



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO – UFOP

ESCOLA DE MINAS

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA



CARLOS ALEXANDRE CAMILO RIBEIRO

**ESTUDO DA VIABILIDADE DE CÉLULAS FOTOVOLTAICAS
APLICADAS EM PLACAS SOLARES PARA UMA RESIDÊNCIA**

**OURO PRETO - MG
2024**

CARLOS ALEXANDRE CAMILO RIBEIRO
carlos.ribeiro@aluno.ufop.edu.br

**ESTUDO DA VIABILIDADE DE CÉLULAS FOTOVOLTAICAS
APLICADAS EM PLACAS SOLARES PARA UMA RESIDÊNCIA**

Monografia apresentada ao Curso de
Graduação em Engenharia Mecânica
da Universidade Federal de Ouro Preto
como requisito para a obtenção do
título de Engenheiro Mecânico.

Professor orientador: DSc. Luís Antônio Bortolaia

OURO PRETO – MG
2024

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

R484e Ribeiro, Carlos Alexandre Camilo.

Estudo da viabilidade de células fotovoltaicas aplicadas em placas solares para uma residência. [manuscrito] / Carlos Alexandre Camilo Ribeiro. - 2024.

71 f.

Orientador: Prof. Dr. Luís Antônio Bortolaia Bortolaia.
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia Mecânica .

1. Geração de energia fotovoltaica - Módulo fotovoltaico. 2. Geração de energia fotovoltaica - Células solares. 3. Sistemas de energia fotovoltaica - Rendimento energético. 4. Métodos de simulação. 5. Estudos de viabilidade. I. Bortolaia, Luís Antônio Bortolaia. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 621

Bibliotecário(a) Responsável: Maristela Sanches Lima Mesquita - CRB-1716



FOLHA DE APROVAÇÃO

Carlos Alexandre Camilo Ribeiro

Estudo da viabilidade de células fotovoltaicas aplicadas em placas solares para uma residência

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Mecânico

Aprovada em 31 de Janeiro de 2024

Membros da banca

DsC. Luís Antônio Bortolaia - Orientador (Universidade Federal de Ouro Preto)
DsC. Elisângela Martins Leal (Universidade Federal de Ouro Preto)
DsC. Jorge Luiz Brescia Murta (Universidade Federal de Ouro Preto)

Luís Antônio Bortolaia, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 09/02/2024



Documento assinado eletronicamente por **Luís Antonio Bortolaia, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 09/02/2024, às 10:58, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0667099** e o código CRC **19F26277**.

AGRADECIMENTO

A Deus, pelo dom da vida, inteligência, e que me permitiu ter saúde e determinação no processo de desenvolvimento deste trabalho, ajudando sempre a ultrapassar os obstáculos desta jornada.

Aos meus pais José e Márcia, e minha avó Maura, pilares eternos de minha vida, pelo incentivo, amor e sacrifício para que eu chegasse até aqui.

À minha irmã Bruna, pelo companheirismo e apoio em todos os momentos, estando sempre presente em minha vida.

À Gloriosa República Sem Destino, seus moradores e ex-alunos, pelo acolhimento, companheirismo, aprendizados e momentos para sempre eternizados em minha memória.

Aos familiares e amigos, que estiveram ao meu lado, pela irmandade incondicional e pelo suporte demonstrado ao longo de todo o período de tempo em que me dediquei a este trabalho.

Ao meu orientador Bortolaia, pelo constante auxílio, desempenhando seu papel com dedicação e amizade a todo tempo, com grande prestação e prontidão.

A todo o corpo docente da UFOP, em especial à Gloriosa Escola de Minas, pelo ensino de qualidade.

“O homem científico não pretende alcançar um resultado imediato. Ele não espera que suas ideias avançadas sejam imediatamente aceitas. Seus trabalhos são como sementes para o futuro. Seu dever é lançar as bases para aqueles que estão por vir e apontar o caminho.

O dia em que descobriremos exatamente o que é a eletricidade, isso irá marcar um evento provavelmente maior, mais importante que qualquer outro na História da Humanidade. Então, será apenas uma questão de tempo para que o Homem consiga ligar suas máquinas diretamente à própria natureza.”.

Nikola Tesla

RESUMO

O presente trabalho trata de um estudo de caso da instalação de um sistema fotovoltaico em uma residência em Sacramento-MG, analisando as características de viabilidade financeira para este projeto, bem como se seu rendimento está coerente com o esperado, para que seja possível criar através deste, simulações para comparação com outros tipos de células presentes no mercado fotovoltaico atual. Para isso são necessárias coletas de dados teóricos para dar embasamento ao trabalho, demonstrando a necessidade de averiguar os tipos de módulos que existem para serem instalados em uma residência, os quais possuem diferentes rendimentos e preços, por possuírem diferentes tipos de elementos químicos em seus materiais de fabricação, de modo a encontrar as melhores escolhas para realizar uma produção de energia renovável. Os dados coletados do sistema fotovoltaico real são obtidos através da proposta comercial deste, bem como na sua constante análise através de um aplicativo móvel que monitora a geração de energia do sistema, que foram tabelados, formando os posteriores resultados em cima das outras células fotovoltaicas escolhidas para simulação, garantindo a possibilidade de comparar tanto seus custos, como suas gerações energéticas, usando ferramentas de análise financeira, indicando quais são os tipos mais adequados para criação de sistemas fotovoltaicos atualmente. Através deste método, foi possível estabelecer uma sequência das células com melhores quesitos de rendimento energético e de viabilidade econômica para sua instalação, iniciando pela célula de silício monocristalino, gerando uma economia anual média de 4268,70 reais (U\$ 869,39), depois a de silício policristalino no mercado, com economia de 3891,37 reais anuais (U\$ 762,54), seguida pela de telureto de cádmio, economizando 3221,30 reais ao ano (U\$ 656,07), depois as de ligas CIGS chegando aos valores de 3063,20 reais anualmente (U\$ 623,87) e por fim, as de silício amorfo, sendo capaz de gerar uma economia anual de 1383,38 reais (U\$ 281,75), posições justificadas pelo seus referentes custos e complexidades de processos de fabricação.

Palavras-chave: Células fotovoltaicas. Rendimento energético. Viabilidade econômica. Simulação. Módulos fotovoltaicos.

ABSTRACT

This present project is about a study case of a photovoltaic installation in a residence wich is situated in the city of Sacramento-MG, analyzing characteristics such as economic feasibility, as well as the energy effincency expected, so that it is possible to create, through this, simulation comparisons with other types of cells present in the current photovoltaic market. For this, it is necessary to collect theoretical data to support the work, demonstrating the need to investigate the types of modules that exist to be installed in a residence, which have different efficiencies and prices, as they have different types of chemical elements in their manufacturing materials, in order to find the best choices to produce renewable energy. The data collected from the real photovoltaic system are obtained through its commercial proposal, as well as its constant analysis through a mobile application that monitors the system's energy generation, which were tabulated, forming the subsequent results on top of the other photovoltaic cells chosen for simulation, ensuring the possibility of comparing both their costs and their energy generations, using financial analysis tools, indicating which types are most suitable for creating current photovoltaic systems. Using this method, it was possible to establish a sequence of cells with the best energy yield and economic feasibility requirements for installation, starting with the monocrystalline silicon, generating an average annual saving of 4268.70 reais (U\$ 869,39), then polycrystalline silicon on the market, saving of 3891.37 reais annually(U\$ 762,54), followed by cadmium telluride, saving 3221.30 reais per year(U\$ 656,07), then those of CIGS alloys reaching values of 3063.20 reais annually (U\$ 623,87) and finally, those of amorphous silicon, being able to generate annual savings of 1383.38 reais (U\$ 281,75), positions justified by their relative costs and manufacturing process complexities.

Key-words: *Photovoltaic cells. Energy efficiency. Economic feasibility. Simulation. Photovoltaic modules.*

LISTA DE SÍMBOLOS

E_g	Banda proibida (<i>gap</i>)
eV	Elétron-Volt
Wp	Potência elétrica em Watt-pico
DSSC	<i>Dye Sensitized Solar Cell</i> (Células sensibilizadas por corantes)
CIS	Disseleneto de cobre índio
CIGS	Disseleneto de cobre índio gálio
CdTe	Telureto de cádmio
C	Carbono
Ge	Germânio
Si	Silício
As	Arsênio
Se	Selênio
Te	Telúrio
P	Fósforo
m-Si	Silício monocristalino
p-Si	Silício policristalino
a-Si	Silício amorfo
Si-Fitas	Fitas de Silício
ROI	<i>Return On Investment</i> (Retorno sobre investimento)
IN	Investimento inicial (R\$)
L	Lucro por uma unidade de tempo (R\$/Ano)

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Materiais semicondutores produzindo corrente elétrica.....	1
Figura 2 – Irradiação solar mundial.....	7
Figura 3 – Potencial fotovoltaico mundial.....	7
Figura 4 – Radiação Solar Média no Brasil.....	9
Figura 5 – Diagrama Fotovoltaico – Sistema <i>On Grid</i>	10
Figura 6 – Bandas de energia.....	12
Figura 7 – Porcentagem de fabricação de células fotovoltaicas nas indústrias.....	12
Figura 8 – Curva característica I-V e curva de potência P-V.....	14
Figura 9 – Gráfico demonstrando diferentes níveis de irradiância solar.....	15
Figura 10 – Variação de temperaturas das células, em relação à corrente pela tensão.....	16
Figura 11 – Fluxograma de Metodologia aplicada ao trabalho.....	21
Figura 12 – Visão via satélite do local de estudo.....	24
Figura 13 – Dados Técnicos DS3D – <i>APSystems</i>	25
Figura 14 – Meses com maior rendimento fotovoltaico.....	26
Figura 15 – Módulo de silício policristalino.....	27
Figura 16 – Módulo de silício monocristalino.....	28
Figura 17 – Módulo de silício amorfo.....	30
Figura 18 – Módulos de telureto de cádmio.....	36
Figura 19 – Módulo de liga CIGS rígido.....	38
Figura 20 – Módulo de liga CIGS flexível.....	39
Figura 21 – Perovskita em desenvolvimento na <i>startup Oxford PV</i>	41
Figura 22 – Interface do aplicativo.....	42
Figura 23 – Produção anual do sistema fotovoltaico.....	44
Figura 24 – Gráfico com valores de sistemas simulados.....	51
Figura 25 – Economia e geração anuais dos módulos.....	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Semicondutores e seus respectivos E_g (valores de bandas proibidas).....	11
Tabela 2 – Melhores células fotovoltaicas fabricadas em 2012.....	13
Tabela 3 – Valores de módulos fotovoltaicos no Reino Unido.....	22
Tabela 4 – Módulo de silício monocristalino.....	31
Tabela 5 – Módulo de silício amorfo.....	32
Tabela 6 – Módulo de telureto de cádmio.....	32
Tabela 7 – Módulo de liga CIGS.....	33
Tabela 8 – Variáveis e Indicadores.....	34
Tabela 9 – Valores de células fotovoltaicas.....	37
Tabela 10 – Comparação de sistema de silício policristalino.....	39
Tabela 11 – Dados do estudo de caso de 2018.....	40
Tabela 12 – Comparação de módulos policristalinos para investimento.....	42
Tabela 13 – Valores simulados de silício monocristalino.....	45
Tabela 14 – Cálculos equacionais de silício monocristalino.....	46
Tabela 15 – Valores simulados de silício amorfo.....	46
Tabela 16 – Cálculos equacionais de silício amorfo.....	47
Tabela 17 – Valores simulados de telureto de cádmio.....	47
Tabela 18 – Cálculos equacionais de telureto de cádmio.....	48
Tabela 19 – Valores simulados de liga CIGS.....	48
Tabela 20 – Cálculos equacionais de liga CIGS.....	49
Tabela 21 – Relação monetária de sistemas simulados.....	50
Tabela 22 – Variáveis para resultados equacionais.....	51

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Formulação do Problema.....	1
1.2	Justificativa.....	4
1.3	Objetivos.....	4
1.3.1	Geral	4
1.3.2	Específicos.....	5
1.4	Estrutura do Trabalho	5
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
2.1	A utilização da energia solar em placas fotovoltaicas.....	6
2.1.1	Energia fotovoltaica: seu uso mundial e no Brasil	6
2.1.2	Funcionamento do painel solar fotovoltaico	9
2.2	O funcionamento de células fotovoltaicas.....	10
2.2.1	Como as células fotovoltaicas geram energia.....	10
2.2.2	Tecnologias na produção de células fotovoltaicas	12
2.3	A composição de módulos fotovoltaicos.....	14
2.3.1	Funcionamento e características de módulos fotovoltaicos	14
2.3.2	Influência de irradiância e temperatura sobre o módulo fotovoltaico	15
2.4	Diferentes composições de células fotovoltaicas no mercado atual.....	16
2.4.1	Primeira geração – <i>Wafers</i> de silício	17
2.4.2	Segunda geração – Filmes finos	17
2.4.3	Terceira geração – Novas tecnologias	17
2.4.3.1	Células de Nanocristais	17
2.4.3.2	Células solares orgânicas	17
2.4.3.3	Células híbridas	17
2.4.3.4	Células sensibilizadas por corantes (DSSC)	18
2.4.3.5	Células <i>perovskita</i>	18
2.4.4	Células Tandem ou de Múltiplas Junções	18
2.5	Análise das células aplicadas no mercado atualmente	18
2.5.1	Retorno Sobre Investimento (<i>ROI</i>).....	18
2.5.2	Período de <i>Payback</i>	19
3	METODOLOGIA.....	20
3.1	Tipo de Pesquisa.....	20

3.2	Materiais e Métodos	21
3.2.1	Descrição da Instalação Fotovoltaica	22
3.2.2	Validação da proposta comercial do estudo de caso	24
3.2.3	Características de diferentes módulos	26
3.2.3.1	Módulo de silício policristalino	27
3.2.3.2	Módulo de silício monocristalino.....	28
3.2.3.3	Módulo de silício amorfo	30
3.2.3.4	Módulo de telureto de cádmio (CdTe).....	31
3.2.3.5	Módulo de liga CIGS	33
3.2.3.6	Módulo de perovskita.....	35
3.3	Variáveis e Indicadores	37
3.4	Instrumento de coleta de dados	37
3.5	Tabulação dos dados.....	38
3.6	Considerações finais	38
4	 RESULTADOS.....	39
4.1	Monitoramento do sistema	39
4.2	Comparação com módulos atuais	41
4.3	Aplicação de proporção entre módulos	45
4.3.1	Simulação de silício monocristalino.....	45
4.3.2	Simulação de silício amorfo	46
4.3.3	Simulação de telureto de cádmio (CdTe)	47
4.3.4	Simulação de liga CIGS	48
4.4	Análise de resultados	50
5	 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES	53
5.1	Conclusão	53
5.2	Recomendações	54
	REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA.....	55

1 INTRODUÇÃO

1.1 Formulação do Problema

Nos dias atuais, uma das alternativas mais promissoras para a geração de energia, que vêm ganhando espaço e viabilidade no mundo inteiro, incluindo o Brasil, é a utilização da energia proveniente do Sol. Usada tanto na forma de calor quanto de luz, a radiação incidente desse astro incide sobre a superfície da Terra, possibilitando a capacidade de geração de energia elétrica, através de painéis fotovoltaicos.

Esta técnica vem ganhando cada vez mais espaço no mercado, junto com a constante consolidação sociocultural do uso de energias renováveis e desenvolvimento sustentável, também disseminadas com o desenvolvimento de mídias para obtenção de informação da população mundial, e os constantes incentivos de empresas, que estão dando maior visibilidade neste assunto.

Com essa premissa, é possível abordar a área de desenvolvimento de placas fotovoltaicas, a qual vem sendo assunto de pesquisas durante as últimas décadas, dando grandes passos, tanto no quesito custo/benefício, quanto no quesito de melhorias que vêm sendo feitas em sua composição. Essa melhoria ocorre através da atuação das células fotovoltaicas que as compõem, podendo obter diferentes composições de estrutura cristalina, em sua maioria, usando o Silício como elemento base de sua construção.

Sendo assim, existem células fotovoltaicas que podem ser constituídas de cristais de silício monocristalinos, policristalinos, de silício amorfo, entre vários outros compostos químicos, todos estes possuindo propriedades alterando o rendimento energético, e o valor de mercado atribuído. Este trabalho está focado em estudar formas diferentes de fabricação de células, tendo a finalidade de propiciar melhor rendimento de produção energética, e consequentemente avaliando seu custo de produção.

Para um melhor entendimento sobre o funcionamento destas células, descreve-se que, segundo Pinho e Galdino (2014), o efeito fotovoltaico acontece em materiais semicondutores que possuem bandas de energia onde é permitida a presença de elétrons (banda de valência) e de outra totalmente “vazia” (banda de condução). O semicondutor mais usado é o silício. Seus átomos possuem quatro elétrons que se ligam aos vizinhos, formando uma rede cristalina.

Ainda segundo Pinho e Galdino (2014), ao adicionarem-se átomos com cinco elétrons de ligação, como o fósforo, por exemplo, um elétron em excesso não poderá ser emparelhado e que ficará "sobrando", fracamente ligado a seu átomo de origem. Isto faz com que, com pouca energia térmica, este elétron se livre, indo para a banda de condução, tendo o fósforo como um dopante doador de elétrons e denomina-se dopante n ou impureza n.

Mas caso introduzem-se átomos como o boro, que tem apenas três elétrons de ligação, faltará um elétron para satisfazer as ligações com os átomos de silício da rede, denominada buraco ou lacuna e ocorre que, com pouca energia térmica, um elétron de um sítio vizinho pode passar a esta posição, deslocando a lacuna, sendo o boro um aceitador de elétrons ou um dopante p (PINHO e GALDINO, 2014).

Segundo Kalogirou (2016), é possível entender que com os semicondutores tipo p e n são unidos, os elétrons em excesso a partir do tipo n saltam para encher as lacunas do tipo p, e as lacunas do tipo p migram por difusão para o lado do tipo n, deixando o lado n da junção carregado positivamente e o lado p carregado negativamente. As cargas negativas do lado p restringem os movimentos dos elétrons adicionais do lado n; mas o movimento dos elétrons adicionais do lado p é mais fácil por causa das cargas positivas na junção no lado n, sendo assim, a junção p-n comporta-se como um diodo.

Estas cargas aprisionadas dão origem a um campo elétrico permanente que dificulta a passagem de mais elétrons do lado n para o lado p; este processo alcança um equilíbrio quando o campo elétrico forma uma barreira capaz de barrar os elétrons livres remanescentes no lado n. Se uma junção pn for exposta a fótons com energia maior que o *gap* (separação de duas bandas permitidas dos semicondutores, denominada banda proibida), ocorrerá a geração de pares elétron-lacuna; se isto acontecer na região onde o campo elétrico é diferente de zero, as cargas serão aceleradas, gerando assim, uma corrente através da junção (PINHO e GALDINO, 2014).

Este deslocamento de cargas dá origem a uma diferença de potencial ao qual chamamos de Efeito Fotovoltaico, Se a célula for conectada a dois eletrodos, haverá tensão elétrica sobre eles. Se houver um caminho elétrico entre os dois eletrodos, surgirá uma corrente elétrica por uma diferença de potencial (VILLALVA, 2012).

A Figura 1 demonstra três situações diferentes que ocorrem com materiais semicondutores, com sua capacidade de produção de energia elétrica.

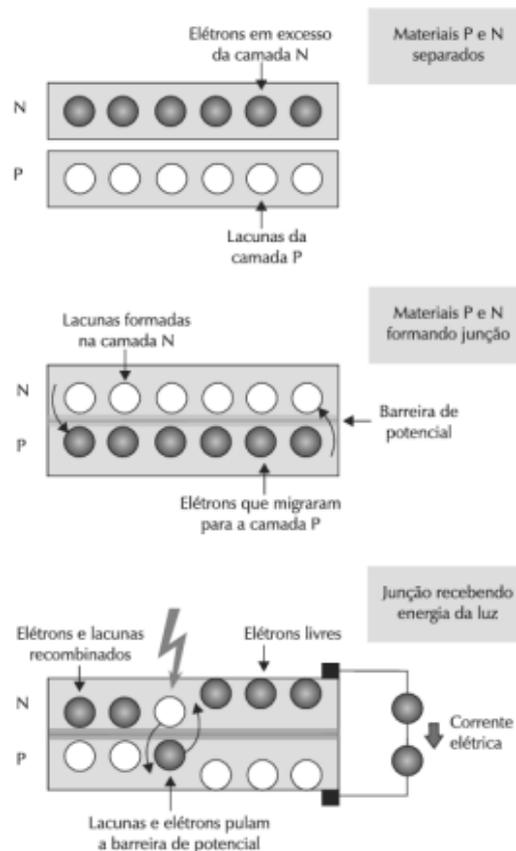


Figura 1 – Materiais semicondutores produzindo corrente elétrica
Fonte: Villalva (2012)

É possível observar na figura 1 que os materiais semicondutores foram dispostos primeiramente separados, depois são mostrados formando uma junção, e posteriormente, essa junção exposta à luz solar, para a produção de corrente elétrica.

Tendo suas composições em mente, as células fotovoltaicas, apresentando essas diferentes qualidades (atualmente existindo três gerações destas), possuem também a possibilidade de obterem uma melhor captação da energia solar para a produção energética por transferência de calor (com placas solares no mercado atual tendo rendimento entre 16% e 18%), variando assim, sua viabilidade financeira, pois quanto maior o seu rendimento, maior será o seu custo de fabricação e, conseqüentemente, o preço da placa fotovoltaica a qual será composta.

Objetivando um melhor desempenho, a proposta deste estudo é pesquisar sobre materiais que possibilitem uma melhoria no rendimento de produção de energia de placas

fotovoltaicas através da composição da célula fotovoltaica, a qual poderá ser empregada em outros estudos além de placas, como a utilização destas em veículos ou construções em geral.

Diante do contexto apresentado, tem-se a seguinte problemática:

Qual a melhor composição química e estrutural de uma célula fotovoltaica, para a otimização de seu rendimento percentual, levando em consideração seu custo?

1.2 Justificativa

A corrente elétrica produzida pela célula fotovoltaica pode ser usada numa infinidade de aplicações, alimentando aparelhos elétricos, carregando baterias usadas em vários automóveis por exemplo, bem como quaisquer locais com sistemas conectados à rede elétrica.

Uma célula fotovoltaica sozinha produz pouca energia, obtendo uma tensão elétrica muito baixa, mas várias células podem ser ligadas em série para fornecer uma grande quantidade de energia elétrica e uma tensão mais elevada.

Existem diversos outros tipos de tecnologias e materiais além das de silício, e de acordo com Villalva (2012), recentemente têm surgido pesquisas sobre as chamadas células fotovoltaicas orgânicas, que utilizam polímeros e outros tipos de materiais combinados no lugar dos semicondutores, mas essa tecnologia ainda não alcançou eficiência de conversão muito elevada, nem a confiabilidade necessária para a produção comercial.

Tendo este contexto em mente, justifica-se a realização de pesquisas que envolvem a constante análise de rendimentos de produção de energia de células fotovoltaicas mais atuais, com a premissa da fabricação em larga escala comercial de células com composições que façam a melhoria deste rendimento, acompanhada da ideia de viabilização monetária de produtos que são constituídos destas, como os painéis fotovoltaicos residenciais.

1.3 Objetivos

1.3.1 Geral

Avaliar as células fotovoltaicas existentes no mercado atualmente (ou em pesquisa), comparando-as de forma a catalogar seu rendimento e custo.

1.3.2 Específicos

- Realizar estudo bibliográfico acerca energia fotovoltaica e painéis fotovoltaicos;
- Pesquisar detalhadamente sobre a composição físico-química e rendimento de células fotovoltaicas;
- Estudar de modo técnico e econômico os painéis fotovoltaicos;
- Exibir comparações e indicações das melhores tecnologias de célula.

1.4 Estrutura do Trabalho

Este trabalho está dividido em cinco capítulos, tendo em vista que o primeiro capítulo será uma introdução às energias renováveis, mostrando como acontece o processo de geração de energia elétrica através de painéis fotovoltaicos, dando ênfase nos objetivos propostos neste trabalho.

Posteriormente, o segundo capítulo se trata de uma revisão bibliográfica, expondo as características que compõem as placas fotovoltaicas, com um maior aprofundamento nas propriedades das células fotovoltaicas que dão à estas, a capacidade de geração de energia.

Dando continuidade, no terceiro capítulo é apresentada a metodologia da realização deste trabalho, informando quais os rendimentos das células mais atuais no mercado, bem como seu valor aquisitivo.

Com isso, no quarto capítulo são analisados os resultados obtidos através da metodologia em questão, e por fim, no quinto capítulo é realizado a conclusão do projeto, com as considerações finais estabelecidas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são abrangidos conteúdos que explicam e exemplificam melhor como é o funcionamento da geração de energia solar através de placas fotovoltaicas, assim como as características dos módulos que as compõem, juntamente às características das células fotovoltaicas que são comumente utilizadas no mercado atual, expondo suas características físico-químicas, com o intuito de avaliar seus preços e estruturas, assim, encontrando uma melhor viabilização devido ao seu rendimento percentual.

2.1 A utilização da energia solar em placas fotovoltaicas

2.1.1 Energia fotovoltaica: seu uso mundial e no Brasil

Por ser uma alternativa de geração de energia limpa, renovável e que se faz presente no mercado atual, tanto nacional quanto internacionalmente, a captação da luz solar e sua transformação em energia elétrica está ganhando cada vez mais notoriedade, e sua evolução gradativa traz vários benefícios ao nosso país, e nos ajuda a evitar a degradação do meio ambiente.

No mundo, a utilização de placas fotovoltaicas começou no início dos anos 60, e tende a ser mais aceita à economia global pelo seu bom rendimento de geração, pois com cálculos desenvolvidos para demonstrar a distribuição espacial da irradiância solar média anual (em W/m^2), explicitando o potencial disponível em cada país, deixando evidente que o Brasil tem essa área de disponibilidade maior que muitos países europeus, onde a conversão fotovoltaica é usada largamente.

A Figura 2 mostra a irradiância solar média anual em torno do globo terrestre.

IRRADIÂNCIA SOLAR MÉDIA

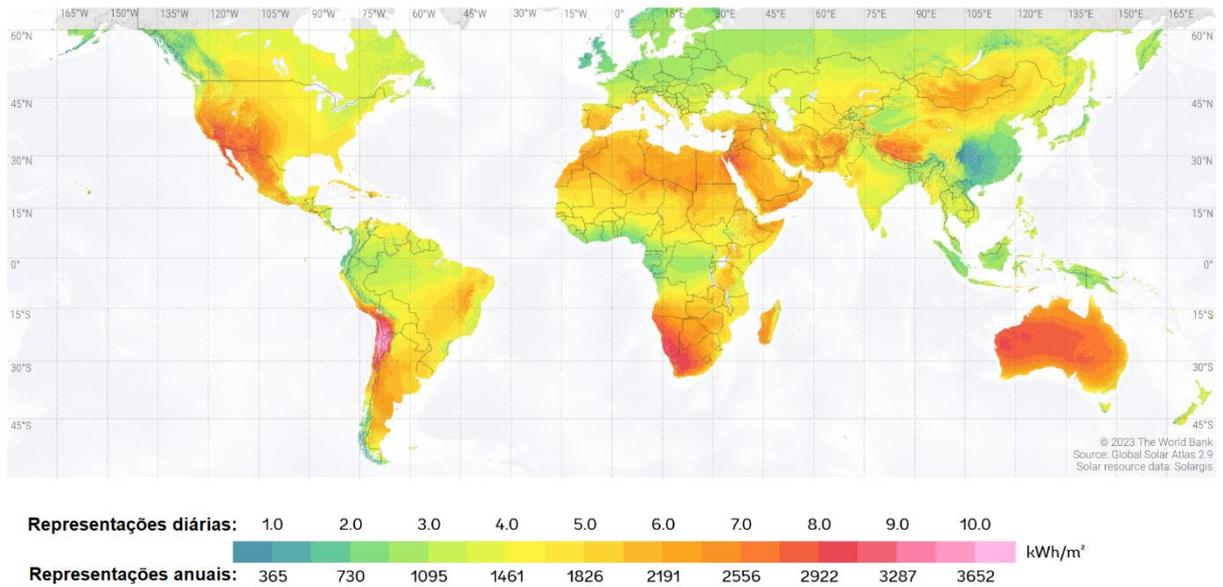


Figura 2 – Irradiação solar mundial
Fonte: *Global Solar Atlas* – (2019)

Já na Figura 3 é possível observar o potencial fotovoltaico de irradiação no mundo.

POTENCIAL DE GERAÇÃO FOTOVOLTAICA

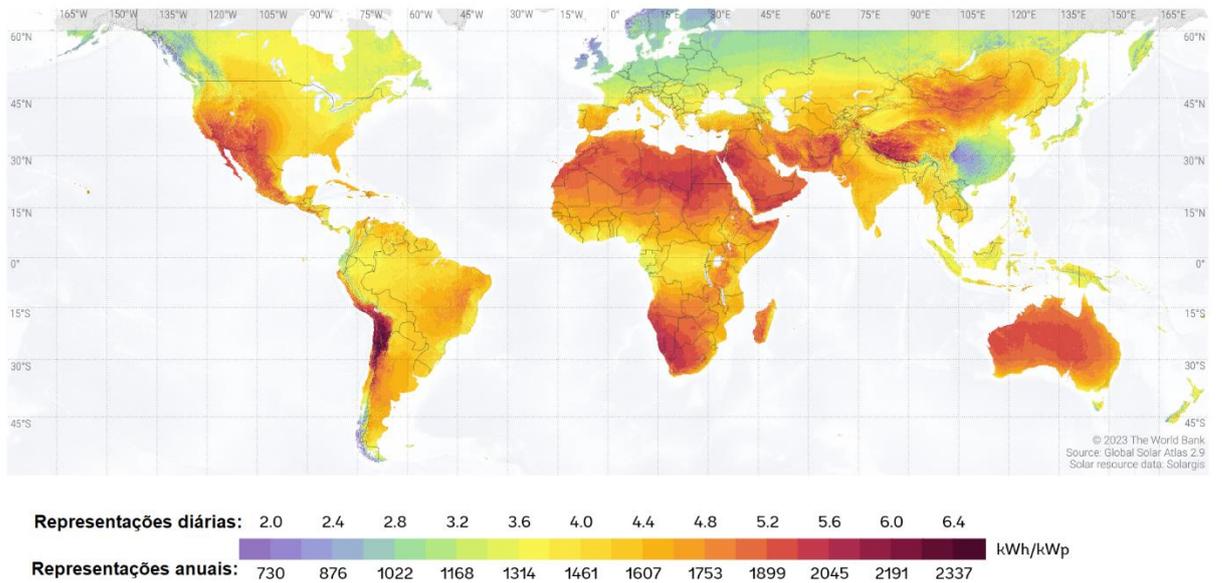


Figura 3 – Potencial fotovoltaico mundial
Fonte: *Global Solar Atlas* – (2019)

Com os dados apresentados da Figura 3, pode-se perceber que o Brasil é uma região de boa aplicabilidade da geração de energia solar, devido à sua proximidade com a linha do Equador.

Segundo Villalva (2012) as Regiões Nordeste e Centro-Oeste do Brasil são as que possuem o maior potencial de aproveitamento da energia solar. Entretanto, as demais regiões não ficam muito atrás e também possuem consideráveis valores de insolação. A Região Sul é a menos privilegiada, entretanto ainda possui insolação melhor do que aquelas encontradas em países que usam largamente a energia solar fotovoltaica.

Em comparação com outros países que concentram a maior parte da geração fotovoltaica no mundo, o Brasil é muito privilegiado para a exploração dessa fonte de energia. já que o Brasil está em uma região privilegiada quanto à incidência de raios solares, por estar próximo à linha do Equador, favorecendo regiões como Norte e Nordeste (VILLALVA, 2012).

A demanda de projetos sendo feita atualmente no nosso país deve-se a fatores que estão ligados a falta de abastecimento de energia elétrica, como usinas hidrelétricas com baixo nível das represas por falta de chuvas, outra a ser a necessidade de busca de fontes renováveis, melhorando a sustentabilidade ecológica mundial (SILVA *et al*, 2019).

A seguir, na Figura 4, pode-se perceber o mapa de irradiação solar média anual, como abordado no item 2.1.1 deste trabalho.

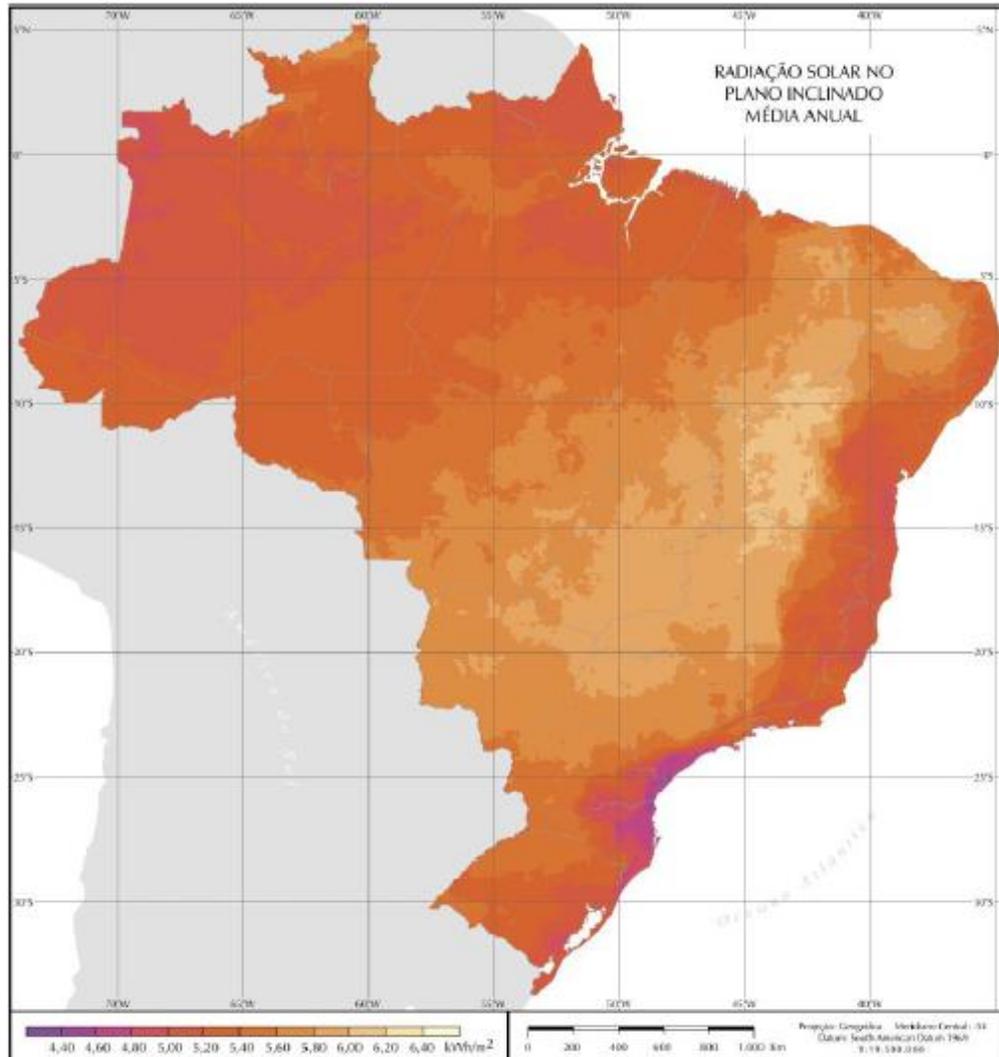


Figura 4 – Radiação Solar Média no Brasil
 Fonte: Silva *et al* (2019)

É possível observar na Figura 4, os locais onde a incidência de raios solares é predominante ao longo do território brasileiro, tendo maior incidência na região Nordeste.

Tendo em vista que a energia solar fotovoltaica é a obtenção de energia elétrica da luz solar, captada por materiais semicondutores, Silva *et al* (2019, p. 3) admite que:

Quando a luz solar atinge uma célula fotovoltaica, uma pequena corrente elétrica é formada e posteriormente recolhida por fios ligados à célula e transferida para os demais componentes do sistema. Sendo assim, quanto mais células fotovoltaicas são ligadas em série ou em paralelo, maior são a corrente e tensão produzidas.

2.1.2 Funcionamento do painel solar fotovoltaico

Os painéis solares fotovoltaicos, são estruturas formadas por um conjunto de módulos fotovoltaicos (ou unitário), sendo os principais componentes do sistema fotovoltaico para o sistema de geração de energia.

Seguindo a analogia de Silva *et al* (2019), este conjunto de módulos dá origem ao painel solar, chamado de gerador solar, compondo a primeira parte do sistema, captando a luz solar e transformando-a em elétrica, existindo hoje, vários modelos diferentes no mercado, variando sua composição através da escolha das suas células fotovoltaicas, podendo ser rígidos ou flexíveis.

A Figura 5 é capaz de demonstrar como é representado um diagrama de um sistema de geração de energia fotovoltaica simples (podendo ou não ser residencial).



Figura 5 – Diagrama Fotovoltaico – Sistema *On Grid*
Fonte: Silva *et al* (2019)

2.2 O funcionamento de células fotovoltaicas

2.2.1 Como as células fotovoltaicas geram energia

Evidenciando a ideia de Pinho e Galdino (2014), na natureza é possível encontrar materiais denominados semicondutores, os quais por possuírem uma banda de valência preenchida por elétrons, e também tendo outra banda “vazia” (sem elétrons) à temperatura de zero absoluto (0 K), nesta temperatura, este semicondutor se comporta como um isolante.

Na tabela periódica, os principais elementos a serem utilizados para a formação das células fotovoltaicas são o Carbono (C), o Germânio (Ge), o Silício (Si), o Arsênio (As), o Selênio (Se), o Telúrio (Te), e o Fósforo (P), e existindo, além destes, uma grande variedade de compostos binários, terciários e até quaternários, que podem ser definidos como semicondutores (PINHO e GALDINO, 2014).

Segundo Kalogirou (2016), alguns elétrons na banda de valência de semicondutores podem possuir uma grande quantidade de energia, o que lhes permite saltar para uma faixa superior. Estes elétrons são responsáveis pela condução de eletricidade e de calor, cuja diferença na energia de um elétron na banda de valência e a camada mais interna da banda de condução é chamada de energia de *gap* (ou banda proibida, chamado de E_g), podendo atingir até 3 eV.

De outra maneira, a Tabela 1 pode demonstrar os valores de E_g – bandas proibidas, para diversos materiais definidos como semicondutores.

Tabela 1 - Semicondutores e seus respectivos E_g (valores de bandas proibidas)

Material	Grupo	E_g (eV)	Material	Grupo	E_g (eV)
Si	elemento	1,12	GaP	III-V	2,26
Ge	elemento	0,66	CdS	II-IV	2,42
GaAs	III-V	1,43	PbS	II-IV	0,35
InSb	III-V	0,18	PbTe	II-IV	0,30
InP	III-V	1,35	CdTe	II-IV	1,45

Fonte: Pinho e Galdino (2014)

A partir da Tabela 1, pode-se perceber os valores de bandas proibidas, definindo o tamanho do *gap* entre as bandas de valência dos elementos e compostos, definindo-os como semicondutores.

Pela existência de bandas de energia, Pinho e Galdino (2014) indicam que os semicondutores possuem características interessantes como o aumento da condutividade devido ao aumento da temperatura, devido à excitação térmica de elétrons da banda de valência para a banda de condução, deixando lacunas na banda de valência, as quais são constituídas por portadores de carga positiva, atraindo outros elétrons, e essa mudança de bandas gera uma diferença de potencial, gerando assim, a corrente elétrica.

Para um melhor entendimento, a Figura 6 consegue mostrar os diferentes tamanhos de bandas de energia presentes para condutores, semicondutores e isolantes, definindo as estruturas de separação destes.

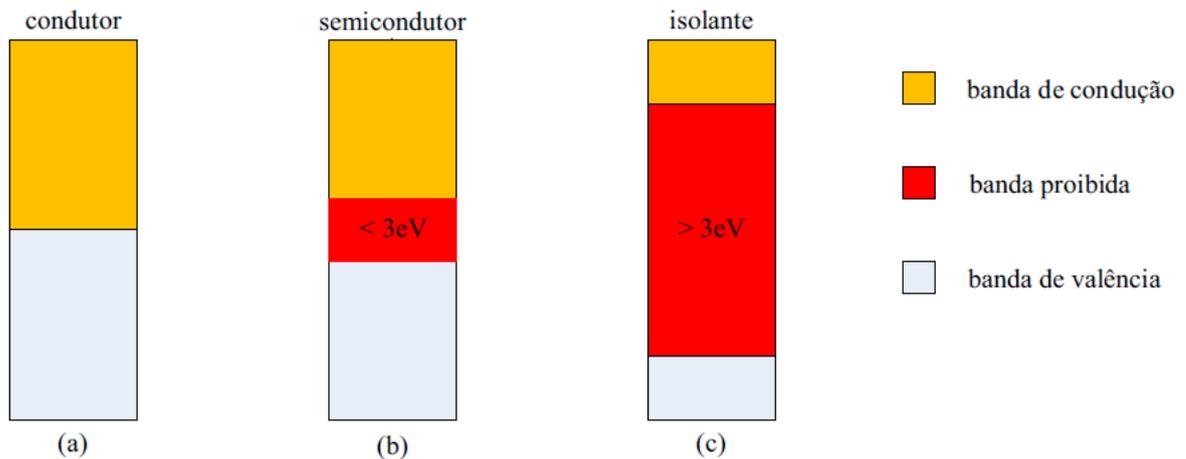


Figura 6 – Bandas de energia
Fonte: Pinho e Galdino (2014)

2.2.2 Tecnologias na produção de células fotovoltaicas

Nos últimos 60 anos, várias tecnologias vêm sendo estudadas, para que sempre haja uma melhor viabilização da produção de módulos fotovoltaicos, porém as células fotovoltaicas que dominam o mercado atualmente são as de silício cristalino (monocristalino m-Si; ou policristalino p-Si), com estas atingindo mais de 87,9% das vendas de sistemas fotovoltaicos nesta área. Outras tecnologias existentes no mercado são difundidas entre a-Si (Silício amorfo), CIS (disseleneto de cobre índio), CIGS (disseleneto de cobre índio gálio), CdTe (telureto de Cádmio), e Si-Fitas (Fitas de Silício) (PINHO e GALDINO, 2014).

Estes dados são demonstrados na Figura 7, com suas respectivas vendas ao longo dos anos.

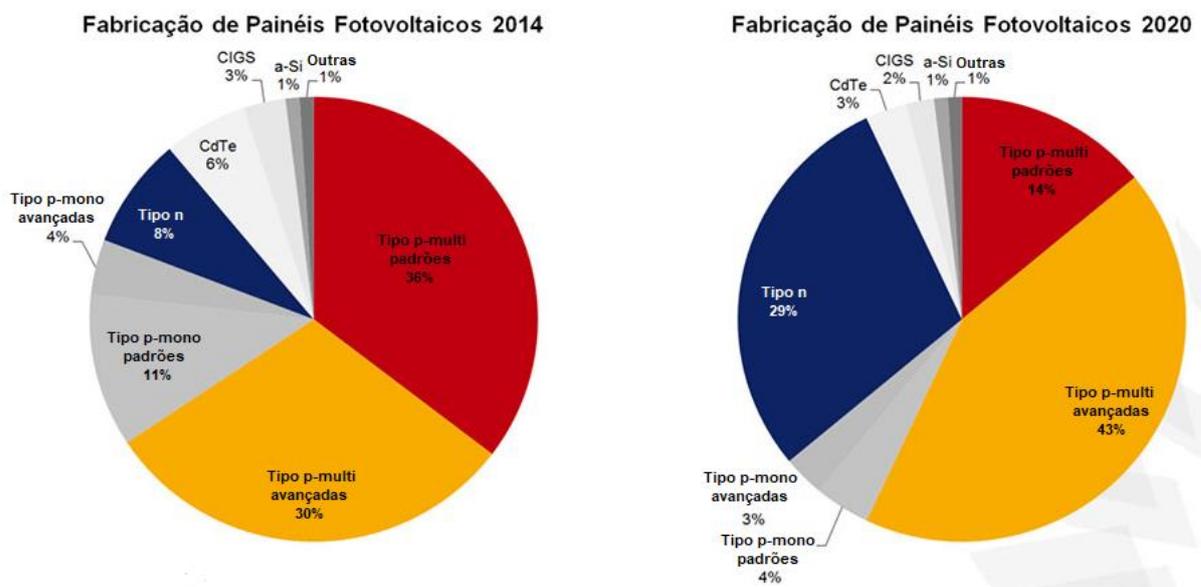


Figura 7 – Porcentagem de fabricação de células fotovoltaicas nas indústrias.
Fonte: Portal Solar (2020)

Os dados demonstrados na Figura 6 indicam a superioridade de vendas de células fotovoltaicas com composição de silício cristalino, responsável por cerca de 90% destas.

A tabela 2 também apresenta os vários tipos de composições de células fotovoltaicas, e agregado à cada uma delas, está o seu rendimento percentual referente, para serem aplicadas em módulos fotovoltaicos.

Tabela 2 - Melhores células fotovoltaicas fabricadas em 2012

Tecnologia		Eficiência (%)
Silício	Monocristalino	25,0 ± 0,5
	Policristalino	20,4 ± 0,5
	Filmes finos transferidos ⁴	20,1 ± 0,4
Compostos III A-VA (ou 13-15)	GaAs (filme fino)	28,8 ± 0,9
	GaAs (policristalino)	18,4 ± 0,5
	InP (monocristalino)	22,1 ± 0,7
Calcogênios Compostos II B-VI A (ou 12-16)	CIGS (CuIn _x Ga _(1-x) Se ₂) (filme fino)	19,6 ± 0,6
	CdTe (filme fino)	18,3 ± 0,5
Silício amorfo / nanocristalino	Amorfo (a-Si) (filme fino)	10,1 ± 0,3
	Nanocristalino (nc-Si)	10,1 ± 0,2
Células Sensibilizadas por Corantes (DSSC)		11,9 ± 0,4
Células Orgânicas (filme fino)		10,7 ± 0,3
Multijunção	InGaP/GaAs/InGaAs	37,7 ± 1,2
	a-Si/nc-Si/nc-Si (filme fino)	13,4 ± 0,4

Fonte: Pinho e Galdino (2014)

Com isso, pode-se perceber na figura 7 os diferentes valores de rendimentos para cada tipo de tecnologia de célula fotovoltaica em diferentes características elementares e de gerações.

2.3 A composição de módulos fotovoltaicos

2.3.1 Funcionamento e características de módulos fotovoltaicos

Os módulos fotovoltaicos, segundo a abordagem de Villalva (2012), são constituídos de um agrupamento de células fotovoltaicas conectadas eletricamente, podendo estas estar em série ou em paralelo, porém, para construção de módulos com maiores tensões de saída, os fabricantes as conectam em série, isso devido ao fato de que cada célula consegue produzir em média, apenas 0,6 V.

A corrente elétrica, por estar totalmente dependente da quantidade de luz que a célula consegue captar, a área com a quantidade de células conectadas fará total diferença, porque quanto maior sua superfície, maior será a corrente fornecida. Os módulos fotovoltaicos padrões não apresentam uma tensão de saída constante em seus terminais, fazendo com que esta fique totalmente dependente da corrente, e do que estará conectado a estes (VILLALVA, 2012).

Por exemplo, caso algum aparelho que demande maior corrente for conectado, a tensão do módulo irá cair (exigindo uma maior associação de módulos em série), e se algum aparelho com pouca dependência de corrente for conectado, sua tensão será elevada, demonstrando a dependência energética de consumo de um sistema sobre sua capacidade de geração.

Na Figura 8, consegue-se perceber a atuação dos módulos de um sistema fotovoltaico através da curva I-V, e da curva P-V

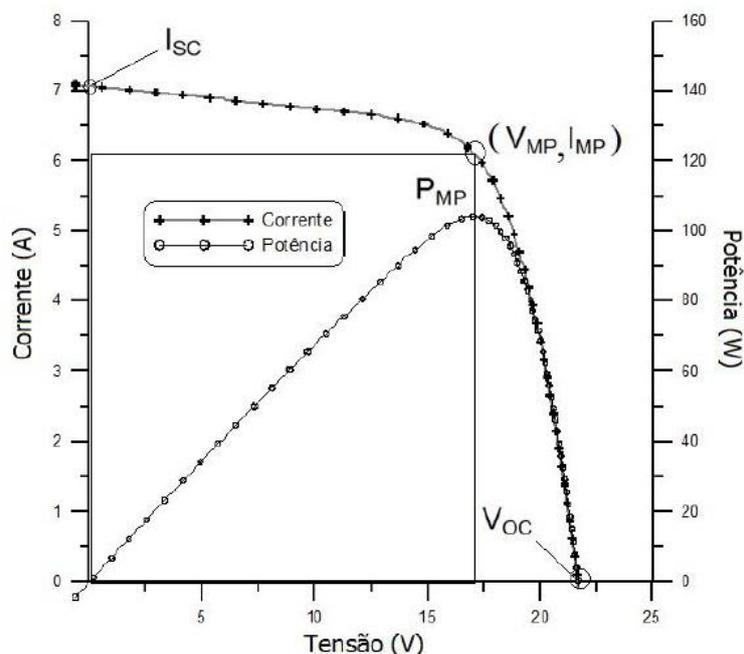


Figura 8 – Curva característica I-V e curva de potência P-V
Fonte: Pinho e Galdino (2014)

Ao observar a Figura 8, consegue-se retirar as características deste módulo, o qual possui potência nominal de 100Wp (potência elétrica de pico).

Com isso, pode-se ressaltar que, de acordo com Pinho e Galdino (2014), um módulo pode ser identificado através de sua potência elétrica de pico, mas nunca desconsiderando outras demais características que o compõe, como a irradiância solar e temperatura a qual será submetido.

2.3.2 Influência de irradiância e temperatura sobre o módulo fotovoltaico

Pode ser demonstrado, através das definições apresentadas por Pinho e Galdino (2014), que a corrente elétrica gerada pelo módulo aumenta com a irradiância solar, como é explicitado na Figura 9, com o efeito da variação da irradiância.

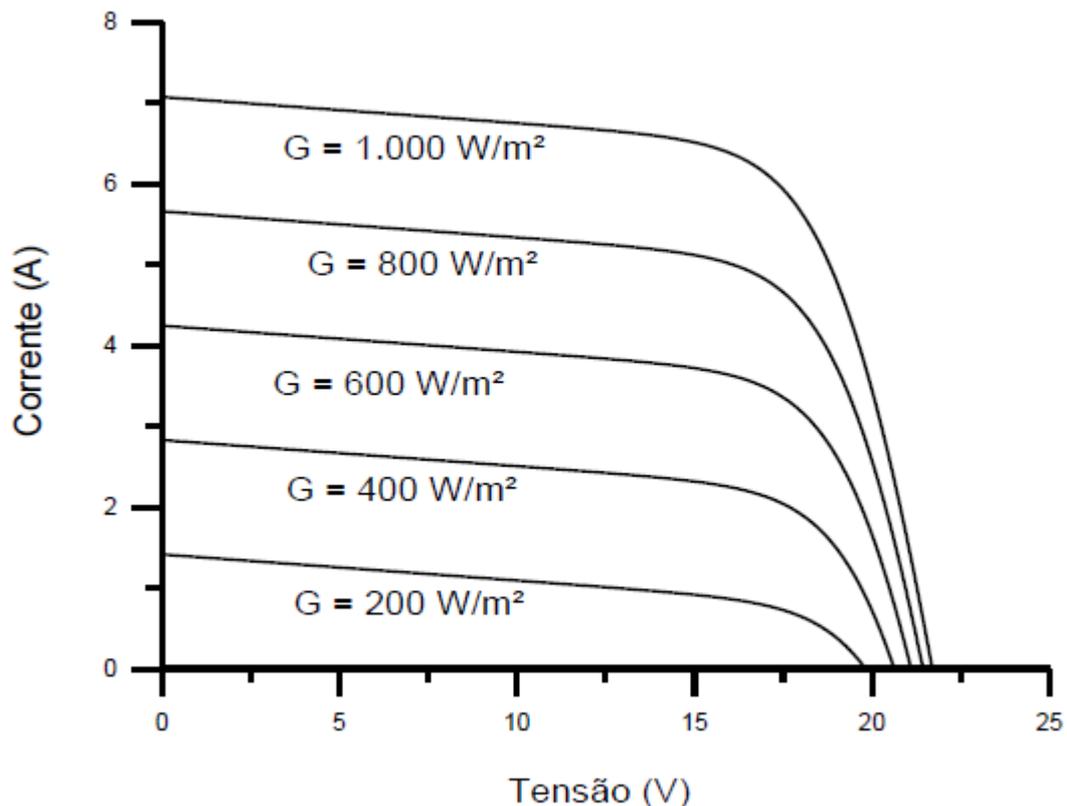


Figura 9 – Gráfico demonstrando diferentes níveis de irradiância solar
Fonte: Pinho e Galdino (2014)

É possível observar que a Figura 9 aplicou os diferentes níveis de irradiância sobre a curva característica I-V, esta especificamente, em um módulo de 36 células de silício cristalino à 25°C, demonstrando que dentro desta pequena faixa de temperatura, sua geração é gradualmente aumentada.

Outro quesito que deve ser levado em consideração quanto aos fatores que afetam os módulos é a temperatura, evidenciando uma queda de tensão com o aumento desta, sendo que a corrente sofre uma elevação muito pequena que não compensa a perda causada pela diminuição da tensão, sendo indicado pela figura 10, utilizando diferentes temperaturas (PINHO e GALDINO, 2014).

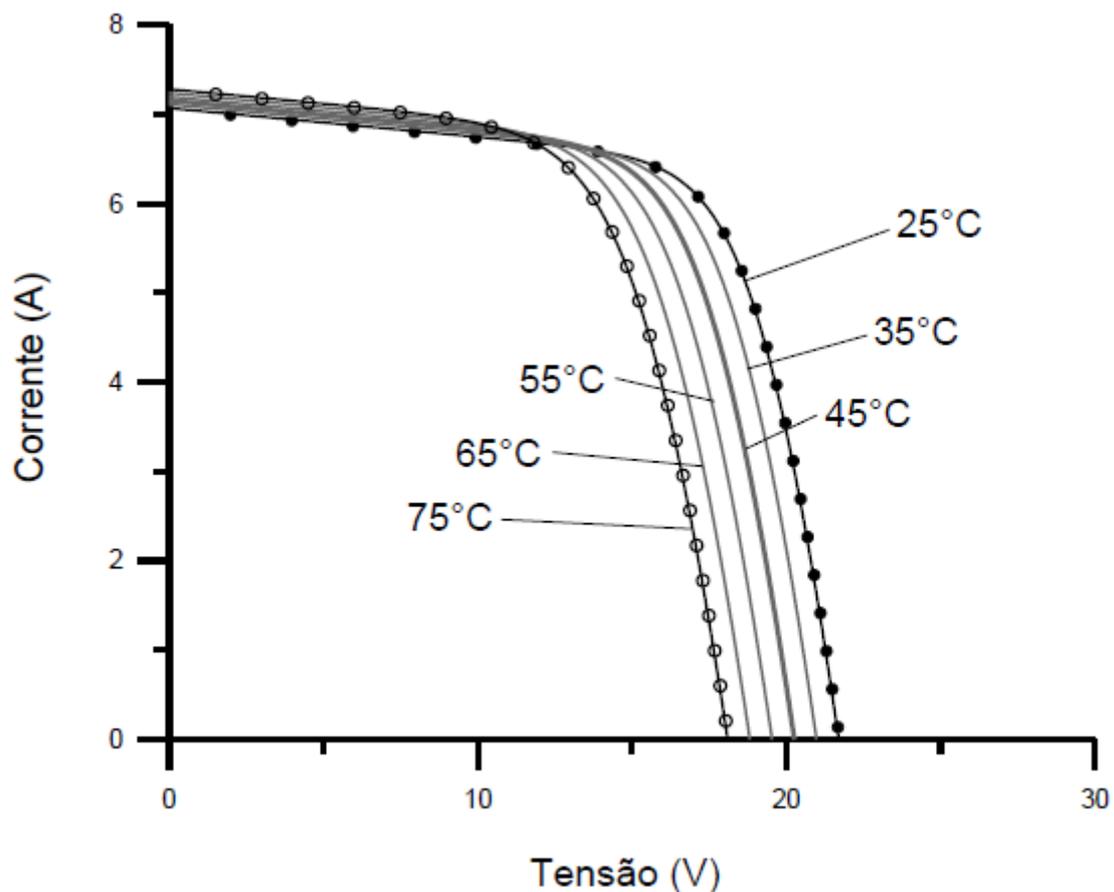


Figura 10 – Variação de temperaturas das células, em relação à corrente pela tensão.
Fonte: Pinho e Galdino (2014)

2.4 Diferentes composições de células fotovoltaicas no mercado atual

Nesta parte do capítulo são introduzidos os principais tipos de células fotovoltaicas, bem como os materiais utilizados para sua fabricação, caracterizando-as de forma sucinta, de acordo com Lima *et al* (2019), também apresentando nível de maturidade comercial e métodos de processamento. Usualmente são definidas características em cada célula fotovoltaica, a fim de identificar, em seus materiais, o coeficiente de absorção, *band gap*, disponibilidade, toxicidade e estabilidade.

2.4.1 Primeira geração – Wafers de silício

São as células baseadas em silício, mais comumente usadas no mercado de dispositivos fotovoltaicos (podendo representar 90% do mercado), este grupo podendo ser dividido em monocristalino e policristalino. Possui tecnologia antiga, mas é o mais utilizado pela alta eficiência de conversão. O silício é um material em alta abundância na crosta terrestre, apresentando boa estabilidade, não toxicidade, com *band gap* em torno de 1,2 eV.

Sua forma monocristalina apresenta melhores rendimentos (17% a 27%) do que a policristalina (12% a 20%), porém é mais cara, devido à alta pureza requerida para o processamento destes materiais (LIMA *et al*, 2019).

2.4.2 Segunda geração – Filmes finos

Painéis são confeccionados na forma de filmes finos, utilizando menos material, fornecendo flexibilidade, redução de custos de material, facilidade de instalação, tempo médio de vida de 25 anos, porém apresenta menores rendimentos, podendo ser obtido utilizando Si amorfo (4% a 8% - baixo rendimento), CdTe (9% a 22,1% - metal pesado aumentando a toxicidade e aumento de custo de reciclagem – *band gap*: 1,5 eV) e composições de ligas de cobre, índio, gálio e selênio (CIGS) (10% a 22.6% - dispositivos flexíveis e leves, com alto tempo de vida) (LIMA *et al*, 2019).

2.4.3 Terceira geração – Novas tecnologias

2.4.3.1 Células de Nanocristais

Chamadas de células solares de pontos quânticos, semicondutores com escalas de nanocristais, utilizando materiais como dióxido de titânio ou silício poroso.

2.4.3.2 Células solares orgânicas

Filmes finos de semicondutores orgânicos, como pequenas moléculas e polímeros condutores, com rendimento em torno de 10%, maior flexibilidade, porém com o maior número de defeitos e ligações pendentes nas cadeiras poliméricas, é mais comum o aparecimento de defeitos, como armadilhas de cargas que reduzem a mobilidade dos portadores.

2.4.3.3 Células híbridas

Heterojunção orgânico/inorgânico, sendo que os orgânicos absorvem luz atuando como camada doadora e para transporte de lacunas, já o inorgânico atua como camada aceitadora e

para transporte de elétrons. Possuem baixo custo por processos *roll-to-roll* e possuem conversão de energia solar em alta escala.

2.4.3.4 Células sensibilizadas por corantes (DSSC)

Baseadas em material orgânico, também conhecidas como células Grätzel, com eficiências entre 7% a 13%, podendo ser usada para gerar energia tanto em ambientes internos como externos, convertendo luz de diversas fontes, sendo elas artificiais ou naturais.

2.4.3.5 Células *perovskita*

É uma célula que foi originada a partir das DSSC's, e usam a *perovskita* como agente sensibilizador, sendo esta, uma classe de compostos, com cátions de diferentes tamanhos, podendo chegar a um rendimento de até 22,1%, com recorde estabelecido em 2018, no entanto, ainda há questões em relação à sua estabilidade, durabilidade e toxicidade, muito devido a metais raros e tóxicos em sua composição, como o Chumbo (LIMA *et al*, 2019).

2.4.4 Células Tandem ou de Múltiplas Junções

Células com várias camadas e compostas por uma variedade de materiais, podendo alcançar até 40% de rendimento, e melhoria de diminuição da degradação dos seus componentes. Porém este ainda é um processo muito caro a ser realizado, limitando o número de aplicações práticas deste dispositivo (LIMA *et al*, 2019).

2.5 Análise das células aplicadas no mercado atualmente

A partir das informações obtidas de tipos de células mais utilizados no mercado, a capacidade de cada célula em relação à sua eficiência e composição faz com que estas tenham áreas específicas em que possam demonstrar uma melhor produtividade e otimização de sua vida. Com isso, é possível utilizar diferentes ferramentas para realizar a viabilidade financeira das células fotovoltaicas citadas, que geralmente estão presentes em propostas comerciais de sistemas fotovoltaicos, como por exemplo o Retorno Sobre Investimento (ROI), e uso do cálculo de *Payback* de investimento.

2.5.1 Retorno Sobre Investimento (ROI)

Segundo o IBGEM (2022), sendo uma ferramenta traduzida do inglês, *ROI* significa *Return On Investment*, ela informa o quanto de retorno uma ação ou projeto está rendendo de

acordo com o investimento feito, sendo aplicada uma fórmula matemática, a fim de esclarecer quanto a pessoa física ou jurídica está ganhando com este investimento. Para que esta fórmula seja construída, devem ser considerados alguns fatores essenciais, como a receita que um investimento tenha gerado, e os custos para colocar este determinado investimento em vigência.

O *ROI* pode ser calculado através da Equação 1:

$$ROI = \frac{(\text{receita} - \text{custo})}{\text{custo}} \times 100 \quad (1)$$

Segundo Januário (2021) apesar de não possuir uma variável temporal na fórmula do *ROI*, é importante ressaltar que esta deve ser levada em consideração no cálculo para uma análise mais assertiva ao longo de um período de tempo definido, sendo assim, a adoção de uma régua “mínima” para o retorno acaba sendo interessante para a tomada de decisão acerca do avanço ou não do investimento, por isso o *payback* de investimento é uma ferramenta interessante a ser usada em conjunto com o *ROI*.

Através destas informações, para a utilização desta ferramenta na viabilidade de um sistema fotovoltaico, devem ser utilizadas o custo geral de instalação completo do sistema fotovoltaico, com os módulos e componentes necessários, o valor da tarifa energética a ser cobrado pela concessionária do estado em que será instalado o sistema, a fim de encontrar a economia média anual que será alcançada com a produção energética em questão (subtração entre receita e custo), encontrando a rentabilidade (*ROI*) anual deste, e multiplicando o resultado por 100, obtendo-o em porcentagem.

2.5.2 Período de *Payback*

A partir da ideia de Reis (2019), o *payback* é o cálculo do período necessário para ter o retorno do investimento inicial do projeto em questão, sendo este, um parâmetro a ser adotado pelo investidor para minimizar as possibilidades do projeto se tornar inviável ao longo do tempo passado. Além de ser simples e de fácil compreensão, ele fornece uma boa ideia para a geração do fluxo de caixa, sendo boa para projetos com vida limitada, mas também tendo o revés de não levar em consideração fluxos distintos aos que calculados no início do projeto.

Segundo Santos *apud* Kassai (2022) é importante ressaltar que esse período nem sempre é curto, depende do valor do investimento e do tipo de negócio, cuja recompensa ocorre ao

longo de meses ou anos, pois quanto menor este indicador para um dado empreendimento, melhor, pois isso indica que o investidor vai recuperar o valor investido mais rapidamente.

O *Payback* é calculado através da Equação 2:

$$payback = \frac{IN}{L} \quad (2)$$

Em que:

- L: lucro por alguma unidade de tempo, geralmente em anos
- IN: é o valor do investimento inicial;

3 METODOLOGIA

Neste capítulo são apresentados os dados como o tipo de pesquisa empregado neste trabalho, seguido da definição dos materiais e métodos utilizados, além de variáveis e indicadores que a compõe, bem como os instrumentos de coleta de dados e a tabulação de dados, e posteriormente, são realizadas as considerações finais do capítulo, concluindo-o.

3.1 Tipo de Pesquisa

A pesquisa deste estudo pode ser classificada de acordo com características como sua forma de abordagem, seus objetivos e procedimentos técnicos abordados.

Seguindo as definições de Azevedo *et al* (2012), dois paradigmas de pesquisa são considerados, sendo estes o quantitativo (positivista) e o qualitativo (fenomenológico), sendo que no qualitativo, procura-se o que é comum, mas sendo aberto à individualidade e significados múltiplos atribuídos por indivíduos à realidade, descrevendo-a sem preocupar-se com mensurações matemáticas e/ou estatísticas, evitando a imposição de categorias para o estudo empírico de um fenômeno.

Já as formas de abordagem de cunho quantitativo, segundo Azevedo *apud* Richardson (1999), destacam a ideia da utilização de métodos e instrumentos para coleta de dados estruturados e informações, bem como seus tratamentos, por meio de técnicas estatísticas, tanto simples (como percentual e médias) como complexas (como coeficientes de correlação e análise de regressão), tendo também em mente que estas duas abordagens são complementares, visto que as abordagens e técnicas estatísticas passam pela subjetividade de seus autores.

De acordo com Gil (2008), através da definição dos objetivos desta monografia, é possível classificá-la como exploratória, tendo como finalidade o desenvolvimento, esclarecimento e modificação de conceitos e ideias, com a formulação de problemas mais precisos ou hipóteses pesquisáveis para estudos posteriores, proporcionando uma visão geral, de tipo aproximativo, de determinado fato, com uma investigação mais ampla.

Posteriormente, é possível descrever por meio de procedimentos técnicos, o uso do estudo de caso, que de acordo com Gil *apud* Yin (2008), é caracterizado pelo estudo profundo de um objetivo, de modo a permitir seu conhecimento amplo e detalhado, sendo um estudo empírico, que investiga um fenômeno atual dentro do seu contexto e/ou realidade.

Através da compreensão da natureza das pesquisas citadas, é possível definir este trabalho como quantitativo-qualitativo, com objetivo exploratório e procedimento técnico de um estudo de caso.

3.2 Materiais e Métodos

A metodologia deste trabalho pode ser encontrada através do fluxograma da Figura 11.

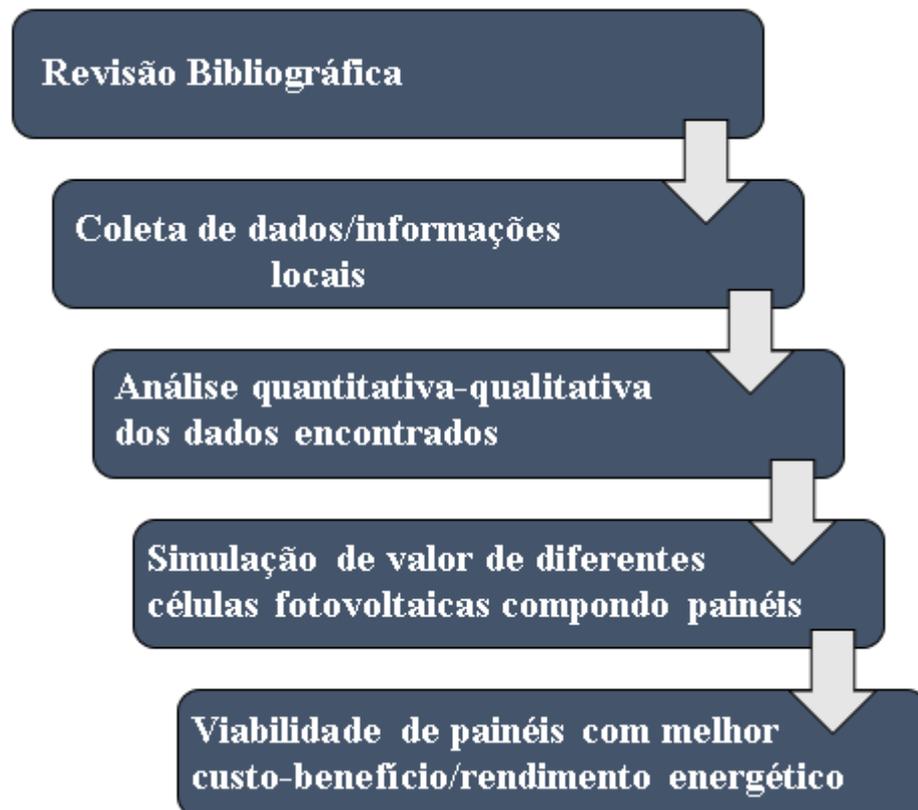


Figura 11 – Fluxograma de Metodologia aplicada ao trabalho.
Fonte: Pesquisa direta (2023)

Através da figura 11 pode-se perceber as etapas da metodologia utilizadas para conseguir os dados necessários para a conclusão do trabalho.

3.2.1 Descrição da Instalação Fotovoltaica

O local onde foi feita a instalação para este estudo de caso resulta em um telhado, na cidade de Sacramento – MG, sendo este um espaço amplo para a quantidade necessária de placas fotovoltaicas, não havendo obstrução de luz solar pelas construções ao redor, nem por algum tipo de arborização.

A instalação possui um total de 10 placas fotovoltaicas instaladas, orientadas para o Norte e com angulação do telhado e estrutura de fixação necessários para garantir o melhor aproveitamento destas durante os meses do ano.

Através da Figura 12, se visualiza a área do local onde será feito o estudo de caso deste trabalho:



Figura 12 – Visão via satélite do local de estudo
Fonte: *Google Earth* (2021)

Como é possível observar na figura 12, são acrescentadas as informações de que estes 10 módulos fotovoltaicos são do modelo *Canadian*, de silício policristalino, com uma potência de 330 Wp cada, ligados a um microinversor de modelo APSsystems, modelo DS3D, ligado em

rede 220 V bifásica, com sistema de monitoramento via Wifi, garantindo ao sistema uma potência de 3,30 kWp.

Também é importante salientar dados sobre esta residência, como o consumo médio energético de 219 kWh/mês, conseqüentemente um consumo de 2.628 kWh/Ano, e por fim, um custo médio energético de R\$245,47 reais por mês, outro fator é que a média de reajuste anual de energia gira em torno de 14% (CEMIG, 2023).

É possível observar na Figura 13, através do boletim técnico da Ecori (2022), a ficha técnica do microinversor utilizado, com suas informações de funcionamento, transmitindo a energia gerada pelas placas solares até o padrão de energia residencial e para rede da concessionária, por transformar corrente contínua em corrente alternada.

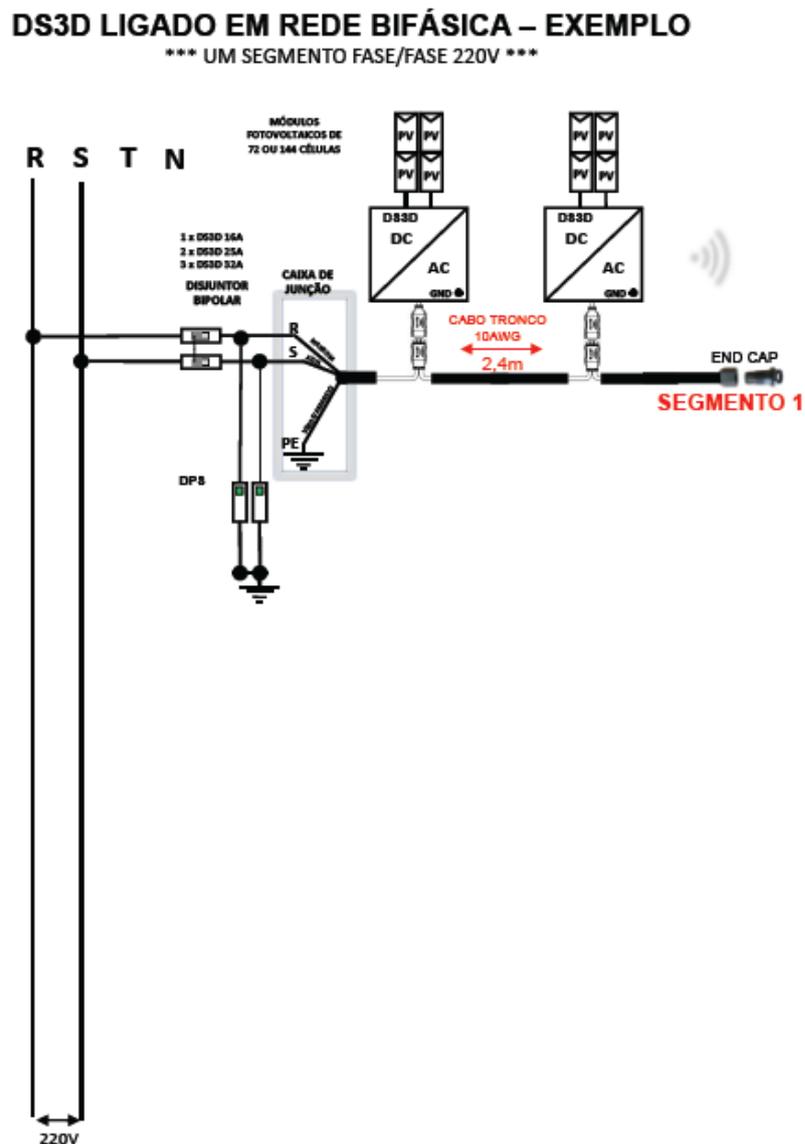


Figura 13 – Dados Técnicos DS3D – APSystems
 Fonte: Ecori (2022)

3.2.2 Validação da proposta comercial do estudo de caso

A partir dos dados coletados pelo aplicativo de monitoramento de eficiências e gerações de energia deste sistema, os três meses consecutivos com maior produção energética foram no ano de 2021, ocorreram entre os meses de novembro e dezembro deste mesmo ano, e janeiro de 2022, como demonstrado pela Figura 16 a seguir.

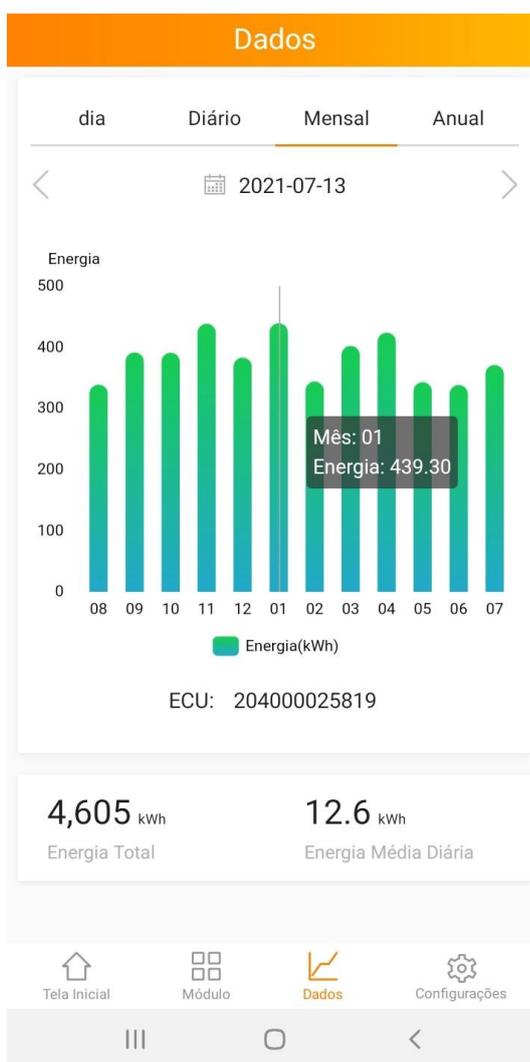


Figura 14 Meses com maior rendimento fotovoltaico
 Fonte: EMA App (2023)

Desse modo, foi possível perceber através da Figura 16 que, quando se trata de um estudo de caso com valores reais e indicadores gráficos para uma posterior análise, devem ser levados em consideração fatores e agentes externos que fazem o rendimento das placas fotovoltaicas sofrerem variações a todo momento, pois esta depende além das condições de intempéries diversas, como chuvas e ventos fortes, as condições de limpeza da superfície da placa solar, bem como objetos que tenham a possibilidade de causar sombreamentos nestes.

As placas possuem manutenções preventivas de limpeza anuais, como citado anteriormente, e com a ausência de objetos que possam causar quaisquer tipos de alterações nos rendimentos, sendo no fim, um custo baixo para sua manutenibilidade, pois a quantidade de água para lavagem dos módulos não possui influência significativa no investimento do projeto.

Através dos meses e anos com maior rendimento energético, é possível constatar a coerência na geração média explicitada na proposta comercial para a instalação deste sistema fotovoltaico, a qual será demonstrada e utilizada como material posteriormente, até mesmo para as simulações a serem feitas com os diferentes módulos fotovoltaicos existentes no mercado, comparando seus valores para viabilidade de aquisição.

De informação extra, segundo *The Eco Experts* (2023) pode-se perceber os valores atuais de mercado, medidos em libras por metro quadrado, para a instalação de placas na Europa, mais especificamente no Reino Unido, através da Tabela 8.

Tabela 3 - Valores de módulos fotovoltaicos no Reino Unido

Tipo de módulo fotovoltaico	Custo por m ²	Vida útil (anos)	Comercialmente disponível?
Monocristalino	£393	25 - 40	Sim
Policristalino	£325	25 - 30	Sim
Filmes Finos	£99	10 - 20	Sim
Transparentes	£250	25 - 30	Sim
CPV	N/A	25 - 35	Não
PERC	£360	25 - 35	Sim
Perovskita	N/A	25 - 30	Não
Telhas solares	£294	25 - 30	Sim
Aquecedor solar	£670	20 - 25	Sim

Fonte: *Eco Experts* (2023)

Sendo assim, a Tabela 8 foi capaz de demonstrar que existem diferentes tipos de avaliação de preços no mercado fotovoltaico ao redor do mundo, e que ainda existem alguns tipos de células fotovoltaicas que não são utilizadas em determinados locais, ou que ainda mesmo não estão disponíveis no mercado para aquisição.

3.2.3 Características de diferentes módulos

Utilizando os dados mencionados até o momento, é possível realizar um aglomerado de informações sobre alguns dos tipos mais utilizados de células fotovoltaicas atualmente, as quais pode-se perceber um aumento significativo de potência ao longo de seu desenvolvimento geral, pois há alguns anos atrás, existiam módulos com capacidade de até 330 W, sendo que hoje em dia já existem no mercado, placas fotovoltaicas com capacidade de geração de 675 até 705 Watts de potência (ECORI ENERGIA SOLAR, 2023).

Utilizando esta ideia, são catalogadas informações atualizadas e mais específicas sobre cada tipo de célula fotovoltaica, escolhidas para análise comparativa, bem como características ilustrativas e técnicas dos módulos, que são compostos por silício monocristalino, por silício amorfo, por telureto de cádmio, a liga de cobre, índio, gálio e selênio (CIGS), e por fim, sobre as células perovskita.

Lembrando que além do valor dos módulos usados no estudo de caso, a instalação fotovoltaica necessita de alguns outros componentes, como o microinversor AP Systems DS3D junto ao seu cabo tronco, seu terminal *End Cap*, e uma caixa plástica de junção AC, escolhendo também um ECU-R para interface de configuração, sendo necessário um aparelho comunicador *Wifi* para receber constantes monitoramentos do sistema. Este conjunto de itens será somado ao sistema com um valor de 700 dólares no total, para posterior conversão (AMAZON, 2023).

3.2.3.1 Módulo de silício policristalino

O módulo policristalino representado pela Figura 17, que possui o mesmo padrão visual tanto em 2018 como em 2023.

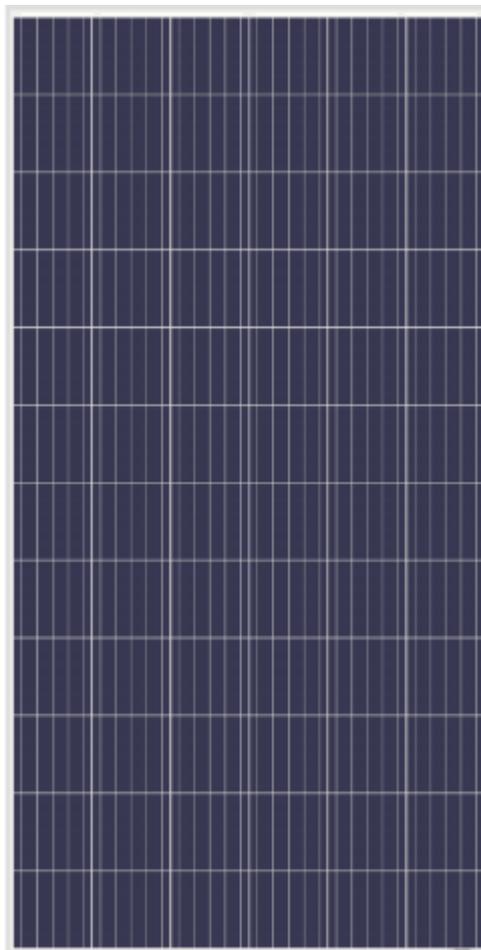


Figura 15 Módulo de silício policristalino.
Fonte: *SolarReviews* (2023)

A Figura 17 foi capaz de retratar como é a coloração mais azulada das placas policristalinas e uma maior quantidade de veios metálicos perpendiculares.

Os dados necessários referentes às placas fotovoltaicas policristalinas de 2018 e 2023 estão dispostas no capítulo de resultados, de modo a ser realizada uma comparação entre elas, onde também já será demonstrado a simulação para as policristalinas mais atualizadas.

É importante ressaltar que, segundo *Google Finanças* (2023), para haver uma melhor estimativa de valores encontrados, foi utilizado a cotação do dólar do dia 22 de novembro de 2023, chegando ao valor de R\$4,91.

3.2.3.2 Módulo de silício monocristalino

Para trazer as informações sobre este tipo de módulo, primeiramente pode-se perceber como é o aspecto visual deste tipo de placa fotovoltaica, através da Figura 18.

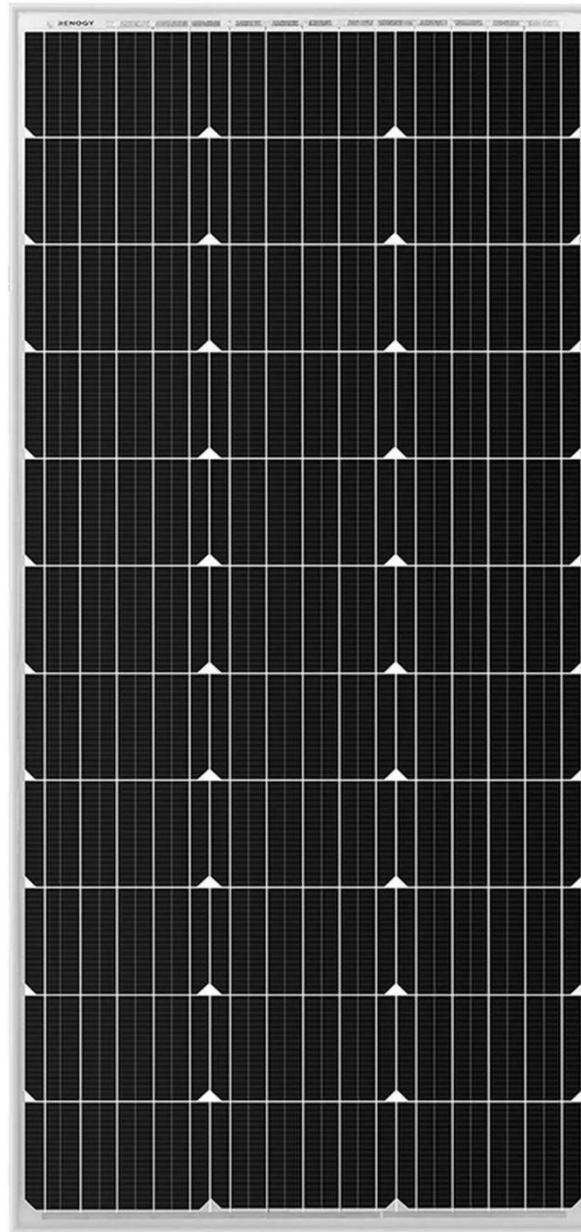


Figura 16 Módulo de silício monocristalino
Fonte: *SolarReviews* (2023)

Pela figura 18, pode-se perceber que mesmo ainda possuindo linhas metálicas perpendiculares, o módulo possui uma coloração mais escura, e pode ser colocado em evidência os dados de mercado deste módulo, através da Tabela 9.

Tabela 4 - Módulo de silício monocristalino

Potência de Módulo (W)	670
Rendimento do Módulo (%)	21,6
Tensão em potência máxima (V)	38,7
Corrente em potência máxima (A)	17,32
Tensão máxima do sistema (V)	1500
Peso do módulo (kg)	34,4
Dimensões (comprimento, largura, espessura)	2384 x 1303 x 35 mm

Fonte: Ecori Energia Solar (2023)

Dessa maneira, a Tabela 9 foi capaz de demonstrar quais as principais informações sobre a placa usada como referência para o trabalho, cujo modelo é HiKu7 Mono PERC, da marca *Canadian Solar*, fundada no Canadá e com produções e exportações na cidade de Suzhou, na China.

3.2.3.3 Módulo de silício amorfo

A fim de representar este módulo e entender como são seus aspectos, a Figura 19 evidencia bem como estes são construídos.



Figura 17 Módulo de silício amorfo
Fonte: SolarReviews (2023)

Após a verificação da Figura 19, foram perceptíveis características mais neutras, em tonalidade escura, com estas placas possuindo um visual limpo, com traços metálicos paralelos, cujas informações específicas foram colocadas na Tabela 10, para posterior análise.

Tabela 5 - Módulo de silício amorfo

Potência de Módulo (W)	100
Rendimento do Módulo (%)	7
Tensão em potência máxima (V)	94,4
Corrente em potência máxima (A)	1,06
Tensão máxima do sistema (V)	1000
Peso do módulo (kg)	15,25
Dimensões (comprimento, largura, espessura)	1412 x 1112 x 25 mm

Fonte: *ENF Solar* (2023)

Sendo assim, pela Tabela 10, foi possível chegar aos resultados de um modelo atual de módulo de silício amorfo, sendo utilizado como base a placa de modelo *Single Glass 100 W Module*, da marca *QS Solar*, empresa criada em Shanghai, na China.

3.2.3.4 Módulo de telureto de cádmio (CdTe)

Este tipo de módulo fotovoltaico possui características peculiares quanto à sua composição química, e sua representação pode ser feita através da Figura 20.



Figura 18 Módulos fotovoltaicos de telureto de cádmio
Fonte: *Solarbe Global* (2023)

Com isso, a Figura 20 mostra que o módulo de CdTe apresenta um visual mais limpo, sem cortes metálicos em sua superfície, com aspecto mais neutro e escuro, tendo seu potencial energético e comercial foi explicitado pela Tabela 11.

Tabela 6 - Módulo de telureto de cádmio

Potência de Módulo (W)	117,5
Rendimento do Módulo (%)	16,3
Tensão em potência máxima (V)	71,2
Corrente em potência máxima (A)	1,65
Tensão máxima do sistema (V)	1500
Peso do módulo (kg)	12
Dimensões (comprimento, largura, espessura)	1200 x 600 x 6,8 mm

Fonte: *ENF Solar* (2023)

A tabela 11 foi capaz de transmitir dados que compõem o módulo escolhido para embasar esta parte do trabalho, sendo escolhido o modelo *First Solar Series 4™ - 4117*, da marca *First Solar Series*, como sede nos Estados Unidos.

3.2.3.5 Módulo de liga CIGS

Agora entrando no quesito da utilização da liga CIGS para construção de módulos fotovoltaicos, a Figura 21 representa de modo fiel a estética destes, inicialmente em modo rígido.

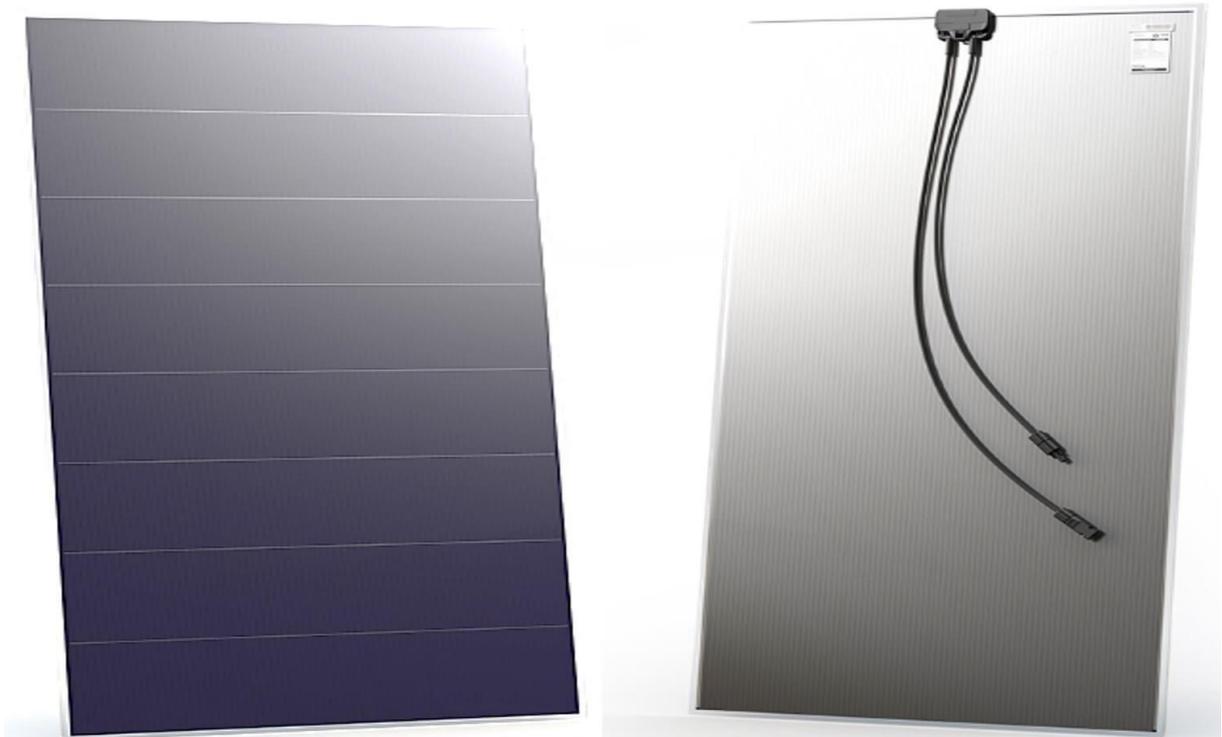


Figura 19 Módulo de liga CIGS rígido
Fonte: Canal Solar (2020)

Deste modo, pode-se perceber através da Figura 21, que os módulos CIGS rígidos apresentam uma estética básica, com uma tonalidade azulada, sem muitos adornos, podendo agregar até mesmo esteticamente locais como varandas, fachadas residenciais e sacadas de prédios.

A título de curiosidade, pode ser levado em consideração a aplicabilidade de células de liga CIGS em módulos fotovoltaicos flexíveis, havendo uma alta gama de aplicabilidade no mercado, como demonstrado na Figura 22.

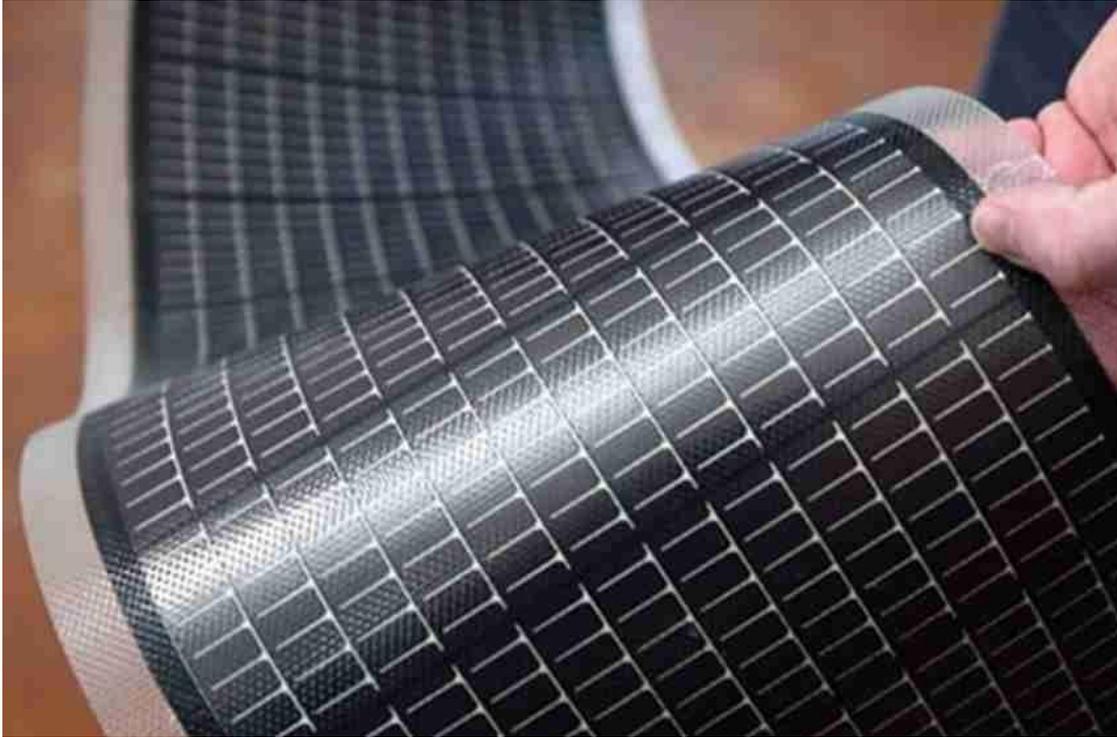


Figura 20 Módulo de liga CIGS flexível
Fonte: Canal Solar (2020)

Utilizando a Figura 22 como base, junto aos dados reunidos da placa, foi possível compreender que este tipo de módulo pode ser aplicado de maneiras mais diversas, podendo ser fixada em superfícies com formatos irregulares ou não-planos.

Os dados foram introduzidos na Tabela 12 a seguir, explicitando apenas os módulos rígidos.

Tabela 7 - Módulo de liga CIGS

Potência de Módulo (W)	365
Rendimento do Módulo (%)	15,5
Tensão em potência máxima (V)	57,5
Corrente em potência máxima (A)	6,35
Tensão máxima do sistema (V)	1000
Peso do módulo (kg)	33,3
Dimensões (comprimento, largura, espessura)	1901 x 1237 x 45 mm

Fonte: ENF Solar (2023)

Portanto, a Tabela 12 pôde relatar que, no mercado, um dos representantes do módulo de liga CIGS é o modelo *CIGS-3000A1 Series*, cuja marca é a *Eterbright Solar Corporation*, de Taiwan.

3.2.3.6 Módulo de perovskita

De maneira a ressaltar as pesquisas que ainda estão em desenvolvimento sobre este tipo específico de célula fotovoltaica, foi possível entender que, segundo *Eco Experts* (2023), estas células vêm batendo recordes de rendimentos percentuais desde 2018, e usando o mineral perovskita, ela é capaz de absorver os espectros de luz azul do sol com uma maior eficácia, a qual está sendo estudada nos laboratórios de Oxford, na Inglaterra, e no centro de pesquisa de Berlim, principalmente.

Outra informação, ainda evidenciada por *Eco Experts* (2023) é que o Departamento de Energia dos Estados Unidos declarou que está investindo, desde 2020, uma quantia de 20 milhões de dólares para o desenvolvimento da tecnologia fotovoltaica de perovskita.

Contudo, segundo *Eco Experts* (2023), estas células ainda não estão disponíveis no mercado atual, mas por alcançarem um patamar de resultados em cerca de 28 a 29 por cento de rendimento nos laboratórios, a Oxford ainda pretende lançar esta tecnologia no mercado ainda no fim de 2023.

Através desta decisão de inclusão dos módulos de perovskita nesta monografia, estão representadas as características e aspectos visuais deste tipo de placa, que ainda possui um futuro promissor em meio ao mercado de energia solar, por meio da Figura 23.



Figura 21 – Perovskita em desenvolvimento na *startup Oxford PV*.
Fonte: *IEEE Spectrum* (2021)

Utilizando os aspectos da Figura 23 juntamente às informações coletadas, evidencia-se que esta pode ser aplicada em um curto a médio prazo no mercado fotovoltaico, de modo a garantir uma estabilidade para o lançamento deste produto, tanto em quesitos de tecnologia e segurança, bem como torná-la economicamente viável para os consumidores de sua geração energética.

3.3 Variáveis e Indicadores

É possível definir, através da ideia de Gil (2008) que variável é tudo aquilo que assume diferentes valores numéricos, podendo ser classificado em duas ou mais categorias, e ao mesmo tempo, indicadores têm a capacidade de mensurar e/ou identificar quantidades relativas a um fenômeno ou conceito.

A Tabela 3 indica quais as variáveis e indicadores utilizados neste trabalho.

Tabela 8 - Variáveis e Indicadores

VARIÁVEIS	INDICADORES
PAINEL FOTOVOLTAICO	- Irradiação; - Eficiência dos painéis; - Valor de instalação.
CÉLULA FOTOVOLTAICA	- Elemento químico constituinte; - Estrutura de composição para fabricação; - Eficiência de cada célula.
ENGENHARIA ECONÔMICA	- Retorno sobre Investimento (<i>ROI</i>); - <i>Payback</i> .

Fonte: Pesquisa direta (2023)

3.4 Instrumento de coleta de dados

Neste estudo, a maioria das informações coletadas são obtidas através de livros e artigos de forma remota, afim de aumentar o acervo de revisão bibliográfica, bem como a utilização de catálogos de fabricantes de células/painéis fotovoltaicos, com uma melhor indicação de suas propriedades e capacidades.

Além destes, é utilizado um aplicativo de monitoramento de placas solares, chamado EMA *app*, para indicação de irradiância e rendimento percentual de geração e energia captada por estas, que posteriormente são utilizadas como padrão para simulação com uso de diferentes células fotovoltaicas.

3.5 Tabulação dos dados

As informações recebidas e analisadas de acordo com cada conjunto de placas solares (constituindo-se de diferentes composições de células fotovoltaicas) são dispostas e tabeladas utilizando o *software* Microsoft Excel, dando ao trabalho uma melhor organização e visibilidade de comparação dos dados obtidos.

3.6 Considerações finais

Neste capítulo foram apresentadas as metodologias necessárias para consolidação da pesquisa em questão, em conjunto da exposição dos ferramentais necessários para a obtenção das informações que fornece os resultados deste trabalho, alcançando os objetivos propostos.

No capítulo seguinte, são abordados os resultados da análise que compõe este trabalho de conclusão de curso, afim de atingir as metas estipuladas, garantindo a melhor opção de célula fotovoltaica de acordo com a viabilidade econômica da mesma, abrangendo as possibilidades de melhor custo/benefício e melhor rendimento possível para sua instalação.

4 RESULTADOS

4.1 Monitoramento do sistema

A fim de demonstrar a confiabilidade de resultados e eficiência dentro do quesito de estudo de caso e sua proposta comercial, foi optado por utilizar dados do aplicativo EMA App do modelo *APSystems* do microinversor instalado no sistema, para coletar amostras de rendimentos que podem variar diariamente, mensalmente e anualmente, com indicativos em gráfico para analisar quantos kWh foram produzidos por cada placa do sistema, e do sistema completo.

Pela observação da Figura 14, é demonstrado a interface inicial do aplicativo, com algumas informações extras que são coerentes com a instalação de uma energia renovável, com uma constante diminuição de poluentes durante seu tempo de vida e produtividade.



Figura 22 – Interface do aplicativo
Fonte: *EMA App* (2023)

A Figura 14 é capaz de proporcionar dados como o tamanho do sistema instalado na residência do estudo de caso, bem como a média de rendimento do dia das placas, a energia total gerada, e as toneladas de dióxido de carbono que foram reduzidas com esta instalação fotovoltaica até o momento.

Com isso, a ideia desta parte do trabalho é coletar as análises de rendimento dos módulos fotovoltaicos anualmente, e após isso ver quais foram os três meses consecutivos com maior rendimento de produção de energia, realizando uma posterior avaliação econômica em cima da produção do sistema, por fim, aplicando este mesmo método, de modo análogo para os outros tipos de células fotovoltaicas que são possíveis de conseguir informações sobre, com possibilidades de estarem disponíveis no mercado, ou ainda estando em pesquisa.

Sendo assim, através da Figura 15, pode-se observar como foi o processo de produção de energia em kWh do sistema do estudo de caso durante os anos de 2019 até 2022, para que seja possível uma análise completa do ano, motivo único de não ter entrado o ano de 2023 neste quesito.

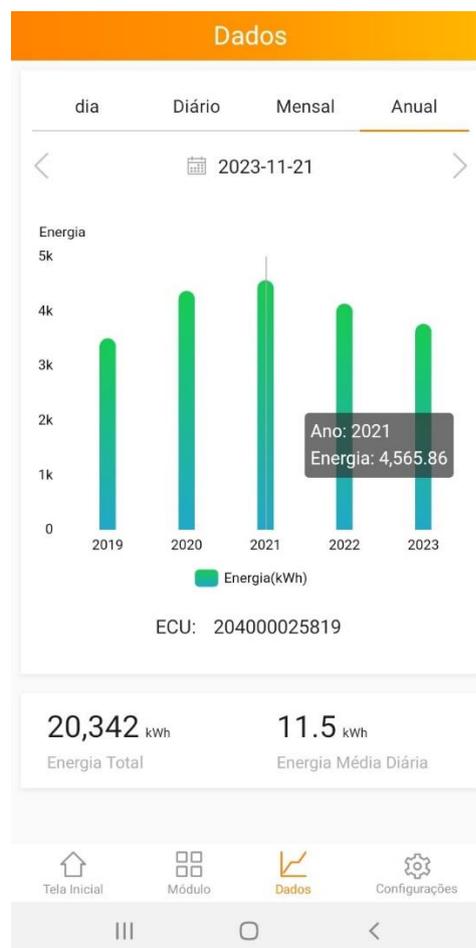


Figura 23 Produção anual do sistema fotovoltaico
Fonte: EMA App (2023)

Portanto, pela Figura 15 é possível perceber que no ano de 2021 foi quando ocorreu uma maior produção de energia fotovoltaica de 4565,88 kWh/ano, pela soma de todos os seus meses, seguido do ano de 2020, sendo que 2022 ficou em terceiro lugar no quesito geral, e foi através destes dados que foram tirados os meses mais produtivos dos módulos, levando em consideração que ocorreram manutenções de limpeza no sistema uma vez ao ano, durante todo o período de observação do gráfico.

4.2 Comparação com módulos atuais

Após esta análise de geração feita, é possível realizar um comparativo entre eficiências e valores das placas fotovoltaicas utilizadas no estudo de caso, como explicitado anteriormente, sendo de silício policristalino, e os de preços da mesma, no mercado atual, a fim de demonstrar quais foram as mudanças de preços e capacidades de produção, com o contínuo desenvolvimento das células fotovoltaicas ao longo dos anos.

Também levando em conta os preços a serem calculados em *cents* por *Watts*, que podem ser avaliados através da Tabela 4 (AURORA SOLAR, 2023).

Tabela 9 - Valores de células fotovoltaicas

Tipo de módulo fotovoltaico	Custo médio por Watt
PERC	U\$0,32 - U\$0,65
Silício Monocristalino	U\$1,00 - U\$1,50
Silício Policristalino	U\$0,70 - U\$1,00
Liga CIGS	U\$0,60 - U\$0,70
Telureto de cádmio (CdTe)	U\$0,50 - U\$0,60
Silício amorfo	U\$0,43 - U\$0,50

Fonte: Aurora Solar (2023)

A Tabela 4 mostra quais os valores atuais em cents por Watts, e neste trabalho são utilizadas as suas médias exatas entre a variação de preço que podem possuir.

Além disso, é possível encontrar o valor aproximado da mão de obra utilizada numa instalação fotovoltaica, segundo o site *Bob Vila* (2023), chegando na faixa de quinze por cento

do valor da instalação geral do sistema, o qual será adicionado às informações posteriores, sendo este um valor relativo à empresa que fará a instalação.

Após essas informações, segue abaixo as informações das placas do estudo de caso com as informações de mercado do módulo fotovoltaico policristalino, através da Tabela 5.

Tabela 10 - Comparação de sistema de silício policristalino

	Módulos do estudo (2018)	Módulo do mercado (2023)
Potência de Módulo (W)	330	435
Rendimento de Módulo (%)	17,28	19,69
Valor do módulo em U\$/Watt	-	0,85
Valor do sistema - 3.3 kWp (R\$)	21.136,88	19.790,99

Fonte: Pesquisa direta (2023)

Pela Tabela 5 é possível compreender que ao passar de meia década, os valores para a aquisição de um sistema fotovoltaico continuaram a aumentar sua viabilidade econômica, instigando assim a contínua evolução do mercado solar no mundo. Para uma melhor compreensão dos resultados encontrados, são explicitados os valores utilizados para análise do estudo de caso, embasando os cálculos das simulações neste trabalho, pela Tabela 6.

Tabela 11 – Dados do estudo de caso de 2018

Característica/Fator	Valor	Unidades
Consumo médio mensal	219	kWh/Mês
Taxa de Disponibilidade (Tarifa Mínima):	R\$ 56,00	R\$/Mês
Custo Médio Mensal de Energia:	R\$ 245,47	R\$/Mês
Consumo Anual Estimado:	2628	kWh/Ano
Geração média mensal estimada	380	kWh/Mês
Geração média anual estimada	4559	kWh/Ano
Economia média mensal estimada para o primeiro ano	189,47	R\$/Mês
Economia total estimada para o primeiro ano	2273,60	R\$/Ano
INVESTIMENTO	21.136,88	R\$

Fonte: Pesquisa direta (2023)

É importante ressaltar que os dados da Tabela 6 são retirados dos cálculos utilizados na proposta comercial real feita para a instalação do sistema fotovoltaico do estudo de caso, na data de 03 de dezembro de 2018, interpretando os valores de economia de 189,47 R\$/Mês, e uma economia média anual gerada pelo sistema fotovoltaico instalado no estudo de caso, resultante em R\$2.273,60, por ter sido estipulado uma média de geração do sistema de 380 kWh/Mês, e conseqüentemente uma geração média de 4559 kWh/Ano.

Para que tenha sido possível a continuação de aplicabilidade das equações envolvidas nesse trabalho, algumas informações foram levadas em consideração, para o desenvolvimento das simulações de diferentes células fotovoltaicas, bem como o modelo de silício policristalino no mercado atual, sendo que o valor de tarifa energética cobrada em bandeira verde (definida pela ANEEL) no grupo B1 de residencial normal, (considerando valores atuais), é no valor de 0,74906 R\$/kWh (CEMIG, 2023).

A partir desta premissa, os valores entre o *payback* e retorno sobre investimento das duas versões deste modelo são transcritos, aplicando uma relação proporcional de custo-geração nesta e nas outras células deste trabalho através da utilização de proporção de

rendimentos com geração média de 5195 kWh/ano com economia de 3891,37 R\$/ano para o módulo de mercado, bem como o valor de simulação do sistema completo, que podem ser evidenciados inicialmente pela Tabela 7.

Tabela 12 - Comparação de módulos policristalinos para investimento

	Módulo do estudo (2018)	Módulo do mercado (2023)
<i>Payback</i> de investimento	5,8 anos	5,1 anos
Retorno sobre Investimento	10,76% ao ano.	19,66% ao ano

Fonte: Pesquisa direta (2023)

De acordo com a Tabela 7, é possível chegar à conclusão de que os valores entre as duas versões do módulo fotovoltaico de silício policristalino apresentam valores que condizem com um mercado que acaba por se tornar mais acessível ao longo dos anos, como os resultados de ferramentas de investimento podem demonstrar, utilizando as tarifas energéticas atuais na simulação financeira.

Outro fator importante para este estudo é realizar um valor aproximado destes módulos no Brasil, e para isso são pesquisados os impostos que são cobrados em cima destas placas fotovoltaicas, que são o ICMS, que caso fosse cobrado pela federação, e pelo estado de Minas Gerais, seria de 18%, o Imposto sobre Produto Industrializado (IPI), de 6,5%, também o Programa de Integração Social (PIS), de 2,1%, o Financiamento da Seguridade Social (COFINS), de 9,65%, e o Imposto sobre Importação (II), de 6% (LOGCOMEX, 2023).

Porém, de acordo com o decreto nº11.456, de 28 de março de 2023, mencionado por Logcomex (2023), o presidente da República assinou a inclusão do setor de fotovoltaicos ao PADIS, zerando estes impostos até 2026.

O estado de Minas Gerais também publicou o decreto estadual nº 48.506/2022, zerando o ICMS para usinas fotovoltaicas de até 5 MW até o ano de 2032, (SECRETARIA DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO - MG, 2022).

Sendo assim, seria apenas levado em consideração a nova lei 14.300 acessada pelo Diário Oficial da União (2022), que diz sobre taxar quinze por cento do valor energético gerado pelo sistema fotovoltaico, em 2023, após sua instalação, valor que não será levado em consideração para a montagem deste.

4.3 Aplicação de proporção entre módulos

Utilizando as condições de comparação utilizadas e explicadas no tópico anterior, abaixo estão as informações de cálculos feitos para ter uma melhor perspectiva de como seria a capacidade de geração energética, aplicando em substituição, cada tipo diferente de módulo fotovoltaico apresentado, no sistema do estudo de caso.

Com esta premissa, em cada subtópico de módulo fotovoltaico estão dispostas informações como as aplicações de proporção de impostos e/ou valor da moeda brasileira (real) aos valores de mercado estrangeiro, junto das informações coletadas para simular os diferentes sistemas, tendo como base a utilização das equações explicitadas na metodologia deste trabalho, afim de explorar uma gama maior de fatores de análise para as simulações de projeto.

4.3.1 Simulação de silício monocristalino

Inicialmente foram demonstrados os valores de mercado compatíveis com os valores por watt que remetem à dimensão do sistema fotovoltaico do estudo de caso, seguido dos valores agregados e conversões monetárias para compor todo o orçamento simulado, através da Tabela 13.

Tabela 13 - Valores simulados de silício monocristalino

Potência de simulação do sistema	3,3 kWp
Valor médio de componentes (U\$)	700
Valor médio em <i>cents</i> por <i>Watt</i>	1,25
Valor de mão de obra (R\$)	3.553,62
Valor do sistema completo (R\$)	27.244,37

Fonte: Pesquisa direta (2023)

Pela Tabela 13, foi indicado que para um sistema completamente montado em uma residência utilizando os valores médios encontrados de módulos de silício monocristalino, acaba por deixar o orçamento geral do sistema bem mais caro que o utilizando o policristalino, mas provavelmente este sistema utilizaria uma quantidade menor de placas, obtendo um rendimento mais satisfatório.

Posteriormente, as informações de valores utilizando as equações (1) e (2) descritas e aplicadas no trabalho, através da utilização de proporção de rendimentos com geração média de 5698,75 kWh/ano com economia de 4268,70 R\$/ano, bem como o valor de simulação do sistema completo, chegaram nos resultados calculados, e evidenciados pela Tabela 14.

Tabela 14 – Cálculos equacionais de silício monocristalino

<i>Payback</i> de investimento	6,4 anos
Retorno sobre investimento (<i>ROI</i>)	15,67% ao ano

Fonte: Pesquisa direta (2023)

Através disso, pela Tabela 14, pode-se perceber que por o sistema de silício monocristalino apresentar um valor maior para aquisição, é natural este precisar de um *payback* de investimento com maior tempo ser pago, e possuindo um *ROI* com porcentagem mediana/aceitável.

4.3.2 Simulação de silício amorfo

Dando continuidade, é possível perceber quais foram os fatores econômicos necessários que foram evidenciados pela Tabela 15, afim de encontrar um valor para o sistema fotovoltaico com este tipo de célula.

Tabela 15 - Valores simulados de silício amorfo

Potência de simulação do sistema	3,3 kWp
Valor médio de componentes (U\$)	700
Valor médio em <i>cents</i> por <i>Watt</i>	0,47
Valor de mão de obra (R\$)	1657,87
Valor do sistema completo (R\$)	12.710,28

Fonte: Pesquisa direta (2023)

Pela observação da Tabela 15, foi capaz de entender que como o valor médio do silício amorfo é bem menor que os outros tipos de célula, o valor do sistema também seria mais baixo, porém a capacidade de geração de energia no geral seria bem menor, devido à sua capacidade de rendimento (de apenas 7%) ser bem menor que as outras células fotovoltaicas no mercado.

Com os resultados das equações (1) e (2) aplicadas para este tipo de módulo através da utilização de proporção de rendimentos com geração média de 1846,82 kWh/ano com economia de 1383,38 R\$/ano, bem como o valor de simulação do sistema completo, a Tabela 16 nos mostra como foram desenvolvidos os valores de Payback, e *ROI*.

Tabela 16 – Cálculos equacionais de silício amorfo

<i>Payback</i> de investimento	9,2 anos
Retorno sobre investimento (<i>ROI</i>)	10,88% ao ano

Fonte: Pesquisa direta (2023)

Ao fim desta observação, os valores da tabela 16 levam a constatar que o silício amorfo, por possuir um eficiência energética bem menor em relação aos outros tipos de células fotovoltaicas, apresenta um menor rendimento financeiro, visto que o seu payback de investimento para um sistema deste porte é bem mais demorado, embora seu rendimento tenha números parecidos com a do estudo de caso, este não deve ser considerado, visto que as taxas tarifárias de meia década atrás com certeza eram bem diferentes da atualidade

4.3.3 Simulação de telureto de cádmio (CdTe)

Utilizando a simulação para o módulo com células de telureto de cádmio, foi possível chegar nas seguintes respostas contidas na Tabela 17.

Tabela 17 - Valores simulados de telureto de cádmio

Potência de simulação do sistema	3,3kWp
Valor médio de componentes (U\$)	700
Valor médio em <i>cents</i> por <i>Watt</i>	0,55
Valor de mão de obra (R\$)	1852,30
Valor do sistema completo (R\$)	14.200,95

Fonte: Pesquisa direta (2023)

Sendo assim, a Tabela 17 foi capaz de promover dados indicando que por este módulo possuir um valor agregado um pouco maior do que os de silício amorfo, seu valor acaba por ser um pouco mais alto, e sendo capaz de possuir um rendimento levemente maior que a do seu

concorrente, e por ter um rendimento parecido com as de silício policristalino, pode vir a ser uma vantagem para este sistema, mas uma das principais desvantagens é que a natureza tóxica do cádmio faz com que a reciclagem deste material seja mais cara do que a dos outros módulos.

Pelo uso das equações aplicadas à esta placa fotovoltaica, através da aplicação de proporção de rendimentos com geração média de 4300,45 kWh/ano com economia de 3221,30 R\$/ano, bem como o valor de simulação do sistema completo, os resultados obtidos foram explicitados pela Tabela 18 abaixo.

Tabela 18 – Cálculos equacionais de telureto de cádmio

<i>Payback</i> de investimento	4,41 anos
Retorno sobre investimento (<i>ROI</i>)	22,68% ao ano

Fonte: Pesquisa direta (2023)

Os dados introduzidos na Tabela 18 demonstram que a utilização deste tipo de célula em um módulo aparenta ser bastante positivas, pois apresenta um valor muito viável de *payback* (o mais curto das análises feitas), além de demonstrar o melhor *ROI* entre as células fotovoltaicas escolhidas para comparação, sendo uma tecnologia solar com potencial enorme.

4.3.4 Simulação de liga CIGS

Partindo para a última simulação de módulo, as placas utilizando células CIGS foram capazes de fornecer resultados condizentes, os quais estão transcritos pela Tabela 19, logo abaixo.

Tabela 19 - Valores simulados de liga CIGS

Potência de simulação do sistema	3,3 kWp
Valor médio de componentes (U\$)	700
Valor médio em <i>cents</i> por <i>Watt</i>	0,65
Valor de mão de obra (R\$)	2.095,35
Valor do sistema completo (R\$)	16.064,30

Fonte: Pesquisa direta (2023)

Com isso, evidenciou-se pela Tabela 19 que os resultados deste tipo de sistema também demonstram uma vantagem em relação aos sistemas de silício amorfo, mas não consegue ser mais economicamente viável do que a de CdTe por exemplo, visto que acaba por ser um sistema mais caro e menos eficiente.

A partir desta ideia, os resultados foram finalizados com as informações de valores encontrados de geração de 4089,38 kWh/ano com 3063,20 R\$/ano de economia, utilizando as equações fornecidas pelo trabalho, chegando aos valores da Tabela 20.

Tabela 20 – Cálculos equacionais de liga CIGS

<i>Payback</i> de investimento	5,25 anos
Retorno sobre investimento (<i>ROI</i>)	19,07% ao ano

Fonte: Pesquisa direta (2023)

De modo análogo às outras placas fotovoltaicas, a coleta de dados pela Tabela 20 foi capaz de esclarecer que este módulo de liga CIGS é capaz de ser muito competitiva para viabilidade financeira, com uma simulação de sistema fotovoltaico contendo resultados acirrados com as melhores células fotovoltaicas escolhidas para análise, tanto em payback quanto em retorno sobre investimento.

4.4 Análise de resultados

Este subtópico do trabalho foi criado com o intuito de coletar todos os resultados obtidos nos tópicos deste capítulo, e realizar um aglomerado de informações com uma maior visibilidade, almejando um entendimento mais dinâmico e ilustrativo para estes, também com a premissa de atender harmonicamente os objetivos estipulados para esta monografia.

Com esta ideia, pode ser observado através da Tabela 21, os valores de cada tipo de sistema fotovoltaico simulados, para melhor compreensão visual ao trabalho, com todos os valores de *Payback* e *ROI*, juntamente aos valores de mão de obra simulados.

Tabela 21 – Relação monetária de sistemas simulados

Tipos de módulos fotovoltaicos	Valores de sistemas (R\$)	<i>Payback</i> (anos)	<i>ROI</i> (% a.a)	Valor com mão de obra (R\$)
Silício Amorfo	12.710,28	9,2	10,88	14.368,15
Telureto de Cádmio	14.200,95	4,41	22,68	16.053,25
Liga CIGS	16.064,30	5,25	19,07	18.159,65
Silício Poli. de Mercado	19.790,99	5,1	19,66	22.759,64
Silício Poli. do Estudo	21.136,88	5,8	10,76	24.307,42
Silício Monocristalino	27.244,37	6,4	15,67	30.797,99

Fonte: Pesquisa direta (2023)

Pela Tabela 21, foi possível perceber qual é a demanda aquisitiva para cada tipo de módulo fotovoltaico escolhido, visto que estes valores estão coerentes com seus custos de *cents* por *Watt* encontrados nas referências bibliográficas, também fazendo jus aos seus respectivos rendimentos energéticos.

Após a análise de valores destas diferentes células fotovoltaicas, podem ser visualizadas as variáveis necessárias para que fossem encontrados os resultados das ferramentas de *payback* e retorno sobre investimento, pela Tabela 22.

Tabela 22 – Variáveis para resultados equacionais

Tipos de módulos	Geração energética anual (kWh/ano)	Economia anual estimada (R\$/ano)
Silício Poli. do Estudo	4559,00	2.273,60
Silício Poli. de Mercado	5195,00	3891,37
Silício Monocristalino	5698,75	4268,70
Silício Amorfo	1846,82	1383,38
Telureto de Cádmio	4300,45	3221,30
Liga CIGS	4089,38	3063,20

Fonte: Pesquisa direta (2023)

A Tabela 22 explicita os valores simulados que foram calculados por proporção em relação aos valores do estudo de caso realizado, porém com o valor mais atualizado da bandeira verde tarifária criada pela ANEEL, utilizada pela concessionária CEMIG, em Minas Gerais.

A partir disso, pode-se observar quais foram os dados de quesito monetário, representados por gráfico, através da Figura 24.

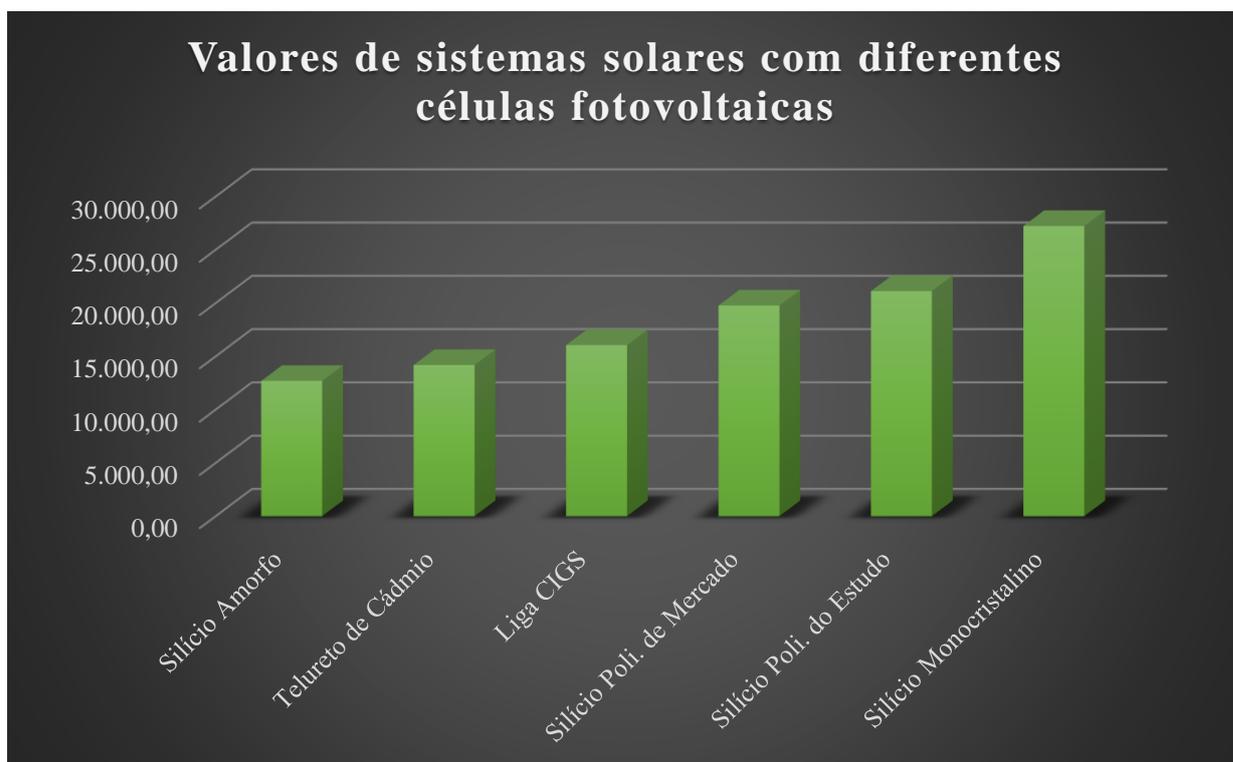


Figura 24 – Gráfico com valores de sistemas simulados

Fonte: Pesquisa direta (2023)

A Figura 24 foi capaz de explicitar as oscilações de gastos com cada tipo de módulo fotovoltaico, com uma evolução gradual, de menor para maior custo.

Já no gráfico da Figura 25, a intenção foi de representar quais foram as maiores premissas de utilização das diferentes células fotovoltaicas, realizando uma plotagem de geração média anual x economia média anual, a fim de comparar sua viabilidade financeira e de produção energética de os sistemas fotovoltaicos, no quesito residencial, levando em consideração tendências de mercado.

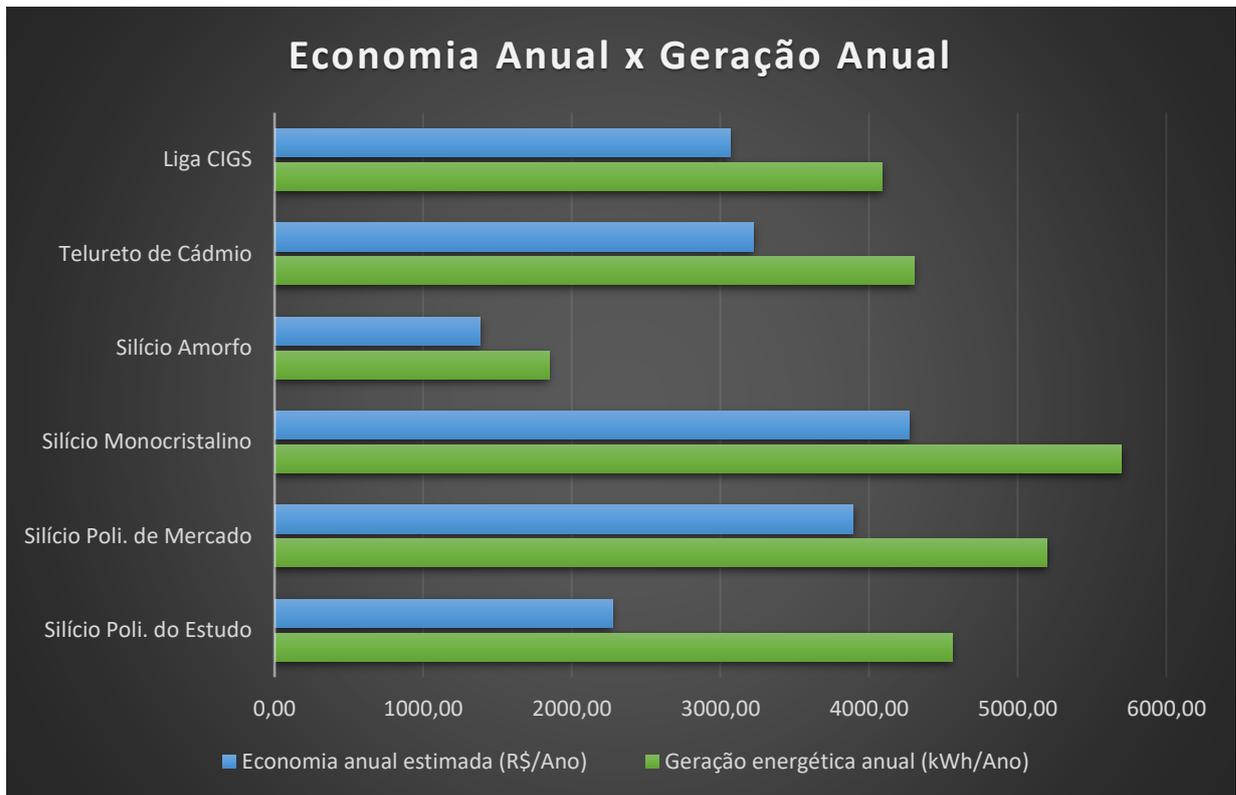


Figura 25 – Economia e geração anuais dos módulos
Fonte: Pesquisa direta (2023)

Portando pela figura 25, pôde-se visualizar uma expectativa de quais são os próximos passos da economia solar, tanto no Brasil como no mundo, indicando que ainda existem lacunas econômicas que devem ser preenchidas com incentivos, de modo a estimular o desenvolvimento contínuo das tecnologias de células fotovoltaicas, aumentando a produção de sistemas solares, sendo estes tanto residenciais, como comerciais e industriais.

5 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES

5.1 Conclusão

Com os resultados obtidos, é possível dizer que com o passar dos anos, o desenvolvimento constante da tecnologia fotovoltaica acabou por proporcionar cada vez mais a acessibilidade deste tipo de geração de energia renovável para a população mundial, e vem sendo um constante diferencial no mercado de produção energético brasileiro, adquirindo cada vez mais espaço e notoriedade.

Este trabalho tem o intuito de instigar e expandir o incentivo a este tipo de tecnologia de produção de energia renovável, a fim de promover uma expansão econômica contínua da população do Brasil, fomentando a competitividade de diferentes tipos de produtos e empresas fotovoltaicas, de modo a melhorar os preços e a acessibilidade gradual no mercado nacional.

De acordo com as premissas desse estudo, levando em consideração algumas das células fotovoltaicas mais utilizadas no mundo, é possível perceber que mesmo ainda existindo certas dificuldades para algumas células chegarem ao patamar das mais utilizadas nas instalações solares, todas ainda estão sendo constantemente estudadas e aplicadas em diferentes situações, locais e objetos, explorando seus potenciais de acordo com suas qualidades sobressalentes.

Abordando a utilização residencial das células usadas no trabalho, as mais viáveis respectivamente, de acordo com os valores energético-econômicos encontrados são as de silício monocristalino, com uma economia anual na média de R\$ 4268,70 na instalação do sistema, seguido pelas de silício policristalino no mercado, com economia simulada de 3891,37 reais, telureto de cádmio economizando 3221,30 reais, as ligas CIGS gerando uma economia de 3063,20 reais por ano e por fim as de silício amorfo, podendo gerar até 1383,38 reais anualmente, indicando que ainda prevalecem o uso dos cristais de silício no mercado, principalmente devido à sua produção mais simples e custos de produção mais baixos.

Portanto, o constante aumento de potencial energético das células de silício monocristalino de alto rendimento abrangem não só empresas de larga escala que estão na corrida de transição energética, contribuindo para um mercado mais sustentável, mas também a adaptabilidade para sistemas residenciais, ganhando cada vez mais espaço de mercado.

Este raciocínio leva a refletir que não se deve deixar de lado as tecnologias de alta qualidade devido aos seus valores de processos de fabricação, pois podem ser sempre aperfeiçoados, sendo esta, uma ideologia que deve ser aplicada à todas as outras células

fotovoltaicas no mercado, contando as não mencionadas, e as que ainda serão apresentadas num futuro próximo.

5.2 Recomendações

Seguem algumas sugestões para futuros trabalhos com cunho de aumento de viabilidade e competitividade de tecnologias fotovoltaicas estimuladas no mundo para o Brasil:

- Cálculos com todas as bandeiras tarifárias da ANEEL nas concessionárias como a Cemig, dando maior competência aos resultados comparativos entre módulos fotovoltaicos, em diferentes situações de escassez energética;
- Utilização de ferramentas no estudo de células fotovoltaicas, como a taxa mínima de atratividade, taxa interna de retorno e valor presente líquido;
- Análise sobre as pesquisas de novas tecnologias de células fotovoltaicas, e sua competitividade no setor energético após sua entrada no mercado.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

AMAZON. **Dual Micro Inverter APSystems DS3D**. Disponível em: <<https://www.amazon.de/-/en/plenti-SOLAR-Inverter-APsystems-Generation/dp/B0CBPX2XBN>>. Acesso em: 25 de novembro de 2023.

AURORA SOLAR. **The frontier of solar cost reductions**. (2023). Disponível em: <<https://aurorasolar.com/blog/what-are-soft-costs-the-frontier-of-solar-cost-reductions/>>. Acesso em: 23 de novembro de 2023.

AZEVEDO, Debora; MACHADO, Lisiane; SACCOL, Amarolinda; SILVA, Lisiane Vasconcellos da. **Metodologia de Pesquisa em Administração – Uma Abordagem Prática**. Unisinos, 2012. Disponível em: <<https://biblioteca.asav.org.br/vinculos/000045/000045b4.pdf>>. Acesso em: 26 de maio de 2022.

BOB VILA: **The cost of solar panels**. Disponível em: <<https://www.bobvila.com/articles/cost-of-solar-panels/>>. Acesso em: 16 de novembro de 2023.

CANAL SOLAR. **Filmes finos CIGS: uma alternativa ao silício cristalino**. Disponível em: <<https://canalsolar.com.br/filmes-finos-cigs-uma-alternativa-ao-silicio-cristalino/>>. Acesso em: 24 de novembro de 2023.

CEMIG. **ANEEL define nova tarifa de Cemig distribuição em processo da 5ª revisão tarifária**. Disponível em: <<https://www.cemig.com.br/release/aneel-define-nova-tarifa-da-cemig/#:~:text=Para%20os%20clientes%20residenciais%20da,reajustado%20em%2014%2C91%25>>. Acesso em: 25 de novembro de 2023.

CEMIG. **Valores de tarifas e serviços**. Disponível em: <<https://www.cemig.com.br/atendimento/valores-de-tarifas-e-servicos/>>. Acesso em: 25 de novembro de 2023.

ECORI. **Boletim de informação técnica – DS3D**. Disponível em: <<https://www.ecorienergiasolar.com.br/assets/uploads/6e116-bit-09-ds3d.pdf>>. Acesso em: 21 de novembro de 2023.

ECORI. **Repositório de arquivos para download**. Disponível em: <<https://www.ecorienergiasolar.com.br/repositorio>>. Acesso em: 16 de novembro de 2023.

ENF SOLAR. **First Solar Series 4™ 105-117**. Disponível em: <<https://www.enfsolar.com/pv/panel-datasheet/crystalline/59263>>. Acesso em: 21 de novembro de 2023.

ENF SOLAR. **QS Solar Single Glass 100W Amorphous Thin-Film Module**. Disponível em: <<https://www.enf.com.cn/Product/pdf/Thin%20film/518896879ebc1.pdf>>. Acesso em: 21 de novembro de 2023.

GIL, Antonio Carlos. **Métodos e Técnicas de Pesquisa Social**, 6ª edição. ATLAS, 2008. Disponível em: <<https://ayanrafael.files.wordpress.com/2011/08/gil-a-c-mc3a9todos-e-tc3a9nicas-de-pesquisa-social.pdf>>. Acesso em: 26 de maio de 2022.

GLOBAL SOLAR DATA. **Map and data downloads**. Disponível em: <<https://globalsolaratlas.info/download>>. Acesso em: 12 de outubro de 2023.

GOOGLE. **Dólar americano a Real brasileiro**. Disponível em: <<https://www.google.com/finance/quote/USD-BRL?sa=X&ved=2ahUKEwixzrbwhNmCAxWIrJUCHcJ-C0wQmY0JegQIBhAr>>. Acesso em: 22 de novembro de 2023.

IBGEM. **ROI: O que é e como calcular**. Disponível em: <<https://ibgem.com.br/2022/06/23/roi-o-que-e-e-como-calcul/>>. Acesso em: 26 de novembro de 2023.

IEEE SPECTRUM. **Perovskite Solar Out-Benches Rivals in 2021**. Disponível em: <<https://spectrum.ieee.org/oxford-pv-sets-new-record-for-perovskite-solar-cells>>. Acesso em: 24 de novembro de 2023.

IMPrensa NACIONAL. **Diário oficial da União**. Disponível em: <<https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/lei-n-14.300-de-6-de-janeiro-de-2022-372467821>>. Acesso em: 21 de novembro de 2023.

JANUÁRIO, Paulo Gabriel Pimentel. **Avaliação de cálculo de retorno sobre investimento em projetos de P&D a partir do nível de maturidade tecnológica**. UTFPR, 2021. Disponível em: <<https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/26602/1/retornoinvestmentomaturidadetecnologica.pdf>>. Acesso em: 02 de fevereiro de 2024.

KALOGIROU, Soteris A. **Engenharia de energia solar – processos e sistemas**. 2 ed. ELSEVIER, 2016. Disponível em: <<https://pdfcoffee.com/engenharia-de-energia-solar-soteris-kalogiroupdf-2-pdf-free.html>>. Acesso em: 01 de fevereiro de 2024.

LIMA, Ariane A.; MENEZES, Natalia P.; SANTOS, Sthefany; AMORIM, Byanca; THOMAZI, Fabiano; ZANELLA, Fernando; HEILMANN, Armando; DARTORA, Cesar A. **Uma revisão dos princípios da conversão fotovoltaica de energia**. São Paulo: SciELO (*Scientific Electronic Library Online*), 2019. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/rbef/a/zmFYrhnnhLQ8dMHk7CDmSfs/?lang=pt#>>. Acesso em: 25 de abril de 2022.

LOGCOMEX. **Importação de painéis solares: vantagens, mercado e dados relevantes:** <<https://blog.logcomex.com/importacao-paineis-solares/>>. Acesso em: 22 de novembro de 2023.

PINHO, J. T. e GALINDO, M. A. **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos.** Rio de Janeiro: CEPEL - CRESESB. Março de 2014. Disponível em: <<https://www.portal-energia.com/downloads/livro-manual-de-engenharia-sistemas-fotovoltaicos-2014.pdf>>.

Acesso em: 31 de março de 2022.

PORTAL SOLAR. **Passo a Passo da Fabricação da Célula Fotovoltaica.** 2020. Disponível em:<<https://www.portalsolar.com.br/passo-a-passo-da-fabricacao-da-celula-fotovoltaica.html>>. Acesso em: 15 de maio de 2022.

REIS, T. **Payback: entenda como calcular o prazo de retorno de um investimento.** SUNO. 2019. Disponível em: <https://www.suno.com.br/artigos/payback>>_. Acesso em: 10 de maio de 2022.

SANTOS, André Silva dos. **Análise de Payback de um sistema fotovoltaico on-grid em residência unifamiliar em Natal – RN.** UFRN, 2022. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/bitstream/123456789/48572/1/An%c3%a1lisedepayback_Santos_2022.pdf>. Acesso em: 02 de fevereiro de 2024.

SECRETARIA DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO. **Minas Gerais prorroga benefício fiscal para energia solar fotovoltaica até 2032.** Disponível em: <<http://www.desenvolvimento.mg.gov.br/inicio/noticias/noticia/2033/minas-gerais-prorroga-beneficio-fiscal-para-energia-solar-fotovoltaica-ate-2032#:~:text=Em%2015%20de%20setembro%20de,31%20de%20dezembro%20de%202022.7>>. Acesso em: 23 de novembro de 2023.

SILVA, Luzilene Souza; ASSUNÇÃO, Ronaldo Furtado de; ROCHA SOBRINHO, Demetrius Clemente da; FREITAS, Ericka da Silva; ASSUNÇÃO, Welton Raiol de. **Avaliação de Custo Benefício da Utilização de Energia Fotovoltaica.** Belém – PA: Revista de Ciência e Tecnologia, 2019. Disponível em: <<https://revista.ufr.br/rct/article/download/5405/2776/23078>>. Acesso em: 12 de maio de 2022.

SOLARBE GLOBAL. **PV glass giant to build 1 GW CdTe solar cell facility.** Disponível em: <<https://www.solarbeglobal.com/pv-glass-giant-to-build-1-gw-cdte-solar-cell-facility/>>. Acesso em: 24 de novembro de 2023.

SOLAR REVIEWS. **Types of solar panels.** Disponível em: <<https://www.solarreviews.com/blog/pros-and-cons-of-monocrystalline-vs-polycrystalline-solar-panels>>. Acesso em: 16 de novembro de 2023.

THE ECO EXPERTS. **The 9 types of solar panels explained**. Disponível em: <<https://www.theecoexperts.co.uk/solar-panels/solar-panels-types>>. Acesso em: 16 de novembro de 2023.

VILLALVA, Marcelo Gradella. **Energia Solar Fotovoltaica – Conceitos e Aplicações**. 3 ed. São Paulo: Érica, 2012. Disponível em: < <https://www.estantevirtual.com.br/livros/marcelo-gradella-villalva/energia-solar-fotovoltaica-conceitos-e-aplicacoes/1734612864>>. Acesso em: 11 de maio de 2022.