



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**  
**PROGRAMA DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**ROBSON NONATO OLIVEIRA DA SILVA**

**ANÁLISE DE VIABILIDADE DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO RESIDENCIAL**  
**NA CIDADE DE ARACATI - CE**

**FORTALEZA - CE**

**2023**

ROBSON NONATO OLIVEIRA DA SILVA

ANÁLISE DE VIABILIDADE DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO RESIDENCIAL NA  
CIDADE DE ARACATI - CE

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do grau de bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Raphael Amaral da Camara.

FORTALEZA - CE

2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Sistema de Bibliotecas

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

S583a Silva, Robson Nonato Oliveira da.  
Análise de viabilidade de um sistema fotovoltaico residencial na cidade de Aracati - CE / Robson Nonato Oliveira da Silva. – 2023.  
59 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Elétrica, Fortaleza, 2023.  
Orientação: Prof. Dr. Raphael Amaral da Câmara.

1. Transição energética. 2. Fontes alternativas de energia. 3. Sistema fotovoltaico. I. Título.  
CDD 621.3

---

ROBSON NONATO OLIVEIRA DA SILVA

ANÁLISE DE VIABILIDADE DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO RESIDENCIAL NA  
CIDADE DE ARACATI - CE

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao  
Curso de Graduação em Engenharia Elétrica do  
Centro de Tecnologia da Universidade Federal  
do Ceará, como requisito parcial à obtenção do  
grau de bacharel em Engenharia Elétrica.

Aprovada em: \_\_/\_\_/\_\_\_\_.

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Raphael Amaral da Camara (Orientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Ph.D. Fernando Luiz Marcelo Antunes  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Me. Gabriel Marçal da Cunha Pereira Carvalho  
Secretaria de Infraestrutura do Estado do Ceará (SEINFRA)

Aos meus pais, familiares e amigos.

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, pela superação de todos os desafios enfrentados na trajetória. Gostaria de agradecer a todos que contribuíram de alguma forma com minha graduação no curso de Engenharia Elétrica. Desde o início da formação em 2018, tive a oportunidade de conhecer inúmeras pessoas que de diversas formas agregaram na minha trajetória, às quais tenho infinda gratidão.

Aos meus pais, Marileine Monteiro e Francisco Teobaldo, que me auxiliaram de perto em todos os aspectos e me deram forças para ultrapassar as dificuldades que surgiram durante todo esse processo de formação acadêmica. Aos meus irmãos Vitória e Gustavo, pelos momentos compartilhados e pela vivência em família que foram essenciais para a construção do meu caráter e senso de responsabilidade.

Aos meus amigos de graduação Patrick Anderson, Pedro Henrique e Wanderson Martins pelas inúmeras e infundáveis noites de estudo, compartilhamento de aprendizado, momentos de descontração, bem como pequenas frustrações durante esse processo. Aos meus amigos Anderson, Jackson e Gabriel, com quem compartilhei apartamento e convivência durante grande parte do curso, além de terem feito parte da minha vida acadêmica desde o período do curso técnico em petroquímica.

A Tecsys Jr, empresa júnior do curso de engenharia elétrica, que me proporcionou logo no início do curso ensinamentos e vivências que ultrapassaram os muros da Universidade. A todos que fizeram parte do meu ciclo nesta empresa, em especial para Davi Gomes, com quem adquiri bastante conhecimento e uma boa amizade. Ao Gabriel Marçal, com quem obtive muitos aprendizados sobre o movimento empresa júnior, além de contribuir em algumas decisões no âmbito profissional.

Ao Prof. Fernando Antunes, pela disponibilidade em fazer parte da banca de avaliação deste trabalho, além de ter ministrado disciplinas de forma espetacular e interativa durante o desafiador período de isolamento social.

Ao meu orientador, Raphael Amaral, pela paciência, disponibilidade e compartilhamento de conhecimentos nas disciplinas ministradas, bem como na escrita e revisão deste trabalho.

## RESUMO

O contexto de transição energética vivenciado na atualidade impacta diariamente a sociedade moderna, sendo a redução de emissão dos gases do efeito estufa (GEE) um dos objetivos almejados. Portanto, visando uma renovação da matriz energética brasileira, bem como a diminuição de emissão dos GEEs, faz-se necessário a utilização de fontes alternativas de energia. Tendo em vista esses pontos, o presente trabalho possui o objetivo de detalhar o desenvolvimento de um sistema fotovoltaico para uma edificação residencial em Aracati-Ce, cidade que devida a localização no litoral cearense conta com altos níveis de radiação solar, tornando um local com grande potencial para produção de energia. A metodologia adotada foi a realização de um estudo de caso, onde todos os dados e informações levantados para o estudo desenvolvido foram determinados com base em documentos apresentados na pesquisa para ter parâmetros para o seu desenvolvimento e informações obtidas por sistemas de informação online como o Centro de Referência para Energia Solar e Eólica (CRESESB), normas técnicas, entre outras publicações e literaturas que auxiliaram o desenvolvimento do presente estudo. O projeto fotovoltaico desenvolvido tem potência instalada de 1,35kWp, com geração mensal de 197kWh, cerca de 0,18 toneladas de CO<sub>2</sub> evitados anualmente e um *payback* de aproximadamente 5 anos.

**Palavras-chave:** Transição energética. Fontes alternativas de energia. Sistema fotovoltaico.

## **ABSTRACT**

The energy transition context experienced today impacts modern society on a daily basis, with the reduction of greenhouse gas (GHG) emissions being one of the desired objectives. Therefore, with a view to renewing the Brazilian energy matrix, as well as reducing GHG emissions, it is necessary to use alternative energy sources. Bearing these points in mind, the present work aims to detail the development of a photovoltaic system for a residential building in Aracati-Ce, a city that, due to its location on the coast of Ceará, has high levels of solar radiation, making it a place with great potential for energy production. The methodology adopted was to carry out a case study, where all the data and information collected for the developed study were determined based on documents presented in the research to have parameters for its development and information obtained by online information systems such as the Centro of Reference for Solar and Wind Energy (CRESESB), technical standards, among other publications and literature that helped the development of this study. The photovoltaic project developed has an installed power of 1.35kWp, with monthly generation of 197kWh, around 0.18 tons of CO<sub>2</sub> avoided annually and a payback of approximately 5 years.

**Keywords:** Energy transition. Alternative energy sources. Photovoltaic system.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Comportamento da radiação solar, sobre a atmosfera terrestre. ....	16
Figura 2 – Efeito fotovoltaico.....	19
Figura 3 – Esquema de funcionamento do sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica .....	20
Figura 4 – Sistema fotovoltaico off-grid. ....	21
Figura 5 – Sistema em conjunto com os módulos fotovoltaicos. ....	28
Figura 6 - Município de Aracati. ....	42
Figura 7 - Detalhe geométrico e dimensional do módulo CS3W-450MS.....	44
Figura 8 - Modelo de inversor SG2K-S.....	47
Figura 9 - Modelo de micro inversor SUN2000G3 .....	48
Figura 10 - Estrutura de suporte para os módulos FV.....	49

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Eficiência energética de acordo com tecnologia. ....	29
Tabela 2 - Ângulo de inclinação.....	38
Tabela 3 - Consumo mensal da residência no período de um ano. ....	40
Tabela 4 - Irradiação solar diária média mensal para a cidade de Aracati.....	43
Tabela 5 - Detalhes específicos da Canadian Solar sobre os módulos.....	44
Tabela 6 - Dados do sistema fotovoltaico dimensionado.....	46
Tabela 7 - Características técnicas do inversor SG2K-S.....	47
Tabela 8 - Características técnicas do inversor SUN2000G3 .....	48
Tabela 9 - Orçamento referente ao sistema fotovoltaico utilizando inversor.....	50
Tabela 10 - Orçamento referente ao sistema fotovoltaico utilizando micro inversor .....	50

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	10
1.1	<b>Objetivos.....</b>	11
1.1.1	<i>Objetivo Geral.....</i>	11
1.1.2	<i>Objetivos Específicos.....</i>	11
1.2	<b>Justificativa.....</b>	11
1.3	<b>Estrutura do Trabalho.....</b>	12
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	14
2.1	<b>Energia Solar.....</b>	14
2.2	<b>Geração distribuída no Brasil.....</b>	16
2.3	<b>Efeito Fotovoltaico.....</b>	17
2.4	<b>Tipos de sistemas fotovoltaicos.....</b>	19
2.4.1	<i>Classificação dos Sistemas Fotovoltaicos.....</i>	22
2.5	<b>Equipamentos dos Sistemas Fotovoltaicos.....</b>	25
2.5.1	<i>Módulos Fotovoltaicos.....</i>	26
2.5.2	<i>Inversores Fotovoltaicos.....</i>	29
2.5.3	<i>Estruturas de Fixação.....</i>	30
2.5.4	<i>Dispositivos de Proteção.....</i>	31
2.5.5	<i>Monitoramento Fotovoltaico.....</i>	32
2.6	<b>Legislação Referente à Energia Solar.....</b>	33
2.7	<b>Vantagens e Desvantagens da Energia Solar.....</b>	35
3	METODOLOGIA.....	37
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	40
4.1	<b>Projeto do Sistema Fotovoltaico.....</b>	41
4.1.1	<i>Dados Geográficos.....</i>	42
4.1.2	<i>Módulo Fotovoltaico.....</i>	43
4.1.3	<i>Dimensionamento do Sistema Solar.....</i>	45
4.1.4	<i>Inversor.....</i>	46
4.1.5	<i>Estrutura Portante dos Módulos.....</i>	49
4.2	<b>Orçamento e Análise dos Custos do Projeto.....</b>	49
4.2.1	<i>Análise de Viabilidade Financeira.....</i>	51
5	CONCLUSÕES.....	53

<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>54</b>
-------------------------	-----------

## 1 INTRODUÇÃO

Na atualidade, tem-se observado um crescente interesse em todo o mundo pela utilização de sistemas fotovoltaicos em residências. A energia solar é uma fonte de energia limpa, renovável e sustentável, e a tecnologia fotovoltaica vem evoluindo rapidamente, tornando-se cada vez mais acessível e eficiente. A instalação de painéis solares em residências tem como objetivo principal a redução das contas de energia elétrica, além de contribuir para a redução das emissões de gases de efeito estufa (EPE, 2021).

A utilização de sistemas fotovoltaicos em residências pode trazer diversos benefícios, tais como a redução dos custos com energia elétrica, a independência em relação à rede elétrica convencional e a contribuição para a sustentabilidade ambiental. De acordo com Braga et al. (2020), a instalação de um sistema fotovoltaico pode gerar economia de até 95% na conta de energia elétrica, dependendo do tamanho do sistema e da taxa de insolação da região. Além disso, a produção de energia solar permite que os consumidores gerem sua própria energia, tornando-os independentes em relação à rede elétrica convencional nas instalações do tipo off-grid.

A instalação de sistemas fotovoltaicos em residências também pode contribuir para a redução das emissões de gases de efeito estufa. Segundo Farias et al. (2020), a geração de energia elétrica a partir de fontes não renováveis é responsável por grande parte das emissões de gases de efeito estufa, enquanto a energia solar é uma fonte limpa e renovável, que não emite gases poluentes. Assim, a utilização de sistemas fotovoltaicos em residências pode contribuir para a redução das emissões de gases de efeito estufa, auxiliando no combate às mudanças climáticas.

Além dos benefícios já citados, a utilização de sistemas fotovoltaicos em residências também pode aumentar o valor dos imóveis. De acordo com Oliveira et al. (2018), a instalação de um sistema fotovoltaico em uma residência pode valorizar o imóvel em até 15%, tornando-o mais atrativo para os compradores e investidores. Isso ocorre devido à valorização da sustentabilidade e da eficiência energética na atualidade, o que tem despertado o interesse de muitos consumidores por imóveis que possuem sistemas fotovoltaicos instalados.

Dessa forma, a utilização de sistemas fotovoltaicos em residências pode trazer diversos benefícios, tais como a redução dos custos com energia elétrica, a contribuição para a sustentabilidade ambiental e a valorização dos imóveis. Com a evolução da tecnologia

fotovoltaica e a crescente preocupação com a sustentabilidade, a tendência é que cada vez mais pessoas adotem a energia solar como fonte de energia em suas residências.

## **1.1 Objetivos**

A seguir, serão apresentados o objetivo geral e os objetivos específicos da pesquisa. O objetivo geral consiste no dimensionamento de um sistema fotovoltaico (FV). Já os objetivos específicos abordam aspectos relativos ao desenvolvimento do projeto e análise dos equipamentos a serem utilizados.

### ***1.1.1 Objetivo Geral***

O objetivo geral desta pesquisa consiste em dimensionar um sistema fotovoltaico para uma residência na cidade de Aracati-Ce.

### ***1.1.2 Objetivos Específicos***

Os objetivos específicos são:

- a) Demonstrar os aspectos de consumo energético e técnicos da residência;
- b) Apresentar o desenvolvimento de um sistema fotovoltaico para atender a demanda da residência, abordando a escolha dos módulos a serem utilizados, além disso fazer uma análise comparativa entre o uso de inversor ou micro inversor;
- c) Modelagem financeira, de forma a analisar a viabilidade técnica e financeira da aplicação do sistema de geração fotovoltaica à residência.

## **1.2 Justificativa**

A pesquisa sobre energia solar e sistemas fotovoltaicos utilizados em residências é relevante por diversas razões (GÖRANSSON et al., 2019). Em primeiro lugar, a energia solar é uma fonte de energia renovável, limpa e sustentável, o que significa que sua utilização contribui para a redução das emissões de gases de efeito estufa e para a mitigação dos impactos ambientais causados pela geração de energia a partir de fontes não renováveis (IRENA, 2020).

Além disso, com a crescente demanda por energia elétrica, especialmente nas áreas urbanas, a utilização de sistemas fotovoltaicos em residências pode contribuir para a redução da dependência da rede elétrica convencional, o que pode levar a uma maior independência energética e a uma redução nos custos de eletricidade a longo prazo (IEA, 2021).

Outra justificativa para a pesquisa sobre energia solar e sistemas fotovoltaicos em residências é a necessidade de avaliar o desempenho desses sistemas em diferentes condições climáticas e geográficas. Isso pode ajudar a identificar os principais desafios para a adoção dessas tecnologias em diferentes regiões e a desenvolver estratégias para aumentar sua eficiência e confiabilidade (SPERIOSU, 2018).

Por fim, a pesquisa sobre energia solar e sistemas fotovoltaicos em residências pode contribuir para o desenvolvimento de políticas públicas e incentivos que visam promover a utilização de fontes renováveis de energia, incluindo a energia solar. Isso pode ter impactos significativos na redução das emissões de gases de efeito estufa, no desenvolvimento sustentável e na melhoria da qualidade de vida das pessoas (ABSOLAR, 2021).

### **1.3 Estrutura do Trabalho**

A estrutura de trabalho adotada neste estudo compreende uma organização lógica e sequencial, subdividida nos seguintes tópicos:

- 1) Introdução: Este segmento delinea o contexto e a relevância da pesquisa, apresentando o problema em questão, justificativa, objetivos e a estrutura geral do trabalho.
- 2) Referencial Teórico: Nesta seção, é conduzida uma revisão da literatura pertinente à temática, visando consolidar o embasamento teórico que sustenta a pesquisa. Conceitos-chave e teorias relevantes são analisados e integrados de maneira coerente.
- 3) Metodologia: Aqui é detalhada a abordagem metodológica adotada para a condução da pesquisa. Apresentando todo o processo de levantamento, coleta e análise dos dados, descrevendo o processo realizado para desenvolvimento da pesquisa.
- 4) Resultados e Discussões: Esta seção apresenta os resultados obtidos por meio da análise dos dados coletados. Os achados são discutidos em relação aos objetivos específicos, e as implicações práticas e teóricas são minuciosamente exploradas.

- 5) Conclusões: A última parte do trabalho sintetiza as descobertas da pesquisa, destacando as contribuições para a área de estudo, limitações do estudo e sugerindo direções para pesquisas futuras. Este segmento encerra o trabalho de forma concisa e reflexiva.



## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

No Referencial Teórico, serão abordados os fundamentos teóricos da energia solar, explorando conceitos como a física da radiação solar, tecnologias fotovoltaicas, armazenamento e distribuição de energia solar. Essa análise da literatura busca estabelecer uma base teórica sólida para compreender os princípios que norteiam a eficácia da energia solar, contribuindo para o avanço do conhecimento nessa área.

### 2.1 Energia Solar

O sol irradia uma enorme quantidade de energia, chamada de energia solar. Ele irradia mais energia em um dia do que o mundo usa em um ano. Esta energia vem de dentro do próprio sol (SALAMONI, 2009).

Como a maioria das estrelas, o sol é uma grande bola de gás composta principalmente de hidrogênio e gás hélio. O sol produz energia em seu núcleo interno em um processo chamado fusão nuclear. A energia do sol leva pouco mais de oito minutos para percorrer os 93 milhões de quilômetros até a Terra. A energia solar viaja à velocidade da luz, ou seja, 186.000 milhas por segundo, ou seja,  $3,0 \times 10^8$  metros por segundo. Apenas uma pequena parte da energia radiante visível (luz) que o sol emite para o espaço chega à Terra, mas isso é mais do que suficiente para suprir todas as nossas necessidades energéticas.

As pessoas utilizam a energia solar para aquecer edifícios e água e para gerar eletricidade e assim, essa energia se tornou responsável por uma porcentagem da energia utilizada principalmente pelas residências e para gerar eletricidade (LORENZO; ZILLES, 1994).

Segundo Rocha e Mariano (2017), a energia solar é considerada uma das formas mais eficientes de aproveitamento das energias renováveis e sua utilização vem crescendo significativamente nos últimos anos em todo o mundo. Além disso, a instalação de sistemas fotovoltaicos pode contribuir para a redução das emissões de gases de efeito estufa e para a mitigação dos impactos ambientais causados pela produção de energia elétrica a partir de fontes fósseis.

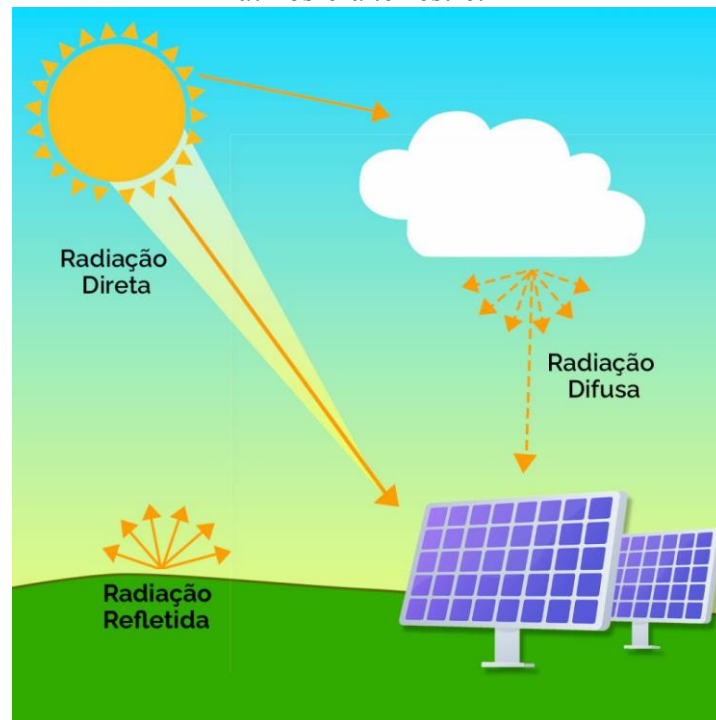
A tecnologia dos painéis solares fotovoltaicos tem evoluído significativamente nos últimos anos, tornando-se cada vez mais acessível e eficiente. Segundo a Agência Internacional de Energia (IEA, 2021), a eficiência dos painéis solares fotovoltaicos aumentou em cerca de 50% nos últimos dez anos, tornando-se uma alternativa cada vez mais competitiva em relação

às fontes de energia convencionais. Além disso, a pesquisa e desenvolvimento de novas tecnologias, como os painéis solares flexíveis e as células solares de terceira geração, têm o potencial de tornar a energia solar ainda mais eficiente e acessível no futuro.

Embora a energia solar tenha se tornado uma alternativa cada vez mais popular e acessível, ainda existem alguns desafios a serem enfrentados para a sua ampla adoção. Segundo Göransson et al. (2019), um dos principais desafios é a necessidade de armazenamento de energia para períodos de baixa insolação, o que pode ser solucionado com o uso de baterias e outras tecnologias de armazenamento. Além disso, a expansão da geração distribuída de energia solar pode apresentar desafios regulatórios e técnicos, como a integração dos sistemas fotovoltaicos à rede elétrica existente. No entanto, com políticas públicas e incentivos adequados, esses desafios podem ser superados e a energia solar pode se tornar uma das principais fontes de energia no mundo.

Dessa forma, se verificou o funcionamento e comportamento da radiação solar sobre o planeta para o seu uso como sistema de energia. À medida que a radiação solar penetra na atmosfera, ela se esgota por absorção e dispersão. Nem toda a radiação dispersa se perde, já que parte dela eventualmente chega à superfície da terra sob a forma de radiação difusa. O termo, radiação difusa é usado da forma usual para denotar esta radiação de comprimento de onda curto que vem de todas as partes do céu. Deve ser claramente distinguida da radiação térmica atmosférica que, embora também difusa na natureza, é de comprimentos de onda muito mais longos (ACKERMANN; ANDERSSON; SÖDER, 2001). A Figura 1 demonstra o comportamento da radiação solar, sobre a atmosfera terrestre.

Figura 1 – Comportamento da radiação solar, sobre a atmosfera terrestre.



Fonte: Pinho e Galdino (2014).

## 2.2 Geração distribuída no Brasil

A energia solar começou a ser utilizada no Brasil na década de 1990, quando o país enfrentou uma crise energética e precisou buscar fontes alternativas de energia. O primeiro sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica do país foi instalado em 1997 no Laboratório de Energia Solar Fotovoltaica da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). O sistema completou 26 anos de operação ininterrupta no ano de 2023. O sistema conta com uma potência instalada de 2kWp, fixado em uma área total de 40m<sup>2</sup>.

Nos anos seguintes, a energia solar no Brasil foi utilizada principalmente em sistemas isolados, como em comunidades rurais e em instalações remotas. Segundo a Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2021), entre 1999 e 2009 foram instalados cerca de 7 mil sistemas fotovoltaicos isolados no país, totalizando uma capacidade instalada de 14 MWp.

Nos últimos anos, a energia solar no Brasil tem experimentado um crescimento significativo, impulsionado por políticas públicas de incentivo e pela queda no custo da tecnologia dos painéis solares fotovoltaicos. Segundo a ABSOLAR (2021), a capacidade instalada de energia solar no Brasil cresceu de cerca de 8 MWp em 2012 para mais de 14 GWp em 2021. Além disso, a energia solar é hoje uma das fontes de energia renovável mais

competitivas em termos de custo no Brasil, o que tem contribuído para a sua ampla adoção em todo o país.

O governo brasileiro tem adotado diversas medidas para incentivar o uso da energia solar no país, como a criação do Programa de Desenvolvimento da Geração Distribuída de Energia Elétrica (ProGD) em 2012, a regulamentação da geração distribuída pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) em 2015 e recentemente a aprovação da Lei nº 14.300/2022. Segundo a EPE (2021), essas medidas têm contribuído para a expansão da energia solar no Brasil, especialmente na geração distribuída, que permite que consumidores instalem painéis solares em suas próprias residências e empresas e gerem sua própria energia.

Nos últimos anos, a energia solar tem se tornado cada vez mais popular em todo o mundo, impulsionada por políticas públicas de incentivo e pela queda no custo da tecnologia dos painéis solares fotovoltaicos. Segundo a Agência Internacional de Energia Renovável (IRENA, 2020), a capacidade instalada de energia solar no mundo cresceu de 25 gigawatts em 2010 para mais de 760 gigawatts em 2020. Além disso, a energia solar é hoje uma das fontes de energia renovável mais competitivas em termos de custo, o que tem contribuído para a sua ampla adoção em diversos países.

A utilização da energia solar no Brasil tem um grande potencial devido à sua localização geográfica privilegiada, com alta incidência solar em grande parte do território. De acordo com o relatório da Agência Internacional de Energia Renovável (IRENA, 2020), o país tem uma das maiores capacidades de geração de energia solar do mundo. Além disso, a expansão da geração distribuída de energia solar tem se tornado uma realidade no país, com incentivos fiscais e linhas de financiamento disponíveis para a instalação de sistemas fotovoltaicos em residências e empresas.

### **2.3 Efeito Fotovoltaico**

O efeito fotovoltaico é um fenômeno físico que consiste na conversão direta da luz solar em energia elétrica. Segundo Speriosu (2018), quando a luz solar incide sobre um material semicondutor, como o silício, ocorre a excitação dos elétrons em sua estrutura, gerando uma corrente elétrica que pode ser utilizada como fonte de energia.

O efeito fotovoltaico foi descoberto em 1839 pelo físico francês Alexandre-Edmond Becquerel, que observou que materiais como o selênio produziam eletricidade quando expostos à luz solar. Segundo os autores García-Rodríguez e Jaramillo-Martínez (2021), a

descoberta de Becquerel foi um marco importante na história da energia solar e abriu caminho para o desenvolvimento da tecnologia dos painéis solares fotovoltaicos.

O funcionamento dos painéis solares fotovoltaicos é baseado no efeito fotovoltaico. Segundo a Agência Internacional de Energia (IEA, 2021), os painéis solares são compostos por células fotovoltaicas que contêm materiais semicondutores, como o silício, que são capazes de gerar eletricidade quando expostos à luz solar. A corrente elétrica gerada pelas células é coletada pelos fios condutores e pode ser usada diretamente ou armazenada em baterias para uso posterior.

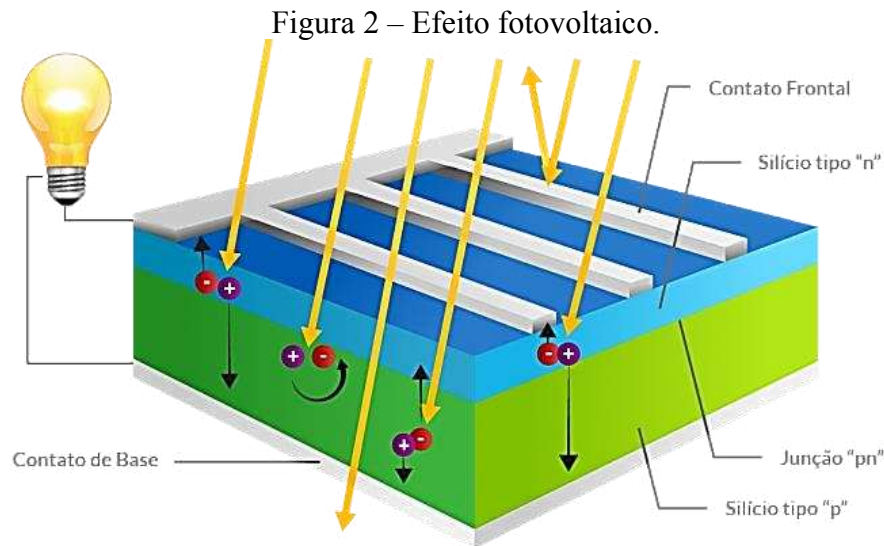
A eficiência das células solares, ou seja, a quantidade de energia elétrica gerada a partir da energia luminosa que incide sobre elas, tem evoluído ao longo dos anos, tornando a energia solar fotovoltaica cada vez mais competitiva em relação às fontes tradicionais de energia elétrica. De acordo com a Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (2021), a eficiência das células solares comerciais atuais varia entre 15% e 23%.

De acordo com a Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (2021), o Brasil é um dos países com maior potencial para a geração de energia solar fotovoltaica do mundo, tendo um território com alta incidência de luz solar e condições climáticas favoráveis. A utilização da energia solar no país tem crescido nos últimos anos, impulsionada pela redução dos custos dos equipamentos e pela ampliação do acesso ao crédito para a instalação de sistemas solares fotovoltaicos.

A eletricidade é produzida quando a energia radiante do sol atinge a célula solar, fazendo com que os elétrons se movimentem. A ação dos elétrons inicia uma corrente elétrica. A conversão da luz solar em eletricidade ocorre silenciosa e instantaneamente. Em comparação com outras formas de produzir eletricidade, os sistemas fotovoltaicos são caros e muitos painéis são necessários para igualar a eletricidade gerada em outros tipos de usinas (JANNUZZI, 2009).

Quando a luz é absorvida pela matéria, os fótons são entregues para excitar os elétrons a estados de energia mais elevados dentro do material. Particularmente, isto ocorre quando a energia dos fótons que compõem a luz é maior do que a folga da banda isolada do semicondutor. Mas os elétrons excitados relaxam rapidamente de volta ao seu estado original ou de terra. Em um dispositivo fotovoltaico, há uma assimetria embutida que puxa os elétrons excitados para longe antes que eles possam relaxar, e os alimenta em um circuito externo. A energia extra dos elétrons excitados gera uma diferença potencial ou força motriz dos elétrons. Esta força impulsiona os elétrons através de uma carga no circuito externo para fazer o trabalho elétrico e gerar eletricidade, sendo determinado como o efeito fotovoltaico (LISITA JÚNIOR, 2005).

Esse funcionamento se dá através da célula solar, que é o bloco básico de construção da energia solar fotovoltaica. A célula pode ser considerada como um dispositivo de dois terminais que conduz como um diodo no escuro e gera uma fototensão quando carregada pelo sol. Quando a junção é iluminada, um fluxo de corrente líquida ocorre em um condutor externo que liga as regiões tipo p e tipo n (LISITA JÚNIOR, 2005). A Figura 2 ilustra a representação do efeito fotovoltaico.



Fonte: Câmara (2011).

## 2.4 Tipos de sistema fotovoltaicos

Existem basicamente três tipos de sistemas de energia solar através dos quais a eletricidade pode ser gerada. Estes incluem: 1. *On-grid*; 2. *Off-grid*; 3. Híbrido. No caso da energia elétrica que é obtida através da célula solar *On-grid* (Figura 3). Uma corrente alternada é usada para alimentar a maioria dos aparelhos. A corrente alternada é obtida através de um inversor que flui através do medidor elétrico que alimenta os aparelhos. Se o sistema solar produzir mais do que a energia necessária, o excesso de eletricidade é enviado para a rede da concessionária, gerando créditos de energia, os quais são computados pelo medidor bidirecional. Durante a noite ou quando o sistema de energia solar não está em condições adequadas de produção, a eletricidade pode ser usada da rede elétrica (MARINOSKI; SALAMONI; RÜTHER, 2004).

Figura 3 – Esquema de funcionamento do sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica



Fonte: Camargo (2017).

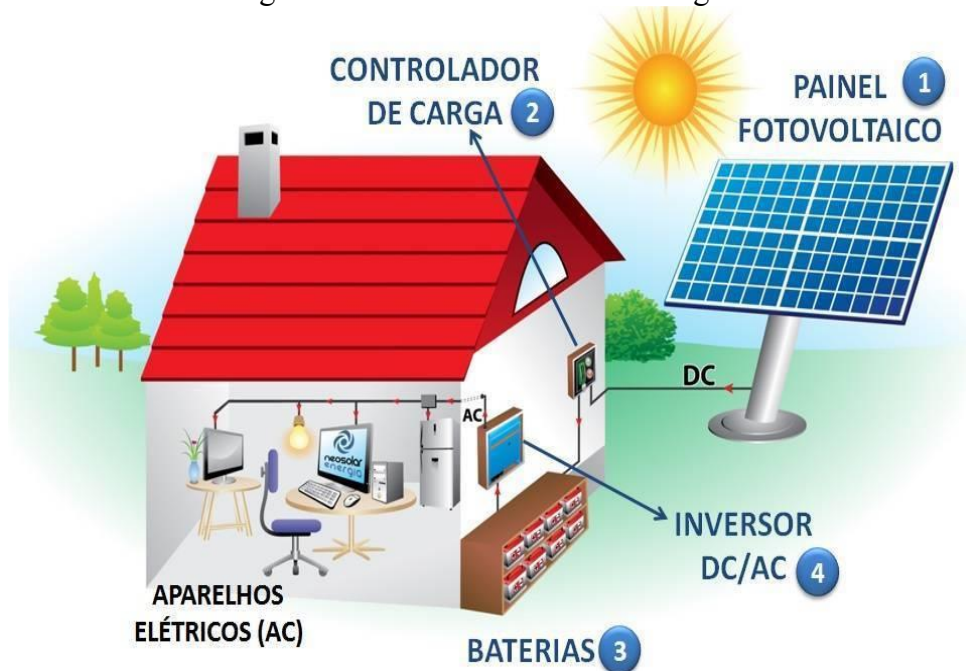
Os sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica são aqueles que produzem energia elétrica para ser utilizada na própria instalação e o excedente é injetado na rede elétrica, gerando créditos para o proprietário do sistema. Conforme Almeida et al. (2015), esses sistemas são indicados para locais com demanda de energia elétrica elevada e tarifas de energia elétrica elevadas.

Já os sistemas fotovoltaicos isolados são aqueles que não estão conectados à rede elétrica e funcionam de forma independente, armazenando a energia gerada em baterias para ser utilizada quando necessário. Oliveira et al. (2020) explicam que esses sistemas são utilizados em locais remotos, onde não há acesso à rede elétrica ou o custo de conexão é muito elevado.

Os sistemas fotovoltaicos são compostos basicamente por painéis solares, inversores, controladores de carga e baterias, no caso dos sistemas isolados. Conforme Santana e Silva (2017), os painéis solares são responsáveis pela conversão da luz solar em energia elétrica, os inversores transformam a energia elétrica em corrente alternada, os controladores de carga regulam a carga das baterias e as baterias armazenam a energia gerada para uso posterior.

No sistema fotovoltaico off-grid (Figura 4), a bateria é utilizada para armazenar a energia produzida em vez da conexão com a rede elétrica. A energia solar fora da rede utiliza minimamente a eletricidade que vem da rede. Ela consiste de célula solar, inversor e um banco de baterias se necessário, um gerador também pode ser usado para backup de energia. A conversão da luz solar em eletricidade é feita através das células solares e esta corrente contínua é convertida em corrente alternada usando um inversor. Depois de fornecer a eletricidade aos dispositivos, se houver algum excesso de eletricidade que seja deixado de fora, ele é armazenado nas baterias que atuam como um backup quando não há suporte de energia solar. Este sistema é mais vantajoso para as pessoas que vivem em áreas remotas onde não há acessibilidade à rede pública (PEREIRA; GONÇALVES, 2008).

Figura 4 – Sistema fotovoltaico off-grid.



Fonte: Camargo (2017).

O híbrido é a amálgama de sistemas de energia solar *on-grid* e *off-grid*. O armazenamento de energia através de baterias para uso em qualquer momento, sem consumi-la da rede elétrica, torna este sistema conveniente de usar e reduz o custo da eletricidade. Durante o dia, a energia solar é convertida em eletricidade. Qualquer quantidade em excesso será armazenada nas baterias, o que é semelhante ao sistema *off-grid*. Caso haja excesso de energia armazenada, ela é alimentada de volta à rede elétrica, semelhante à energia solar *on-grid*. Quando não há suporte de energia solar *on-grid*, a energia pode ser usada a partir das baterias. Da mesma forma, quando não há suporte suficiente de bateria e não há energia solar, um fluxo



ininterrupto de eletricidade pode ser obtido da rede elétrica e a bateria também pode ser carregada (PEREIRA; GONÇALVES, 2008).

#### ***2.4.1 Classificação dos Sistemas Fotovoltaicos***

Os sistemas conectados à rede são sistemas fotovoltaicos que se conectam diretamente à rede elétrica da concessionária de energia. Estes têm como principal vantagem a possibilidade de gerar energia elétrica em excesso e, assim, fornecê-la de volta à rede. De acordo com Souza et al. (2015), os sistemas conectados à rede são compostos por um inversor, que converte a corrente contínua gerada pelos painéis solares em corrente alternada, permitindo que a energia seja distribuída na rede elétrica da concessionária. Além disso, esses sistemas também contam com medidores bidirecionais, que permitem que a energia fornecida à rede seja contabilizada e posteriormente compensada na conta de luz do consumidor.

Segundo Oliveira et al. (2019), a regulamentação da geração distribuída no Brasil, por meio da Resolução Normativa (REN) nº 482/2012 da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), foi um marco importante para o crescimento dos sistemas conectados à rede no país. Essa resolução estabeleceu as regras para a instalação de sistemas fotovoltaicos conectados à rede e a compensação da energia excedente gerada pelos consumidores na conta de luz. No entanto, por meio da Resolução Normativa nº 1059/2023 da ANEEL, a REN 482/2012 foi revogada em sua totalidade, além de trazer uma série de correções da REN nº 1000/2021.

Além disso, sistemas conectados à rede podem ser benéficos para a rede elétrica como um todo. De acordo com Garcia et al. (2018), a geração distribuída pode reduzir a demanda máxima de energia elétrica e, conseqüentemente, diminuir a necessidade de investimentos em infraestrutura por parte das concessionárias. Além disso, a geração distribuída pode contribuir para a redução de perdas elétricas na rede, já que a energia é gerada próxima ao local de consumo.

Sistemas fotovoltaicos isolados são utilizados em locais onde não há disponibilidade de rede elétrica, como em áreas remotas ou em propriedades rurais distantes. Esses sistemas são projetados para atender a demanda energética do local de forma autossuficiente, sem a necessidade de conexão com a rede elétrica convencional (SPERIOSU, 2018).

De acordo com Rüter et al. (2018), os sistemas isolados podem ser classificados em duas categorias: sistemas autônomos de pequena escala e sistemas híbridos. Os sistemas

autônomos de pequena escala são sistemas que utilizam apenas a energia solar como fonte de energia. Já os sistemas híbridos combinam diferentes fontes de energia, como a energia solar e a energia eólica ou a energia solar e um gerador a diesel, por exemplo.

Segundo Pinho (2015), a escolha do sistema isolado mais adequado depende das características do local e da demanda energética. Além disso, o dimensionamento adequado do sistema é fundamental para garantir sua eficiência e confiabilidade. É necessário levar em conta a energia consumida no local, a capacidade de armazenamento de energia das baterias e a disponibilidade de energia solar na região.

De acordo com Krenzinger et al. (2021), os sistemas fotovoltaicos isolados apresentam vantagens em relação aos sistemas convencionais conectados à rede, como a independência da rede elétrica, a redução de perdas de energia na transmissão e distribuição de energia, e a possibilidade de serem instalados em áreas remotas. No entanto, os sistemas isolados também apresentam desafios, como a necessidade de dimensionamento adequado do sistema e a manutenção regular das baterias. Em resumo, os sistemas fotovoltaicos isolados são uma opção viável para locais sem acesso à rede elétrica convencional. O dimensionamento adequado do sistema e a escolha correta do tipo de sistema são fundamentais para garantir sua eficiência e confiabilidade.

Sistemas híbridos de energia renovável têm se tornado uma alternativa cada vez mais viável e popular em áreas remotas ou de difícil acesso à rede elétrica. Segundo Rütter et al. (2018), os sistemas híbridos combinam diferentes fontes de energia renovável para fornecer energia elétrica estável e confiável. Geralmente, esses sistemas combinam a energia solar fotovoltaica com outras fontes, como energia eólica, hidráulica, geotérmica ou biomassa.

De acordo com Krenzinger et al. (2021), os sistemas híbridos têm a vantagem de serem capazes de fornecer energia elétrica de forma mais constante e estável, mesmo em situações de baixa irradiação solar ou ventos fracos. Além disso, esses sistemas podem ser dimensionados de acordo com a demanda energética específica de cada local, o que ajuda a evitar desperdícios de energia e reduzir custos.

Segundo Pinho (2015), outra vantagem dos sistemas híbridos é a possibilidade de armazenar energia elétrica em baterias ou outros dispositivos de armazenamento para uso posterior. Isso permite que a energia seja utilizada durante a noite ou em períodos de pouca irradiação solar, por exemplo.

No entanto, como aponta Oliveira et al. (2019), a instalação e manutenção de sistemas híbridos de energia renovável podem ser mais complexas do que sistemas solares fotovoltaicos isolados, o que pode representar um desafio para áreas remotas com pouca

infraestrutura e mão de obra especializada. Além disso, os custos iniciais de instalação de sistemas híbridos podem ser mais altos do que os de sistemas solares fotovoltaicos isolados, o que pode limitar a sua adoção em algumas regiões. Apesar dos desafios, os sistemas híbridos de energia renovável têm sido cada vez mais adotados em todo o mundo como uma alternativa sustentável e eficiente para fornecer energia elétrica em áreas remotas e de difícil acesso à rede elétrica.

Os sistemas fotovoltaicos flutuantes são uma das tecnologias emergentes mais promissoras para a geração de energia solar. Esses sistemas são instalados em corpos d'água, como reservatórios de água, lagoas e barragens, aproveitando a superfície da água para gerar energia limpa e renovável. Segundo Krenzinger et al. (2021), os sistemas fotovoltaicos flutuantes têm uma série de vantagens em relação aos sistemas terrestres, incluindo a redução do uso de terras, a menor necessidade de resfriamento e a possibilidade de melhorar a eficiência dos painéis solares.

Uma das principais vantagens dos sistemas fotovoltaicos flutuantes é a possibilidade de instalação em áreas onde os sistemas terrestres seriam inviáveis. De acordo com Rüther et al. (2018), a falta de terra é um dos principais desafios para a expansão da energia solar em muitos países. Os sistemas flutuantes podem ser instalados em corpos d'água existentes, aproveitando áreas que não seriam utilizadas para outros fins.

Além disso, os sistemas fotovoltaicos flutuantes têm a vantagem de reduzir a necessidade de resfriamento dos painéis solares. Conforme Pinho (2015), o resfriamento é um fator importante na eficiência da geração de energia solar, pois altas temperaturas podem afetar negativamente a produção de eletricidade. Ao serem instalados na superfície da água, os painéis solares são naturalmente resfriados pela água, o que pode melhorar a eficiência e prolongar a vida útil dos painéis.

Outra vantagem dos sistemas fotovoltaicos flutuantes é a possibilidade de integrá-los com outras fontes de energia, como turbinas hidrelétricas ou eólicas. Segundo Oliveira et al. (2019), os sistemas híbridos de geração de energia são uma das tendências para a produção de energia renovável. A combinação de diferentes tecnologias pode melhorar a eficiência e a confiabilidade do sistema, permitindo uma geração de energia mais constante e estável.

No entanto, os sistemas fotovoltaicos flutuantes também apresentam desafios e limitações, como o maior custo de instalação e manutenção, a maior exposição a condições climáticas adversas e a necessidade de soluções técnicas específicas para garantir a segurança e estabilidade dos sistemas. Segundo Souza et al. (2015), é importante avaliar cuidadosamente

as condições locais e as necessidades de energia antes de decidir pela instalação de um sistema fotovoltaico flutuante.

Apesar desses desafios, a tecnologia de sistemas fotovoltaicos flutuantes está em constante evolução e aprimoramento, com novas soluções sendo desenvolvidas para garantir a eficiência, a segurança e a viabilidade econômica desses sistemas. Conforme Garcia et al. (2018), os sistemas fotovoltaicos flutuantes representam uma das tecnologias mais promissoras para a geração de energia solar, oferecendo uma alternativa renovável e sustentável para a produção de eletricidade.

## **2.5 Equipamentos dos Sistemas Fotovoltaicos**

Os sistemas fotovoltaicos são compostos por diversos equipamentos que desempenham funções específicas para a geração de energia solar. De acordo com Rüter et al. (2018), os principais equipamentos utilizados em sistemas fotovoltaicos são os módulos fotovoltaicos, inversores, estruturas de fixação, cabeamentos, dispositivos de proteção e monitoramento.

Os módulos fotovoltaicos são responsáveis por converter a energia solar em eletricidade. Segundo Pinho (2015), eles são compostos por células fotovoltaicas, que são feitas de materiais semicondutores, como o silício, e que absorvem a luz solar para gerar uma corrente elétrica.

Os inversores, por sua vez, são responsáveis por converter a corrente contínua gerada pelos módulos fotovoltaicos em corrente alternada, que é compatível com a rede elétrica. Conforme Pereira et al. (2019), os inversores também desempenham a função de maximizar a geração de energia, ajustando a tensão e a corrente elétrica de saída dos módulos fotovoltaicos.

As estruturas de fixação são utilizadas para suportar os módulos fotovoltaicos e mantê-los em posição inclinada, permitindo uma melhor captação da luz solar. De acordo com Souza et al. (2015), essas estruturas podem ser fixadas em telhados, lajes ou em solo, dependendo do tipo de instalação.

Os cabeamentos, por sua vez, são responsáveis por conduzir a energia elétrica gerada pelos módulos fotovoltaicos até o inversor. Segundo Oliveira et al. (2019), é importante que esses cabos sejam dimensionados corretamente para evitar perdas de energia e superaquecimento.

Os dispositivos de proteção e monitoramento são utilizados para garantir a segurança e o bom funcionamento do sistema fotovoltaico. Conforme Garcia et al. (2018), esses

dispositivos incluem dispositivos de proteção contra surtos, dispositivos de proteção contra sobretensão, medidores de energia, sensores de temperatura e dispositivos de monitoramento remoto.

Os equipamentos utilizados em sistemas fotovoltaicos são diversos e desempenham funções específicas para a geração de energia solar, desde a captação da luz solar até a entrega da energia elétrica na rede (GARCÍA-RODRÍGUEZ; JARAMILLO-MARTÍNEZ, 2021)

### **2.5.1 Módulos Fotovoltaicos**

Os módulos fotovoltaicos (FV) são o principal componente dos sistemas fotovoltaicos, sendo responsáveis pela conversão da energia solar em eletricidade. Eles são compostos por células solares, que são dispositivos que convertem a luz solar em eletricidade por meio do efeito fotovoltaico. Segundo Garcia et al. (2018), as células solares geralmente são feitas de silício, que é um material semicondutor com propriedades que o tornam adequado para essa finalidade.

Os módulos FV são classificados de acordo com o tipo de tecnologia utilizada em sua produção. Existem basicamente dois tipos de tecnologias: de filme fino e de silício cristalino. Os módulos de filme fino são produzidos a partir de materiais como o disseleneto de cobre, índio e gálio (CIGS), o disseleneto de cobre e índio (CIS) e o telureto de cádmio (CdTe). Já os módulos de silício cristalino são produzidos a partir de lingotes de silício, que são cortados em finas fatias chamadas de *wafers*. Em seguida, os *wafers* são tratados e encapsulados para formar os módulos fotovoltaicos. (RÜTHER et al., 2018)

Os módulos FV possuem diversas características que determinam o seu desempenho e eficiência, tais como a potência nominal, a eficiência, a tensão máxima do sistema e a corrente máxima do sistema. A potência nominal, medida em watts (W), indica a quantidade de energia que o módulo é capaz de gerar em condições ideais de radiação solar. Já a eficiência indica a proporção de energia solar que é convertida em eletricidade pelo módulo. Segundo Souza et al. (2015), os módulos fotovoltaicos comerciais possuem eficiências que variam de 14% a 22%, dependendo da tecnologia utilizada e das condições de instalação.

Os módulos fotovoltaicos também são afetados por diversos fatores externos que podem afetar seu desempenho e vida útil, como a temperatura, a umidade e a exposição a intempéries. Para minimizar esses efeitos, os módulos fotovoltaicos são frequentemente encapsulados em materiais resistentes a intempéries, como o vidro temperado e o EVA (etileno-vinil-acetato) (PINHO, 2015).

De acordo com Mokhtar et al. (2018), os painéis solares são compostos por células solares, que convertem a energia solar em eletricidade. Essas células são normalmente feitas de silício, um material semicondutor que é altamente eficiente na conversão de energia solar em eletricidade. As células solares são geralmente agrupadas em módulos que são ligados em série para aumentar a tensão e a potência.

A fabricação de painéis solares fotovoltaicos envolve vários processos complexos, incluindo a produção de silício cristalino e a fabricação de células solares a partir desse material. Segundo Lopes et al. (2019), a criação de painéis solares envolve a utilização de tecnologias como deposição química de vapor (CVD), fotolitografia e metalização. Cada etapa do processo é crítica para a produção de painéis solares eficientes e confiáveis.

Os painéis solares possuem diferentes características que afetam sua eficiência e desempenho. Segundo Friesen et al. (2021), a eficiência do painel solar está relacionada à quantidade de energia solar que é convertida em eletricidade. Essa eficiência depende da qualidade e do tipo de célula fotovoltaica utilizada no painel, bem como das condições ambientais, como a intensidade e a temperatura da luz solar.

Além disso, os painéis solares também possuem diferentes tipos de tecnologias e designs que afetam sua eficiência e desempenho. Segundo Lopes et al. (2019), os painéis solares podem ser classificados em diferentes categorias, como monocristalinos, policristalinos e de filme fino, cada um com suas vantagens e desvantagens em termos de eficiência, custo e durabilidade.

Outro fator importante a ser considerado é a durabilidade dos painéis solares. Zheng et al. (2020) destacam que a durabilidade dos painéis solares depende de vários fatores, como a qualidade dos materiais utilizados, a tecnologia de fabricação e as condições ambientais. Portanto, a escolha de um painel solar deve levar em conta não apenas sua eficiência, mas também sua durabilidade e vida útil.

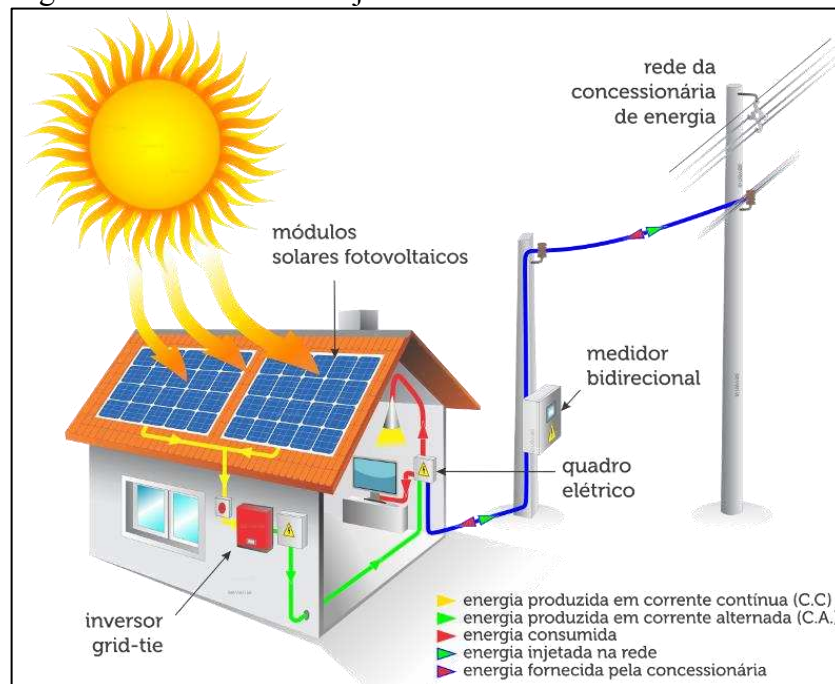
A seguir estão os diferentes tipos de painéis solares classificados de acordo com a geração do painel solar (RÜTHER, 2004):

- a) Painéis Solares Monocristalinos (Mono-SI)
- b) Painéis Solares Policristalinos (Poly-SI)
- c) Célula Solar de Silício Amorfo (A-Si)
- d) Células Solares de Filme Fino (TFSC)
- e) Célula Solar Biohíbrida
- f) Célula FVP concentrada (CVP e HCVP)

g) Célula Solar de Tellurido de Cádmio (CdTe)

Um único módulo solar pode fornecer apenas uma quantidade inadequada de energia. A maioria das instalações inclui vários módulos. Dessa forma, um sistema fotovoltaico inclui um conjunto de módulos fotovoltaicos, um inversor, a fiação de interconexão, podendo ter ou não um conjunto de baterias para armazenamento e um mecanismo de rastreamento solar (opcional) (SANTOS, 2009). A Figura 5 demonstra o funcionamento do sistema em conjunto com os módulos fotovoltaicos.

Figura 5 – Sistema em conjunto com os módulos fotovoltaicos.



A eficiência energética é um parâmetro fundamental para os módulos FV, pois se relaciona diretamente com a quantidade de energia elétrica que elas podem gerar a partir da radiação solar incidente. De acordo com Rincón-Mejía et al. (2020), a eficiência energética de um módulo FV é definida como a relação entre a energia elétrica gerada pelo módulo e a energia solar incidente na sua superfície. É expressa em percentual e pode variar de acordo com o material, a tecnologia e o processo de fabricação do módulo, a Tabela 1 ilustra os equipamentos e suas eficiências.

Tabela 1 – Eficiência energética de acordo com tecnologia.

<b>Tecnologia</b>	<b>Eficiência Energética</b>
Silício Monocristalino	20-22%
Silício Policristalino	15-17%
Silício Amorfo	5-7%
Filmes Finos de Silício	10-13%
Células de Perovskita	16-18%
Células de Telureto de Cádmio	9-12%
Células de Cobre-Índio-Gálio-Selênio	10-12%
Células Orgânicas	6-8%

Fonte: Rincón-Mejía et al. (2020).

A eficiência energética dos módulos FV tem evoluído ao longo dos anos, graças aos avanços em tecnologia e processo de fabricação. Segundo Liu et al. (2021), a eficiência energética média dos módulos FV comerciais em 2020 foi de 20,8%, sendo que algumas tecnologias avançadas atingem eficiências acima de 25%. Esse aumento na eficiência energética tem permitido que os módulos sejam cada vez mais utilizados como fonte de energia elétrica em residências, comércios e indústrias.

Além disso, a eficiência energética dos módulos está relacionada com a sua durabilidade e desempenho ao longo do tempo. De acordo com García-Sánchez et al. (2021), é importante avaliar a eficiência energética de um módulo a longo prazo, uma vez que ela pode ser afetada por fatores como a degradação dos materiais e a exposição a condições ambientais adversas. Portanto, a escolha de módulos com alta eficiência energética e boa durabilidade é fundamental para garantir a eficiência e rentabilidade do sistema fotovoltaico como um todo.

É importante destacar que a eficiência energética dos módulos FV também está relacionada com a sua sustentabilidade ambiental. De acordo com Chen et al. (2020), a utilização de módulos com alta eficiência energética permite reduzir a emissão de gases de efeito estufa e outros poluentes associados à geração de energia elétrica a partir de combustíveis fósseis. Portanto, a eficiência energética dos módulos é um parâmetro fundamental a ser considerado na transição para um modelo energético mais sustentável e limpo.

### **2.5.2 Inversores Fotovoltaicos**

O inversor fotovoltaico é um equipamento fundamental em sistemas de geração de energia solar fotovoltaica, pois é responsável por converter a corrente contínua gerada pelos módulos fotovoltaicos em corrente alternada utilizável pela rede elétrica ou pelos aparelhos



elétricos (MACHADO et al., 2020). Segundo Oliveira et al. (2019), a corrente contínua gerada pelos módulos fotovoltaicos é instável e não é compatível com as normas técnicas de energia elétrica, o que torna o inversor fundamental para a operação adequada do sistema.

Os inversores fotovoltaicos podem ser classificados de acordo com a topologia de operação, sendo os principais tipos o inversor centralizado, o inversor *string* e o micro inversor (SOUZA et al., 2015). O inversor centralizado é utilizado em sistemas de grande porte, em que vários módulos fotovoltaicos são conectados em série formando um *array* que alimenta um único inversor. Já o inversor *string* é utilizado em sistemas menores, em que grupos de módulos são conectados em série e cada *string* é conectada a um inversor individual. Por fim, o micro inversor é um equipamento que é conectado diretamente em cada módulo fotovoltaico, o que permite o controle individualizado de cada um (PEREIRA et al., 2019).

O funcionamento do inversor fotovoltaico é baseado em duas etapas principais: a primeira é a conversão da corrente contínua gerada pelos módulos em corrente alternada de baixa frequência, e a segunda é a elevação dessa frequência para os valores da rede elétrica (PINHO, 2015). Segundo Rüter et al. (2018), os inversores mais modernos possuem tecnologia de rastreamento máximo de potência (MPPT), que permite que o inversor adapte a tensão e a corrente de saída de acordo com as condições de irradiação solar, maximizando a geração de energia elétrica do sistema.

Além disso, os inversores fotovoltaicos também possuem funções de monitoramento e proteção, que garantem a segurança do sistema e permitem a identificação de possíveis falhas e problemas de desempenho (GARCIA et al., 2018). Essas funções incluem o monitoramento da corrente, da tensão e da frequência da rede elétrica, a proteção contra sobretensão e sobrecorrente, entre outras (KREZZINGER et al., 2021).

Em resumo, o inversor fotovoltaico é um equipamento fundamental em sistemas de geração de energia solar fotovoltaica, sendo responsável pela conversão da corrente contínua gerada pelos módulos fotovoltaicos em corrente alternada utilizável pela rede elétrica ou pelos aparelhos elétricos. Existem diferentes tipos de inversores, que variam de acordo com a topologia de operação, e os inversores mais modernos possuem tecnologia de rastreamento máximo de potência e funções de monitoramento e proteção (MACHADO et al., 2020).

### **2.5.3 Estruturas de Fixação**

As estruturas de fixação são elementos fundamentais nos sistemas fotovoltaicos, pois são responsáveis por sustentar e fixar os módulos fotovoltaicos aos telhados ou terrenos

onde serão instalados. Segundo Machado et al. (2020), as estruturas de fixação são projetadas para resistir a diversas condições climáticas, como ventos fortes e chuvas intensas, garantindo a segurança e a estabilidade do sistema.

De acordo com Rüter et al. (2018), as estruturas de fixação podem ser divididas em dois tipos: fixas e ajustáveis. As estruturas fixas são indicadas para instalações em telhados ou terrenos planos, onde a inclinação dos módulos é previamente definida durante o projeto. Já as estruturas ajustáveis permitem a variação da inclinação dos módulos, o que é recomendado para sistemas instalados em terrenos com declive ou para maximizar a eficiência energética do sistema.

Além disso, segundo Krenzinger et al. (2021), as estruturas de fixação podem ser fabricadas com diferentes materiais, como alumínio, aço galvanizado e aço inoxidável, e devem ser escolhidas de acordo com as condições climáticas e a durabilidade desejada. Segundo Pinho (2015), as estruturas de fixação também podem ser classificadas em dois tipos de fixação: mecânica e aderente. A fixação mecânica é realizada por meio de parafusos e presilhas, enquanto a fixação aderente é realizada por meio de cola ou fita adesiva especializada.

Por fim, é importante destacar a importância da instalação adequada das estruturas de fixação. Segundo Oliveira et al. (2019), a instalação deve ser realizada por profissionais capacitados, seguindo as normas de segurança e as especificações do projeto, a fim de garantir a eficiência energética e a durabilidade do sistema fotovoltaico.

#### ***2.5.4 Dispositivos de Proteção***

Os dispositivos de proteção fotovoltaicos são essenciais para garantir a segurança e o desempenho adequado dos sistemas fotovoltaicos. De acordo com Hu et al. (2020), os principais dispositivos de proteção incluem dispositivos de proteção contra surtos, dispositivos de proteção contra sobretensão, dispositivos de proteção contra sobrecorrente, dispositivos de proteção contra inversão de polaridade, dispositivos de proteção contra curto-circuito e dispositivos de proteção contra sobretemperatura.

Os dispositivos de proteção contra surtos, também conhecidos como DPS, são responsáveis por proteger o sistema fotovoltaico contra descargas atmosféricas e outras sobretensões transitórias. Conforme destacado por Lopes et al. (2019), esses dispositivos são instalados na entrada do inversor ou no quadro geral do sistema, e devem ser capazes de suportar a tensão máxima do sistema.

Já os dispositivos de proteção contra sobretensão, ou OVP, são utilizados para proteger o sistema fotovoltaico contra sobretensões permanentes. Segundo Liao et al. (2021), esses dispositivos são instalados no caminho da corrente entre os módulos fotovoltaicos e o inversor, e devem ser dimensionados de acordo com a tensão máxima de operação do sistema.

Os dispositivos de proteção contra sobrecorrente, ou OCP, são projetados para proteger o sistema fotovoltaico contra correntes excessivas. De acordo com Krebs et al. (2018), esses dispositivos são geralmente instalados no circuito DC, entre os módulos fotovoltaicos e o inversor, e devem ser dimensionados de acordo com a capacidade de corrente do sistema.

Os dispositivos de proteção contra inversão de polaridade, por sua vez, são responsáveis por evitar danos ao sistema fotovoltaico quando a polaridade dos módulos fotovoltaicos é invertida. Conforme destacado por Xu et al. (2019), esses dispositivos são instalados no circuito DC, antes do inversor, e podem ser compostos por diodos de bloqueio ou chaves eletrônicas.

Os dispositivos de proteção contra curto-circuito e sobretemperatura são utilizados para evitar danos ao sistema fotovoltaico em casos de falhas ou mau funcionamento. Conforme explicado por Zheng et al. (2020), esses dispositivos são geralmente integrados ao inversor, e devem ser capazes de desligar rapidamente o sistema em situações de emergência.

### **2.5.5 Monitoramento Fotovoltaico**

Os equipamentos de monitoramento fotovoltaico são essenciais para o controle e aprimoramento da eficiência dos sistemas de energia solar. Dentre eles, podemos destacar os medidores de energia, que fornecem dados precisos de produção e consumo de energia elétrica. Segundo Mokhtar et al. (2018), esses medidores são fundamentais para garantir a eficiência do sistema e identificar possíveis problemas, permitindo uma rápida intervenção para minimizar perdas.

Além dos medidores de energia, os sistemas de monitoramento também contam com dispositivos de monitoramento de temperatura, que são importantes para o controle da temperatura dos módulos fotovoltaicos. Segundo a pesquisa de Lopes et al. (2019), altas temperaturas nos módulos fotovoltaicos podem reduzir significativamente sua eficiência energética. O monitoramento contínuo da temperatura permite a identificação de possíveis falhas no sistema de resfriamento e a realização de ajustes para manter a temperatura ideal de operação dos módulos.

Outro equipamento fundamental para o monitoramento fotovoltaico é o *datalogger*, que é utilizado para registrar e armazenar dados do sistema fotovoltaico, como a produção de energia, temperatura e tensão. Segundo Friesen et al. (2021), o *datalogger* é uma ferramenta importante para avaliar o desempenho do sistema, identificar tendências de produção e possíveis falhas no sistema.

Pode-se destacar os sistemas de monitoramento remoto, que permitem o acesso aos dados do sistema fotovoltaico em tempo real, independentemente da localização física do sistema. Segundo a pesquisa de Liao et al. (2021), esses sistemas permitem o monitoramento contínuo do desempenho do sistema, possibilitando a rápida identificação e solução de problemas. Com essas informações, os usuários podem tomar decisões estratégicas sobre a operação do sistema e realizar a manutenção preventiva, garantindo a máxima eficiência e prolongando a vida útil do sistema fotovoltaico.

## **2.6 Legislação Referente à Energia Solar**

A legislação brasileira referente à energia solar vem passando por mudanças significativas nos últimos anos, principalmente no que se refere à geração distribuída. A resolução normativa nº 482/2012 da ANEEL foi um marco importante, ao permitir a instalação de sistemas de geração distribuída conectados à rede elétrica, inclusive sistemas fotovoltaicos. Segundo Braga et al. (2020), essa resolução permitiu a instalação de sistemas de geração distribuída com capacidade de até 5 MW, permitindo que consumidores pudessem gerar sua própria energia e, em alguns casos, vender o excedente para a concessionária de energia elétrica.

No ano de 2019, foi publicada a resolução normativa nº 687/2019, que atualizou e ampliou a resolução anterior. Segundo Farias et al. (2020), essa nova resolução permitiu a instalação de sistemas fotovoltaicos em condomínios, a criação de comunidades solares e a possibilidade de compensação de créditos em diferentes unidades consumidoras. Essas mudanças foram importantes para o desenvolvimento do setor fotovoltaico no país, incentivando a geração distribuída em larga escala.

Além das resoluções da ANEEL, existem outras legislações importantes relacionadas à energia solar no Brasil. A lei nº 13.203/2015, por exemplo, instituiu a Política Nacional de Energia Elétrica (PNEE), que prevê a utilização de fontes renováveis de energia na matriz elétrica brasileira. Segundo Oliveira et al. (2018), a PNEE tem como objetivo diversificar a matriz energética do país, reduzindo a dependência de fontes não renováveis e contribuindo para a mitigação das mudanças climáticas.

Vale salientar a importância dos incentivos fiscais para o setor solar no Brasil. A lei nº 11.196/2005, por exemplo, instituiu a isenção do Imposto sobre Produtos Industrializados (IPI) para equipamentos e componentes utilizados em sistemas de energia solar. Além disso, alguns estados brasileiros oferecem benefícios fiscais, como isenção de ICMS, para a geração distribuída de energia solar. Esses incentivos têm sido importantes para tornar a energia solar mais acessível e competitiva no mercado brasileiro (OLIVEIRA et al., 2018).

Em abril de 2021, foi publicada a Resolução Normativa ANEEL nº 896/2021, que atualiza as regras para a geração distribuída de energia elétrica no Brasil, incluindo a microgeração e minigeração de energia solar fotovoltaica. A nova legislação estabelece uma transição para o fim da modalidade de compensação de energia elétrica conhecida como “*net metering*”, que permitia ao consumidor gerar sua própria energia e trocar o excedente com a distribuidora local em forma de créditos na conta de luz (ANEEL, 2021). A partir de 2022, será instituído o sistema de “compensação de energia elétrica com rateio”, em que a distribuidora pagará ao consumidor apenas pelo excedente de energia gerado que for injetado na rede elétrica e não for utilizado no local de geração.

A Lei 13.400/22, que institui o marco legal da micro e minigeração de energia, estabelece limites para a potência instalada na micro e minigeração distribuída de energia solar fotovoltaica. Para a microgeração distribuída a produção de energia elétrica por unidade consumidora com potência instalada até 75 kW. Já para a minigeração, que é a produção de energia elétrica por unidade consumidora com potência instalada superior a 75 kW e até 3 MW, o limite passou de 5 MW para 3 MW (ANEEL, 2021).

Além disso, a Resolução Normativa ANEEL nº 896/2021 estabelece um cronograma de redução gradual dos subsídios para a geração distribuída, de forma a incentivar a eficiência energética e a modicidade tarifária. A partir de 2023, as novas instalações de geração distribuída deixarão de ter isenção da tarifa de uso do sistema de distribuição (TUSD) e da tarifa de uso do sistema de transmissão (TUST). Em 2030, as instalações de micro e minigeração distribuída também deixarão de ter isenção da tarifa de energia elétrica (ANEEL, 2021).

Segundo Garcia-Sanchez et al. (2021), a nova legislação brasileira pode contribuir para o desenvolvimento de um mercado de energia solar mais sustentável e competitivo. Os autores destacam a importância de incentivar a eficiência energética e a modicidade tarifária, ao mesmo tempo em que se mantém um ambiente favorável para o desenvolvimento de tecnologias de geração distribuída. Para Braga et al. (2020), a atualização das regras para a geração distribuída de energia elétrica pode trazer benefícios econômicos e ambientais

significativos, especialmente em regiões remotas ou de difícil acesso, onde a conexão à rede elétrica pode ser onerosa e inviável.

No entanto, Farias et al. (2020) alertam para a necessidade de atenção à implementação das novas regras e à garantia da segurança jurídica para os consumidores que já investiram em sistemas de geração distribuída de energia solar fotovoltaica. Os autores destacam a importância de se buscar um equilíbrio entre a promoção da eficiência energética e a proteção dos direitos adquiridos dos consumidores.

## **2.7 Vantagens e Desvantagens da Energia Solar**

A energia solar é uma fonte de energia renovável que apresenta diversas vantagens em relação a outras fontes de energia. Uma das principais vantagens da energia solar é a sua disponibilidade abundante e constante em várias partes do mundo. Segundo a International Energy Agency (IEA) a energia solar pode suprir a demanda mundial de energia elétrica em mais de 10.000 vezes. (RAJPUT, 2017).

Além disso, a energia solar é uma fonte de energia limpa e não poluente, pois não emite gases de efeito estufa nem outros poluentes. Isso faz com que a energia solar seja uma das fontes de energia mais seguras e sustentáveis do mundo, contribuindo para a mitigação dos impactos ambientais causados pelas fontes de energia convencionais. (RASHID, 2017).

Outra vantagem da energia solar é a sua versatilidade. A energia solar pode ser usada em diferentes aplicações, desde sistemas de aquecimento de água até sistemas de geração de energia elétrica em larga escala. Além disso, a energia solar pode ser integrada a edificações, como em painéis solares instalados em telhados, gerando eletricidade localmente e reduzindo a dependência de redes de distribuição de energia elétrica. (SILVA et al., 2018).

A energia solar também apresenta vantagens econômicas, pois a instalação de painéis solares fotovoltaicos em residências e empresas pode gerar uma economia significativa nas contas de energia elétrica, além de proporcionar uma fonte de renda para proprietários de grandes áreas de terra. Além disso, a geração distribuída de energia solar fotovoltaica pode reduzir a necessidade de investimentos em infraestrutura de redes elétricas e na construção de novas usinas hidrelétricas ou termelétricas. (MACHADO et al., 2020).

A energia solar é uma fonte de energia segura e confiável. A energia solar é uma fonte de energia descentralizada, o que significa que a geração de energia elétrica é distribuída em diferentes locais, tornando o sistema mais resiliente a falhas e mais resistente a interrupções no fornecimento de energia elétrica. Além disso, os sistemas de energia solar são projetados

para ter uma longa vida útil e requerem pouca manutenção, tornando-os uma opção confiável para geração de energia elétrica. (WU et al., 2021).

Embora a energia solar tenha muitas vantagens, também apresenta algumas desvantagens significativas. Uma das principais desvantagens é a sua dependência de condições climáticas favoráveis. Em dias nublados, chuvosos ou durante a noite, a geração de energia solar pode ser significativamente reduzida ou até mesmo nula. De acordo com Rajput (2017), a falta de luz solar suficiente durante o inverno, em algumas áreas, pode levar à redução da produção de energia em até 70%.

Outra desvantagem da energia solar é o alto custo inicial de instalação de um sistema fotovoltaico, que inclui a aquisição de painéis solares, inversores, baterias, suportes e outros componentes. De acordo com Rashid (2017), os custos iniciais podem ser um impedimento significativo para a adoção generalizada da energia solar em muitas partes do mundo. Além disso, a instalação inadequada pode levar a uma diminuição da eficiência e vida útil do sistema.

A instabilidade da rede elétrica pode ser outra desvantagem da energia solar. Segundo Silva et al. (2018), a produção de energia solar pode ser afetada por interrupções na rede elétrica, como quedas de energia, oscilações de tensão ou instabilidades de frequência. Além disso, a incompatibilidade entre os sistemas de energia solar e as redes elétricas existentes pode causar problemas, como sobrecarga, curto-circuito ou falhas no sistema.

Finalmente, a produção de energia solar também pode ser afetada por questões ambientais. Por exemplo, a acumulação de poeira ou sujeira nos painéis solares pode reduzir significativamente a eficiência do sistema. Além disso, a produção de energia solar pode afetar a biodiversidade local, dependendo do local de instalação dos painéis solares e da magnitude da produção de energia. Wu et al. (2021) afirmam que a ocupação de grandes áreas de terra para a instalação de painéis solares pode levar à perda de habitats naturais e causar impactos significativos na fauna e flora local.

Apesar de ter muitas vantagens, a energia solar também apresenta desvantagens significativas. A dependência de condições climáticas favoráveis, o alto custo inicial de instalação, a instabilidade da rede elétrica e a possibilidade de impactos ambientais são alguns dos principais desafios enfrentados pelos sistemas de energia solar (MACHADO et al., 2020).

### 3 METODOLOGIA

O tema da presente pesquisa está associado a apresentação do desenvolvimento de um sistema fotovoltaico em uma edificação, abordando o contexto já apresentado, referente a prática do uso de um sistema de energia solar em uma residência, que resultará então na análise de viabilidade financeira do projeto a partir da avaliação do tempo de retorno de investimento no sistema fotovoltaico.

O foco do presente trabalho é a demonstração de um estudo de caso da geração de energia solar a partir de um sistema de módulos fotovoltaicos (FV) ligados à rede elétrica, o projeto será desenvolvido tendo como base as normas NBR 16274 (ABNT, 2014) e NBR 16150 (ABNT, 2013), que apresentam os requisitos mínimos para documentação, ensaios de comissionamento, inspeção e avaliação de desempenho além das características da conexão elétrica. Desta forma os procedimentos para desenvolvimento do projeto foram:

a) Análise da potência elétrica necessária da residência tido como referência, ou seja, será realizando o levantamento da carga total da potência da residência, com base na NBR 5410 (ABNT, 2004).

b) Determinação dos dados geográficos, para registrar os dados de insolação da cidade referente ao estudo em questão, a partir do levantamento de dados do Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio Brito (CRESESB). O processo mais viável de determinação das informações solares atualmente e mais utilizado é por meio de base de dados que levanta as informações necessárias para o desenvolvimento do projeto, como determina a norma, e no caso da presente pesquisa será utilizado como fonte dessas informações o CRESESB, através do qual, com os dados das coordenadas geográficas, se obtém o índice de insolação.

c) Na sequência, segundo Villalva e Gazoli (2012), é possível se obter o ângulo de instalação para os painéis fotovoltaicos, tendo como parâmetro os dados geográficos do local estudado, tendo como base os dados demonstrados na Tabela 2.



Tabela 2 - Ângulo de inclinação.

Latitude geográfica do local	Ângulo de inclinação determinado
0° a 10°	a = 10°
11° a 20°	a = latitude
21° a 30°	a = latitude + 5°
31° a 40°	a = latitude + 10°
41° ou mais	a = latitude + 15°

Fonte: Villalva e Gazoli (2012).

d) Com as informações prévias obtidas, é necessário demonstrar o módulo FV a ser determinado no projeto, detalhando seu índice de rendimento, de acordo com o fabricante e o material do mesmo, demonstrando a viabilidade da sua escolha.

e) A partir das informações obtidas até o momento é possível realizar o dimensionamento do sistema fotovoltaico, as equações utilizadas são apresentadas na sequência:

Primeiramente encontra-se a energia produzida pela equação:

$$Em = A * \eta * Es \quad (1)$$

Onde:

$Em$  é a energia produzida diariamente pelo módulo em kWh/dia;

$A$  é a área do módulo determinado em m<sup>2</sup>;

$\eta$  é a eficiência do módulo em decimal;

$Es$  é a insolação do local determinado.

Após o cálculo da energia produzida se calcula a potência do sistema, que pode ser determinada pela seguinte equação:

$$Pt = Nm * Pm \quad (2)$$

Onde:

$Pt$  é a potência total do sistema a ser instalado em kW;

$Nm$  é o número de módulos usados;

$Pm$  é a potência de um módulo em kW.

f) Demonstrar o inversor a ser utilizado, com o objetivo de realizar a conversão da corrente elétrica, tendo como referência o sistema dimensionado, devido a necessidade de transformar a energia solar gerada em corrente contínua foi determinada com base na NBR 16150, o uso do equipamento eletrônico determinado como inversor.

g) Quantificar os custos e demonstrar o orçamento do sistema desenvolvido, tendo

como base os preços apresentados pelos fabricantes dos equipamentos referidos.

h) Como determinação da viabilidade do sistema será apresentado o *payback*, e assim será realizado o tempo de retorno necessária para o sistema se autossustentar.

i) A partir destas informações torna-se possível concluir e associar os objetivos propostos pela presente pesquisa e os resultados obtidos.

#### 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O primeiro passo para poder se realizar o projeto de energia solar é estabelecer a potência necessária pelo projeto estudado. Sendo assim foi utilizado a conta de energia elétrica referente a residência analisada e através dela foi levantado o consumo energético para abastecer a potência que será utilizada como parâmetro pelo sistema fotovoltaico, em que a unidade consumidora se classifica como B1 Residencial Monofásico. A Tabela 3 demonstra o histórico de consumo elétrico da conta utilizada como referência.

Tabela 3 - Consumo mensal da residência no período de um ano.

<b>Mês/Ano</b>	<b>Consumo em kWh</b>
Jul/23	236
Jun/23	173
Mai/23	226
Abr/23	170
Mar/23	255
Fev/23	166
Jan/23	199
Dez/22	166
Nov/22	298
Out/22	0
Set/22	136
Ago/22	171
Jul/22	135
<b>Média</b>	<b>194</b>

Fonte: Próprio Autor (2023).

Analisando a Tabela 3, tem-se que a média mensal de consumo é de 194kWh, porém o custo de disponibilidade da rede é de 30kWh (B1 Residencial Monofásico), segundo inciso terceiro do art. 148 da REN 1000/21. Dessa forma seria necessário um sistema para suprir o consumo mensal de 164kWh, haja vista o desconto do custo de disponibilidade que deve ser pago de forma obrigatória. Entretanto, no ano de 2023 foi possível identificar uma notável tendência de aumento de consumo, dessa forma será considerado como Energia de Geração ( $E_{\text{geração}}$ ) o valor de 194kWh fornecida na Tabela 3, como medida para dimensionamento do sistema fotovoltaico, para que possa garantir que a residência seja atendida no seu potencial elétrico.

Dessa forma, será utilizada a equação 3 para o cálculo da potência total dos painéis ( $P_{total\text{painéis}}$ ), levando em consideração a energia de geração ( $E_{geração}$ ) e tempo de exposição à luz solar ( $T_{exposição}$ ).

$$E_{geração} = P_{total\text{painéis}} \times T_{exposição} \quad (3)$$

Portanto, para obter o tempo de exposição é necessário consultar o CRESESB, dessa forma, de acordo com a Tabela 4, para o painel inclinado a 4° N, a Hora de Sol Pleno (HSP) é de 4,90 kWh/m<sup>2</sup>dia. Como observado, o tempo de exposição apresenta-se em uma relação diária, enquanto a energia de geração é mensal, dessa forma, faz-se necessário a conversão desta grandeza através da equação 4.

$$E_{geraçãodiária} = \frac{E_{geração}}{30} = 6,47 \text{ kWh/dia} \quad (4)$$

Logo a potência total dos painéis será calculada com a substituição das grandezas na equação 3.

$$P_{total\text{painéis}} = \frac{6,47\text{kWh/dia}}{4,90\text{kWh}} = 1,32\text{kWp}$$

Dessa forma, para suprir o consumo da energia elétrica da residência determinada é necessário um projeto de sistema solar que consiga gerar no mínimo 1,32 kW de potência atendendo assim o consumo energético dessa família estabelecido pela análise dos dados elétricos.

#### 4.1 Projeto do Sistema Fotovoltaico

No tópico a seguir será ilustrado a realização do dimensionamento do sistema fotovoltaico, onde será demonstrado por meio de diversos procedimentos a serem seguidos conforme detalhado pela NBR 16274 (ABNT, 2014) e NBR 16150 (ABNT, 2013).

Então como descrito pela metodologia é necessário se obter os dados regionais e geográficos do local e assim determinar o potencial de geração de energia solar determinado como a irradiação solar.

Com essas informações, é possível determinar os equipamentos necessários para satisfazer o rendimento do sistema fotovoltaico e assim com os dados desses equipamentos, é possível por meio das equações descritas no presente tópico detalhar o potencial do sistema fotovoltaico que será projetado.

#### 4.1.1 Dados Geográficos

Fazendo uso então de uma ferramenta geográfica como o Google Maps, é possível se obter as coordenadas geográficas da cidade, determinada como objeto de estudo da pesquisa, para dimensionamento do sistema, que a partir do seu uso foi realizado que o município de Aracati - CE (Figura 6) está localizado na Latitude  $4^{\circ} 33' 46''$ S e Longitude  $37^{\circ} 46' 09''$ W.

Figura 6 - Município de Aracati.



Fonte: Google Maps (2023).

A partir dos dados geográficos de latitude e longitude, e o banco de dados com os valores de insolação, para desenvolvimento de sistemas fotovoltaicos da CRESESB, determinou-se que o valor de irradiação solar média para um ângulo igual a latitude é de 4,89 Kwh/m<sup>2</sup>dia, para o painel inclinado a  $4^{\circ}$  N é de 4,90 Kwh/m<sup>2</sup>dia e para a insolação menor com  $10^{\circ}$  é obtido o valor de 4,82 Kwh/m<sup>2</sup>dia, a Tabela 4 demonstra os resultados obtidos.

Tabela 4 - Irradiação solar diária média mensal para a cidade de Aracati.

Ângulo	Inclinação solar	Irradiação solar diária média mensal [kWh/m <sup>2</sup> .dia]													
		Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Média	Delta
Plano Horizontal	0° N	5,41	5,64	4,91	4,38	3,52	3,27	3,40	4,37	4,53	5,05	5,54	6,03	<b>4,67</b>	<b>2,76</b>
Ângulo igual a latitude	5° N	4,88	5,37	5,06	5,00	4,37	4,29	4,36	5,23	4,84	4,92	5,06	5,34	<b>4,89</b>	<b>1,08</b>
Maior média anual	4° N	4,97	5,44	5,08	4,96	4,29	4,19	4,27	5,16	4,83	4,97	5,15	5,45	<b>4,90</b>	<b>1,27</b>
Maior mínimo mensal	10° N	4,55	5,10	4,95	5,06	4,55	4,52	4,57	5,37	4,80	4,73	4,74	4,93	<b>4,82</b>	<b>0,85</b>

Fonte: CRESESB (2023).

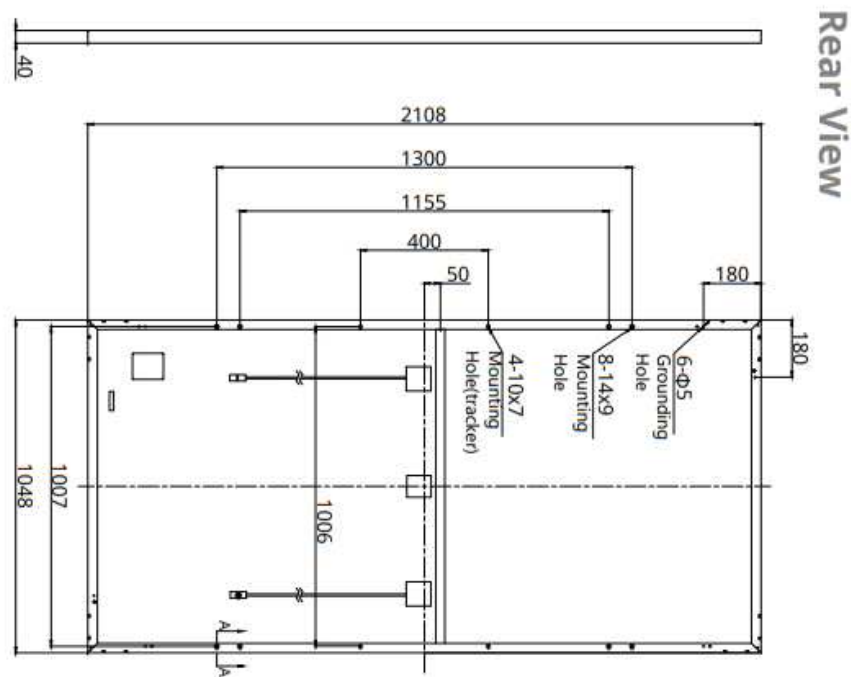
Sendo assim, o valor adotado no projeto será o com ângulo de inclinação solar de 4°, tendo a irradiação média de 4,90 kWh/m<sup>2</sup>.dia. Na sequência se obtêm outro parâmetro fundamental determinado pelo projeto para dimensionamento do sistema, que é o ângulo de instalação para os painéis fotovoltaicos.

Desta forma, seguindo os dados da Tabela 2, referente ao ângulo de inclinação dos módulos FV do projeto, como contextualizado anteriormente que as latitudes estão entre os valores adotados serão entre 0° e 10°, dessa forma aplica-se a = 10°, sendo então o ângulo de inclinação para instalação dos módulos de 10°, possibilitando assim o escoamento da água da chuva, além de receber o nível adequado de irradiação solar. Com esses dados se dá continuidade no projeto e determina-se o módulo fotovoltaico.

#### 4.1.2 Módulo Fotovoltaico

O dimensionamento do sistema solar implica na escolha de um módulo, o tipo tido como determinado foi o Canadian CS3W-450MS, este possui uma potência nominal máxima de 450W, com dimensões de 2108 x 1048 x 40mm (Figura 7), e o motivo de sua escolha foi por ser originado de um material monocristalino, tendo um rendimento de 20,4%, além de apresentar a tecnologia *haff-cell*, conferindo maior eficiência ao sistema em eventuais sombreamentos.

Figura 7 - Detalhe geométrico e dimensional do módulo CS3W-450MS.



Fonte: Canadian Solar (2021).

A Tabela 5 apresenta as especificações do módulo escolhido.

Tabela 5 - Detalhes específicos da Canadian Solar sobre os módulos.

<b>ELECTRICAL DATA STC*</b>			
<b>CS6P</b>	<b>445MS</b>	<b>450MS</b>	<b>455MS</b>
Nominal Max. Power (Pmax)	445 w	450 w	270 w
Opt. Operating Voltage (Vmp)	41.1 V	41.1 v	30.8 v
Opt. Operating Current (Imp)	10.89 A	10.96 A	11.02 A
Open Circuit Voltage (Voc)	48.9 v	49.1 v	49.3 v
Short Circuit Current (Isc)	11.54A	11.60 A	11.66 A
Module Efficiency	20.1%	20.4%	20.6%
Operating Temperature	- 40°C ~ +85°C		
Max. System Voltage	1500V (IEC/UL) or 1000V (IEC/UL)		
Module Fire Performance	TYPE 1 (UL 1703) or CLASS C (IEC 61730)		
Max. Series Fuse Rating	20A		
Application Classification	Class A		
Power Tolerance	0~+10W		

• Under Standard Test Conditions (STC) of irradiance of 1000 W/m<sup>2</sup>, spectrum AM 1.5 and cell temperature of 25°C.

Fonte: Canadian Solar (2021).

Com o módulo determinado é possível calcular quantos módulos serão necessários para o sistema, tendo o módulo uma área de 2,20 m<sup>2</sup>. Como demonstra os cálculos na sequência.

$$\text{NÚMERO DE MÓDULOS} = \frac{\text{POTÊNCIA DE CONSUMO}}{\text{POTÊNCIA GERADA}} \quad (5)$$

$$\text{NÚMERO DE MÓDULOS} = \frac{1320 \text{ W}}{450 \text{ W}}$$

$$\text{NÚMERO DE MÓDULOS} = 2,9 \sim 3 \text{ módulos}$$

$$\text{ÁREA TOTAL DAS PLACAS} = 3 * 2,20 \text{ m}^2$$

$$\text{ÁREA TOTAL DAS PLACAS} = 6,60 \text{ m}^2$$

Seguindo então, é possível para ser mais exato uma área de 6,60 m<sup>2</sup> para resultar no abastecimento da potência determinada inicialmente de 1,32 kW da residência, e dessa forma serão utilizados um total de 3 módulos para suprir a demanda energética da residência. É importante ressaltar que não existe área mínima ou máxima, a questão é determinar quantos módulos são necessários para gerar a potência do sistema elétrico da residência.

#### 4.1.3 Dimensionamento do Sistema Solar

Reproduzindo os valores obtidos até agora na equação 1 é possível chegar ao resultado:

$$Em = A * \eta * Es \quad (1)$$

$$Em = 2,20 * 0,2040 * 4,90$$

$$Em = 2,19 \text{ kWh/dia}$$

Sendo assim, a partir dos dados obtidos e apresentados nos tópicos anteriores e resolvendo o cálculo se tem a produção de energia diária de 2,19 kWh/dia. A potência do sistema pode ser determinada pela equação 2:

$$Pt = Nm * Pm \quad (2)$$

$$Pt = 3 * 0,450$$

$$Pt = 1,35 \text{ kWp}$$

Desta forma com base nas especificações do fabricante do módulo a potência total do sistema Pt igual a 1,35 kWp.



Sendo assim é possível observar na Tabela 6 os principais dados obtidos no dimensionamento do sistema fotovoltaico.

Tabela 6 - Dados do sistema fotovoltaico dimensionado.

<b>Descrição</b>	<b>Resultados</b>
Irradiação solar	4,90 kWh/m <sup>2</sup> /dia
Ângulo de instalação dos módulos	10°
Módulo Fotovoltaico	Canadian CS3W-450MS
Potência do módulo	450 W
Eficiência do módulo	20,4%
Energia produzida diariamente por cada módulo	2,19 kWh/dia
Potência total do sistema	1,35 kWp

Fonte: Próprio Autor (2023).

Além dos cálculos realizados e a determinação dos parâmetros referente ao projeto, é necessário detalhar alguns equipamentos que são fundamentais para o funcionamento do sistema fotovoltaico como o inversor e a estrutura de suporte.

#### **4.1.4 Inversor**

A escolha do inversor se deu a partir da determinação da potência do sistema fotovoltaico, sendo 1,32 kWp. Desta forma serão analisadas duas alternativas, sendo elas a utilização de um inversor convencional e a aplicação de um micro inversor, para que seja avaliada a viabilidade e os custos envolvidos em cada tecnologia.

Primeiramente com a utilização de um inversor convencional, foi escolhido a partir das opções apresentadas pela empresa Sungrow, sendo uma das empresas mais fortes nacionalmente no mercado de produtos eletrônicos para geração e transmissão de energia, foi escolhido o inversor solar modelo SG2K-S, que suporta até 2 kW. A Figura 8 apresenta o modelo escolhido.

Figura 8 - Modelo de inversor SG2K-S.



Fonte: Sungrow (2023).

A Tabela 7 demonstra os dados e propriedades do inversor SG2K-S escolhido como alternativa para o projeto em questão.

Tabela 7 - Características técnicas do inversor SG2K-S.

Corrente de saída de 9.1A
Tensão de alimentação monofásica de 220V
Grau de proteção IP65
Resfriamento por convecção forçada
Monitoramento remoto via internet
Conexão Ethernet
Protocolo Modbus SunSpec
Topologia sem necessidade de transformador
Máxima eficiência igual ou superior a 98%
Umidade de até 100% sem condensação

Fonte: Sungrow (2023).

Já para o sistema com micro inversor, foi escolhido o modelo SUN2000G3 da fabricante Deye, o qual apresenta 2kW de potência na saída, aceitando a conexão de 4 painéis de até 600W cada. A Figura 9 apresenta o modelo escolhido.

Figura 9 - Modelo de micro inversor SUN2000G3.



Fonte: Minha Casa Solar (2023).

A Tabela 8 demonstra os dados e propriedades do inversor SUN2000G3 escolhido como alternativa para o projeto em questão.

Tabela 8 - Características técnicas do inversor SUN2000G3.

Potência solar de entrada de cada MPPT: 210W~600W

Tensão nominal da rede: 220V

Tensão máxima de entrada: 60V

Corrente máxima de entrada: 13A

Número de MPPT: 04

Grau de proteção IP67

Potência nominal de saída CA: 2000W

Corrente máxima de saída: 9.1A

Refrigeração: Arrefecimento natural

Monitoramento remoto via internet

Conexão via Wifi

Protocolo Modbus SunSpec

Topologia sem necessidade de transformador

Máxima eficiência igual ou superior a 98%

Umidade de até 100% sem condensação

Fonte: Deye (2023).

#### 4.1.5 Estrutura Portante dos Módulos

A estrutura para suporte dos módulos FV também é relevante na sua determinação, mesmo sendo um fator desconsiderado na realização de um orçamento o seu custo é algo considerável para o projeto em questão. Sendo assim, foi realizado o contato com uma empresa especializada neste tipo de estrutura sendo a Sonnen Energia, e foi indicada o suporte para residências, que segue apresentado na Figura 10.

Figura 10 - Estrutura de suporte para os módulos FV.



Fonte: Sonnen Energia (2022).

A estrutura para fixação, foi configurada para uso em telhados cerâmicos, onde possibilita utilizar grandes variações nas distâncias de fixação dos módulos, sendo adequado para diversos tipos de telhas coloniais.

A instalação pode ser executada para qualquer tamanho de painel solar e a suas dimensões são padronizadas em kits de instalação, existindo a possibilidade de tamanhos específicos para projetos exclusivos de acordo com a necessidade do cliente, conforme especificação com fornecedor.

Com o projeto desenvolvido é possível apresentar então a questão do orçamento e custos do projeto dimensionado e assim ilustrar o tempo de retorno para que o mesmo se pague.

#### 4.2 Orçamento e Análise dos Custos do Projeto

Neste tópico serão desenvolvidos dois orçamentos para projetos distintos, haja vista a possibilidade de utilização de inversor ou micro inversor, o que implica diretamente nos materiais utilizados, pois para o segundo caso, não há necessidade de uma *string box* com proteção de corrente contínua, a qual já se encontra presente no próprio micro inversor.

Tendo levantado todas as informações referentes ao sistema, foi realizado o contato com as empresas ou terceiros referentes aos produtos fornecidos para o levantamento orçamentário e de custo de todo o sistema fotovoltaico.

Um terceiro responsável pela venda dos produtos da empresa Canadian Solar, apresentou os custos para a instalação do sistema com base no dimensionamento e no módulo determinado inclusive apresentou os equipamentos auxiliares necessários para a sua instalação. A Tabela 9, ilustra os dados recebidos.

Tabela 9 - Orçamento referente ao sistema fotovoltaico utilizando inversor.

<b>Material</b>	<b>Preço Unitário</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Preço Total</b>
Canadian Solar 144 Cells 450Wp Mono	R\$ 675,00	3	R\$ 2.025,00
Conectores MC4 Femea/Macho	R\$ 12,55	2	R\$ 25,10
Cabo 4mm, 1000V	R\$ 3,22	11	R\$ 35,42
String Box com Proteção CC - Clamper	R\$ 728,00	1	R\$ 728,00
String Box com Proteção CA	R\$ 354,22	1	R\$ 354,22
Estrutura de Suporte e Mão de Obra	R\$ 2075,35	1	R\$ 2075,35
Inversor Sungrow Monofásico 2kW – SG2K-S	R\$ 2119,47	1	R\$ 2119,47
Projeto e Homologação de Energia Fotovoltaica padrão Enel	R\$ 600,00	1	R\$ 600,00
<b>Total</b>			<b>R\$ 7.962,56</b>

Fonte: Minha Casa Solar (2023).

Feito o orçamento para a utilização do inversor convencional, segue na tabela 10 o orçamento referente ao sistema FV com a aplicação de um micro inversor.

Tabela 10 - Orçamento referente ao sistema fotovoltaico utilizando micro inversor.

<b>Material</b>	<b>Preço Unitário</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Preço Total</b>
Canadian Solar 144 Cells 450Wp Mono	R\$ 675,00	3	R\$ 2.025,00
Cabo 4mm, 1000V	R\$ 3,22	11	R\$ 35,42
String Box com Proteção CA	R\$ 354,22	1	R\$ 354,22
Estrutura de Suporte e Mão de Obra	R\$ 2075,35	1	R\$ 2075,35
Micro inversor solar Deye Monofásico 2kW – SUN2000G3	R\$ 1199,79	1	R\$ 1199,79
Projeto e Homologação de Energia Fotovoltaica padrão Enel	R\$ 600,00	1	R\$ 600,00
<b>Total</b>			<b>R\$ 6289,78</b>

Fonte: Minha Casa Solar (2023).

Com a análise dos orçamentos em questão, verifica-se que o sistema com utilização do micro inversor apresenta um custo significativamente menor, nesse sentido será adotado o orçamento presente na tabela 10 para a análise de viabilidade financeira a ser tratada no tópico a seguir.

#### 4.2.1 *Análise de Viabilidade Financeira*

O *payback* é o período necessário para que se obtenha o retorno do investimento realizado sobre determinado projeto, sendo assim, neste estudo de caso será apresentado juntamente com o orçamento levantado o tempo que se leva para se obter os custos gastos no projeto do sistema fotovoltaico.

Para a determinação do *payback*, é necessário determinar algumas informações prévias. Primeiro, é necessário se obter o valor da tarifa de energia levantada no projeto, de acordo com a distribuidora de energia e com a legislação, seguindo as regulamentações da ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) em 2023, a tarifa para o projeto em questão é de R\$ 0,56/kWh, tendo em vista que o projeto se propõe para um local residencial.

Seguindo a determinação do *payback* é necessário levantar a geração de energia mensal do sistema dimensionado, tendo em vista que é gerado 2,19 kWh/dia por cada módulo e tendo 3 módulos, o sistema apresentado é responsável por gerar 197 kWh/mês.

Com os dados levantados torna-se possível então de se realizar a determinação do tempo de retorno do investimento no projeto, o *payback* para este caso segundo Solar (2018), se dará pela adaptação da seguinte equação, como é demonstrado a seguir:

$$Payback [meses] = \frac{Investimento (R\$)}{Energia Gerada \left(\frac{kWh}{mes}\right) \times Valor da Tarifa \left(\frac{R\$}{kWh}\right)} \quad (6)$$

$$Payback [meses] = \frac{6.289,78 (R\$)}{197 \left(\frac{kWh}{mes}\right) \times 0,56 \left(\frac{R\$}{kWh}\right)}$$

$$Payback [meses] = 57,01 meses$$

Sendo assim, fazendo uso da equação apresentada, o tempo de retorno para o investimento no sistema fotovoltaico com 1,35 kWp de potência, é de 57,01 meses ou 5 anos aproximadamente.

## 5 CONCLUSÕES

O objetivo geral da presente pesquisa foi demonstrar por meio de uma análise realizada, a viabilidade técnica de implantação de um projeto de energia solar conectado à rede elétrica, para suprir a demanda de energia de uma residência na cidade de Aracati – CE e concluir por meio do projeto, do orçamento e *payback* a avaliação do sistema dimensionado.

O estudo de caso para demonstração do sistema solar foi aplicado a cidade de Aracati – CE, o propósito do projeto levantado foi determinar um sistema de energia renovável que pode ser utilizado e que viabilize, em um determinado tempo, o fornecimento de energia auto sustentável, tendo em vista a excelente propagação da radiação solar nos países tropicais como o Brasil. A viabilidade de utilização deste método energético é fundamental para economia do meio ambiente e desenvolvimento de tecnologia e do setor energético, desta forma considerando então uma área de 6,60 m<sup>2</sup> foi determinado um sistema para atender à necessidade do residência proposta que é de no mínimo 1,32 kW de potência.

Primeiramente, o processo de desenvolvimento do sistema requereu o seu dimensionamento, então fazendo uso da bibliografia e das normas regulamentadas para tal, foi realizado o dimensionamento do sistema para a cidade em questão e para a área determinada, desta forma foi possível concluir que nestas condições era possível gerar um total de 2,19 kWh/dia por cada módulo, tendo um total de 3 módulos, determinando uma potência de 1,35 kW.

Com o sistema dimensionado foi possível determinar o micro inversor com base nos dados do fabricante e também a estrutura portante dos módulos. Sendo assim a partir de todos estes componentes, tornou-se possível levantar o custo total dos gastos para tornar este sistema possível, o valor total do sistema é de R\$ 6.289,78.

Tendo em vista a presente pesquisa desenvolvida para a aplicação da energia solar para uma residência, tem-se a seguinte sugestão de trabalho futuro: análise de ampliação do sistema fotovoltaico para geração de créditos para compensação em outra unidade consumidora.



## REFERÊNCIAS

AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIA RENOVÁVEL (IRENA). **Renewable capacity statistics 2021**. Abu Dhabi: IRENA, 2021. Disponível em: <https://www.irena.org/publications/2021/Apr/Renewable-Capacity-Statistics-2021>. Acesso em: 22 set. 2023.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Tarifas. Resolução Homologatória N° 2432 De 07 De Agosto De 2018**. Tarifas de Energia – TE e as Tarifas de Uso dos Sistemas de Distribuição – TUSD. 2018.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução Normativa nº 482/2012**. 2012. Disponível em: [https://www.aneel.gov.br/legislacao/resolucoes-normativas/-/document\\_library\\_display/b0JydXM9LmF0aGVuZWw6cGFnZS92aWV3LWZvcvMTUzMDUzMC1yZXN1bHRfY29udGV4dC5wZGY=](https://www.aneel.gov.br/legislacao/resolucoes-normativas/-/document_library_display/b0JydXM9LmF0aGVuZWw6cGFnZS92aWV3LWZvcvMTUzMDUzMC1yZXN1bHRfY29udGV4dC5wZGY=). Acesso em: 20 set. 2023.

AMBIENTE ENERGIA. **Sicredi Reduz Taxas Para Financiamento de Energia Solar para Residências e Empresas**. 2018. Disponível em: <https://www.ambienteenergia.com.br/index.php/2018/10/sicredi-reduz-taxas-para-financiamento-de-energia-solar-para-residencias-e-empresas/34818#.W8CcKPIKjIU>. Acesso em: 24 set. 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA (ABSOLAR). **Dados estatísticos. 2021**. Disponível em: <https://www.absolar.org.br/dados-estatisticos/>. Acesso em: 22 set. 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA (ABSOLAR). **O setor de energia solar fotovoltaica no Brasil**. 2021. Disponível em: <https://www.absolar.org.br/o-setor>. Acesso em: 23 set. 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16274: Sistemas fotovoltaicos conectados à rede — Requisitos mínimos para documentação, ensaios de comissionamento, inspeção e avaliação de desempenho**. Rio de Janeiro, 2014.

BRAGA, L. R. M.; MARTINS, G. C.; MIRANDA, M. L. **Geração de energia fotovoltaica em unidades consumidoras no Brasil**. Revista Brasileira de Energia Solar, v. 9, n. 1, p. 47-57, 2020.

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY (IRENA). **Renewable Energy Statistics 2020**. 2020. Disponível em: <https://www.irena.org/publications/2020/Jun/Renewable-energy-statistics-2020>. Acesso em: 23 set. 2023.

BRASIL. **PL 5828/2019**. Projeto de Lei do Marco Regulatório da Geração Distribuída. 2019. Disponível em: [https://www.camara.leg.br/proposicoesWeb/prop\\_mostrarintegra?codteor=1829917&filena me=PL+5829/2019](https://www.camara.leg.br/proposicoesWeb/prop_mostrarintegra?codteor=1829917&filena me=PL+5829/2019). Acesso em: 24 set. 2023.

BRASIL. **Lei nº 14.300, de 6 de janeiro de 2022**. Institui o marco legal da microgeração e minigeração distribuída, o Sistema de Compensação de Energia Elétrica (SCEE) e o Programa

de Energia Renovável Social (PERS); altera as leis n<sup>os</sup> 10.848, de 15 de março de 2004 e 9.427, de 26 de dezembro de 1996; e dá outras providências. Disponível em: [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2019-2022/2022/lei/114300.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2022/lei/114300.htm). Acesso em: 25 set. 2023.

CANADIAN SOLAR. **CSI CS6K-270P**. 2021. Disponível em:< [https://www.canadiansolar.com/downloads/datasheets/en/new/Canadian\\_Solar-Datasheet-CS6K-P\\_en.pdf](https://www.canadiansolar.com/downloads/datasheets/en/new/Canadian_Solar-Datasheet-CS6K-P_en.pdf)>. Acesso em: 23 set. 2023.

CHEN, J. et al. **Assessment of Energy and Environmental Efficiency of Different Photovoltaic Technologies**. Journal of Cleaner Production, v. 247, 2020.

GARCIA, L. C.; CAMPANA, P. P.; BRUM, A. S.; CERETTA, P. S. **Evaluation of the solar photovoltaic system for a single-family house in southern Brazil**. Renewable Energy, 119, 161-172, 2018.

FARIAS, T. L. S.; CAMPOS, C. M.; FERNANDES, T. R. S. **Análise da Resolução Normativa N<sup>o</sup> 482/2012 e suas modificações: geração distribuída no Brasil**. Revista GEINTEC: Gestão, Inovação e Tecnologias, v. 10, n. 2, p. 5883-5893, 2020.

HU, Y.; HAN, X.; WU, Y.; LI, H.; QIU, X. **Optimal Design and Performance Evaluation of a High-Precision Dual-Axis Solar Tracking System**. IEEE Access, 8, 35634-35645, 2020.

KREBS, F. C.; GEVORGIAN, S.; HIRSCH, L. **Solar cell technology development for concentrator photovoltaics**. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 26(2), 69-84, 2018.

XU, J.; HE, Z.; ZHU, L.; XU, Y. **A novel low-cost solar tracking system with an adaptive tracking strategy**. Applied Energy, 238, 1262-1270, 2019.

SANTOS, I. P. **Integração de painéis solares fotovoltaicos em edificações residenciais e sua contribuição em um alimentador de energia de zona urbana mista**. 2009. 126p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

KRENZINGER, A.; NASCIMENTO, F. A. R.; SOUZA, G. F. L.; PINHO, J. T. **Solar energy in Brazil: An overview of the photovoltaic market**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 145, 111062, 2021.

LORENZO, E.; ZILLES, R. **El generador fotovoltaico**. In: LORENZO, Eduardo Org. Electricidad solar: ingenieria de los sistemas fotovoltaicos. Sevilla: ProgenSA, 1994.

PINHO, J. T. **Introduction to photovoltaic systems**. Springer, 2015.

PINHO, J.; GALDINO, M. **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos**, 2<sup>a</sup>. ED., Editora: Abril, Rio de Janeiro, 2014.

LIAO, Y., et al. **Fault detection and diagnosis for photovoltaic systems: A review**. Renewable and Sustainable Energy Reviews 140, 110719, 2021.

ZHENG, X.; WU, X.; JIANG, X.; HE, Z. **An intelligent tracking algorithm of single-axis solar tracking system based on support vector regression**. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 12(1), 015001, 2020.

LISITA JÚNIOR, O. **Sistemas fotovoltaicos conectados à rede: Estudo de caso de 3kWp instalados no estacionamento do IEE-USP**. 2005. 87p. Dissertação (Mestrado – Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia) – Instituto de Eletrotécnica e Energia, Escola Politécnica, Faculdade de Economia e Administração, Instituto de Física da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2005.

MACHADO, L. A. S. et al. **Potencial de redução de emissões de gases de efeito estufa em sistemas fotovoltaicos flutuantes em reservatórios hidrelétricos**. *Ambiência (UNICENTRO)*, v. 16, n. 4, p. 1179-1201, 2020.

PEREIRA, J. L. C. et al. **Análise de desempenho de um sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica em clima tropical**. *Revista Brasileira de Energia Solar*, v. 8, n. 1, p. 01-08, 2019.

ROCHA, Maria C. F.; MARIANO, Aline R. **A energia solar no Brasil e no mundo: perspectivas e desafios**. *Cadernos EBAPE.BR*, v. 15, n. 3, p. 601-613, 2017.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Boletim de Monitoramento do Sistema Elétrico Brasileiro**. Brasília, DF: EPE, 2021. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/boletins-de-monitoramento-do-sistema-eletrico-brasileiro>. Acesso em: 23 set. 2023.

OLIVEIRA, L. C.; LEÃO, R. N.; FERNANDES, L. A. **Photovoltaic solar energy in the state of Bahia: An analysis of the electricity market**. *Energy Policy*, 133, 110906, 2019.

OLIVEIRA, J. M. et al. **Projeto e simulação de sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica de baixa tensão**. In: Congresso Brasileiro de Energia Solar, 2019, Vitória. Anais do XVI Congresso Brasileiro de Energia Solar, 2019.

OLIVEIRA, L. R. M. de; MORAES, G. J. de; KARAM JUNIOR, D. **Análise dos incentivos fiscais para micro e minigeração de energia elétrica fotovoltaica**. *Revista Brasileira de Gestão e Desenvolvimento Regional*, v. 14, n. 3, p. 165-187, 2018.

SALAMONI, I. T. **Um programa residencial de telhados solares para o Brasil: diretrizes de políticas públicas para a inserção da geração fotovoltaica conectada à rede elétrica**. 2009. 186p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

ACKERMANN, T.; ANDERSSON, G.; SÖDER, L. Distributed generation: a definition. *Electric Power Systems Research*. Issue 3, v.57, p.195-204, 2001.

RÜTHER, Ricardo. **A energia solar no Brasil e os sistemas conectados à rede elétrica**. 2016. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/energia/article/view/44849>. Acesso em: 23 set. 2023.

GÖRANSSON, Anders et al. **The potential and challenges of solar energy contribution to sustainable energy development in sub-Saharan Africa**. *Energy for Sustainable Development*, v. 50, p. 31-44, 2019.

SOLAR. **Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede**. Universo Solar. 2016. Disponível em: <<http://universosolar.com/sistemas-fotovoltaicos-conectados-a-rede/>>. Acesso em: 24 set. 2023.

MARINOSKI, D. L.; SALAMONI, I.T.; RÜTHER, R. Pré-dimensionamento de sistema solar fotovoltaico: estudo de caso do edifício sede do CREA/SC. In: **I Conferência Latino-Americana de Construção Sustentável; X Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído**. 18 -21 de julho de 2004, São Paulo.

MOKHTAR, M. A.; ABU-ELMAATY, S. A.; MOHAMED, A. H. **Review on fault diagnosis in photovoltaic systems: Techniques and algorithms**. Renewable and Sustainable Energy Reviews 81, 743-755, 2018.

SONNEN ENERGIA. **Catálogo de Estruturas de Fixação para Painéis Fotovoltaicos**. 2017. Disponível em: <<http://www.sonnen.com.br/wp-content/uploads/2017/04/Cat%C3%A1logo-SolarFix-2017.pdf>>. Acesso em: 24 set. 2023.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **Renewables 2021: Analysis and Forecasts to 2026**. 2021. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/renewables-2021>. Acesso em: 23 set. 2023.

SOUZA, R. C.; PASCHOALOTTO, A. B.; PAULINO, G. H. **A review of microgrid and photovoltaic systems**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 47, 48-59, 2015.

SOUZA, W. O. et al. **Dimensionamento de um sistema fotovoltaico off-grid para uma residência localizada na zona rural de Pau dos Ferros/RN**. In: Congresso Brasileiro de Energia Solar, 2015, Belo Horizonte. Anais do XIII Congresso Brasileiro de Energia Solar, 2015.

SOUZA, Edmilson Moutinho dos Santos. **Análise econômica da implantação de sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica para microgeração de energia elétrica**. 2016. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rgni/a/dzjKkkvV7QgKR7DPvDvLcJ7/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 23 set. 2023.

AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIA (IEA). **Photovoltaics Report**. Paris: IEA, 2021. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/photovoltaic-report>. Acesso em: 12 set. 2023.

ROCHA, Maria C. F.; MARIANO, Aline R. **A energia solar no Brasil e no mundo: perspectivas e desafios**. Cadernos EBAPE.BR, v. 15, n. 3, p. 601-613, 2017.

LOPES, M. J. M.; SEIXAS, J.; SOARES, F. J. P.; LIMA, R.; MACHADO, J. T. **A decision-making tool for solar trackers selection**. Energy Procedia, 157, 1403-1410, 2019.

LOPES, P. A., et al. **A review of the main challenges associated with the photovoltaic systems performance monitoring**. Renewable and Sustainable Energy Reviews 99, 394-408, 2019.

ALMEIDA, T. C. et al. **Energia solar fotovoltaica: fundamentos e aplicações**. 2. ed. São Paulo: Érica, 2015.

SPERIOSU, M. **The Photovoltaic Effect: A Brief History**. 2018. Disponível em: <https://www.solarpowerworldonline.com/2018/03/the-photovoltaic-effect-a-brief-history/>. Acesso em: 24 set. 2023.

GARCÍA-RODRÍGUEZ, R.; JARAMILLO-MARTÍNEZ, A. **From the Photoelectric Effect to the Solar Cell: The History of the Photovoltaic Effect**. IEEE Journal of Photovoltaics, v. 11, n. 2, p. 524-532, 2021.

JANNUZZI, Gilberto de Martino (coord). **Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede elétrica no Brasil: Panorama da Atual Legislação**. Campinas-SP: International Energy Initiative para a América Latina (IEI-LA) e Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), 2009.

TEIXEIRA, A. **PL 5829/19: O que muda com o marco legal da geração distribuída?** INFOSOLAR. 2021. Disponível em: <<https://infosolar.com/politica/legislativo/o-que-muda-com-a-aprovacao-da-pl-5829-19>>. Acesso em: 24 set. 2023.

PEREIRA, O. L. S.; GONÇALVES, F. F. Dimensionamento de inversores para sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica: estudo de caso do sistema de Tubarão/SC. **Revista Brasileira de Energia**. Vol.14, nº 1, 1º Sem. 2008, pp. 25-45.

SANTANA, L. C.; SILVA, M. E. **Energia fotovoltaica em edificações**. In: Congresso Brasileiro de Gestão de Desenvolvimento de Produto, 8., 2017, Aracaju. Anais eletrônicos [...]. Aracaju: Universidade Federal de Sergipe, 2017.

RINCÓN-MEJÍA, J. A. et al. **Enhanced power output of a crystalline silicon photovoltaic module through low-cost and scalable technologies: A review**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 127, 2020.

FRIESEN, G., et al. **Photovoltaic module-level monitoring: A comprehensive review of approaches and technical challenges**. Renewable and Sustainable Energy Reviews 137, 110662, 2021.

LIU, H. et al. **Review on bifacial photovoltaic technology and its application**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 135, 2021.

MACHADO, L. A. S. et al. **Potencial de redução de emissões de gases de efeito estufa em sistemas fotovoltaicos flutuantes em reservatórios hidrelétricos**. *Ambiência (UNICENTRO)*, v. 16, n. 4, p. 1179-1201, 2020.