e uma melhora na eficiência energética da planta, além de conseguir aproveitar uma maneira sustentável de geração de energia.

Palavras-chave: Energias renováveis; energia solar fotovoltaica; viabilidade técnica e econômica; eficiência energética.

## **ABSTRACT**

The present work aims at solving a problem faced in several industries, but it is specifically aimed at a Primer factory, located in the interior of Santa Catarina. The problem in question is the high cost of electricity. Taking into account the growing demand for new sources of electricity generation, one of the alternatives with the greatest potential is photovoltaic solar energy. Observing this reality, this work is concerned with analyzing the technical and economic feasibility of implementing a photovoltaic system in a given low voltage consumer unit. The work will initially present the theoretical framework of photovoltaic technology and development perspectives. Then, the place chosen for the installation of the plates, determined considering technical and structural aspects of the plant. At the end, an economic analysis will be carried out for the implementation of the system. The main objective of the present study is the reduction of the energy bill and an improvement in the energy efficiency of the plant, in addition to being able to take advantage of a sustainable way of generating energy.

**Keywords:** Renewable Energies; Photovoltaic Solar Energy; Technical and economic feasibility; Energy Efficiency.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Matriz elétrica mundial.....	13
Figura 2 - Matriz elétrica brasileira .....	14
Figura 3 - Variação do ângulo de declinação solar ao longo do ano de acordo com o movimento de translação e de rotação do planeta Terra .....	19
Figura 4 - Mapa de irradiação solar média anual no mundo .....	20
Figura 5 - Corte transversal de uma célula fotovoltaica .....	22
Figura 6 - Efeito fotovoltaico na junção pn .....	23
Figura 7 - Sistema ON-GRID .....	25
Figura 8 - Sistema OFF-GRID .....	26
Figura 9 - Controlador de cargas .....	27
Figura 10 - Inversor solar.....	27
Figura 11 - Irradiação solar diária média mensal .....	31
Figura 12 - Painéis fotovoltaicos .....	32
Figura 13 - Método de instalação de cabos .....	34
Figura 14 - Fatores de correção para temperaturas ambientes diferentes .....	34
Figura 15 - Fatores de agrupamento .....	35
Figura 16 - Capacidade de condução de corrente.....	35
Figura 17 - String box .....	36
Gráfico 1 - Irradiação solar no plano inclinado .....	31
Gráfico 2 - Temperatura máximas e mínimas em São Bento do Sul .....	37
Gráfico 3 - Preços dos sistemas fotovoltaicos .....	40
Gráfico 4 - Energia Mensal Produzida .....	43
Gráfico 5 - Comparativo de Economia de Energia .....	45

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Consumo mensal .....	30
Tabela 2 - Energia Produzida .....	43
Tabela 3 - Análise econômica .....	44

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
ANEEL	Agência Nacional de Engenharia Elétrica
ABSOLAR	Associação brasileira de energia solar fotovoltaica
PCHs	Pequenas Centrais Hidrelétricas
SIN	Sistema Interligado Nacional
CRESESB	Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sergio Brito
NBR	Normas Brasileiras
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CV	Cavalo Vapor
A	Ampere

## LISTA DE SÍMBOLOS

GW	Gigawatts
KW	Quilowatts
MW	Megawatts
GD	Geração distribuída
kWh	Quilowatt-hora
W/m <sup>2</sup>	Watt por metro quadrado
kW/ m <sup>2</sup>	Quilowatt por metro quadrado
kWh/m <sup>2</sup>	Quilowatt hora por metro quadrado
m	Metros
Si	Silício
m <sup>2</sup>	Metros quadrados
mm <sup>2</sup>	Milímetros quadrados
Wp	Watt-pico
KWp	Quilo Watt-pico
W	Watt
R\$	Reais
m <sup>2</sup> .dia	Metros quadrados dia

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>13</b>
1.1	Contextualização	15
1.2	Problema	16
<b>2</b>	<b>JUSTIFICATIVA</b>	<b>17</b>
<b>3</b>	<b>OBJETIVOS</b>	<b>18</b>
3.1	Objetivo geral	18
3.2	Objetivos específicos	18
<b>4</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA</b>	<b>19</b>
4.1	Radiação Solar	19
4.2	Efeito Fotovoltaico	21
4.3	Placas fotovoltaicas	23
4.3.1	Placa de silício monocristalino	23
4.3.2	Placa de silício policristalino	24
4.4	Sistemas On e Off Grid	25
4.4.1	Sistema On Grid	25
4.4.2	Sistema Off Grid	26
4.5	Controlador de carga e bateria (sistema off-grid)	26
4.6	Inversor solar	27
4.7	Localização	28
4.8	Região no Brasil com melhor incidência de radiação solar	28
<b>5</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>29</b>
5.1	Potencial Solar	30
5.2	Painel fotovoltaico	31
5.3	Cabeamento	33
5.4	String Box	36
5.5	Número de módulos por String	37
5.6	Energia produzida	38
5.7	Prestação de serviço	39
<b>6</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	<b>41</b>
<b>7</b>	<b>CONCLUSÃO</b>	<b>47</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>48</b>
	<b>ANEXO A</b>	<b>51</b>
	<b>ANEXO B</b>	<b>52</b>

<b>ANEXO C .....</b>	<b>53</b>
<b>ANEXO D – .....</b>	<b>54</b>
<b>ANEXO E – .....</b>	<b>55</b>
<b>ANEXO F – .....</b>	<b>55</b>

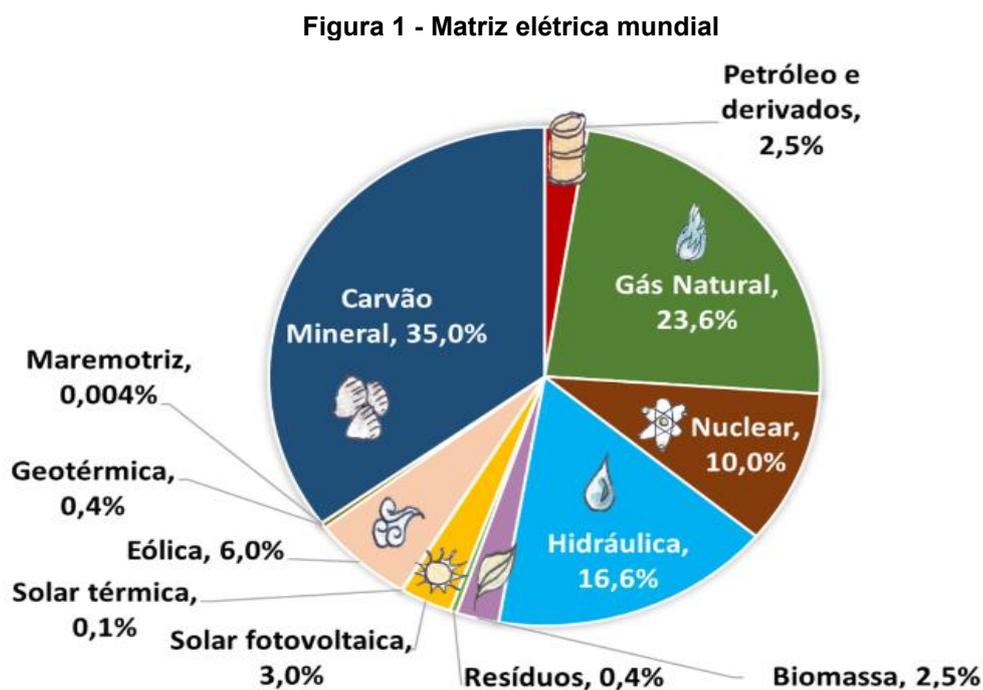
## 1 INTRODUÇÃO

Ao longo do tempo, o ser humano vem buscando alternativas renováveis para conseguir gerar energia, e por consequência, diminuir os custos em contas de energia elétrica. O alto valor na fatura de energia é algo recorrente em diversas indústrias brasileiras, e a instalação de painéis fotovoltaicos vem sendo uma opção muito rentável para quem busca uma energia limpa e renovável.

A expansão das energias renováveis é de grande importância, tendo em vista que é abundante em todo o planeta, sendo proveniente de fontes inesgotáveis e que não produzem gases poluentes. A energia proveniente de painéis fotovoltaicos está em ascensão em nosso país. Segundo dados levantados pela Associação brasileira de energia solar fotovoltaica (ABSOLAR), a energia solar se tornou a segunda maior fonte de energia na matriz elétrica brasileira, ultrapassando a energia eólica.

A maior parte da energia elétrica gerada no mundo ainda é proveniente de fontes não renováveis e poluentes, como o gás natural e o carvão mineral. (Portal Solar, 2022).

Segundo dados mais recentes, a matriz elétrica mundial está composta de acordo com a figura 1:

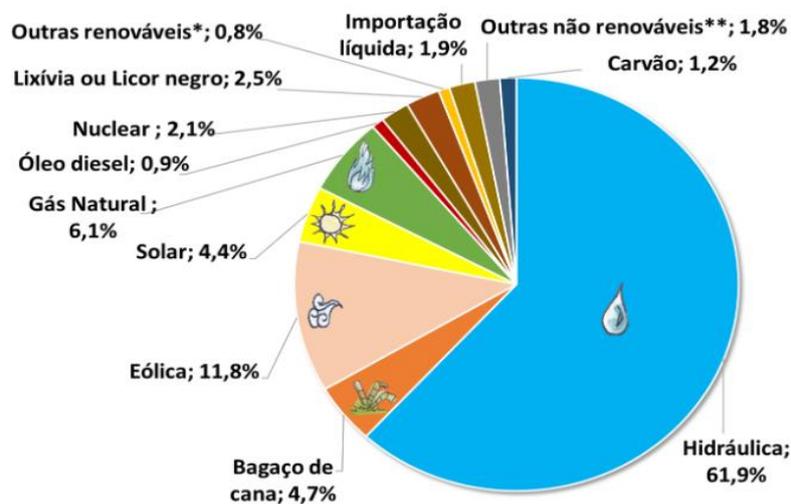


Fonte: IEA (2022)

Já a Figura 2, nos mostra como estão distribuídas e a importância das diversas fontes de energia elétrica no cenário brasileiro, dessa maneira é possível observar a predominância da fonte hidráulica na matriz elétrica. Porém, as grandes centrais elétricas atualmente situam-se afastadas dos grandes centros de consumo.

Segundo dados mais atuais da EPE (Empresa de Pesquisa Energética), a energia solar ocupa o terceiro lugar na matriz elétrica brasileira, ficando atrás apenas da hidráulica e eólica como mostra a figura 2.

Figura 2 - Matriz elétrica brasileira



Fonte: BEN (2023)

Há dois tipos de geração distribuída, sendo eles: Sistema de microgeração e sistema de minigeração. O que difere um do outro é a potência instalada. Segundo RESOLUÇÃO NORMATIVA ANEEL Nº 1.059, DE 7 DE FEVEREIRO DE 2023, caracteriza-se um sistema de microgeração: Central geradora de energia elétrica, com potência instalada, em corrente alternada, menor ou igual a 75 kW e que utilize cogeração qualificada, conforme a Resolução Normativa nº 1.031, de 26 de julho de 2022. E para a minigeração: Central geradora de energia elétrica renovável ou de cogeração qualificada, conforme a Resolução Normativa nº 1.031, de 2025, conectada na rede de distribuição de energia elétrica por meio de instalações de unidade consumidora, que possua potência instalada em corrente alternada maior que 75 kW e menor ou igual a:

a) 5 MW para as centrais geradoras de fontes despacháveis, exceto fotovoltaicas;

b) 3 MW para as demais fontes não enquadradas como centrais geradoras de fontes despacháveis e para fotovoltaicas enquadradas como despacháveis; ou

c) 5 MW para unidades consumidoras já conectadas em 7 de janeiro de 2022 ou que tenham protocolado solicitação de orçamento de conexão, nos termos da Seção IX do Capítulo II do Título I, até 7 de janeiro de 2023, independentemente do enquadramento como centrais geradoras de fontes despacháveis.

A instalação de um sistema fotovoltaico se torna viável por diversos fatores, o primeiro e mais importante é a economia na conta tarifária, pois, irá gerar sua própria energia, que ao longo de alguns anos irá pagar seu investimento. Outro fator relevante a ser citado na viabilidade, é que, o sistema fotovoltaico provém de energia sustentável, então, além de estar economizando na tarifa, automaticamente também estará contribuindo com a sustentabilidade do meio ambiente.

De forma a trazer uma economia na tarifa de energia da empresa Primer Brasil, foi proposto o desenvolvimento de um trabalho visando a viabilidade técnica e econômica da instalação de um sistema fotovoltaico para atender a demanda da empresa citada, a qual se localizada na cidade de São Bento do Sul, no Estado de Santa Catarina.

## **1.1 Contextualização**

O Brasil concluiu o primeiro semestre de 2023 com um acréscimo de 5,1 gigawatts (GW) na capacidade de geração de instalada de energia elétrica. Esse crescimento da matriz, calculado pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), compõe os 193,9 GW disponíveis para geração comercial no país (ANEEL, 2023).

Dentre as fontes de obtenção de energia, as fontes renováveis correspondem a 83,64% dos 193,9 GW em operação no país. Entre as usinas que entraram em operação comercial nos últimos seis meses, as fontes eólicas e solar foram protagonistas, somando 2,3 GW e 2,2 GW, respectivamente. Por sua vez, as termelétricas pequenas centrais hidrelétricas (PCHs) e centrais geradoras hidrelétricas também contribuíram para o cenário, com um total de 521,4 MW, 121,5 MW e 11,4 MW, respectivamente (ANEEL, 2023).

Dentro desta diversificação da matriz energética, a geração distribuída (GD), onde a geração concentra-se próximo as localidades consumidoras, tem se destacado no Brasil possuindo um potencial instalado superior a 7,3 GW em micro e minigeração de energia elétrica. Fortemente relacionado com os incentivos econômicos governamentais via ANEEL (Resoluções Normativas 482/2012 e 687/2015).

Sancionada em 6 de janeiro de 2022, a Lei nº 14.300/22, que é denominada de Marco Legal da Microgeração e Minigeração Distribuída, prevê que quem já possuía instalação para geração e consumo da energia solar seguirá sem pagar pelo uso das redes de distribuição até o ano de 2045, isso também vale para quem aderiu ao sistema até de 7 de janeiro de 2023, posteriormente a esta data, será cobrado uma taxa gradualmente entre 2023 e 2028, sendo no primeiro ano, uma taxa de 4,1%, e seguirá crescendo 4% a cada ano, até atingir 24,3% em 2028.

## 1.2 Problema

O aumento da demanda e a escassez de recursos hídricos ocasionou uma elevação na tarifa de energia elétrica, originando as bandeiras tarifárias, que afetaram todos os consumidores conectados ao Sistema Interligado Nacional (SIN) (ANEEL, 2017).

O nosso sistema tarifário é dividido em três bandeiras: verde, amarela e vermelha.

**Bandeira verde:** representa condições favoráveis de energia e a tarifa não sofre nenhum acréscimo.

**Bandeira amarela:** é quando se tem condições desfavoráveis de geração de energia elétrica, sofrendo um acréscimo de R\$ 0,01874 para cada quilowatt-hora (kWh) consumidos.

**Bandeira vermelha:** possui dois patamares 1 e 2. O patamar 1 indica condições mais custosas de geração e a tarifa sofre um acréscimo de R\$ 0,03971 para cada kWh consumido. O patamar 2 possui condições ainda mais custosas de geração, a tarifa sofre um acréscimo de R\$ 0,09492 para cada kWh consumido (ANEEL, 2022).

Com o aumento significativo das faturas de energia nos últimos anos, buscaram-se cada vez mais alternativas para suprir a demanda energética e diminuição do custo.

## **2 JUSTIFICATIVA**

Levando em consideração a crescente demanda por novas fontes de geração de energia elétrica e o aumento do preço das tarifas de energia, umas das alternativas com maior potencial de geração de energia elétrica é a geração através de módulos solares fotovoltaicos. Observando essa realidade, este trabalho ocupa-se em analisar a viabilidade técnica e econômica da implantação de um sistema fotovoltaico em uma determinada unidade consumidora em baixa tensão, pois, antes de realizar qualquer investimento é necessário analisar a viabilidade tanto econômica quanto técnica do projeto proposto.

### **3 OBJETIVOS**

A energia solar fotovoltaica se dá na conversão direta da luz em eletricidade, ocorrendo quando um raio solar incide em uma placa de captação, convertendo-a em energia elétrica através de um inversor. O objetivo principal é que o sistema de geração consiga suprir a demanda de utilização de energia da fábrica sem precisar consumir energia da rede da concessionária.

#### **3.1 Objetivo geral**

Este trabalho tem como objetivo estudar a viabilidade técnica e econômica da implantação de um sistema fotovoltaico na empresa Primer Brasil, localizada na cidade de São Bento do Sul, em Santa Catarina. Dessa forma, buscando uma redução no valor da tarifa de energia da empresa.

#### **3.2 Objetivos específicos**

Os estudos visam especificamente:

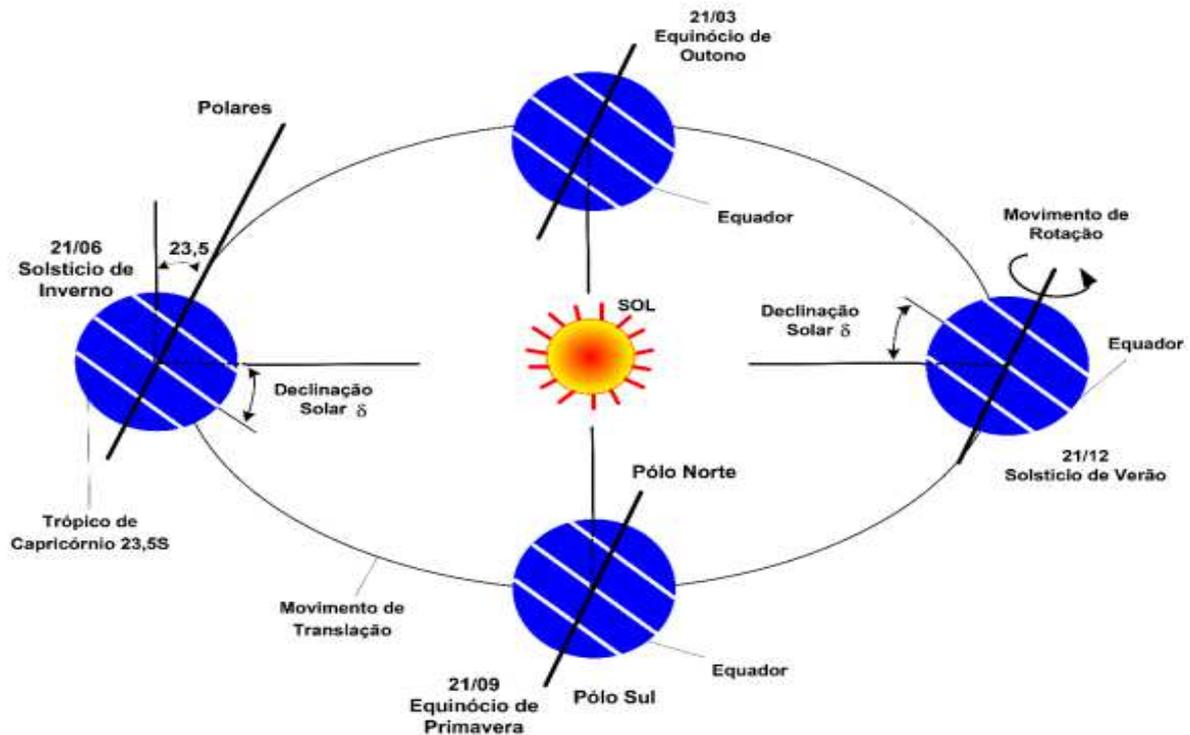
- Analisar a viabilidade técnica e econômica da instalação dos painéis;
- Aprofundamento no estudo de placas solares;
- Incentivo ao uso de energia renovável, tendo em vista o fator econômico e ambiental;

## 4 REVISÃO DE LITERATURA

### 4.1 Radiação Solar

Segundo PETRIN (2015), o sol emite energia na forma de radiação eletromagnética, essa energia é chamada de radiação solar. Metade da energia é emitida na forma de luz visível e complementada em luz infravermelha e ultravioleta. Tal energia é a principal responsável pela dinâmica da atmosfera terrestre e pelas características do clima, também, por manter o movimento principalmente linear de matéria e energia nos ecossistemas.

**Figura 3 - Variação do ângulo de declinação solar ao longo do ano de acordo com o movimento de translação e de rotação do planeta Terra**



Fonte: Fraga, (2009)

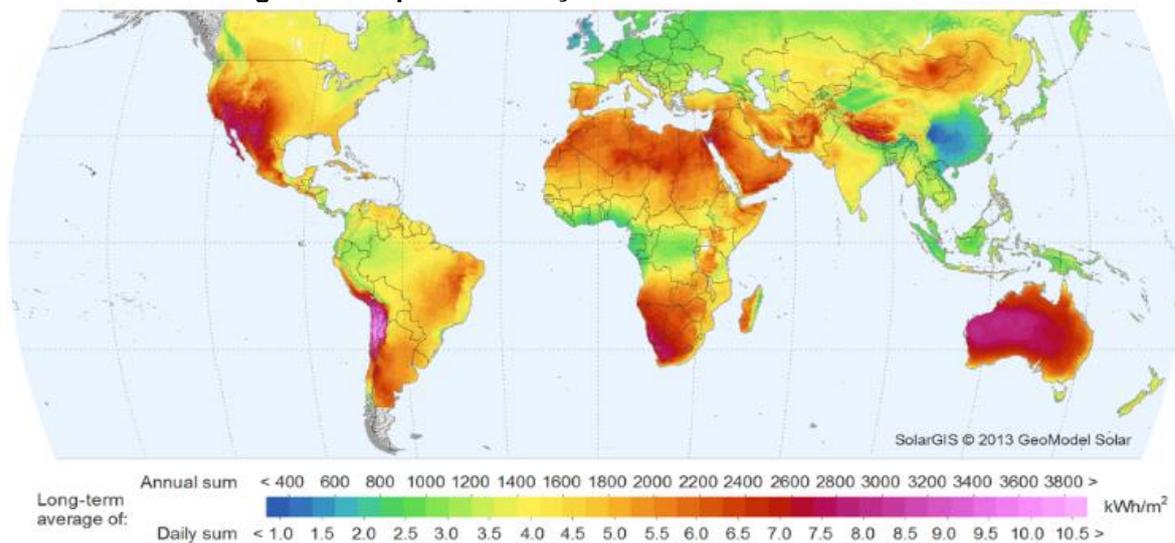
A Figura 3 ilustra o significado do ângulo de declinação solar. Segundo VILLALVA (2015), mudanças na posição angular da Terra podem ser observadas ao longo do ano. O ângulo de declinação  $\delta$  representa o ângulo entre os raios solares e o plano equatorial e varia ao longo do ano devido à inclinação do eixo de rotação da Terra. Diante do exposto, é possível afirmar que quanto mais perpendiculares são os raios, mais intensos eles são. Assim sendo, em lugares no qual a latitude é zero, como

na linha do Equador, os raios são perpendiculares e a insolação atinge seus maiores níveis. Já nas regiões mais próximas dos polos, os raios penetram inclinados, o que representa uma temperatura menor em relação ao Equador, ou seja, se maior a latitude, menor será a temperatura.

De acordo com RUBÉRIA (2009), o nordeste brasileiro possui uma alta taxa de incidência solar, sendo a região semiárido a que dispõe do melhor índice, com valores que podem chegar de 200 a 250 W/m<sup>2</sup> de potência contínua, o que equivale de 1752 a 2190 kWh/ m<sup>2</sup> por ano de radiação incidente, fazendo da região nordeste brasileira um dos locais com maior potência de energia solar.

A irradiação solar é um fator de extrema importância para a viabilidade econômica de um sistema de geração de energia fotovoltaica. O Brasil é um país extremamente privilegiado nesse aspecto, apresentando alto índice de irradiação solar em praticamente toda sua extensão.

**Figura 4 - Mapa de irradiação solar média anual no mundo**



**Fonte: EcoBrasil energy (2022)**

Como pode ser visto na Figura 4, a radiação solar média anual é maior nas áreas mais próximas do Equador em comparação com outras áreas. A Alemanha é um dos países de referência para instalação de módulos solares, com uma radiação solar média anual de 900 a 1.250 kWh/m<sup>2</sup>. Na Espanha, onde a tecnologia também está crescendo, o índice varia de 1.200 a 1.850 kWh/m<sup>2</sup>. Já no Brasil, os índices ficam entre 1.200 a 2.350 kWh/m<sup>2</sup> por ano, comprovando o enorme potencial.

São Bento do Sul é uma cidade do interior de Santa Catarina, fica a cerca de 80km de Joinville, localizando-se na região norte do estado e sul do país. Segundo o site do CRESESB, a cidade fica a 838 m acima do nível do mar e possui um índice médio de radiação solar de 1.490 kWh/m<sup>2</sup> ao ano, assim sendo, é possível afirmar que há um bom potencial de geração de energia através da luz solar.

## 4.2 Efeito Fotovoltaico

Segundo Greenvolt, a história do efeito fotoelétrico começa na primeira metade do século XIX. Para ser mais preciso, em 1839, um jovem físico francês, ao estudar um eletrolisador composto por dois eletrodos metálicos, descobriu que quando certos materiais eram expostos à luz solar, eram observadas pequenas correntes elétricas. Seu nome era Alexandre Edmond Becquerel e aos 19 anos chamou esse fenômeno de “efeito fotoelétrico”.

Os primeiros painéis solares foram projetados por Charles Fritz e instalados em um telhado na cidade de Nova York na década de 1880, mas foi somente na década de 1940, graças às patentes e ao trabalho de Russell Ohl, que os painéis solares usando junções p-n de silício surgiram e tornaram-se viáveis para aplicações práticas. Eficiências de conversão superiores a 5% foram alcançadas somente na década de 1950, um passo significativo em direção à viabilidade das comunicações por satélite. Basicamente, o efeito fotovoltaico corresponde ao desenvolvimento de uma diferença de potencial entre dois terminais de uma estrutura (normalmente uma junção p-n). Em um dispositivo iluminado, o efeito fotoelétrico interno permite a geração de um par de elétron-buraco através da absorção de um fóton. (LIMA et al., 2020)

Nos Sistemas fotovoltaicos, a energia é gerada através da incidência da radiação solar em células fotovoltaicas feitas de semicondutores, sendo o mais usual o silício (Si). Tal geração ocorre quando os fótons de luz provenientes do sol atingem as células, acontecendo uma absorção por parte delas. Posteriormente, a luz é transferida para os elétrons, fazendo com que haja uma movimentação dos mesmos, gerando corrente elétrica.

Os módulos solares fotovoltaicos não utilizam calor para produzir eletricidade. Interpretando a palavra “photo” significa “produzir luz” e o sufixo “voltaico” refere-se à “eletricidade produzida por uma reação química”, ou seja, eles são elementos básicos para a transformação de energia eletromagnética em

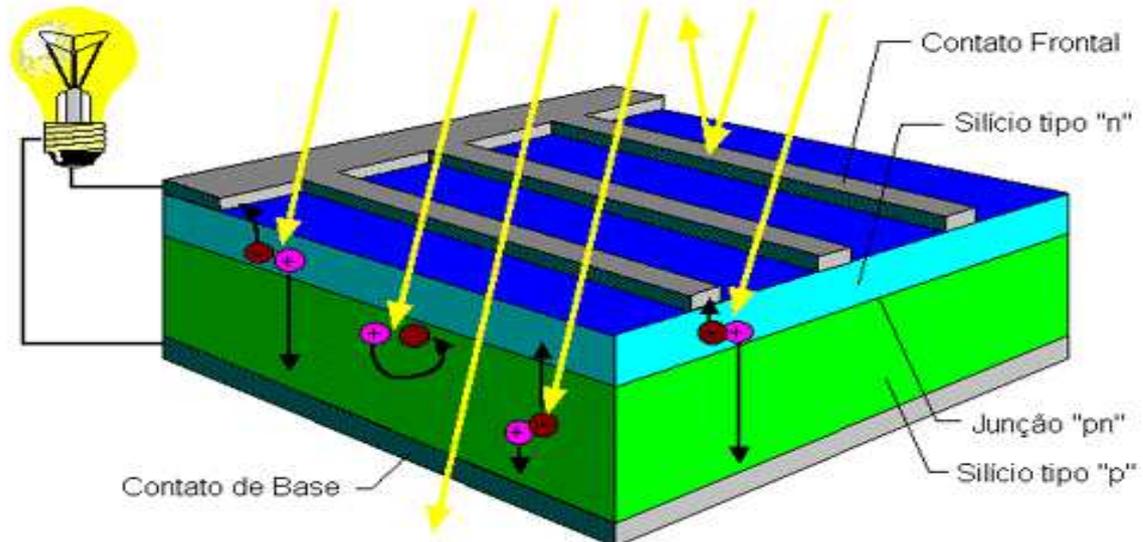
energia elétrica e podem ser compreendidos como dispositivos semicondutores que produzem corrente elétrica quando expostos à luz. (RUBÉRIA, 2009, P. 3).

Segundo CRESESB (2008), o silício é o semicondutor mais usado. Tendo como característica principal uma rede cristalina de átomos formada por quatro elétrons que se ligam aos vizinhos.

Quando se adiciona átomos que tenham ligação de cinco elétrons, um elétron ficará em excesso, conseqüentemente, não poderá ficar ligado, ficando abertamente unido ao átomo de origem. Fazendo assim, com que esse elétron tenha facilidade de ir para banda de condução quando houver pouca energia.

De acordo com CRESESB (2008), o fósforo é um dopante doador de elétrons e denomina-se dopante n ou impureza n se em vez do fósforo, adiciona-se o boro, que possui apenas três elétrons livres para ligação, faltaria um elétron para fazer a ligação com o quarto elétron do silício, constituindo assim o silício do tipo P. Diz-se, portanto, que o boro é um aceitador de elétrons ou um dopante p.

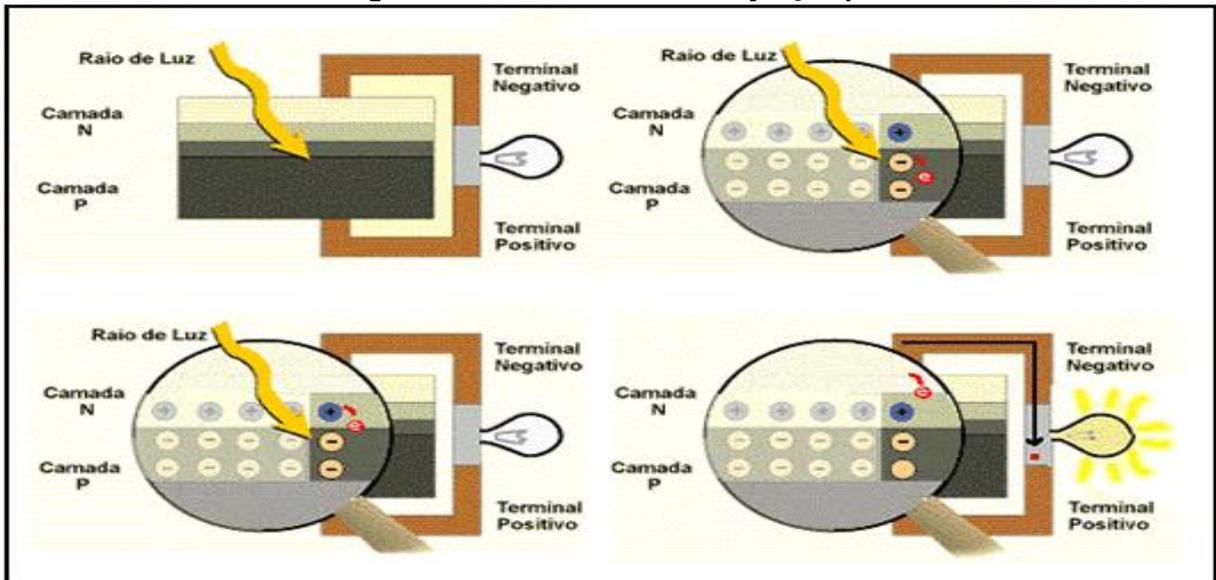
**Figura 5 - Corte transversal de uma célula fotovoltaica**



**Fonte: Cresesb (2008)**

Segundo VANNI (2008), ao formar-se a junção pn, cria-se um campo elétrico devido aos elétrons livres do silício tipo N que ocupam as lacunas da estrutura do silício tipo P. Ao ser incidida uma fonte luminosa sobre a junção pn, os fótons se colidem com os elétrons, essa colisão fornece energia transformando o silício em um material condutor.

Figura 6 - Efeito fotovoltaico na junção pn



Fonte: Cresesb (2008)

Segundo CRESESB (2006), existem três categorias para um sistema fotovoltaico, sendo elas: sistemas isolados (off-grid), conectados à rede (on-grid) e híbridos.

### 4.3 Placas fotovoltaicas

As placas solares são o principal componente de um sistema gerador de energia solar. São fabricadas a partir de um conjunto de células fotovoltaicas conectadas entre si. Para gerar energia, a placa absorve a luz do sol e a converte em eletricidade por meio do fenômeno conhecido como efeito fotovoltaico. Existem diversos tipos de placas, e neste tópico serão abordadas as mais utilizadas.

#### 4.3.1 Placa de silício monocristalino

Segundo Energia Wise, a tecnologia monocristalina é a mais antiga e possui a eficiência mais alta. Os painéis solares de silício monocristalino (mono-Si) são facilmente reconhecíveis olhando de perto. Possuem uma cor uniforme, indicando silício de alta pureza e cantos tipicamente arredondados. Em relação aos outros tipos, a monocristalina apresenta as seguintes vantagens e desvantagens:

#### **Vantagens:**

- Esse tipo de placa possui uma eficiência de 14 a 21%.
- Por serem mais eficientes, necessitam de menos espaço para gerar a mesma quantidade de energia se comparado aos outros tipos de placa.
- Tendem a funcionar melhor do que painéis solares policristalinos em condições de pouca luz.
- A vida útil dos painéis monocristalinos é maior que 30 anos e eles geralmente vem com garantia de 25 anos.

**Desvantagens:**

- Painéis solares monocristalinos são mais caros.
- Também pode-se ressaltar o desperdício durante a produção, ocasionado pelo processo Czochralski. É comum que as bordas contenham imperfeições, ocasionando a reciclagem e a maculação do silício.

#### 4.3.2 Placa de silício policristalino

Segundo Energia Wise, assim como os painéis monocristalinos, o silício também é o principal componente de um painel solar policristalino. Mas, em vez de um único cristal de silício, os fabricantes usam vários cristais de silício para a produção desse painel solar. O processo de fabricação consiste no derretimento de diferentes fragmentos de silício para criar “bolachas”, e após, as anexar ao painel.

Como existem mais de um cristal de silício em cada célula, há menos espaço para os elétrons se moverem livremente. Esta é a razão pela qual os painéis solares policristalinos são menos eficientes do que seus equivalentes monocristalinos.

**Vantagens:**

- Painéis de silício policristalino são mais baratos, portanto, são mais econômicos.
- Uma menor quantidade de silício é desperdiçada durante a produção de painéis de silício policristalino.
- A vida útil dos painéis policristalinos é maior que 30 anos e eles vem com garantia de 25 anos.

**Desvantagens:**

- A eficiência de painéis solares policristalinos é tipicamente entre 13 e 16%.
- Isso é devido, principalmente, a menor pureza do polisilício.

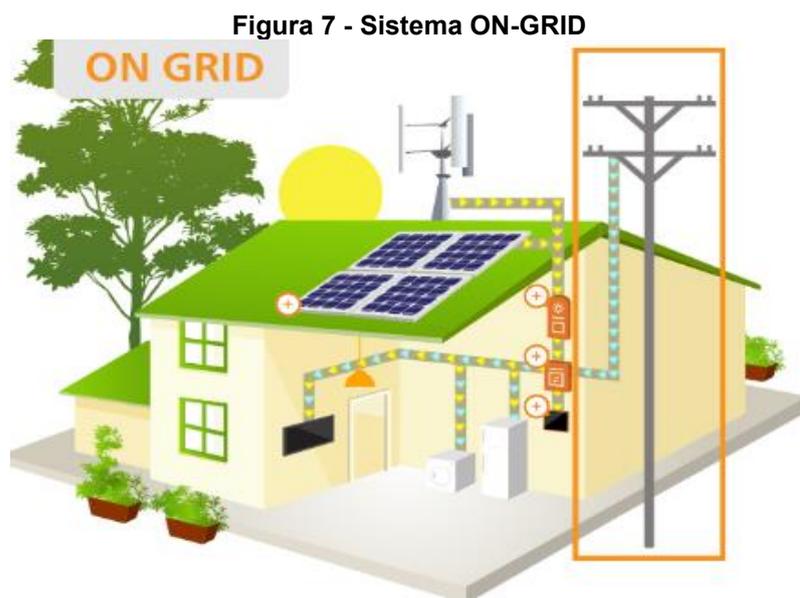
- Normalmente é necessária uma área maior de painéis policristalinos para gerar a mesma quantidade de Watts/m<sup>2</sup> que o painel monocristalino.

#### 4.4 Sistemas On e Off Grid

Os sistemas "on-grid" e "off-grid" são duas maneiras diferentes para a geração e distribuição de energia elétrica.

##### 4.4.1 Sistema On Grid

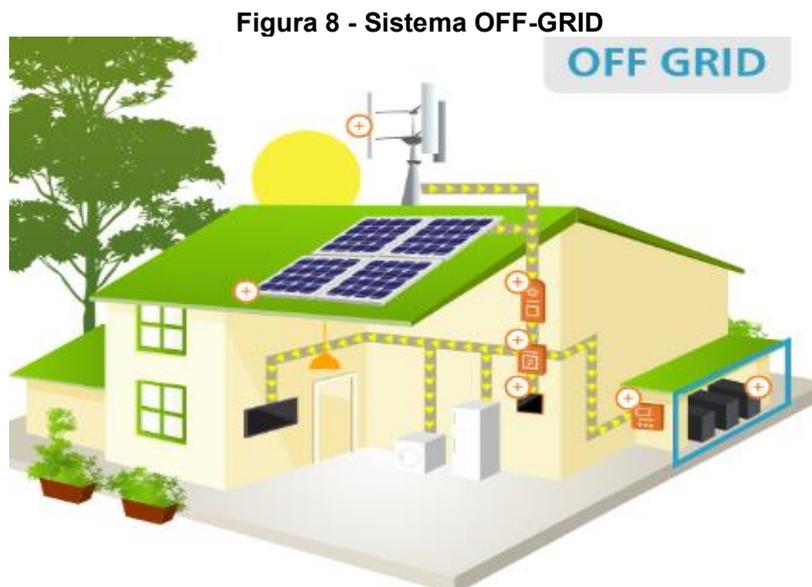
O sistema on-grid é conectado à rede elétrica convencional, ou seja, a energia gerada pelo sistema é diretamente alimentada na rede elétrica local. Essa energia produzida pelo sistema pode ser usada na propriedade onde está instalada, e qualquer excesso é fornecido de volta à rede elétrica. Isso pode resultar em créditos de energia ou até mesmo pagamentos pelo excedente. O sistema on-grid é a opção mais comum em áreas urbanas, onde a infraestrutura elétrica é amplamente disponível e confiável. Eles garantem energia constante, mesmo quando o sistema solar não está gerando, como à noite.



Fonte: Confortec (2021)

#### 4.4.2 Sistema Off Grid

Já o sistema off-grid, é independente da rede elétrica convencional. Ele normalmente utiliza painéis solares ou outras fontes de energia renovável, juntamente com baterias de armazenamento, para suprir as necessidades de eletricidade da propriedade. Os sistemas off-grid são frequentemente usados em áreas remotas, rurais ou em locais onde o acesso à rede elétrica é difícil ou caro. Eles fornecem eletricidade autossuficiente e independente. Devido à falta de conexão com a rede, os sistemas off-grid precisam ser dimensionados para atender à demanda de energia durante todos os momentos, incluindo períodos de baixa geração de energia (como à noite ou em dias nublados).



Fonte: Confortec (2021)

#### 4.5 Controlador de carga e bateria (sistema off-grid)

O controlador de carga é um componente usado no sistema off-grid. Tem como função preservar as baterias acopladas no sistema. É acionado quando as baterias atingem o nível máximo carga ou quando atingem o nível mínimo de descarga.

**Figura 9 - Controlador de cargas**

Fonte: MPPT SOLAR (2023)

A bateria por sua vez, terá a função de armazenar a carga excedente proveniente das placas.

#### 4.6 Inversor solar

A função básica do inversor no sistema fotovoltaico é converter a corrente contínua (CC) gerada pelos painéis solares, para alternada (CA) para que posteriormente seja feito o uso da energia obtida. Conforme esquemático abaixo:

**Figura 10 - Inversor solar**

Fonte: SOL E ENERGIA (2018)

Outros pontos importantes que devem ser destacados a respeito dos inversores são:

**Eficiência Energética:** os inversores solares tem um papel determinante na eficiência de um sistema solar. Inversores modernos são projetados para maximizar a eficiência de conversão, minimizando perdas no processo de conversão.

**Monitoramento e Controle:** muitos inversores solares vêm com recursos de monitoramento e controle, permitindo que os proprietários monitorem o desempenho de seus sistemas em tempo real por meio de aplicativos ou interfaces online.

**Integração com Armazenamento de Energia:** alguns inversores solares são compatíveis com sistemas de armazenamento de energia, como baterias. Isso permite que o excesso de energia solar seja armazenado para uso posterior, reduzindo a dependência da rede elétrica.

Por isso, é essencial escolher um inversor de qualidade, para que assim, o equipamento tenha um bom desempenho no longo prazo, além disso, deve-se fazer manutenções adequadas para garantir o funcionamento eficiente e confiável do sistema.

#### **4.7 Localização**

De acordo com PINHO; GALDINO (2014), para realizar o projeto é de extrema importância saber o endereço ou latitude e longitude do local pretendido onde será instalado o sistema de geração de energia. Além disso, recomenda-se a integração de painéis solares com elementos locais para evitar sombreamento, obter boa incidência de radiação solar e estar localizado o mais próximo possível das cargas dos consumidores a serem atendidos.

#### **4.8 Região no Brasil com melhor incidência de radiação solar**

Segundo RUBÉRIA (2009), o nordeste brasileiro possui uma alta taxa de incidência solar, sendo a região semiárido a que dispõe do melhor índice, com valores que podem chegar de 200 a 250 W/m<sup>2</sup> de potência contínua, o que equivale de 1752 a 2190 kWh/ m<sup>2</sup> por ano de radiação incidente, fazendo da região nordeste brasileira um dos locais com maior potência de energia solar.

## 5 METODOLOGIA

A fábrica dispõe das seguintes medidas: 750 m<sup>2</sup>, sendo 25 m de frente e 30 m de lateral com altura de 6 m. O telhado tem dimensões de 32 m x 30,5 m e inclinação de 25° em ambos os lados. Ressalta-se que, o lado direcionado para o norte tem dimensões maiores em comparação ao lado oposto, no caso, 17,5 m para direção norte, e 14,5 m para região sul. A fábrica conta com 4 motores, sendo dois de 15 CV, um de 25 CV e um de 30 CV, tendo um consumo médio mensal em torno de 4104,286 kWh.

Foi verificado juntamente com o dono da empresa a possibilidade de realizar um estudo de viabilidade técnica e econômica para a implantação de um sistema de geração de energia fotovoltaica.

Por ser uma fábrica de pequeno porte, está conectada na rede de baixa tensão (BT) e se encaixa na modalidade de Microgeração distribuída, pertencente ao grupo B, que segundo RESOLUÇÃO NORMATIVA ANEEL Nº 1.000, DE 7 DE DEZEMBRO DE 2021, deve ter tensão menor que 2,3 kV e potência instalada menor ou igual a 75 kW.

Diante das informações adquiridas, o sistema escolhido foi o sistema ON-GRID (conectado à rede), que tem como principal característica se manter conectado à rede da distribuição. Dessa forma, quando não há produção de energia, pode-se usar a energia da distribuidora.

Para a instalação completa dos painéis fotovoltaicos são necessários os seguintes materiais:

- Painel fotovoltaico
- Inversor solar
- Cabeamento
- String box
- Estruturas

Para dimensionar o sistema fotovoltaico, é necessário se obter a média de consumo de energia. Para isso, foi efetuado um cálculo de média do consumo de energia da fábrica em um período de 7 meses.

<b>Mês</b>	<b>Consumo (kWh)</b>
Novembro (2022)	4150,0
Janeiro (2023)	3790,0
Fevereiro (2023)	4260,0
Março (2023)	4220,0
Abril (2023)	4010,0
Maio (2023)	3510,0
Junho (2023)	4790,0
Média	4104,286

**Fonte: Autoria própria (2023)**

Como preparação para a instalação, uma limpeza e uma vistoria serão feitas no telhado para que futuramente não haja qualquer tipo de infiltração onde serão fixadas as placas. Levando em consideração o melhor ângulo e a melhor direção de incidência solar, são feitos desenhos no telhado, onde cada módulo de placa irá ficar. Na instalação, os painéis são acoplados a trilhos de alumínio bem parafusados para que não haja nenhum tipo de torção.

Após fixadas as placas, o inversor e o string box serão colocados em uma parede de fácil acesso, de preferência próximo ao quadro de distribuição, visando a economia de cabos. Caso o sistema seja off-grid, são usados mais dois componentes, sendo eles: Baterias para armazenar a energia excedente, e um controlador de carga, para proteger a vida útil das baterias.

A ligação do quadro até as placas será feita por meio de cabos e disjuntores específicos para esse tipo de ligação. Para finalizar, o inversor será ligado à rede elétrica, e alguns testes serão feitos para saber se tudo está funcionando de acordo, após isso, o sistema estará pronto para uso.

## **5.1 Potencial Solar**

Estimar o potencial solar é de extrema importância em um projeto como este, pois, ele depende da incidência do sol nas placas para que haja obtenção de energia.

Dessa forma, foi realizado um levantamento no site da CRESESB com intuito de saber a média de irradiação solar e o melhor ângulo para que as placas tenham um melhor aproveitamento, conforme figura abaixo:

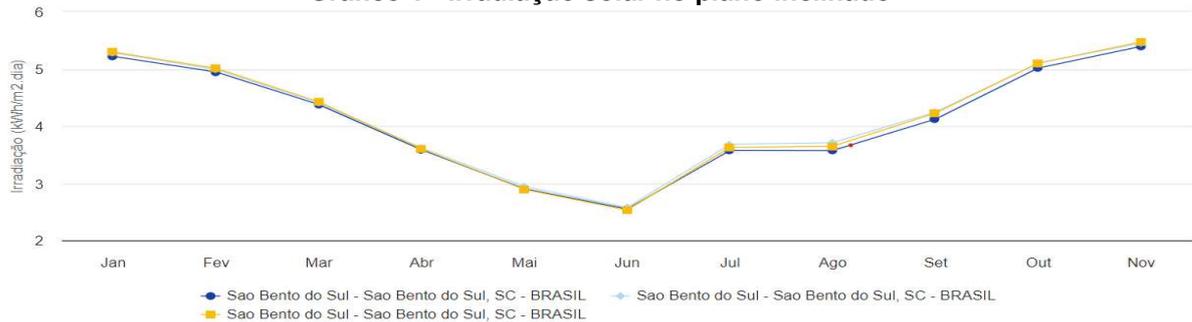
**Figura 11 - Irradiação solar diária média mensal**

#	Ângulo	Inclinação	Irradiação solar diária média mensal [kWh/m <sup>2</sup> .dia]												Média	Delta
			Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez		
✓	Plano Horizontal	0° N	5,22	4,95	4,38	3,59	2,90	2,55	2,73	3,57	3,57	4,12	5,01	5,39	4,00	2,84
✓	Ângulo igual a latitude	26° N	4,71	4,73	4,53	4,11	3,65	3,36	3,54	4,31	3,80	4,03	4,60	4,79	4,18	1,43
✓	Maior média anual	21° N	4,86	4,82	4,55	4,05	3,54	3,24	3,42	4,21	3,80	4,09	4,72	4,95	4,19	1,71
✓	Maior mínimo mensal	45° N	3,98	4,17	4,23	4,11	3,84	3,63	3,78	4,43	3,64	3,63	3,93	4,00	3,95	,80

Fonte: CRESESB (2023)

Na figura 11 observa-se que, a inclinação 21° N é a com maior média de incidência solar. Entretanto, para fins de cálculos, será usado o ângulo igual a latitude, que conta com uma média mensal de 4,18 kWh/(m<sup>2</sup>.dia). Tal escolha foi feita embasada na inclinação do telhado da fábrica.

**Gráfico 1 - Irradiação solar no plano inclinado**



Fonte: CRESESB (2023).

O gráfico 1 ilustra a irradiação solar ao longo dos meses do ano, onde é possível afirmar que os meses com maior incidência solar são os de início e final do ano.

## 5.2 Pannel fotovoltaico

Os painéis fotovoltaicos são estruturas com células unidas com a função de transformar a luz proveniente do sol em energia elétrica, que pode ir direto para a rede elétrica (On-grid), ou ser armazenada (Off-grid).

**Figura 12 - Painéis fotovoltaicos**

**Fonte: G1 (2023)**

Dispondo da média de consumo de energia (Tabela 1), pode-se calcular a quantidade necessária de módulos para o sistema. Para isso divide-se o consumo médio por 30 para se obter o consumo diário.

$$Cd = \frac{Mc}{30} \quad (1)$$

Onde:

Cd = Consumo diário

Mc = Média de consumo

Posteriormente, foi feito um levantamento para conhecimento do potencial solar da região. Essa análise foi realizada no site da CRESESB, na aba de potencial solar, onde, ao inserir as coordenadas geográficas de latitude e longitude da região, dispõe-se das médias de radiação e o melhor ângulo para que as placas recebam uma maior incidência solar.

Dispondo da média de radiação, executa-se a divisão do consumo médio pela radiação obtida no site da CRESESB, para encontrar a potência de energia gerada.

$$P_w = \frac{Cd}{r} \quad (2)$$

Onde:

$P_w$  = Potência de energia gerada

$r$  = Radiação solar

Diante disso, para se obter o número de módulos necessários, basta dividir a potência de energia gerada pela potência de cada painel multiplicada por 0,8.

$$N^\circ \text{ Painel} = \frac{P_w}{\text{PotPainel} \times 0,8} \quad (3)$$

PotPainel = Potência do painel

Este fator de 0,8 é o índice de eficiência global, que leva em consideração as perdas no módulo fotovoltaico. Segundo o fornecedor, o painel perde 0,35% de eficiência por grau Celsius acima de 25°C, e o painel pode chegar a uma temperatura de 75°C. Logo, as perdas podem chegar em até 20%.

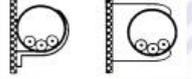
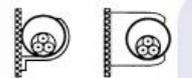
### 5.3 Cabeamento

Para definir a bitola e o método de instalação dos cabos, foi consultada a norma NBR 5410 (2004). Inicialmente, consultou-se a tabela 33 da norma NBR 5410 para escolher o método de instalação dos cabos, assim sendo, foi selecionado o método B1 por ser o que mais se encaixou com as características do nosso sistema, conforme figura abaixo:

Figura 13 - Método de instalação de cabos

A - 00.308.141/0002-57 (Pedido 208272 Impressor: 22/01/2010)

**Tabela 33 — Tipos de linhas elétricas**

Método de instalação número	Esquema ilustrativo	Descrição	Método de referência <sup>1)</sup>
1		Condutores isolados ou cabos unipolares em eletroduto de seção circular embutido em parede termicamente isolante <sup>2)</sup>	A1
2		Cabo multipolar em eletroduto de seção circular embutido em parede termicamente isolante <sup>2)</sup>	A2
3		Condutores isolados ou cabos unipolares em eletroduto aparente de seção circular sobre parede ou espaçado desta menos de 0,3 vez o diâmetro do eletroduto	B1
4		Cabo multipolar em eletroduto aparente de seção circular sobre parede ou espaçado desta menos de 0,3 vez o diâmetro do eletroduto	B2

Fonte: NBR 5410 (2004)

Após, foi consultada a tabela 40 da norma NBR 5410 (2004), que mostra os valores dos fatores de correção para temperaturas ambientes diferentes, neste caso, será utilizada a temperatura de 45°C, cujo fator de correção neste caso é 0,87 pois o cabo fotovoltaico possui isolamento XLPE, conforme figura abaixo:

Figura 14 - Fatores de correção para temperaturas ambientes diferentes

FORMÁTICA COMERCIO E SERVICOS LTDA - 00.308.141/0002-57 (F

**Tabela 40 — Fatores de correção para temperaturas ambientes diferentes de 30°C para linhas não-subterrâneas e de 20°C (temperatura do solo) para linhas subterrâneas**

Temperatura °C	Isolação	
	PVC	EPR ou XLPE
Ambiente		
10	1,22	1,15
15	1,17	1,12
20	1,12	1,08
25	1,06	1,04
35	0,94	0,96
40	0,87	0,91
45	0,79	0,87
50	0,71	0,82
55	0,61	0,76
60	0,50	0,71
65	—	0,65
70	—	0,58
75	—	0,50
80	—	0,41

Fonte: NBR 5410 (2004)

Com base na tabela 42 da norma NBR 5410 (2004), verificou-se o fator de agrupamento, que neste caso é 3 pois teremos um sistema trifásico.

**Figura 15 - Fatores de agrupamento**

**Tabela 42 — Fatores de correção aplicáveis a condutores agrupados em feixe (em linhas abertas ou fechadas) e a condutores agrupados num mesmo plano, em camada única**

Ref.	Forma de agrupamento dos condutores	Número de circuitos ou de cabos multipolares												Tabelas dos métodos de referência
		1	2	3	4	5	6	7	8	9 a 11	12 a 15	16 a 19	≥20	
1	Em feixe: ao ar livre ou sobre superfície; embutidos; em conduto fechado	1,00	0,80	0,70	0,65	0,60	0,57	0,54	0,52	0,50	0,45	0,41	0,38	36 a 39 (métodos A a F)
2	Camada única sobre parede, piso, ou em bandeja não perfurada ou prateleira	1,00	0,85	0,79	0,75	0,73	0,72	0,72	0,71	0,70				36 e 37 (método C)
3	Camada única no teto	0,95	0,81	0,72	0,68	0,66	0,64	0,63	0,62	0,61				
4	Camada única em bandeja perfurada	1,00	0,88	0,82	0,77	0,75	0,73	0,73	0,72	0,72				38 e 39 (métodos E e F)
5	Camada única sobre leito, suporte etc.	1,00	0,87	0,82	0,80	0,80	0,79	0,79	0,78	0,78				

Fonte: NBR 5410 (2004)

Com estas informações e sabendo que a corrente de curto circuito é de 14A, foi possível calcular a corrente corrigida, conforme equação abaixo:

$$I_c = \frac{14}{0,87 \times 0,70} \quad (4)$$

Logo,  $I_c = 23 \text{ A}$

$I_c =$  Corrente corrigida (A)

Assim sendo, verificou-se a tabela 37 da norma NBR 5410 (2004), para definir a bitola do cabo.

**Figura 16 - Capacidade de condução de corrente**

**Tabela 37 — Capacidades de condução de corrente, em ampères, para os métodos de referência A1, A2, B1, B2, C e D**

Condutores: cobre e alumínio

Isolação: EPR ou XLPE

Temperatura no condutor: 90°C

Temperaturas de referência do ambiente: 30°C (ar), 20°C (solo)

Seções nominais mm <sup>2</sup>	Métodos de referência indicados na tabela 33											
	A1		A2		B1		B2		C		D	
	2	3	2	3	2	3	2	3	2	3	2	3
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)
Cobre												
0,5	10	9	10	9	12	10	11	10	12	11	14	12
0,75	12	11	12	11	15	13	15	13	16	14	18	15
1	15	13	14	13	18	16	17	15	19	17	21	17
1,5	19	17	18,5	16,5	23	20	22	19,5	24	22	26	22
2,5	26	23	25	22	31	28	30	26	33	30	34	29
4	35	31	33	30	42	37	40	35	45	40	44	37
6	45	40	42	38	54	48	51	44	58	52	56	46
10	61	54	57	51	75	66	69	60	80	71	73	61

Fonte: NBR 5410 (2004)

Com base na tabela, é possível afirmar que um cabo de 2,5 mm<sup>2</sup> suportaria essa corrente de 23 A, porém, os cabos mais comuns de serem utilizados nestes casos são os de 4 e 6 mm<sup>2</sup>. Levando em consideração outros fatores, como queda de tensão, qualidade e confiabilidade da instalação, e que futuramente o dono da fábrica pretenda instalar mais motores, demandando assim mais placas, e consequentemente cabos com bitolas maiores, decidiu-se utilizar o cabo de 6 mm<sup>2</sup>.

#### 5.4 String Box

A string box se localiza entre as placas fotovoltaicas e o inversor, como ilustrado no ANEXO F, e tem como função fazer a proteção do sistema, de forma a impedir acidentes elétricos provenientes de curtos-circuitos e surtos que possam afetar o sistema fotovoltaico.

A norma brasileira de instalações elétricas de baixa tensão – NBR 5410 – e a norma brasileira sobre sistemas fotovoltaicos – NBR 16690 – preveem que as instalações devem ter como características básicas a proteção contra choque elétrico do usuário, proteção contra efeitos térmicos e incêndios, proteção contra sobrecorrente, proteção contra sobretensão e capacidade de seccionamento. (CANAL SOLAR, 2019).

Figura 17 - String box



Fonte: RIBEIRO (2016)

A string box escolhida é composta por um sistema CC + CA, sendo:

Lado CC composto de:

- Disjuntor dos painéis fotovoltaicos (440 VCC/70 A)
- Fusíveis de proteção CC
- DPS CC para proteção contra descargas atmosféricas

Lado CA composto de:

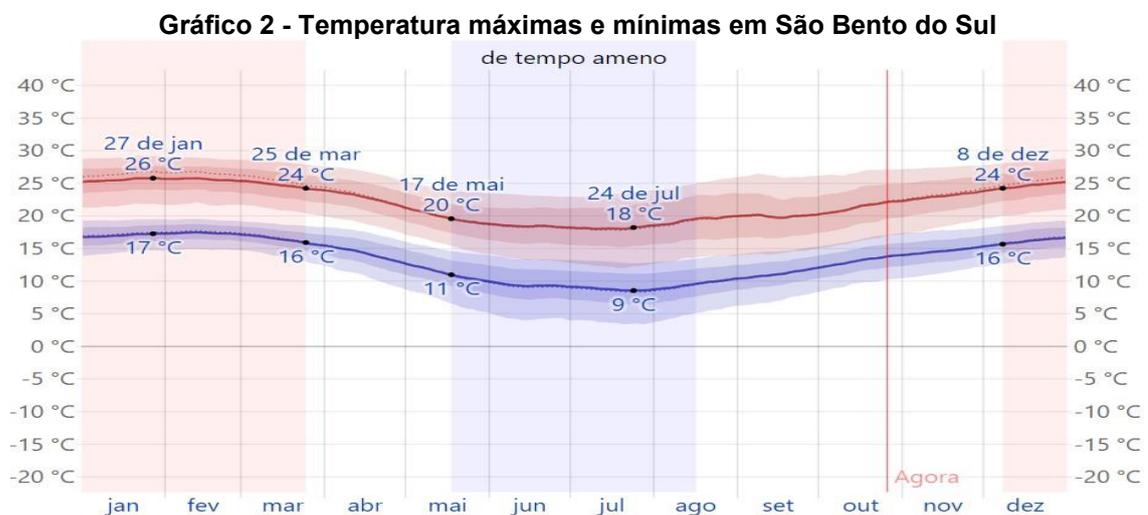
- Disjuntor dos painéis fotovoltaicos (400 VCA/150A)
- DPS CC para proteção contra descargas atmosféricas 275 VCA – 20 Ka (fases)

## 5.5 Número de módulos por String

Para se obter o número máximo de módulos suportado por string, deve-se primeiramente consultar os datasheet's (folha de dados) dos fabricantes do módulo fotovoltaico e do inversor.

Como ilustrado na folha de dados do ANEXO D, são obtidos 3 valores, a tensão de circuito aberto, o coeficiente de temperatura e a condição de teste padrão. Na folha de dados do inversor (ANEXO E), faz-se uso da máxima tensão.

Deve-se também se obter a mínima temperatura registrada na determinada região. Para os cálculos, foi considerado a menor temperatura registrada no ano de 2023 na região, que de acordo com o Gráfico 2, foi de 9°C.



Fonte: Weather Spark (2023)

Para definir o número máximo de módulos por string, primeiramente deve-se achar a tensão de circuito aberto máxima.

Para isso, utiliza-se a seguinte equação:

$$VocMax = Voc + Voc \times [(temp - STC) \times \left(\frac{TcVoc}{100}\right)] \quad (5)$$

Onde:

VocMax = Tensão de circuito aberto máxima

Voc = Tensão de circuito aberto

Temp = Mínima temperatura registrada na região

STC = Condições de teste padrão

TcVoc = Coeficiente de temperatura

Após isso, divide-se a máxima tensão de entrada pelo valor obtido, o resultado arredondado para baixo, será o valor máximo de módulos por string.

$$ModString = \frac{VinMax}{VocMax} \quad (6)$$

## 5.6 Energia produzida

Pode-se obter a energia produzida através da seguinte expressão:

$$Geração Anual \left(\frac{MWh}{ano}\right) =$$

$$Pot. de cada mód. (Wp) \times N^\circ de módulos \times nível médio de radiação solar (h) \times Ef. global \times 365 \times 10^6. \quad (7)$$

Onde:

- Geração Anual (MWh/ano) = Estimativa de energia a ser produzida
- Pot. de cada mód. (Wp) = Potência nominal do módulo
- N° de módulos = Quantidade de placas fotovoltaicas
- Nível médio de radiação solar (h) = Radiação solar anual média (kWh/m<sup>2</sup>.dia)
- Ef. global = Valor usual 0,7 a 0,8

Através do valor da energia total gerada, é possível estimar a economia de energia em reais. Pode-se obter a energia gerada através da seguinte multiplicação:

Energia Gerada = Número de dias x Potência de cada módulo x Radiação Solar x Rendimento x Número de painéis

O sistema que alimenta a fábrica é trifásico, logo, multiplica-se a tarifa pela energia gerada durante o mês vigente.

$$\mathbf{Dinheiro\ Economizado = (Energia\ Gerada\ x\ Tarifa)} \quad \mathbf{(8)}$$

### **5.7 Prestação de serviço**

Segundo um estudo feito pela Greener em fevereiro de 2023, para saber a média de preço da mão de obras da instalação de um sistema fotovoltaico, deve-se observar as informações do gráfico 3, o qual mostra uma média de preço dos sistemas fotovoltaicos.

O sistema escolhido para execução do projeto abordado é de 44 kWp, logo, usa-se a coluna de 50 kWp mais atual, que resulta em 2,84.

Multiplica-se o valor da potência do sistema pelo valor encontrado no gráfico para achar o valor total da instalação.

$$\mathbf{VT = PS\ x\ Tab} \quad \mathbf{(9)}$$

Onde:

VT = Valor total do projeto incluso instalação

PS = Potência do sistema

Tab = Valor encontrado na tabela

Posteriormente, para se obter o valor da mão de obra, subtrai-se o valor do sistema escolhido do valor total do projeto.

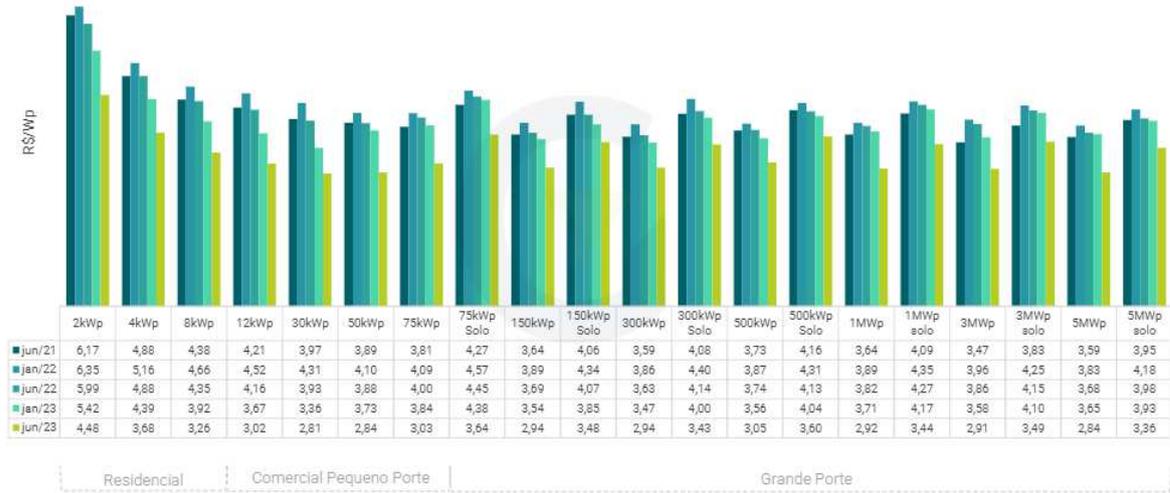
$$\mathbf{Mo = VT - VS} \quad \mathbf{(10)}$$

Onde:

Mo = Valor da mão de obra

VS = valor do sistema

**Gráfico 3 - Preços dos sistemas fotovoltaicos**



Fonte: Greener (2023)

## 6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A média de consumo da empresa é de 4104,286kWh, tendo seu pico mais alto no mês de junho, com um consumo de 4790,0 kWh, e seu pico mais baixo no mês de maio, atingindo uma máxima de 3510,0 kWh como mostra a tabela 1.

De acordo com a equação 1, foram encontrados os seguintes valores:

$$Cd = \frac{4104,286}{30}$$

$$Cd = 136,8095 \text{ kWh}$$

De acordo com pesquisa feita no site da CRESESB a radiação diária na cidade de São Bento do Sul é de média de 4,18 kWh/m<sup>2</sup> considerando a inclinação de 26° N. A partir do consumo diário e da radiação solar, foi feito o cálculo da potência de energia gerada utilizando a equação 2, conforme cálculo abaixo:

$$Pw = \frac{136,8095}{4,18}$$

$$Pw = 32,7295 \text{ kWp}$$

Diante desse resultado, pôde-se escolher o sistema adequado. O sistema escolhido foi o GERADOR DE ENERGIA SOLAR GROWATT ON GRID com um inversor com potência nominal de 44 kWp de 550W.

Para o cálculo do número de painéis foi usado a equação 3:

$$N^{\circ} \text{ Painéis} = \frac{32,7295}{0,550 \times 0,8}$$

$$N^{\circ} \text{ Painéis} = 74,4$$

O valor mínimo de painéis calculado foi de 75 painéis, contudo, foi escolhido um sistema com 80 painéis, dando uma margem de 5 painéis, pois, nem sempre a radiação solar atingirá um valor adequado para chegar à média, sendo assim, esses 5 painéis a mais irão compensar essa perda.

O número máximo de módulos por string pode ser obtido a partir da divisão da máxima tensão de entrada pela tensão de circuito aberto máxima. Para calcular a tensão de circuito aberto máxima foi usada a equação 5:

$$VocMax = 49,9 + 49,9 \times [(9 - 25) \times \left(\frac{-0,275}{100}\right)]$$

$$VocMax = 52,1 V$$

Agora, a partir da equação 6 pode ser encontrado o valor de número máximo de módulos por string:

$$ModString = \frac{1.100}{52,1}$$

$$ModString = 21,113$$

Salienta-se que, esse não é o único critério para dimensionar o número de módulos por fileira. Deve-se levar em conta também a faixa de tensão do MPPT do inversor. O número obtido na equação (6) deve ser sempre arredondado para baixo, pois, se trata da quantidade máxima de módulos que 1 string suporta. Ressalta-se que, o valor obtido poderia ser arredondado para 21 módulos, porém, optou-se em utilizar 20 módulos por string, totalizando assim, 4 strings com 20 módulos cada.

A fábrica se encontra com a parte da frente do telhado direcionado a região norte, com uma inclinação de aproximadamente 25° contudo, foi usado a inclinação de 26° N para uma melhor obtenção de radiação solar. A outra parte está direcionada para região sul. Porém, a parte da frente já é suficiente para comportar todas as placas. Diante disso, por estar direcionada para o norte, tem-se o maior aproveitamento possível da incidência solar.

Para se obter a geração anual em MW, basta multiplicar a potência de cada módulo pelo número de módulos, média de radiação solar, 0,8, que é a eficiência global usual, e por  $365 \times 10^{-6}$  que equivale ao ano.

$$Geração Anual = 550 \times 80 \times 4,18 \times 0,8 \times 365 \times 10^6$$

$$Geração Anual = 53.7 MWh/ano$$

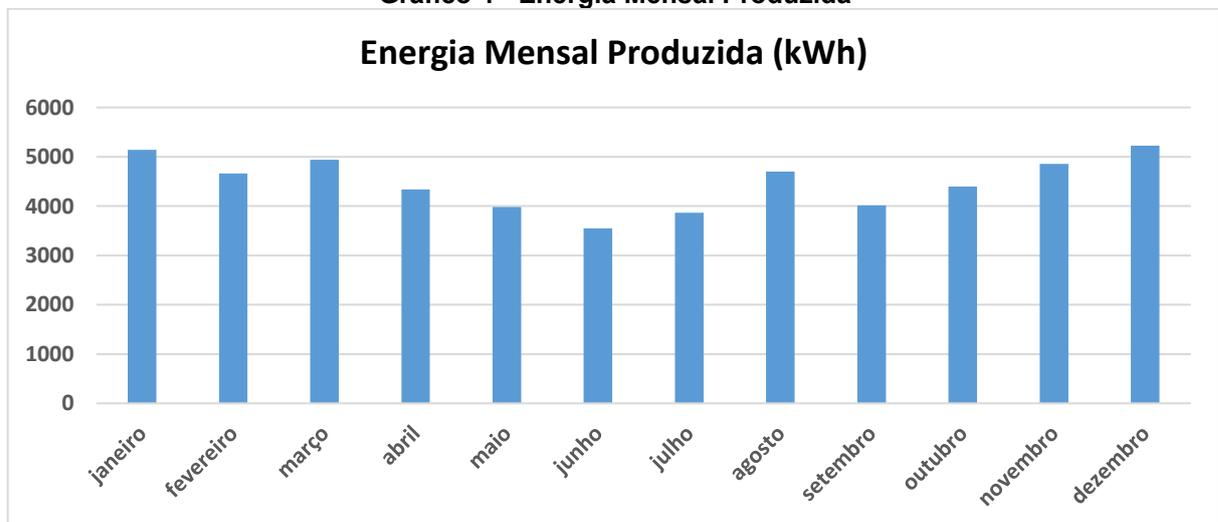
Tabela 2 - Energia Produzida

Mês	Dias	Potência instalada (kWh)	Radiação solar (kWh/m <sup>2</sup> )	Rendimento do inversor 98,8 %	Energia mensal produzida (kWh)
<b>Janeiro</b>	31	44	4,71	0,988	<b>5.139,552</b>
<b>Fevereiro</b>	28	44	4,73	0,988	<b>4.661,888</b>
<b>Março</b>	31	44	4,53	0,988	<b>4.943,136</b>
<b>Abril</b>	30	44	4,11	0,988	<b>4.340,160</b>
<b>Mai</b>	31	44	3,65	0,988	<b>3.982,880</b>
<b>Junho</b>	30	44	3,36	0,988	<b>3.548,160</b>
<b>Julho</b>	31	44	3,54	0,988	<b>3.862,848</b>
<b>Agosto</b>	31	44	4,31	0,988	<b>4.703,072</b>
<b>Setembro</b>	30	44	3,80	0,988	<b>4.012,800</b>
<b>Outubro</b>	31	44	4,03	0,988	<b>4.397,536</b>
<b>Novembro</b>	30	44	4,60	0,988	<b>4.857,600</b>
<b>Dezembro</b>	31	44	4,79	0,988	<b>5.226,848</b>
<b>Média Mensal Produzida</b>					<b>4.473,040</b>

Fonte: Autoria própria (2023)

Levando em consideração a radiação solar do ano de 2023, tabela 2 mostra que a produção anual de energia será de aproximadamente 53,7 MWh/ano.

Gráfico 4 - Energia Mensal Produzida



Fonte: Autoria própria (2023)

Visando viabilidade econômica, qualidade do produto e durabilidade, foi escolhido um Kit no site da Aldo, que conta com um inversor solar da marca Growatt de 44.000 W para conversão de corrente contínua em alternada, 80 painéis de célula de silício monocristalino de 550 W, todos os conectores, cabos e estruturas, custando R\$ 87.519,00. Separadamente, o string box juntamente com os disjuntores e DPS's foi encontrado no valor de R\$ 1.300,00.

Segundo Greener (2023), os preços para o cliente em junho de 2023 apresentam queda de 17% em relação a janeiro de 2023.

Para se obter o valor total do projeto, faz-se uso da equação 9:

$$VT = 44.000 \times 2,84$$

$$VT = 124.960$$

O valor aproximado da mão de obra pode ser obtido através da equação 10:

$$Mo = 124.960 - 87.519$$

$$Mo = 37.441$$

Embasado no estudo feito pela Greener, chegou-se ao valor de mão de obra de R\$ 37.441,00.

Dessa forma, conclui-se que o preço final do projeto ON-GRID é de aproximadamente R\$ 124.960,00 com tudo incluso. Que corresponde a US\$ 24.992,00 (data de cotação 24/10/2023).

A análise econômica foi calculada conforme a equação 8.

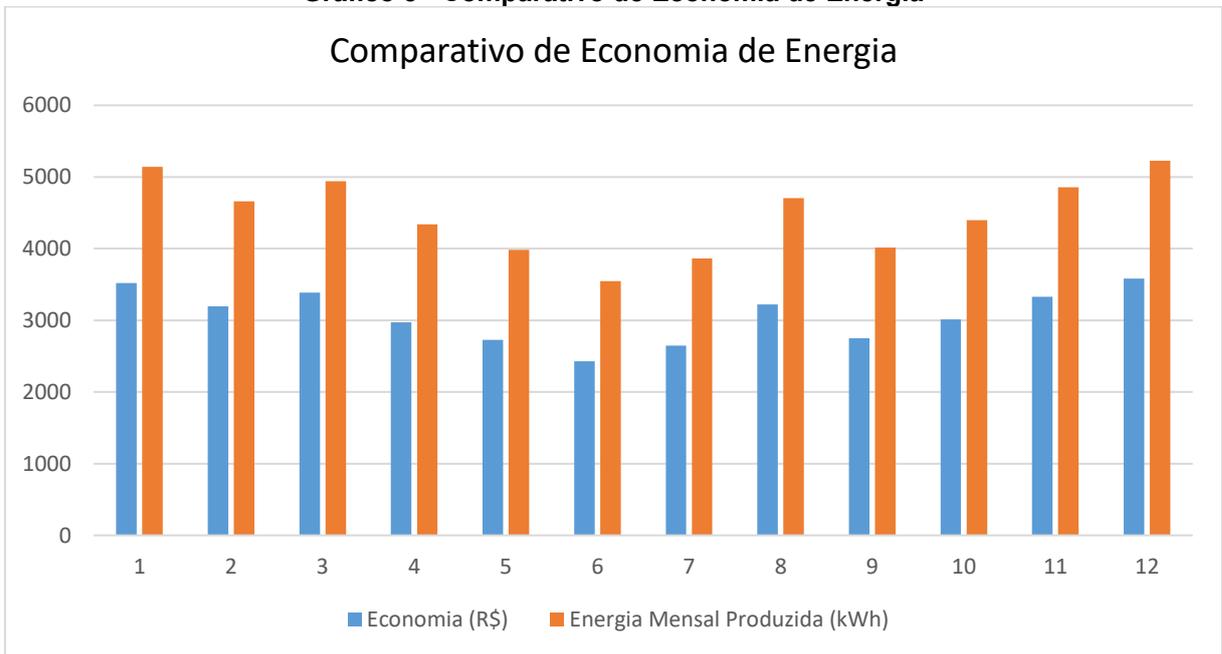
**Tabela 3 - Análise econômica**

<b>Energia Mensal Produzida (kWh)</b>	<b>Economia (R\$)</b>
5.139,552	3.521,16
4.661,888	3.193,90
4.943,136	3.386,59
4.340,160	2.973,49
3.982,880	2.728,71
3.548,160	2.430,88

3.862,848	2.646,47
4.703,072	3.222,12
4.012,800	2.749,21
4.397,536	3.012,80
4.857,600	3.328,00
5.226,848	3.580,97

Fonte: Autoria própria (2023)

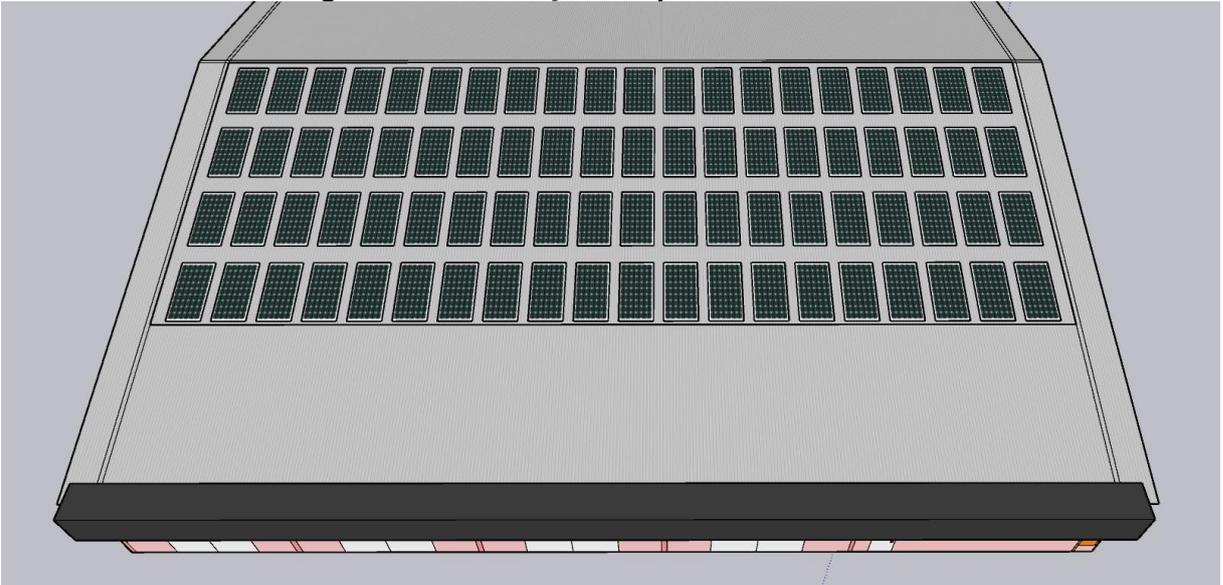
Gráfico 5 - Comparativo de Economia de Energia



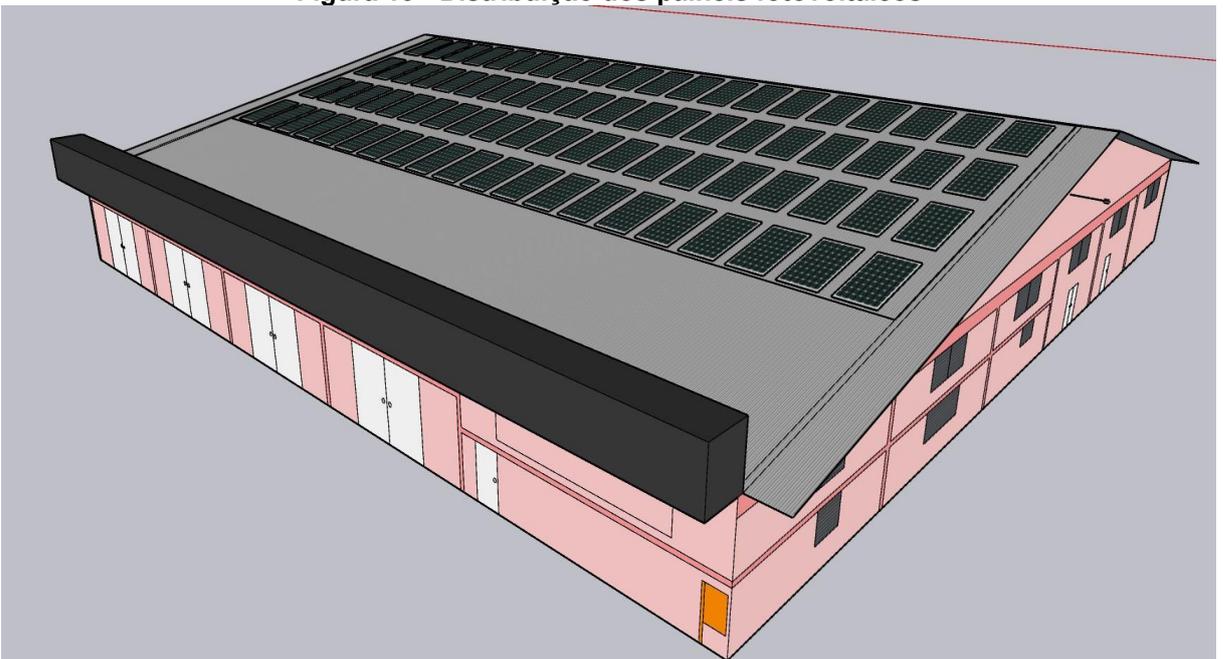
Fonte: Autoria própria (2023)

Com isso, conclui-se que em um ano haverá uma economia de aproximadamente R\$ 36.774,30. Como citado anteriormente, a instalação completa do sistema custa em torno de R\$ 124.960,00, dessa forma, o sistema se pagará em aproximadamente 3 anos e 5 meses. Após esse período, a empresa pagará apenas a tarifa mínima para manter a unidade consumidora ligada a rede.

Com o auxílio do software SketchUp, foi feita uma simulação de como irão ficar os painéis no teto da fábrica. Ressalta-se que, o desenho foi feito em escala baseado nas dimensões reais da fábrica e dos painéis.

**Figura 18 - Distribuição dos painéis fotovoltaicos**

Fonte: Autoria própria (2023)

**Figura 19 - Distribuição dos painéis fotovoltaicos**

Fonte: Autoria própria (2023)

A figura 18 ilustra os 80 painéis monocristalinos divididos em 4 fileiras (strings), com 20 módulos em cada. O espaçamento entre as fileiras é de 70 cm, de forma a facilitar a locomoção entre os painéis para futuras manutenções e limpezas.

## 7 CONCLUSÃO

Este trabalho propôs um estudo de análise de viabilidade técnica e econômica para a instalação de um sistema fotovoltaico em uma fábrica de primer, com intuito de gerar economia para a fábrica. Diante dos cálculos de dimensionamento realizados, e levando em conta a rentabilidade e o fato do Brasil ser um país tropical, conclui-se que o projeto possui viabilidade tanto técnica quanto econômica para a implantação do sistema na fábrica.

O investimento para execução do projeto é de aproximadamente R\$ 126.960,00 incluindo todos os acessórios, estruturas e mão de obra. A potência total instalada será de 32,7295 kWp distribuídas em 80 módulos. A capacidade de geração anual será de 53.7 MWh/ano, suprimindo a demanda da fábrica e gerando uma economia aproximadamente R\$ 36.774,30 por ano.

Em condições normais, levando em consideração a irradiação solar média mensal da cidade, o sistema se pagará em aproximadamente 3 anos e 5 meses. Porém, vale ressaltar que, nem sempre essa média de insolação será constante, dessa forma, esse tempo poderá sofrer alguma variação. Salienta-se que, a tarifa da empresa não será zerada, pois, a fábrica ainda terá que pagar a taxa mínima para manter a unidade consumidora ligada à rede da concessionária de energia (Celesc).

Assim sendo, conclui-se que a implantação de um sistema solar fotovoltaico é de total valia, tendo em vista a questão técnica, econômica e ambiental.

## REFERÊNCIAS

**AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL RESOLUÇÃO NORMATIVA ANEEL N° 1.059, DE 7 DE FEVEREIRO DE 2023.**

**ABNT, Norma Brasileira - Instalações Elétricas de Baixa Tensão NBR 5410:2004** versão corrigida, 2008. Systems, IET Generation, Transmission & Distribution, 2010.

**AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL RESOLUÇÃO NORMATIVA ANEEL N° 1.000, DE 7 DE DEZEMBRO DE 2021(\*).** [s.l: s.n.].

**BV. Quais são os passos para a instalação de energia solar?** Disponível em: <<https://www.bv.com.br/bv-inspira/parceiro-solar/instalacao-de-energia-solar>>. Acesso em: 14 nov de 2022.

**CANAL SOLAR. Entenda as especificações básicas dos componentes da string box.** Disponível em: <<https://canalsolar.com.br/entenda-as-especificacoes-basicas-string-box/>> Acesso em: 10 nov. 2023.

**Clima, condições meteorológicas e temperatura média por mês de São Bento do Sul (Brasil) - Weather Spark.** Disponível em: <<https://pt.weatherspark.com/y/29893/Clima-caracter%C3%ADstico-em-S%C3%A3o-Bento-do-Sul-Brasil-durante-o-ano>>. Acesso em: 20 nov. 2023.

**CLIMAINFO. Capacidade instalada de geração solar aumentou 30% no 1º semestre de 2022.** Disponível em: <<https://climainfo.org.br/2022/07/29/consumo-de-energia-solar-aumentou-30-no-1o-semester-de-2022/>>. Acesso em: 14 nov de 2022.

**“Conheça a Diferença Entre Placas Policristalinas E Monocristalinas.”** Energia Wise, 9 Aug. 2017. Disponível em: <<https://energiawise.com.br/conheca-diferenca-entre-placas-policristalinas-e-monocristalinas/>>. Acesso em: 14 nov de 2023.

**Controlador de Carga para Painel Solar.** Disponível em: <<https://www.mpptsolar.com/pt/controlador-de-carga-para-painel-solar.html>>. Acesso em: 05 out. 2023.

**CRESESB. Centro de referência para energia solar.** Disponível em <<http://www.cresesb.cepel.br/>>. Acesso em: 14 nov de 2022.

**CRESESB. Manual de Engenharia Para Sistemas Fotovoltaicos.** Disponível em: <[http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Manual\\_de\\_Engenharia\\_FV\\_2014.pdf](http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Manual_de_Engenharia_FV_2014.pdf)>. Acesso em: 10 nov de 2022.

**CRESESB. Energia solar fotovoltaica.** Disponível em: <[http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=com\\_content&lang=pt&cid=321](http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=com_content&lang=pt&cid=321)>. Acesso em: 10 nov de 2022.

**CRESESB. Potencial Solar.** Disponível em: <<http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=sundata>>. Acesso em: 10 nov de 2022.

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

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Matriz energética e elétrica**. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>>. Acesso em: 07 dez. 2022.

ECOBRAZIL. **Solar – Um Panorama**. Disponível em: <<https://ecobrazilenergy.com.br/site/2018/04/27/o-que-e-energia-solar/>>. Acesso em: 15 nov de 2022.

E4 Energias Renováveis. **Diagrama ON-GRID**. Disponível em: <<https://www.e4energiasrenovaveis.com.br/artigos/o-que-e-energia-solar>>. Acesso em: 13 dez de 2023.

Fadigas, E.A. F.A **Energia Solar Fotovoltaica: Fundamentos, Conversão e Viabilidade técnico-econômica**. Apostila Solar. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018.

**GERADOR DE ENERGIA SOLAR GROWATT ONDULADA ROMAGNOLE ALDO SOLAR ON GRID GF 44KWP JA DEEP BLUE MONO 550W MID 36KW 4MPPT TRIF 380V**. Disponível em: <<https://www.aldo.com.br/produto/183805-8/gerador-de-energia-solar-growatt-ondulada-romagnole-aldo-solar-on-grid-gf-44kwp-ja-deep-blue-mono-550w-mid-36kw-4mppt-trif-380v>>. Acesso em: 15 out. 2023.

**Google Maps**. Disponível em: <<https://www.google.com.br/maps/place/Primer+Brasil/@-26.2447653>>. Acesso em: 19 nov. 2023.

GREENVOLT. **O efeito fotovoltaico - O que é, como surgiu e suas aplicações**. Disponível em: <<https://greenvolt.com.br/o-efeito-fotovoltaico/>>. Acesso em: 15 out. 2023.

G1. **Energia solar se torna a terceira maior fonte da matriz elétrica brasileira**. Disponível em: <<https://g1.globo.com/jornal-da-globo/noticia/2022/07/20/energia-solar-se-torna-a-terceira-maior-fonte-da-matriz-eletrica-brasileira.ghtml>>. Acesso em: 14 nov de 2022.

G1. **Painéis solares fotovoltaicos proporcionam economia de até 95% na conta de luz**. Disponível em: <<https://g1.globo.com/sp/bauru-marilia/especial-publicitario/h-energy/noticia/2019/07/24/paineis-solares-fotovoltaicos-proporcionam-economia-de-ate-95percent-na-conta-de-luz.ghtml>>. Acesso em: 08 set de 2023.

**Inversor Solar Fotovoltaico**. Sol e Energia, 6 maio 2018. Disponível em: <<https://soleenergias.com.br/inversor-solar-fotovoltaico/>>. Acesso em: 15 set. 2023.

LIMA, A. A. et al. **Uma revisão dos princípios da conversão fotovoltaica de energia**. Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 42, p. e20190191, 2020.

**Matriz elétrica brasileira apresenta expansão de 2.746 MW no primeiro trimestre de 2023**. Disponível em: <<https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/matriz-eletrica-brasileira-apresenta-expansao-de-2-746-mw-no-primeiro-trimestre-de-2023>>. Acesso em: 17 out. 2023.

MOSTARO, L. **Licenciamento ambiental e energias renováveis**. Disponível em: <<https://ambisis.com.br/licenciamento-ambiental-e-energias-renovaveis/>>. Acesso em: 9 nov. 2023.

**On-Grid X Off Grid: Qual escolher?** Disponível em: <<https://confortec.com.br/on-grid-off-grid-recomendado/>>. Acesso em: 10 out. 2023.

PETRIN, Natalia. Radiação solar. Disponível em: <<https://www.estudopratico.com.br/radiacao-solar-insolacao-comprimento-de-onda-ecomposicao-espectral/>>. Acesso em: 14 out de 2023.

**Placa Solar Fotovoltaica: Tudo Sobre | Neosolar**. Disponível em: <<https://www.neosolar.com.br/aprenda/saiba-mais/placa-solar-fotovoltaica>>. Acesso em: 08 out de 2023.

PORTAL SOLAR. **Tipos de Sistemas Fotovoltaicos**. Disponível em: <<https://www.portalsolar.com.br/tipos-de-sistemas-fotovoltaicos>>. Acesso em: 08 dez de 2022.

PORTAL SOLAR. **Painel solar: o que é, como funciona e tipos**. Disponível em: <<https://www.portalsolar.com.br/painel-solar>>. Acesso em: 08 out de 2023.

PINHO, J. T.; GALDINO M. A.; **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos**. Disponível em: <[http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Manual\\_de\\_Engenharia\\_FV\\_2014.pdf](http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Manual_de_Engenharia_FV_2014.pdf)>. Acesso em: 14 set de 2023.

RUBERIA, C. M.; **Energia solar fotovoltaica e perspectivas de autonomia energética para o nordeste brasileiro**. 2009.

RIBEIRO, P. R.; **Dimensionamento de um sistema fotovoltaico residencial**. 2016.

SOLAR FONTE. **On Grid x Off Grid**. Disponível em: <<http://solarfonte.com.br/blog/grid-x-grid>>. Acesso em: 08 dez de 2022.

SOLAR VOLT. **Sting-box: o que é e como funciona**. Disponível em: <<https://www.solarvoltenergia.com.br/blog/string-box-o-que-e-e-como-funciona/>>. Acesso em: 10 dez de 2022.

VILLALVA, Marcelo Gradella. **Energia Solar Fotovoltaica – conceitos e aplicações**. 2 ed. São Paulo: Érica, 2015.

VANNI, Sílvia Regina. **Estudo de Viabilidade Econômica de Fontes Alternativas de Energia de uma Comunidade Típica da Região Nordeste do Brasil**. 2008. 162 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Técnico em Ciências área de Tecnologia Nuclear - Reatores, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

## ANEXO A – FOTOS DA FÁBRICA



Fonte: Google Maps (2023)



Fonte: Google Maps (2023)

**ANEXO B – CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DOS MÓDULOS FOTOVOLTAICOS**

DADOS ELÉTRICOS DOS MÓDULOS FOTOVOLTAICOS	
Fabricante	JA SOLAR
Modelo	JAM72S30-550/MR
Desempenho mínimo sob condições de teste padrão STC (1000 W/m <sup>2</sup> , 25 °C, espectro AM 1,5 G)	
Potência no ponto máximo de potência	550W
Tensão no ponto máximo de potência	41,96V
Corrente no ponto máximo de potência	13,11A
Tensão em Circuito Aberto	49,90V
Corrente de Curto Circuito	14A
Eficiência	21,3%
Tolerância de potencias positiva	0~+5W
CARACTERÍSTICAS DE TEMPERATURA	
Coeficiente de temperatura (Pmax)	-0.35% / °C
Coeficiente de temperatura (Voc)	-0.275% / °C
Coeficiente de temperatura (Isc)	0.045% / °C
Temperatura nominal da célula (NOCT)	45±2°C
Temperatura Admissível para o Módulo em Operação Contínua	-40 °C até +85 °C
Tensão máxima do sistema	1500 VDC
Fusível máximo	25A

**ANEXO C – CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DO INVERSOR**

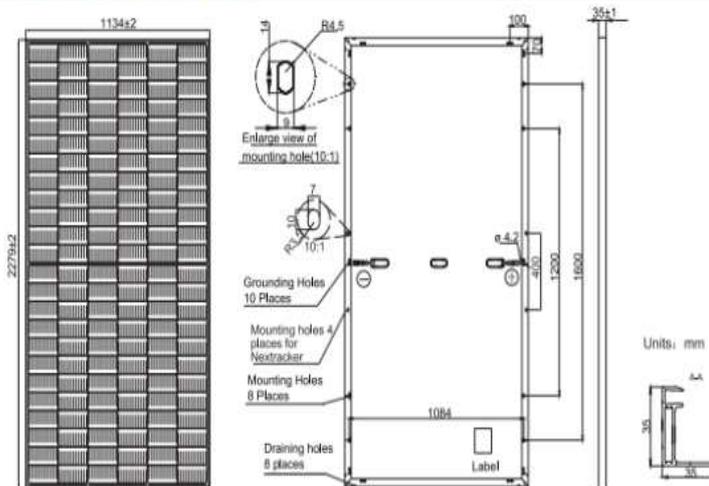
DADOS TÉCNICOS DO INVERSOR	
Fabricante	GROWATT
Modelo	MID 36KTL3-X
Tensão máxima de entrada	1100 VCC
Área de tensão MPP	180~1000 VCC
Tensão nominal de entrada	600 VCC
Corrente DC máxima por string	26 A / 32 A
Rastreadores de MPPT	4
Número de arranjos por MPPT	2
DADOS DE SAÍDA	
Potência nominal de saída	36 KW
Tensão nominal trifásico	220/380V (3NPE)
Frequência nominal	50/60 Hz
Corrente máx. de saída	60 A
Eficiência máxima	98.8%
THDi	< 3%

## ANEXO D – FOLHA DE DADOS DA PLACA FOTOVOLTAICA

JA SOLAR

JAM72S30 530-555/MR Series

## DIAGRAMA MECÂNICO



Remark: customized frame color and cable length available upon request

## ESPECIFICAÇÕES

Célula	Mono
Peso	28.6kg±3%
Dimensões	2278±2mm×1134±2mm×35±1mm
Seção transversal do cabo	4mm <sup>2</sup> (IEC) , 12 AWG(UL)
Nº de células	144(6×24)
Caixa de Junção	IP68, 3 diodos
Conector	QC 4,10(1000V) QC 4,10-35(1500V)
Comprimento do cabo (Incluindo Conector)	Porta-retrato: 300mm(+)/400mm(-); Paisegem: 1300mm(+)/1300mm(-)
Configuração da Embalagem	31pcs/Pallet 620pcs/40HQ Container

## PARAMÊTROS ELÉTRICOS NA STC

Tipo	JAM72S30 -530/MR	JAM72S30 -535/MR	JAM72S30 -540/MR	JAM72S30 -545/MR	JAM72S30 -550/MR	JAM72S30 -555/MR
Potência Máxima(Pmax) [W]	530	535	540	545	550	555
Tensão de Circuito Aberto(Voc) [V]	49.30	49.45	49.60	49.75	49.90	50.02
Tensão na Potência Máxima(Vmp) [V]	41.31	41.47	41.64	41.80	41.96	42.11
Corrente de Curto-circuito(Isc) [A]	13,72	13,79	13,86	13,93	14,00	14,07
Corrente na Potência Máxima(Imp) [A]	12,83	12,90	12,97	13,04	13,11	13,18
Eficiência do Módulo [%]	20,5	20,7	20,9	21,1	21,3	21,5
Tolerância de Potência	±5W					
Coeficiente de Temperatura da Isc( $\alpha_{Isc}$ )	+0.045%/°C					
Coeficiente de Temperatura da Voc( $\beta_{Voc}$ )	-0.275%/°C					
Coeficiente de Temperatura da Pmax( $\gamma_{Pmp}$ )	-0.350%/°C					
STC (Condições de Teste Padrão)	Irradiância 1000W/m <sup>2</sup> , temperatura das células 25°C, AM1.5G					

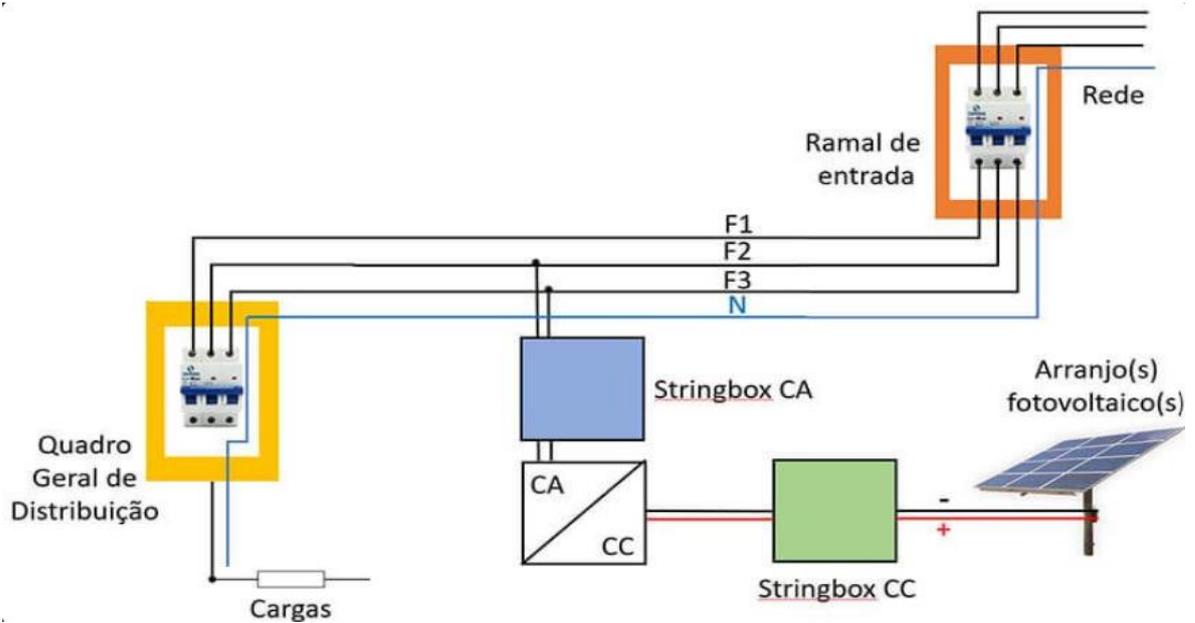
Fonte: JA solar

## ANEXO E – FOLHA DE DADOS DO INVERSOR

Ficha de dados	MID 36KTL3-X	
<b>Dados de entrada</b>		
Máxima potência fotovoltaica recomendada (para módulo STC)	54000W	
Máxima tensão CC	1100V	
Tensão de partida	250V	
Faixa de tensão MPPT/tensão nominal	600V	
Faixa de tensão MPPT	180-1000V	
Número de MPP trackers	4	
Número de Strings por MPP tracker	2	
Máxima corrente de entrada por MPP tracker	26A	
Máxima corrente de curto-circuito por MPP tracker	32A	

Fonte: Growatt

## ANEXO F – DIAGRAMA DO SISTEMA ON-GRID



Fonte: E4 Energias Renováveis