

Universidade Federal de São Carlos – UFSCar  
Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia – CCET  
Departamento de Engenharia Elétrica – DEE

**Gustavo Silvestre**

**Discussão sob as perspectivas técnica, econômica e  
ambiental do uso de concentradores baseados em  
lentes de Fresnel em sistemas de geração fotovoltaica**

São Carlos

2023



**Gustavo Silvestre**

**Discussão sob as perspectivas técnica, econômica e ambiental do uso de concentradores baseados em lentes de Fresnel em sistemas de geração fotovoltaica**

Monografia de Conclusão de Curso apresentada ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia da Universidade Federal de São Carlos, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Guilherme Guimarães Lage.

São Carlos  
2023



# Dedicatória

Dedico este Trabalho de Conclusão de Curso a minha amada família, cujo apoio incondicional, compreensão e amor foram pilares essenciais ao longo desta jornada acadêmica. Cada conquista alcançada é reflexo do incentivo constante e da presença encorajadora de vocês.

Aos meus amigos, que compartilharam risos, desafios e momentos inesquecíveis durante essa trajetória, dedico uma parte significativa desta conquista. Seu apoio moral e alegria contagiante foram elementos essenciais para superar obstáculos e celebrar sucessos.

Esta dedicação é uma expressão singela da minha profunda gratidão a todos que, de alguma forma, contribuíram para o alcance deste objetivo. Este trabalho é, também, fruto do amor e apoio daqueles que estiveram ao meu lado, tornando esta jornada mais especial e significativa.



# Agradecimentos

Gostaria de expressar meus sinceros agradecimentos a todos que contribuíram para a conclusão deste Trabalho de Conclusão de Curso.

Em primeiro lugar, quero agradecer à dedicada equipe de professores do Departamento de Engenharia Elétrica da UFSCar, em especial ao Professor Guilherme Guimarães Lage, que desempenhou um papel fundamental como meu orientador. Sua expertise e orientação foram essenciais para o desenvolvimento deste trabalho. Suas valiosas contribuições e insights enriqueceram significativamente o processo de pesquisa e elaboração deste estudo.

À minha família, expresso minha profunda gratidão pelo constante apoio, compreensão e incentivo ao longo desta jornada acadêmica. Suas palavras de encorajamento e amor foram fontes inesgotáveis de inspiração, impulsionando-me nos momentos desafiadores.

Agradeço também aos meus amigos, que compartilharam não apenas momentos de descontração, mas também ofereceram suporte moral e estímulo durante todo o percurso acadêmico. Seu apoio foi vital para superar desafios e celebrar conquistas.





# Resumo

Com a expansão e popularização do uso de sistemas de geração de energia elétrica pelo efeito fotovoltaico, consumidores enquadrados no grupo A, sejam eles cativos ou livres, atendem uma parte significativa de suas demandas. No entanto, a depender do porte desse sistema de geração fotovoltaica, a necessidade de capital para o investimento inicial de implementação desses sistemas pode-se tornar um obstáculo. Para que esse obstáculo seja superado, uma alternativa para se produzir uma maior quantidade de energia consiste no uso de concentradores baseados em lentes de Fresnel que aumentam a incidência de raios solares sobre os painéis fotovoltaicos, possibilitando uma diminuição do investimento inicial. Neste trabalho, apresenta-se, portanto, uma comparação entre um sistema de geração fotovoltaica “tradicional” e um sistema de geração fotovoltaica com concentradores baseados em lentes de Fresnel com o objetivo de se aumentar o rendimento por módulo solar. Esse estudo comparativo será baseado na quantidade de módulos de painéis fotovoltaicos sem e com concentradores necessários para gerar uma mesma quantidade de energia, o que impacta diretamente a área necessária para a instalação dos painéis fotovoltaicos e também os custos iniciais de investimento. Portanto, serão comparados os quesitos econômicos, assim como o impacto ambiental e área ocupada. Ressalta-se também que, além da diminuição dos requisitos técnico-econômicos, o amplo uso de concentradores propicia um menor uso de recursos, como o silício, devido ao menor tamanho dos painéis fotovoltaicos, além de uma maior eficiência técnica.

**Palavras-chave:** análise técnico-econômica, concentradores, lentes de Fresnel, sistema de geração fotovoltaica.



# Abstract

With the expansion and popularization of photovoltaic energy generation systems, consumers classified in group A, whether captive or free, meet a significant portion of their demands. However, depending on the size of these photovoltaic generation systems, the capital requirement for the initial implementation investment can become an obstacle. To overcome this obstacle, an alternative to producing a greater amount of energy involves the use of concentrators based on Fresnel lenses that increase the incidence of sunlight on photovoltaic panels, allowing a reduction in the initial investment. In this study, a comparison is presented between a “traditional” photovoltaic generation system and a photovoltaic generation system with Fresnel lens concentrators with the aim of increasing the efficiency per solar module. This comparative study will be based on the number of photovoltaic panel modules required to generate the same amount of energy, impacting the area needed for the installation of photovoltaic panels and the initial investment costs. Therefore, economic aspects, as well as environmental impact and occupied area, will be compared. It is also emphasized that, in addition to reducing technical and economic requirements, the widespread use of concentrators enables a lower use of scarce resources, such as silicon, due to the smaller size of the photovoltaic panels, as well as greater technical efficiency.

**Keywords:** Technical and economic analysis, concentrators, Fresnel lenses, photovoltaic generation systems



# Lista de abreviaturas e siglas

CPV *Concentrator Photovoltaic*

ACL *Ambiente de contratação livre*

MME *Ministério de Minas e Energia*

ODS *Objetivos de Desenvolvimento Sustentável*

ONU *Organização das Nações Unidas*

GEE *Gases de Efeito Estufa*

PMMA *Polimetilmetacrilato*

SOG *Silicone-Sobre-Vidro*



# Lista de ilustrações

Figura 1 – Efeito fotovoltaico na célula . . . . .	27
Figura 2 – Lente de Fresnel. . . . .	31
Figura 3 – Maior usina de energia solar em atividade na América Latina. . . . .	34
Figura 4 – Comparativo de tamanho, módulo CPV e um carro. . . . .	35
Figura 5 – Arranjo Geral Módulo Convencional. . . . .	40
Figura 6 – Arranjo geral módulo CPV. . . . .	41
Figura 7 – Emissões de gases do efeito estufa. . . . .	43
Figura 8 – Interface do software PVsyst. . . . .	51

# Lista de tabelas

Tabela 1 – Dados sobre as lentes que compõem os módulos CPV . . . . .	44
Tabela 2 – Comparação de Módulos Solares . . . . .	45
Tabela 3 – Comparação do quesito área. . . . .	47
Tabela 4 – Valores de arrendamento. . . . .	48



# Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>17</b>
<b>1.1</b>	<b>Abertura de mercado</b>	<b>17</b>
1.1.1	Público alvo	17
1.1.2	Impactos e estímulos	18
<b>1.2</b>	<b>Energia limpa e acessível</b>	<b>20</b>
<b>1.3</b>	<b>Módulos fotovoltaicos</b>	<b>21</b>
1.3.1	Módulos concentradores fotovoltaicos	21
<b>1.4</b>	<b>Objetivos</b>	<b>22</b>
<b>1.5</b>	<b>Metodologia</b>	<b>22</b>
<b>1.6</b>	<b>Organização do texto</b>	<b>23</b>
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>25</b>
<b>2.1</b>	<b>Células fotovoltaicas</b>	<b>25</b>
2.1.1	Silício monocristalino	25
2.1.2	Silício policristalino	26
2.1.3	Silício amorfo	26
<b>2.2</b>	<b>Efeito fotovoltaico</b>	<b>26</b>
<b>2.3</b>	<b>Desafios</b>	<b>27</b>
<b>2.4</b>	<b>Concentração solar</b>	<b>27</b>
<b>2.5</b>	<b>Os módulos CPV</b>	<b>28</b>
2.5.1	As lentes de Fresnel	30
2.5.2	As células solares dos concentradores	31
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA PARA ANÁLISE TÉCNICO-ECONÔMICA DA EFICIÊNCIA NO USO DE CONCENTRADORES FOTOVOLTAICOS</b>	<b>33</b>
<b>3.1</b>	<b>Metodologia</b>	<b>36</b>
<b>4</b>	<b>ESTUDO DE CASO</b>	<b>39</b>
<b>4.1</b>	<b>Área ocupada</b>	<b>40</b>
<b>4.2</b>	<b>Manutenção e garantia</b>	<b>41</b>
<b>4.3</b>	<b>Impactos ambientais</b>	<b>42</b>
4.3.1	Emissões de gases de efeito estufa de óticas primárias de lentes de Fresnel	43
<b>4.4</b>	<b>Geração</b>	<b>44</b>
<b>4.5</b>	<b>Datasheets</b>	<b>45</b>

4.6	Preço . . . . .	45
5	<b>ANÁLISE TÉCNICO-ECONÔMICO-AMBIENTAL . . . . .</b>	<b>47</b>
5.1	Aspecto área ocupada . . . . .	47
5.2	Aspecto ambiental . . . . .	48
5.3	Aspecto econômico . . . . .	48
5.4	Considerações acerca da análise realizada . . . . .	49
5.4.1	Validação da análise . . . . .	50
6	<b>CONCLUSÕES . . . . .</b>	<b>53</b>
	<b>REFERÊNCIAS . . . . .</b>	<b>55</b>

# 1 Introdução

As fontes de energia renovável, como solar, eólica, geotérmica e biomassa, são consideradas alternativas viáveis aos combustíveis fósseis, que correspondem a aproximadamente 80% do suprimento mundial de energia primária (J., 2008). Elas não apenas reduzem a poluição e o aquecimento global, mas também contribuem para o avanço econômico. No entanto, apesar do rápido crescimento das fontes de energia renováveis, existem desafios relacionados à sua adoção mais ampla. Em primeiro lugar, a eficácia de tais fontes depende da localização geográfica e das condições climáticas prevalentes. Os recursos naturais necessários para a geração de energia renovável estão além do controle humano (LE et al., 2023), no caso deste trabalho o recurso em questão é o sol. Em segundo lugar, a geração intermitente de energia a partir de fontes renováveis pode levar a desequilíbrios entre o fornecimento e a demanda de energia, problemas de qualidade de energia e limitações nas redes de energia (LE et al., 2023).

Para tanto, é necessária a modernização das redes para que a geração de energia através de fontes de energia renováveis não fique limitada à uma rede de distribuição ultrapassada e que não suporta a aparição de novos geradores. Uma vez que, com a pauta de descarbonização e transição energética, o número de geradores de energia renovável venha a crescer para acompanhar tal demanda do mercado global.

## 1.1 Abertura de mercado

### 1.1.1 Público alvo

Como já dito anteriormente, os consumidores de categoria livre serão o foco a ser discutido neste trabalho, uma vez que são consumidores com uma demanda acima de 500kW, previsto na Portaria n°465 de 12 de dezembro de 2019 do Ministério de Minas e Energia (MME), e por tanto fazem um uso de uma quantidade maior de placas solares, tendo assim todos os impecílhos que podem ser um obstáculo para a aquisição de um sistema potencializados.

Tais consumidores se enquadram no Ambiente de contratação livre (ACL), regulado pela Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE), o qual fornece a possibilidade de realizar compra e venda de energia elétrica através de contratos bilaterais previstos no mercado livre de energia, atualmente a indústria brasileira conta com 90% de seu total atendido por este mercado (ABRACEEL, 2021). Este tipo de modalidade cresceu cerca

de 26% desde novembro de 2020 (ABRACEEL, 2021), mas tem um potencial para crescer ainda mais, graças aos estímulos que se tem junto às energias renováveis.

Em geral, os consumidores que estão enquadrados no mercado livre, pertencem ao grupo tarifário A, o qual é representado geralmente por empresas de grande porte, indústrias, comércios e outros estabelecimentos que demandam uma quantidade significativa de energia elétrica para suas operações. Esses consumidores têm a possibilidade de contratar energia no mercado livre, o que significa que têm mais flexibilidade para negociar contratos diretamente com geradores ou comercializadores de energia, buscando condições mais vantajosas em termos de preço e condições contratuais.

Em março de 2022, o volume de eletricidade negociado no ambiente de Comercialização Livre (DCE) representou cerca de 34,63% da demanda total do país, com uma média de aproximadamente 71.304 megawatts. Esse número registrou um notável aumento de 7,5% em comparação com o mesmo mês de 2021, enquanto o ambiente de Comercialização Regulada (RCE) observou um crescimento mais modesto de 0,9%. Além disso, em março de 2022, o número de participantes no DCE aumentou significativamente, alcançando um incremento de 12,6% em relação a 2021, de acordo com informações da CCEE (CCEE, 2012)).

As agências encarregadas de regular o comércio de energia no Brasil, como a ABRACEEL (Associação Brasileira dos Comercializadores de Energia) e a CCEE (Câmara de Comercialização de Energia Elétrica), atualmente estão conduzindo uma análise sobre a transição dos grupos A e B, cuja demanda é inferior a 500 kW, para o DCE. Esses grupos atualmente representam 19% do RCE, representando um marco significativo no mercado de energia do Brasil. Quando essa transição for concluída, o DCE abrangerá 59% de todo o mercado, superando o RCE em demanda total pela primeira vez (ABRACEEL, 2021). Essa redução gradual de barreiras que impedem a inserção de novas unidades consumidoras neste ambiente livre de contratação promoverá a então chamada Abertura de Mercado, possibilitando multiplicar várias vezes o número de UC's inseridas neste contexto, enfatizando assim a importância de se realizar estudos comparativos de geração de energia para que se possa atender estes novos consumidores.

### 1.1.2 Impactos e estímulos

A abertura do mercado de energia pode ter um impacto considerável e positivo nas energias renováveis e em seus geradores. Conforme os mercados de energia se tornam mais competitivos e menos regulamentados, várias mudanças e influências se tornam evidentes.

Primeiramente, essa abertura estimula o investimento em energias renováveis. Com mais liberdade para investidores participarem do setor de energia, há um potencial au-

mento significativo no capital disponível para projetos de energias renováveis, acelerando assim o desenvolvimento de parques eólicos, usinas solares e outras fontes limpas de energia (SILVA, 2022).

Além disso, a competição resultante no mercado de energia pode levar a preços mais competitivos para eletricidade gerada a partir de fontes renováveis. Isso torna a energia limpa uma opção mais atraente para os consumidores, incentivando sua adoção em larga escala.

Outro benefício é o estímulo à inovação e eficiência. A concorrência cria incentivos para encontrar maneiras mais eficientes e econômicas de gerar e distribuir energia renovável, possivelmente resultando em avanços tecnológicos que aumentam a eficiência e reduzem os custos (SILVA, 2022). Fato o qual está diretamente relacionado com o objetivo deste trabalho, comparar dois modelos e experimentalmente apontar uma melhor opção para estes consumidores e geradores novos.

Tal abertura do mercado também pode promover a diversificação da matriz energética, reduzindo a dependência de fontes de energia não renovável. Isso é essencial para a transição para um sistema de energia mais sustentável com menores emissões de carbono (ABRACEEL, 2021).

Pode-se dizer também que a entrada de mais players pode descentralizar a geração de energia, com um aumento na geração de pequena escala, como painéis solares residenciais e turbinas eólicas de pequeno porte. Isso pode tornar a rede mais resiliente e menos vulnerável a falhas em larga escala.

Como citado anteriormente, esta abertura está diretamente relacionada ao estímulo a descarbonização uma vez que pode incentivar a comercialização de créditos de carbono, estimulando as empresas a reduzir suas emissões de carbono, tornando as energias renováveis ainda mais atraentes para empresas preocupadas com a sustentabilidade.

Finalmente, a expansão das energias renováveis pode ter um impacto socioeconômico positivo, criando empregos nas comunidades locais por meio da construção e manutenção de instalações de energia limpa.

Porém, para que toda essa expansão e estímulos à geração de energia renovável venha a acontecer de forma correta e segura, é necessário que o país como um todo tenha suas redes de distribuição e transmissão melhoradas quanto à capacidade de de potência que pode ser inserida, uma vez que, com o grande número de novas UCs e geradores de energia, as redes precisam se atualizar para suportar tamanho potencial energético.

## 1.2 Energia limpa e acessível

A transição para fontes de energia sustentáveis desempenha um papel crucial no alcance dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da ONU, com destaque para o ODS 7 - Energia Limpa e Acessível. Nesse contexto, as energias renováveis, e em especial a fotovoltaica, emergiram como catalisadoras fundamentais para a mitigação das mudanças climáticas e a promoção de um desenvolvimento mais sustentável. O uso crescente da energia solar fotovoltaica representa não apenas uma resposta às preocupações ambientais, mas também uma solução viável para a crescente demanda global por energia.

Este estudo explora não apenas o crescimento exponencial das instalações de energia solar, mas também os benefícios socioeconômicos associados, como a criação de empregos, o aumento do acesso à eletricidade em áreas remotas e a redução das emissões de gases de efeito estufa. Ao abordar as implicações e os desafios dessa transição energética, esta monografia busca contribuir para o entendimento mais amplo do papel da energia fotovoltaica no contexto dos ODS, evidenciando sua importância estratégica para a construção de um futuro mais sustentável e inclusivo.

A temática ambiental assume uma posição proeminente nos acordos ambientais internacionais estabelecidos por organizações públicas e privadas, bem como no âmbito de organizações do terceiro setor e da academia.

A importância crescente das fontes de energia limpa e renovável tem sido cada vez mais destacada no avanço do desenvolvimento sustentável e no sucesso das iniciativas de redução das emissões de carbono. No contexto específico da energia solar no Brasil, a auto-geração tem desempenhado um papel fundamental ao colocar os consumidores residenciais e indústrias como protagonistas da expansão da energia fotovoltaica (NUNES-VILLELA et al., 2017).

A crise ambiental sistêmica demanda uma mudança de paradigma, substituindo a visão de crescimento ilimitado e exploração desenfreada dos recursos naturais por uma abordagem de desenvolvimento sustentável. Essa abordagem mantém o compromisso intergeracional de preservar e restaurar o sistema que sustenta a vida. O sucesso da transição depende do posicionamento estratégico dos principais atores, como governos, empresas e sociedades, dentro de uma economia moldada por escolhas que considerem a melhor relação custo-benefício (NUNES-VILLELA et al., 2017).

Visando apresentar a escolha que representa maior relação custo-benefício, este estudo tem como um objetivo demonstrar uma comparação entre dois modelos e identificar qual será a melhor opção no decorrer da transição energética que vivemos nos dias atuais, de forma a torná-la mais rápida e de menor custo.

## 1.3 Módulos fotovoltaicos

Como já visto na seção anterior, o mundo vive uma transição energética a qual ocorre por meio da utilização de métodos que geram energia limpa e renovável. Portanto, é impensável não relacionar a energia solar fotovoltaica com esta causa, uma vez que, no Brasil atualmente este tipo de energia é responsável por 11,6% de toda a matriz de geração do país (ABSOLAR, 2023).

O processo de conversão direta da energia solar em energia elétrica, conhecido como efeito fotovoltaico, é realizado por meio de um dispositivo chamado célula fotovoltaica. A célula fotovoltaica é tipicamente composta de silício e possui uma junção PN, semelhante à de um diodo semicondutor (VILLALVA, 2016). Um painel solar fotovoltaico possui várias células e com o trabalho em conjunto destas, ocorre a composição do módulo e sua capacidade de conversão de energia.

### 1.3.1 Módulos concentradores fotovoltaicos

Com a grande onda de aparelhos e máquinas que demandam do uso de energia elétrica para garantir seus funcionamentos, foram se intensificando e aprimorando as maneiras de gerar e distribuir a energia, por exemplo, em uma escala de distribuição maior, pode-se citar o elevado número de usinas hidrelétricas presentes no território brasileiro, assim como a presença de usinas nucleares em alguns países ao redor do mundo.

Com isso, também surgiu a oportunidade que possibilita os próprios consumidores, cativos ou livres, de gerarem sua própria energia elétrica, através da opção de instalar um sistema fotovoltaico em suas residências. Fato o qual contribui para a transição energética do país e, em paralelo, leva economia ao consumidor que gera sua energia.

Porém, como a tecnologia e as inovações sempre buscam a evolução, a facilidade e comodidade da sociedade, então surgiram oportunidades de aprimorar aquilo que ainda é rentável, ou seja, uma possibilidade de fazer um melhor uso dos sistemas fotovoltaicos para os consumidores livres, ou seja, aqueles que possuem uma demanda contratada acima de 1000kW, os quais serão o foco deste projeto e possuem especialmente dois fatores a serem combatidos quanto a geração de energia: preço do sistema e sua área ocupada.

Este conjunto de medidas abrange instruções para ativar os consumidores e viabilizar sua capacidade de produzir, armazenar e vender energia por conta própria. Coloca-se um foco central nos consumidores, possibilitando que gerem energia renovável e recebam compensação com base na quantidade que produzem (ZEPTER et al., 2019).

A partir de alguns estudos apresentados, a discussão quanto a viabilidade do uso de painéis CPV (do inglês *concentrators photovoltaics*) para maximizar a produção de energia a partir da incidência de raios solares tende a crescer (SANTOS; COSTA, 2018).

Este modelo de módulo solar trás um conjunto de lentes as quais são encaixadas nas células fotovoltaicas e tem como função convergir os raios solares para o local correto onde ocorre a transformação da energia vinda da luz solar em energia elétrica, fato o qual aumenta o rendimento por célula a partir da diminuição do “desperdício” de raios solares.

De acordo com (KOLAMROUDI et al., 2023), a utilização de módulos CPV traz uma redução do preço por unidade de energia gerada por conta da maximização dos resultados de um módulo fotovoltaico convencional, ou seja, as lentes presentes nos concentradores tem como objetivo aumentar a geração de eletricidade e a eficiência de conversão como um todo de um painel convencional.

## 1.4 Objetivos

Esta monografia tem como objetivos primordiais comparar módulos fotovoltaicos convencionais com módulos concentradores (CPV) em três aspectos cruciais: área ocupada, impacto ambiental e retorno financeiro. A análise da eficiência em termos de área se propõe a avaliar a capacidade de geração de energia em relação ao espaço utilizado por cada tecnologia. Paralelamente, a avaliação do impacto ambiental busca oferecer uma visão abrangente, considerando fatores como consumo de recursos, emissões de gases de efeito estufa e resíduos gerados ao longo do ciclo de vida de ambos os tipos de módulos. No âmbito financeiro, a pesquisa visa realizar uma análise econômica comparativa, abordando investimentos iniciais, custos operacionais e potenciais benefícios financeiros ao longo do tempo. Ao final, espera-se que esta investigação forneça recomendações fundamentadas para orientar a implementação de módulos fotovoltaicos, contribuindo não apenas para o avanço do conhecimento científico, mas também para uma tomada de decisão informada por parte de stakeholders interessados em adotar tecnologias fotovoltaicas eficientes e sustentáveis.

## 1.5 Metodologia

Para efeitos de comparação, foram estabelecidos critérios específicos, visando equalizar as condições entre ambos os modelos. Essa abordagem busca assegurar que os resultados obtidos sejam exclusivamente derivados das características intrínsecas dos modelos em análise, eliminando possíveis influências de variáveis externas, tais como distintos inversores, capacidades de pico variadas e espaçamentos divergentes entre as mesas de módulos. Nesse contexto, será fixada uma potência total limitada pela quantidade de inversores (1,2 MW), sendo a partir desse limite que as áreas ocupadas e os equipamentos necessários para cada caso serão determinados. Tal abordagem permitirá a realização de cálculos pre-



cisos quanto ao retorno econômico, ao mesmo tempo em que proporcionará uma avaliação detalhada do impacto ambiental associado a cada cenário.

## 1.6 Organização do texto

O conteúdo desta monografia está organizado da seguinte forma.

No Capítulo 2, são abordados os fundamentos teóricos relacionados aos componentes de um sistema de geração de energia elétrica por meio do efeito fotovoltaico. Esse embasamento teórico é essencial para a compreensão dos conceitos subjacentes ao estudo comparativo desenvolvido posteriormente.

No Capítulo 3, são apresentados de maneira detalhada a metodologia que será empregada para conduzir o estudo comparativo. Esse capítulo delinea todos os elementos e procedimentos que serão utilizados, oferecendo uma visão clara e abrangente do caminho metodológico adotado para a análise comparativa.

No Capítulo 4, são apresentados os critérios de comparação previamente estabelecidos, visando eliminar a influência de variáveis externas e isolar os resultados obtidos. Para isso, são separados por seções cada tópico a ser comparado.

No Capítulo 5, é fornecida uma análise comparativa com base nos aspectos mencionados anteriormente, proporcionando uma visão aprofundada das conclusões derivadas do estudo. Dessa forma, a sequência estruturada da monografia permite uma compreensão progressiva e interligada do desenvolvimento do estudo e da análise comparativa.

Por último, no Capítulo 6, são feitas as conclusões obtidas a partir de todos os dados obtidos, trabalhados e discutidos nas seções anteriores.



## 2 Fundamentação teórica

Assim como abordado no último capítulo, a humanidade como um todo vive um momento de descarbonização, evento o qual ocorre, de maneira majoritária, através da geração de energia renovável. Neste trabalho a energia solar leva seu destaque e, com isso em vista, é de suma importância que o efeito fotovoltaico, assim como os detalhes de funcionamento dos equipamentos fotovoltaicos sejam esclarecidos.

### 2.1 Células fotovoltaicas

Uma célula fotovoltaica padrão é formada por duas camadas de material semicondutor, uma do tipo P e outra do tipo N, juntamente com uma grade de coletores metálicos e uma base metálica. Além disso, a célula conta com uma camada de material antirreflexivo, cuja função é aumentar a absorção de luz (VILLALVA, 2016).

É possível produzir células solares utilizando diversos materiais. As células mais populares e amplamente disponíveis no mercado são feitas de silício monocristalino, silício policristalino ou silício amorfo (VILLALVA, 2016).

#### 2.1.1 Silício monocristalino

As células solares monocristalinas são produzidas através do corte em lâminas dos lingotes de silício monocristalino. Esses lingotes são obtidos a partir de silício purificado, extraído do mineral quartzo, que é muito abundante na crosta terrestre (VILLALVA, 2016).

O lingote de silício monocristalino possui uma estrutura cristalina única, o que lhe confere uma aparência brilhante e uniforme. Para a produção das células solares, o lingote é cortado em fatias finas, chamadas de bolachas de silício ou wafers (VILLALVA, 2016).

Os wafers passam por um processo de dopagem, no qual são formadas as camadas P e N que conferem as propriedades fotovoltaicas. Em seguida, o wafer dopado recebe os eletrodos e o tratamento antirreflexivo, resultando na formação da célula fotovoltaica (VILLALVA, 2016).

Uma célula solar monocristalina tem uma aparência uniforme e pode ter uma coloração azulada ou preta, dependendo do tipo de tratamento antirreflexivo utilizado. As células de silício monocristalino são as mais eficientes disponíveis comercialmente em larga escala (VILLALVA, 2016).

### 2.1.2 Silício policristalino

O processo de fabricação do silício policristalino é mais simples e utiliza temperaturas mais baixas em comparação com o silício monocristalino. O lingote de silício policristalino é composto por um aglomerado de vários cristais, que possuem diferentes tamanhos e orientações espaciais (VILLALVA, 2016).

Os wafers policristalinos, assim como as células solares finalizadas, apresentam uma aparência heterogênea e um aspecto bastante distinto em relação ao silício monocristalino (VILLALVA, 2016).

### 2.1.3 Silício amorfo

A eficiência dos módulos com este tipo de silício é baixa, tendo seus valores entre 5% e 8%, além de tem uma baixa vida útil, de 6 a 12 meses sua eficiência já diminui. Estes fatores são causados graças à degradação induzida pela luz (VILLALVA, 2016).

## 2.2 Efeito fotovoltaico

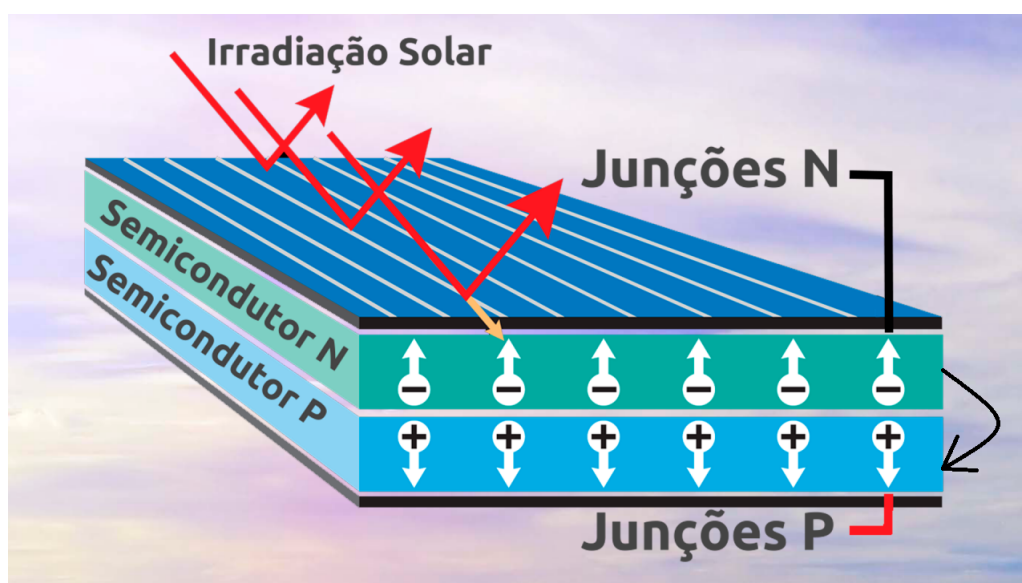
O efeito fotovoltaico é um fenômeno físico no qual a luz é convertida diretamente em eletricidade por meio da célula fotovoltaica. Quando a luz solar incide sobre a célula fotovoltaica, os fótons (partículas de luz) transferem energia para os elétrons presentes no material semicondutor. Essa energia absorvida pelos elétrons faz com que eles sejam excitados, saindo de sua posição original no átomo. O material semicondutor é estruturado de tal forma que os elétrons excitados são forçados a se moverem em uma direção preferencial, criando uma corrente elétrica (VILLALVA, 2016).

A estrutura da célula fotovoltaica é geralmente constituída de camadas de diferentes materiais semicondutores com propriedades eletrônicas específicas. A camada superior, geralmente feita de material tipo p, tem um excesso de buracos (cargas positivas), enquanto a camada inferior, geralmente feita de material tipo n, tem um excesso de elétrons (cargas negativas). Quando a luz solar atinge a célula fotovoltaica, ela carrega elétrons na camada superior e portanto abrem-se buracos na camada inferior (VILLALVA, 2016).

Esses elétrons e buracos são então separados pela estrutura da célula fotovoltaica, criando uma diferença de potencial elétrico. Essa diferença de potencial, também conhecida como tensão, faz com que os elétrons fluam de volta à camada inferior através de um circuito externo, gerando uma corrente elétrica útil. Esse fluxo de elétrons é o que chamamos de corrente fotovoltaica (VILLALVA, 2016).

A partir da imagem abaixo é possível identificar de maneira visual o efeito fotovoltaico ocorrendo na célula, tendo os elétrons energizados pelos fótons viajando entre uma diferença de potencial e criando a corrente elétrica.

Figura 1 – Efeito fotovoltaico na célula



Fonte: Autoria própria, adaptado de (ENSOLARE, 2020)

## 2.3 Desafios

Segundo (ANTONINI, 2010) os principais obstáculos para a energia fotovoltaica ser ainda mais competitiva com as fontes de energia convencionais são três: a baixa eficiência, entendida como a baixa densidade de produção de energia por área ocupada, o alto custo dos materiais constituintes e a variabilidade da produção, que está correlacionada às condições meteorológicas.

Enquanto para o último ponto as soluções estão relacionadas a tecnologias externas à energia fotovoltaica, abordando questões de gerenciamento da rede e distribuição de usinas solares, os dois primeiros problemas são alvos da pesquisa em energia fotovoltaica.

## 2.4 Concentração solar

A origem da concentração solar remonta a tempos muito antigos, quando era utilizada pelos gregos no século VIII a.C. para acender a primeira tocha dos Jogos Olímpicos antigos (776 a.C.) (AZIZ et al., 2014). Essa tocha era iluminada pelo sol com o auxílio de um espelho parabólico chamado SKAPHIA. Quinhentos anos depois, durante o ataque

dos romanos e o cerco a Siracusa (Sicília), Arquimedes reutilizou a invenção do espelho de fogo. Ele havia desenvolvido espelhos gigantes de bronze polido para refletir os raios solares e concentrá-los nas velas dos navios da frota romana, a fim de incendiá-las. Na Europa (1515), Leonardo da Vinci propôs a ideia de projetar um Refletor Compacto Linear de Fresnel (CLFR). No entanto, de acordo com o que foi relatado na literatura, seu estudo sobre esse sistema permaneceu apenas no papel e não foi apoiado por trabalhos experimentais (AZIZ et al., 2014). Ele afirmou que esse sistema seria válido para muitos usos industriais.

A concentração de energia solar permite alcançar temperaturas práticas muito úteis para uso em diversos setores domésticos e industriais. A tecnologia solar concentrada é de grande interesse, pois oferece uma maneira eficiente e adequada de suprir a crescente demanda global por eletricidade solar. Os concentradores solares recebem radiação em feixes por meio de superfícies reflexivas perfeitas e sistemas de rastreamento, redirecionando-a para receptores de superfície reduzida por meio de refrações em prismas ou lentes, ou múltiplas reflexões em espelhos (GHODBANE et al., 2020).

## 2.5 Os módulos CPV

Uma maneira investigada para melhorar a eficiência e reduzir os custos é a tecnologia fotovoltaica concentrada (CPV); a concentração de luz permite uma maior eficiência na conversão fotovoltaica das células e permite substituir uma grande parte dos materiais fotoativos por componentes mais baratos, concentrando a luz. Infelizmente, além dessas vantagens, também existem algumas limitações para a CPV; as mais evidentes são a necessidade de o painel ser montado em um rastreador solar e a capacidade de converter apenas a componente direta da luz solar; além disso, a confiabilidade dos sistemas CPV ainda não foi comprovada em campo por um longo período, como aconteceu com a energia fotovoltaica convencional, já que essa tecnologia atingiu uma dimensão industrial apenas nos últimos anos (ANTONINI, 2010).

Os concentradores fotovoltaicos são encontrados em uma ampla variedade de configurações possíveis; existem concentradores com fatores de concentração de 2 a mais de 1000, existem montagens CPV que utilizam células solares de silício, bem como células solares semicondutoras III-V; existem sistemas CPV com rastreamento de um eixo ou dois eixos, e com diferentes requisitos de precisão de apontamento. Todas essas diferentes configurações foram desenvolvidas desde os primeiros trabalhos pioneiros na década de 70 até os produtos comerciais atuais, buscando as melhores soluções para uma energia solar competitiva em custo. A indústria CPV é muito diferente da indústria de outros tipos de tecnologia fotovoltaica; de fato, um módulo ou montagem CPV é composto por muitos

componentes que requerem alta precisão de montagem. Portanto, o setor CPV parece ser um híbrido entre as indústrias microeletrônica e automotiva. Essa possibilidade de derivar uma grande parte da automação necessária para uma produção de médio a alto volume de outros campos industriais bem consolidados é uma vantagem importante para a primeira avaliação da tecnologia CPV e uma referência útil para a análise de custos de grandes produções (ANTONINI, 2010).

Ainda segundo (ANTONINI, 2010), alguns parâmetros ópticos desempenham um papel substancial nos concentradores fotovoltaicos; esses parâmetros são tanto geométricos, relacionados ao design ideal das peças, quanto físicos, relacionados a questões de fabricação e escolha de materiais. Os principais parâmetros geométricos são:

- Fator de concentração;
- Ângulo de aceitação;

No contexto dos módulos concentradores CPV, diversos fenômenos ópticos desempenham um papel fundamental no seu funcionamento e eficiência. Esses fenômenos incluem a transmissão de luz, reflexão de luz, absorção de luz, dispersão, índice de amarelamento (Yellowing Index - YI), função de distribuição bidirecional de reflexão (Bidirectional Reflectance Distribution Function - BRDF) e função de distribuição bidirecional de transmissão (Bidirectional Transmission Distribution Function - BTDF).

A transmissão de luz é um aspecto crucial para garantir que a luz solar incidente seja eficientemente direcionada para as células fotovoltaicas, contribuindo para a geração de eletricidade. Maximizar a transmissão é fundamental para otimizar o desempenho dos módulos concentradores.

Por outro lado, a reflexão de luz representa uma perda de energia, uma vez que a luz refletida não é direcionada para as células fotovoltaicas. Portanto, minimizar as perdas por reflexão é uma preocupação constante no design desses sistemas.

Da mesma forma, absorção de luz está diretamente relacionada à capacidade dos materiais usados nos módulos concentradores de capturar a energia luminosa e convertê-la em calor ou eletricidade. Esses materiais devem ser seletivos, absorvendo eficazmente apenas as partes do espectro solar que podem ser convertidas em energia útil (ANTONINI, 2010).

De maneira equivalente, dispersão de luz, por sua vez, pode afetar negativamente a concentração de luz e a eficiência dos módulos concentradores, uma vez que a difusão da luz pode resultar em perdas e dispersão da energia luminosa (ANTONINI, 2010).

Por sua vez, Índice de Amarelamento (Yellowing Index - YI) é uma medida que avalia a tendência de materiais transparentes a amarelar com o tempo de exposição à

luz solar. Isso é relevante porque o aumento do amarelamento pode prejudicar a transmissão de luz e reduzir o desempenho dos módulos concentradores ao longo do tempo (ANTONINI, 2010).

Assim, as funções de distribuição bidirecional de reflexão (BRDF) e de transmissão (BTDF) são ferramentas essenciais para compreender como os materiais e superfícies ópticas interagem com a luz solar em diferentes ângulos e direções. O conhecimento dessas funções permite projetar módulos concentradores que direcionam eficazmente a luz solar para as células fotovoltaicas (ANTONINI, 2010).

Portanto, o entendimento desses fenômenos ópticos é fundamental para o desenvolvimento, aprimoramento e eficiência dos módulos concentradores de energia solar, contribuindo para a geração de eletricidade sustentável e eficaz a partir da luz solar (ANTONINI, 2010).

A BRDF (Bidirectional Reflectance Distribution Function) é uma função que descreve a distribuição da refletância de um material em relação à direção da luz incidente. Ela representa a radiância dispersa em relação à irradiância incidente. Matematicamente, é apresentada da seguinte forma expressa:

$$BRDF(\theta_i, \phi_i, \theta_s, \phi_s) = \frac{\partial L_s(\theta_s \phi_s)}{\partial E_i(\theta_i \phi_i)} \quad (2.1)$$

Na formulação, os ângulos  $\theta_i$ ,  $\phi_i$  denotam os ângulos de incidência para a radiação que entra, utilizando coordenadas esféricas, ao passo que os ângulos  $\theta_s$ ,  $\phi_s$  representam as direções de espalhamento.  $L_s$  corresponde à radiância espalhada, ao passo que  $E_i$  é a irradiância incidente (ANTONINI, 2010).

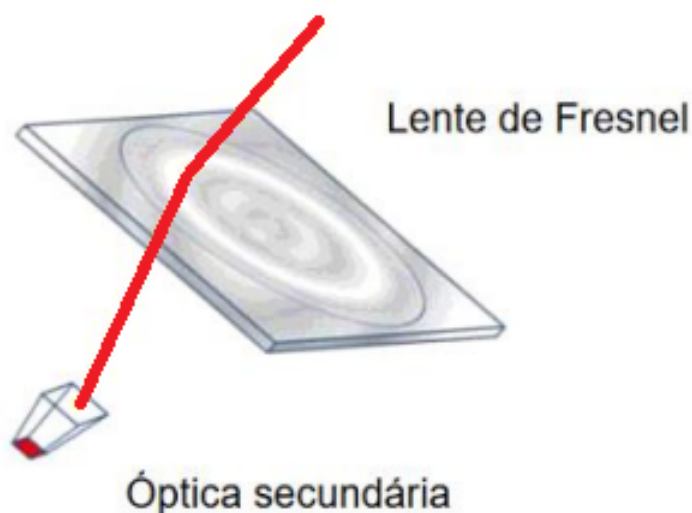
### 2.5.1 As lentes de Fresnel

Essa tecnologia recebe o nome do cientista francês Augustin-Jean Fresnel, que inventou a lente objetiva de Fresnel no século XVIII para ser utilizada em faróis. Sua ideia era criar uma lente convexa convencional em múltiplas seções para obter uma lente mais leve e econômica, capaz de direcionar corretamente os raios de luz em uma direção específica e garantir uma grande abertura em curta distância focal. A ideia principal da tecnologia LFR foi inspirada na lente de Fresnel e consiste em dividir um espelho parabólico em uma série de espelhos refletores para focalizar os raios colimados em um ponto ou linha focal, dependendo se os refletores são circulares ou lineares (GHODBANE et al., 2020). Este trabalho considera lentes de Fresnel convexas com alta capacidade de concentração e baixa aberração na borda do campo de aceitação. Para alcançar um equilíbrio entre tamanho compacto e ângulo de aceitação dos concentradores, as lentes de Fresnel foram projetadas para obter concentrações ópticas próximas a 10 sóis em condições paraxiais



(CHEMISANA; IBÁÑEZ; BARRAU, 2009). A figura abaixo ilustra como é uma lente de Fresnel:

Figura 2 – Lente de Fresnel.



Fonte: Autoria própria, adaptado de (HENRIQUE, 2020)

Atualmente, a maioria dos CPV é baseada em lentes de Fresnel para a ótica primária; as lentes de Fresnel são um tipo particular de lentes em que o volume de material dielétrico transparente é reduzido ao mínimo, a fim de reduzir a massa, assim como o peso, e também a absorção de luz. Outras soluções utilizam a reflexão da luz em vez da refração para concentrar a luz; os refletores parabólicos clássicos são utilizados, bem como configurações mais complexas na forma de designs de Cassegrain, esse design óptico baseado em duas reflexões tem o objetivo de alcançar uma estrutura compacta, com o foco de luz atrás do concentrador primário (ANTONINI, 2010).

Os sistemas ópticos CPV comumente consistem em um concentrador primário junto a um elemento óptico secundário (EOS); esses elementos secundários são geralmente acoplados às células fotovoltaicas e têm a finalidade de aprimorar o fator de concentração e a capacidade de aceitar luz em ângulos variados (ANTONINI, 2010).

## 2.5.2 As células solares dos concentradores

As células solares utilizadas em CPV são fabricadas com várias tecnologias diferentes, dependendo do tipo de concentrador utilizado. Em geral, para baixos e médios

níveis de concentração, até cerca de 300 vezes a intensidade da luz solar, são usadas células de silício; para concentrações mais altas, geralmente são empregadas células baseadas em semicondutores do tipo III-V. Essas células mais avançadas permitem alcançar eficiências em torno de 40% e são especialmente adequadas para aplicações de alta concentração (ANTONINI, 2010).

Devido ao alto custo dos materiais base e dos processos de fabricação, essas células de ultra-alta eficiência são comumente utilizadas em satélites espaciais e em sistemas de concentração solar em terra. Células solares de filmes finos, especialmente as feitas de CISIGS (ANTONINI, 2010).

A intensidade da luz, ao aumentar a concentração dos portadores minoritários, tem um impacto significativo no aprimoramento da eficiência das células solares, seguindo uma relação logarítmica. A corrente elétrica gerada é diretamente proporcional ao nível de radiação incidente; e como a potência gerada é o resultado do produto entre essa corrente e a tensão aplicada, e a tensão aumenta de forma logarítmica com o nível de concentração (conforme demonstrado na equação abaixo), a potência total cresce de forma superlinear. Na equação (9),  $C$  representa o nível de concentração, enquanto  $J_{ph1sun}$  é a corrente fotogerada sob uma unidade padrão de nível de irradiação solar (ANTONINI, 2010).

$$V_{oc} = \frac{A \cdot k \cdot T}{q} \ln \left( \frac{C J_{ph1sun}}{J_0} + 1 \right) \quad (2.2)$$

Aqui,  $J_0$  representa a corrente de escuro ou corrente de saturação do diodo, e  $A$  é o fator de idealidade do dispositivo. Uma vantagem adicional das células fotovoltaicas concentradoras (CPV) é a redução do desempenho associado ao aumento da temperatura, que é menor sob a luz concentrada em comparação com o mesmo efeito observado em condições de irradiação solar padrão (um Sol), para o mesmo tipo de célula. Essa relação é geral para todos os semicondutores; adicionalmente, as células do tipo III-V, frequentemente utilizadas em CPV, apresentam um coeficiente de temperatura menor do que as células solares de silício cristalino convencionais (ANTONINI, 2010).

Uma das principais distinções na produção de tecnologia entre células solares concentradoras e células solares padrão reside na exigência de que as células CPV, que geram uma densidade de corrente elevada, possuam uma resistência em série reduzida (ANTONINI, 2010).

### 3 Metodologia para análise técnico-econômica da eficiência no uso de concentradores fotovoltaicos

De maneira geral, esta monografia tem como objetivo realizar um estudo comparativo entre um caso real de geração, utilizando o sistema fotovoltaico vigente atualmente no Brasil, comparando o com os modelos CPV, os quais possuem lentes concentradoras de luz solar e prometem uma eficiência maior de conversão de energia, devido aos tipos específicos de células presentes e já apresentados anteriormente.

Vale salientar que ambos os sistemas possuem vantagens e desvantagens, com isso em vista, serão inferidas as conclusões com base nos estudos e experimentos realizados ao decorrer deste trabalho, atendendo as necessidades preestabelecidas e considerando o caso de consumidores livres que geram energia através de usinas fotovoltaicas, sendo levado em conta as atuais dificuldades enfrentadas pelos mesmos e como tais desafios seriam caso a utilização de painéis CPV fosse implementada, da mesma forma como seus benefícios em ambos os casos.

Para isso, serão realizadas comparações quanto a geração de energia, viabilidade técnica e econômica a partir da produção e do espaço ocupado pelas usinas baseadas em cada modelo em questão. Em primeiro lugar, o preço do sistema fotovoltaico por si só é um obstáculo que se dá de maneira muito incômoda aos clientes que pensam em adquirir tal tecnologia e isto é intensificado quando se trata de usinas de médio e grande porte. Um dos principais fatores para que se tenha um preço alto deste produto, se deve ao material de qual suas células fotovoltaicas fazem uso, o silício (VILLALVA, 2016).

Em segundo lugar, para que seja construída uma usina fotovoltaica, é necessário que o consumidor compre, abdique ou arrende uma grande área de um terreno para que seja realizada a instalação dos módulos e, como é o caso de consumidores livres, esperam-se sistemas que ocupam grandes áreas, portanto é justo fazer deste fato um obstáculo. Um exemplo claro de como isso pode vir a ser um problema se dá como quando em 2017 uma estatal italiana Enel Green Power decide instalar a que até então seria a maior usina solar da América Latina, presente na cidade de São Gonçalo (PI), a qual ocupa uma área de 690 hectares de terra. A figura abaixo demonstra uma estimativa da área ocupada por tal instalação:

Ao considerar os desafios enfrentados pelos consumidores livres na instalação de usinas fotovoltaicas, destaca-se o primeiro problema relacionado ao elevado investimento

Figura 3 – Maior usina de energia solar em atividade na América Latina.



Fonte: Autoria própria, adaptado de (ENEL, 2021)

inicial, principalmente devido ao custo das células fotovoltaicas. Essas células, compostas por duas camadas de materiais semicondutores, apresentam uma potência máxima inferior a 2W cada. A necessidade de realizar conexões em série ou paralelo é imperativa para alcançar uma geração suficiente, formando assim um módulo fotovoltaico tradicional. A instalação, composta por conjuntos desses módulos, é projetada para suprir a demanda do consumidor. Em casos de demanda elevada, a utilização de diversos módulos é essencial, contribuindo para o aumento do preço total da instalação.

Nesse contexto, o desafio financeiro relacionado ao preço das células fotovoltaicas ressoa diretamente com a discussão anterior sobre os obstáculos enfrentados pelos consumidores na adoção de sistemas fotovoltaicos. O investimento inicial expressivo, notadamente nas usinas de médio e grande porte, evidencia a necessidade de encontrar soluções que otimizem a eficiência da geração de energia e, ao mesmo tempo, minimizem os custos associados a esses materiais. Essa análise reforça a importância de explorar alternativas, como os modelos CPV mencionados anteriormente, que buscam maximizar a eficiência de conversão de energia, considerando as características específicas das células utilizadas e, assim, potencialmente reduzir os custos globais da instalação. (CORREIA, 2018).

Já com um sistema fotovoltaico de concentração, um sistema óptico é inserido com a finalidade de concentrar a radiação solar nas células, onde é feita a conversão de energia, ampliando a radiação que cada uma recebe, ocasionando em um menor número de células, reduzindo o número de painéis e gera a mesma potência. Este fato pode vir a combater a alta precificação e tornar mais viável que consumidores realizem grandes usinas de geração, tendo em vista que o valor do dispositivo óptico é mais barato quando comparado a adição de mais células (CORREIA, 2018).

Para uma prévia noção, ao realizar uma pesquisa simples na internet, os módulos convencionais de potência equivalente a 550W se encontram na faixa de R\$1278,00 (SOLARESOL, 2023). Enquanto que para o sistema CPV é necessário realizar o cálculo por componentes, porém para se usar de base pode-se estimar algo em torno de R\$2748,00

(HENRIQUE, 2020). Quanto a área ocupada, para o módulo de 550W, da marca SUNOVA a área que cada painel ocupa é igual a aproximadamente 2,58 m<sup>2</sup> (SOLARESOL, 2023), enquanto que, levando em consideração um arranjo CPV da marca Arzon Solar, a área que cada arranjo ocupa é igual a aproximadamente 76,42 m<sup>2</sup> (ARZON SOLAR, 2023).

O arranjo CPV da Arzon Solar pode ser conferido na figura abaixo:

Figura 4 – Comparativo de tamanho, módulo CPV e um carro.



Fonte: Autoria própria, adaptado de (ARZON SOLAR, 2023)

Para conduzir as comparações dos emissores e recursos naturais necessários para a fabricação dos dois modelos, os dados dos Datasheets serão empregados, e uma pesquisa adicional será realizada para validar essas informações.

Em alinhamento com as discussões anteriores, é evidente que a utilização de um menor número de painéis para atingir a mesma geração de energia resulta na redução da área necessária para a instalação. Numa era em que a preservação ambiental assume um papel cada vez mais proeminente, a necessidade de uma área menor não apenas previne potenciais desmatamentos, mas também permite ao consumidor gerar energia de maneira sustentável. Assim, o consumidor não apenas atende de maneira eficaz às demandas ambientais, mas também responde a uma crescente necessidade por práticas sustentáveis.

Essa reflexão sobre a otimização do uso da área para instalação de sistemas fotovoltaicos está diretamente relacionada aos desafios discutidos anteriormente, como o custo elevado e a extensa área requerida para a construção de usinas. Ao explorar alternativas que não apenas melhoram a eficiência de geração, como nos modelos CPV, mas também reduzem a pegada ambiental, torna-se possível abordar tanto os aspectos econômicos quanto

os ambientais associados à adoção dessas tecnologias. Assim, a busca por soluções que considerem tanto a eficiência energética quanto os impactos ambientais torna-se crucial para enfrentar os desafios presentes na implementação de usinas fotovoltaicas.

Em continuidade ao que foi previamente abordado, é essencial destacar a capacidade de conversão da irradiação solar em energia elétrica nos dois modelos que estão sendo comparados. A eficiência de conversão dos módulos convencionais varia de 4% a 26%, dependendo do tipo de material utilizado na sua construção. Em condições ideais, apenas 26% da radiação solar é convertida em energia elétrica, uma vez que aproximadamente 60% é convertido em calor, elevando as temperaturas nos painéis e prejudicando o desempenho (KOLAMROUDI et al., 2023).

No contexto dos módulos CPV, esses equipamentos utilizam lentes para concentrar a radiação solar, enfrentando o problema do sobreaquecimento comum nos módulos fotovoltaicos convencionais. A eficiência de conversão dos módulos CPV é projetada para ser superior, buscando maximizar a quantidade de radiação solar convertida em energia elétrica. Essa abordagem visa superar as limitações observadas nos módulos convencionais, onde o sobreaquecimento impacta negativamente o funcionamento e o rendimento. Assim, a utilização de lentes concentradoras nos módulos CPV representa uma estratégia inovadora para otimizar a eficiência de conversão e mitigar os desafios associados ao sobreaquecimento (KOLAMROUDI et al., 2023).

### 3.1 Metodologia

Para que seja feito o estudo comparativo de ambos os casos de geração solar fotovoltaica, a princípio será feita uma comparação com embasamento teórico, utilizando o software EXCEL, onde serão introduzidas tabelas com dados de geração para o caso que utiliza painéis convencionais e então para o que utiliza concentradores, tendo como base suas especificações via datasheet de produtos reais.

Além destes dados de geração, serão utilizados também planilhas que demonstram o retorno financeiro de ambos os sistemas, com os valores médios dos equipamentos encontrados em mercado. Também será levado em consideração o impacto ambiental proporcionado pela produção de tais sistemas, contando também com a área que será abdicada para a instalação.

Será feito também, uma comparação entre as áreas reservadas para duas usinas fotovoltaicas utilizando o software Autocad, uma para cada modelo de painel solar. As dimensões serão dadas em metros de forma a ter uma comparação mais próxima da realidade, podendo então tirar conclusões embasadas em resultados satisfatórios e que condizem com a prática.

Para este levantamento de dados, foram selecionados tópicos que são de interessante discussão para que se tenha uma melhor ideia quanto à comparação de ambos os módulos, são eles:

- Eficiência de conversão: tal eficiência é a capacidade de converter a luz solar em eletricidade. Ela é geralmente expressa em percentual. Quanto maior a eficiência, mais energia o módulo é capaz de produzir em relação à quantidade de luz solar recebida.
- Tolerância de potência: indica o quão próximo o desempenho real do módulo estará em relação à sua potência nominal. Por exemplo, um módulo com uma tolerância de  $\pm 3\%$  significa que ele pode ter uma variação de até 3% em relação à sua potência nominal.
- Energia gerada: para calcular o total de energia gerada por dois módulos solares, é necessário conhecer a potência nominal de cada módulo e estimar a quantidade de tempo que eles estarão expostos à luz solar.
- Custo: levando em consideração o custo por watt, que é uma medida de custo em relação à potência nominal do módulo.
- Garantias: isso inclui a garantia de desempenho, que garante uma produção mínima de energia ao longo de um período específico, e a garantia de produto, que cobre defeitos de fabricação.





## 4 Estudo de caso

Para que seja feita uma comparação de maneira eficaz, é necessário estabelecer critérios que devem ser mantidos e respeitados em ambos os casos, sendo eles:

- Terreno: Será considerado um terreno ideal, o qual possui condições ideais de terraplanagem e sem risco de alagamentos.
- Disposição dos trackers: Os trackers devem ser posicionados de maneira à respeitar uma distância mínima da cerca de 10 metros, uma distância mínima do acesso de 8 metros e, caso necessário, respeitar uma distância vertical entre dois trackers de 2 metros. Outra medida que deve ser respeitada é a do pitch de 7 metros, ou seja, uma fileira de módulo deve estar posicionada à 7 metros de distância da próxima fileira.
- Inversores: Serão utilizados quatro inversores com potência de 300kW cada, totalizando 1,2MW de potência total.
- Trackers: Os trackers desenhados no Autocad seguem as medidas reais dos equipamentos, sendo fornecidas pelos próprios fabricantes, tendo assim uma comparação mais real possível.

Vale ressaltar que, para essa comparação, o uso de um software de simulação de geração, como o PVSyst, é de fato um diferencial desejável para a validação dos dados e apresentação das conclusões.

Porém, como tal software se trata de uma ferramenta de alto valor monetário, ele não foi utilizado para este estudo, entretanto, para que a falta do mesmo não seja sentida de maneira abrupta, trassou-se a estratégia de limitar a geração em corrente alternada de ambos os casos, para que assim possa ser considerado opcional o uso do software de simulação descrito anteriormente, uma vez que ambas as usinas em questão terão a mesma capacidade de potência em CA.

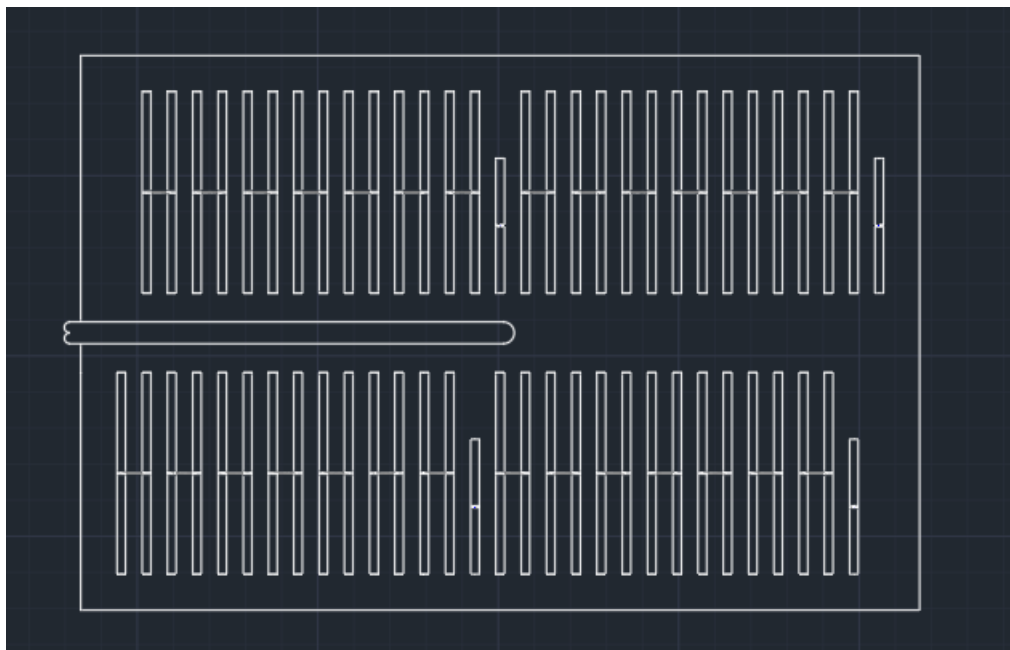
Com a potência limitada pelos inversores, a estratégia adotada consiste em comparar os impactos ambientais, área ocupada e o valor dos equipamentos empregados para cada caso, sendo que ambos devem produzir o mesmo montante de energia gerada

## 4.1 Área ocupada

Nesta seção será abordado o estudo comparativo feito através do software Autocad para dimensionar a área que cada usina ocupa, tendo os critérios estabelecidos na seção anterior respeitados. Para fins comparativos, serão construídos dois Arranjos gerais, um composto por trackers de módulos CPV e outro por módulos convencionais, ambos os arranjos serão feitos utilizando dados reais fornecidos pelos fabricantes de maneira a reduzir os erros de projeto.

Na Figura abaixo, pode-se observar a disposição dos módulos convencionais e trackers dentro da área estipulada como máxima:

Figura 5 – Arranjo Geral Módulo Convencional.



Fonte: Autoria própria

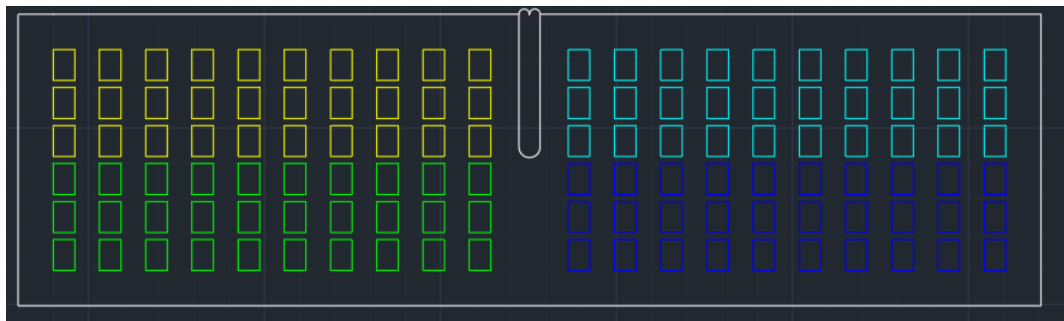
A partir da imagem acima, é possível afirmar que, uma usina com potência instalada igual à 1,2MW, utilizando 616 módulos de 660W da marca Canadian Solar por inversor, totalizando 2464 módulos convencionais e tendo como potência de pico 1,626MWp total, respeitando os critérios estabelecidos neste trabalho, ocupa uma área total de cerca de 35.740m<sup>2</sup>.

Por fins explicativos, cada tracker grande acima contém duas fileiras com 42 módulos em cada uma, já o tracker pequeno possui uma única fileira de 28 módulos. Para cada inversor é conectado um arranjo com 7 trackers grandes e um pequeno, totalizando os já citados 616 módulos por inversor.

Já uma usina baseada em módulos concentradores, devem ser utilizados 1440 módulos por inversor, totalizando 5760 módulos CPV na usina. A distribuição dos módulos nos trackers se dá da seguinte forma: Cada tracker suporta 48 módulos CPV e possui uma potência de pico igual à 13,44KWp, por tanto, para cada inversor serão separados 30 trackers, com 1440 painéis, totalizando uma potência de pico de 1,608MWp na usina como um todo.

Na figura abaixo pode-se visualizar a configuração da usina atendendo aos critérios já estabelecidos neste estudo comparativo:

Figura 6 – Arranjo geral módulo CPV.



Fonte: Autoria própria

A partir do modelo de CAD acima, pode-se inferir alguns dados referentes à área ocupada, mas também vale ressaltar que cada cor representa um inversor de 300KW. A área ocupada por este modelo é equivalente à, aproximadamente, 24.010m<sup>2</sup>.

## 4.2 Manutenção e garantia

De acordo com os fabricantes de primeira linha de módulos solares convencionais, por quase sua totalidade, a garantia para tais equipamentos é igual à 25 anos a partir do momento de sua compra, enquanto qualquer manutenção necessária devido à acidentes em obra, são ofertadas de maneira abundante no Brasil, devido ao grande mercado destas peças.

Já em relação aos concentradores, foram encontrados dados respectivos à garantia de 30 anos dadas pelo fabricante, entretanto, suas manutenções serão de difícil acesso em território nacional, justamente por não ser um produto popular no Brasil. Porém, de acordo com (CASSARES, 2016) , em seu experimento empirico, que utilizou 2 blocos de trackers, um contendo módulos convencionais e outro com os concentradores BSQ-D280/53, foi constatado que após 6 meses de geração, os módulos CPV tiveram uma baixa significativa em sua produção, enquanto os módulos convencionais, apresentaram

apenas um problema, sendo constatado como uma situação de fácil resolução que não impactou diretamente na geração e foi possível resolver.

O motivo de tais baixas não foi constatado em seu trabalho, justamente por faltar informações disponíveis no mercado, assim como especialistas em tais equipamentos. Entretanto, entre as possíveis causas constatadas por (CASSARES, 2016), estão: desalinhamento do seguidor solar, desalinhamento da estrutura de suporte dos módulos e degradação das lentes e células solares.

Por isso, pode-se dizer que, em relação à garantia, durabilidade e manutenção, os módulos convencionais têm ampla vantagem quando essa comparação é feita em território nacional. A falta de suporte e de mão de obra especializada nos equipamentos concentradores pode vir a ser um grande problema, uma vez que a degradação já fora constatada em um curto período de tempo.

### 4.3 Impactos ambientais

Neste contexto, é imperativo reaproveitar os dados anteriormente adquiridos na seção sobre a Área, alinhando-os com o Objetivo de Desenvolvimento Sustentável (ODS) número 7 da ONU, que preconiza a “Energia Limpa e Acessível”. A relevância desse alinhamento reside na compreensão de que quanto menor a área necessária por quilowatt gerado, mais sustentável torna-se a usina, ocupando o mínimo de espaço possível para gerar uma quantidade igual ou superior de energia.

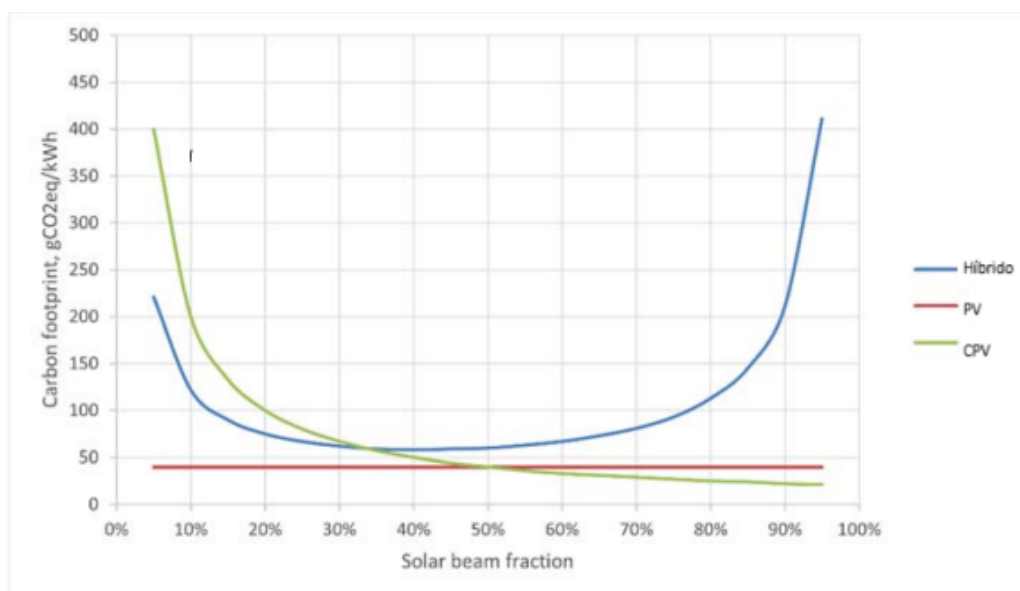
Nesse sentido, os módulos CPVs destacam-se favoravelmente, como evidenciado na Tabela 1. Esta tabela revela que a usina equipada com concentradores apresenta uma significativa redução de área para a mesma capacidade de potência. Dessa forma, considerando a eventual necessidade de supressão vegetal para essas construções, os módulos CPV mostram-se vantajosos, consolidando sua eficácia no uso otimizado do espaço e contribuindo para a sustentabilidade do empreendimento, alinhando-se diretamente com as metas do ODS 7 da ONU.

Agora, outro fator crucial a ser considerado é a pegada de carbono apresentada pelos dois modelos. Conforme indicado pelo estudo (LEUTZ, 2021), que realizou uma análise comparativa entre a pegada de carbono de um sistema com módulos convencionais, outro com módulos CPV e um terceiro com um sistema híbrido, as emissões de carbono para geradores individuais de energia fotovoltaica (PV) e concentradores fotovoltaicos (CPV) foram assumidas como sendo de 40 g CO<sub>2</sub>eq/kWh e 20 g CO<sub>2</sub>eq/kWh, respectivamente. Vale ressaltar que o sistema de PV de placa plana não reage às variações na fração de radiação solar.

Devido à sua notável eficiência, o CPV exhibe uma pegada de carbono reduzida, uma característica desafiadora de ser superada, especialmente em condições de alta insolação. A eficácia da pegada de carbono híbrida é maximizada quanto mais energia é gerada pelo sistema que possui a pegada de carbono mais alta entre os dois, consolidando ainda mais os benefícios ambientais dessa abordagem (LEUTZ, 2021).

Na Figura 7, é possível conferir um gráfico comparando as emissões de gases de efeito estufa entre os três sistemas já citados, considerando um local com irradiação igual à 1700 kWh/m<sup>2</sup>.

Figura 7 – Emissões de gases do efeito estufa.



Fonte: Adaptado de (LEUTZ, 2021)

#### 4.3.1 Emissões de gases de efeito estufa de óticas primárias de lentes de Fresnel

Óticas primárias provenientes de lentes Fresnel são frequentemente empregadas em sistemas de fotovoltaica concentrada (CPV). Portanto, neste segmento, discutem-se parques de lentes Fresnel fabricadas a partir de materiais como Polimetilmetacrilato (PMMA) e silicon-on-glass (SOG). Vale ressaltar que dados sobre o material PMMA são consideravelmente mais acessíveis em fontes industriais em comparação com informações sobre lentes feitas de SOG. As óticas primárias desempenham um papel contributivo de aproximadamente 5-15% na pegada de carbono de usinas de energia CPV. Para isso, os dados referentes às lentes produzidas em ambos os materiais estão presentes na Tabela 1.

Tabela 1 – Dados sobre as lentes que compõem os módulos CPV

	PMMA	SOG	Unidade
Insolação total	1,700	1,700	kWh/m <sup>2</sup> /a
Fração direta	50%	50%	-
Insolação direta	850	850	kWh/m <sup>2</sup> /a
Tempo de vida	25	25	anos
Eficiência da célula	45%	45%	-
Fator de desempenho	0.75	0.75	-
Energia gerada ao longo da vida	7,172	7,172	kWh/m <sup>2</sup>
Espessura do material	4.0	0.5	mm
Massa específica das óticas primárias	4.8	0.51	kg/m <sup>2</sup>
Energia produzida	1,507	14,063	kWh/kg
Potencial de aquecimento global (GWP)	5.0	7.5	kgCO <sub>2</sub> eq/kg
Painel de vidro (apenas para SOG)	-	1.1	gCO <sub>2</sub> eq/kWh
GWP por kWh gerado	3.3	1.6	gCO <sub>2</sub> eq/kWh

Fonte: Adaptado de (PAYET; GREFFE, 2019), (CEFIC, 2015) e (FEICA, 2019)

## 4.4 Geração

No contexto da comparação de geração entre os dois modelos, é crucial ressaltar que a potência instalada está limitada a 1,2 MW devido às restrições impostas pelos inversores. Essa limitação representa um elemento central na análise, uma vez que ambas as tecnologias serão avaliadas em condições equivalentes de capacidade de geração.

Ao levar em conta essa restrição de potência, a pesquisa concentra-se na otimização da eficiência energética e no desempenho de cada modelo dentro desse limite. A análise comparativa abarca não apenas a capacidade total de geração, mas também a eficiência de conversão de energia, considerando fatores como a curva de potência, eficiência dos módulos e possíveis perdas associadas ao sistema.

É imperativo considerar também os desafios e benefícios de manutenção para ambos os modelos, conforme indicado pelo estudo e implementação conduzidos por (CASSARES, 2016). Apesar do sistema CPV apresentar uma capacidade pico por módulo significativamente maior, sua eficiência efetiva ao longo do período de análise de seis meses foi inferior ao sistema convencional. A análise da produtividade final reforça essa constatação, destacando a necessidade de uma investigação mais aprofundada nas causas subjacentes das perdas no sistema CPV, visando otimizar sua eficiência e potencializar seu desempenho futuro.

## 4.5 *Datasheets*

Conforme discutido no Capítulo 3, é relevante ampliar a análise para incluir as informações disponíveis nos datasheets fornecidos pelos fabricantes de equipamentos. Nesse contexto, serão comparadas as taxas de eficiência na conversão de energia, aliadas à tolerância de potência. A partir da Tabela 2 abaixo, pode-se ter uma noção comparativa entre as duas opções:

Tabela 2 – Comparação de Módulos Solares

Módulo Solar	Potência [W]	Eficiência de Conversão [%]	Tolerância [%]
Canadian CS7N-660MB-AG	660	21,2	5
BSQ-D280/53	280	28	3

Com base nos dados apresentados, observa-se que os concentradores demonstram uma vantagem em termos de eficiência em seus módulos. Quanto às tolerâncias, ambas são consideradas satisfatórias, com valores percentuais próximos ao esperado. Essa análise contribui para uma compreensão mais abrangente das características dos módulos solares disponíveis no mercado.

É importante trazer também as características relativas às degradações previstas pelos fabricantes em ambos os datasheets dos modelos, uma vez que uma instalação com painéis fotovoltaicos tem, em média, previsão de funcionamento de no mínimo 25 anos. Dito isto, para o modelo da Canadian Solar, em seu datasheet consta a informação de que no primeiro ano, as placas não excederão 2% de degradação, enquanto que nos subsequentes anos essa taxa não ultrapassará 0,45% por ano. Já para o modelo CPV, não foram encontrados números relativos as taxas de degradação, apenas foi constatado pelo fabricante que os módulos são aprovados por duas normas IEC (International Electrotechnical Commission) que constata que a taxa de degradação está dentro dos padrões de normalidade.

## 4.6 Preço

Para assegurar uma comparação equitativa, é imprescindível contemplar os custos integrais de construção para cada usina, abarcando não apenas os valores dos módulos, mas também os custos de arrendamento de terra (considerando ambas as usinas na mesma região) e as despesas relacionadas a sistemas de monitoramento e segurança. Essa abordagem é motivada pelo fato de que os gastos com inversores e outros equipamentos essenciais

serão uniformes para ambos os casos. Vale ressaltar que o custo médio de arrendamento no estado de São Paulo é estimado em R\$ 2.105 por hectare, conforme (SPGLOBAL, 2023).

Em resumo, os equipamentos cujos custos estão diretamente ligados à área ocupada pela usina serão minuciosamente analisados nesta comparação. Um exemplo ilustrativo é o sistema de monitoramento, cujo preço é impactado diretamente pelo tamanho da área. Para esse estudo, foram selecionados modelos amplamente reconhecidos no mercado, notáveis por sua eficiência e acessibilidade. Nesse contexto, a escolha recaiu sobre o módulo da marca Canadian Solar, modelo CS7N-660MB-AG de 660W, instalado em trackers da marca STI Array.

No que tange aos concentradores, esses normalmente são disponibilizados como unidades completas, incluindo a estrutura do seguidor solar em conjunto com os módulos. Portanto, para esta comparação, optou-se pelo conjunto módulo e tracker BSQ-D280/53, fabricado pela BSQsolar, cujo valor é expresso exclusivamente em dólares. Essa abordagem visa proporcionar uma análise abrangente e precisa, considerando os diversos elementos que influenciam os custos de construção e, conseqüentemente, a viabilidade econômica das usinas.

Além dos elementos previamente mencionados, a equalização dos custos de construção entre as usinas de fotovoltaica concentrada (CPV) e os módulos fotovoltaicos convencionais implica em uma análise criteriosa de fatores como a infraestrutura necessária para cada tecnologia. A seleção do local de instalação desempenha um papel fundamental, sendo que a consideração do valor de arrendamento de terra desempenha um papel crucial nesse contexto. O preço médio de arrendamento no estado de São Paulo, utilizado como referência, destaca-se como um componente significativo nos custos iniciais e, portanto, é crucial para uma avaliação precisa.

Ao detalhar essas considerações, a comparação entre os sistemas CPV e os módulos convencionais transcende a eficiência energética, abrangendo um espectro mais amplo de fatores financeiros. Essa abordagem abrangente é essencial para fornecer uma visão completa da viabilidade econômica dessas tecnologias, orientando escolhas sustentáveis e fundamentadas economicamente no desenvolvimento de usinas fotovoltaicas.



## 5 Análise técnico-econômico-ambiental

Os resultados obtidos são apresentados de forma objetiva, contextualizando essas descobertas dentro do cenário mais amplo da geração de energia solar. São discutidas as nuances das limitações e vantagens de ambos os modelos, destacando a relevância de fatores como área ocupada, emissões de gases de efeito estufa e retorno financeiro associado a cada tecnologia.

Além disso, são consideradas as implicações práticas desses resultados no contexto brasileiro e sua relação com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da ONU.

Este capítulo busca apresentar de maneira imparcial as respostas para as questões de pesquisa, bem como estimular reflexões adicionais e pesquisas futuras no campo em constante evolução da energia solar fotovoltaica.

### 5.1 Aspecto área ocupada

Com base nos dados obtidos a partir da construção das usinas utilizando o software AutoCad, pode-se afirmar que, para usinas de mesma proporção de geração, a área ocupada pela usina composta por módulos CPV, tende a ser menor. Portanto, se ambas as usinas possuírem a mesma área, a usina CPV possuirá uma capacidade de geração maior entre as duas. Na tabela abaixo estão os dados obtidos com este método de comparação:

Tabela 3 – Comparação do quesito área.

	Usina convencional	Usina CPV
Área ocupada (m <sup>2</sup> )	35.740	24.010
Área ocupada (Hectares)	3,6	2,4
Quantidade de módulos	2464	5760
Potência de pico (MWp)	1,63	1,61

De forma conclusiva, os dados mostram que uma usina CPV é aproximadamente 33% menor quando comparada à uma tradicional, dessa forma se mostra mais vantajosa economicamente, uma vez que os gastos com arrendamentos de terrenos e com construção de sistemas de vigilância e monitoramento serão menores devido à esta redução de área total. Mais detalhes sobre a economia serão abordados na seção seguinte, com preços estipulados.

## 5.2 Aspecto ambiental

De forma conclusiva, os módulos CPV demonstraram uma vantagem significativa, como evidenciado na Tabela 1. A eficiência na utilização do espaço é notável, resultando em uma redução considerável da área necessária para uma capacidade de potência equivalente em comparação com os módulos convencionais. Esta característica é crucial, especialmente quando se considera a eventual necessidade de supressão vegetal para tais construções. Os módulos CPV se destacam não apenas pela eficiência operacional, mas também pela contribuição para a sustentabilidade do empreendimento.

Além disso, quando associamos essa eficiência na utilização do espaço às emissões de gases de efeito estufa (GEE), observamos que os sistemas CPV mantêm emissões extremamente baixas, registradas em 20 gCO<sub>2</sub>eq/kWh. Essa cifra representa aproximadamente a metade do potencial de aquecimento global (GWP) dos sistemas fotovoltaicos convencionais e apenas 1/50 dos recursos não renováveis de energia. Além disso, as lentes Fresnel, principais componentes dos CPV, sejam de Polimetilmetacrilato (PMMA) ou silicone-sobre-vidro (SOG), contribuem de forma relativamente modesta para as emissões totais, com valores estimados em 1,6 gCO<sub>2</sub>eq/kWh para SOG e o dobro desse valor para PMMA. A combinação de eficiência na área ocupada e baixas emissões de GEE destaca os módulos CPV como uma escolha vantajosa, alinhando-se não apenas com a eficiência operacional, mas também com os objetivos de sustentabilidade ambiental. Essa conclusão ressalta a importância dos módulos CPV como uma solução viável e sustentável para a geração de energia solar.

## 5.3 Aspecto econômico

Neste quesito, serão considerados os impactos econômicos, tanto para o arrendamento de terreno, quanto para os equipamentos e suportes em questão.

Conforme discutido, tomando como base um arrendamento médio de R\$2.105,00 e considerando que ambas estarão, hipoteticamente, no mesmo terreno e nas mesmas condições, pode-se construir a tabela comparativa vista abaixo:

Tabela 4 – Valores de arrendamento.

	Usina convencional	Usina CPV
Área ocupada (m <sup>2</sup> )	35.740	24.010
Área ocupada (Hectares)	3,6	2,4
Valor por Hectare (R\$)	2.105,00	2.105,00
Valor mensal (R\$)	7.532,85	5.052,00
Valor anual (R\$)	90.479,70	50.652,00

Dessa forma, extraindo os dados da tabela, temos que o resultado anual de arrendamento de uma usina convencional com uma potência de pico igual à, aproximadamente, 1,63MWp, instalada no estado de São Paulo e atendendo todos os requisitos já citados, tem um valor total de R\$ 90.479,70. Já a usina CPV, com potência instalada de, aproximadamente, 1,61MWp e operando nas mesmas condições da anterior, um custo anual de R\$50.652,00 com o terreno alugado.

Neste quesito a usina que utiliza módulos concentradores leva vantagem por ocupar uma área menor, resultando em menos supressão vegetal na área, custo menos com sistemas de vigilância e opera com uma eficiência de kW gerado por m<sup>2</sup> maior do que das usinas convencionais. De forma conclusiva, em relação à área de arrendamento que deve ser reservada para cada usina gerar quantidades próximas de energia, é indiscutivelmente mais vantajosa a ideia de se construir uma usina considerando módulos concentradores, uma vez que se apresentou uma economia de aproximadamente 40 mil reais por ano de arrendamento. Ainda assim, constatou-se que em relação ao custo dos equipamentos, os módulos convencionais demonstraram ter um valor de aproximadamente R\$ 800,00 por módulo, já os concentradores, não foi encontrado por meio de buscas na internet e no site da fabricante qualquer informação sobre o valor de seus equipamentos.

## 5.4 Considerações acerca da análise realizada

Com base na análise minuciosa dos dados coletados e no desenvolvimento progressivo do projeto até o momento, constata-se que os módulos CPV apresentam uma viabilidade financeira notável. A inclusão de lentes nesses equipamentos se destaca por seu custo mais baixo em comparação com a adição de mais módulos, reforçando a premissa dos concentradores, que evidenciam melhorias em diversas capacidades dos painéis convencionais, notadamente a eficiência na conversão de radiação solar em energia elétrica, proporcionando benefícios aos consumidores (KOLAMROUDI et al., 2023). De acordo com as conclusões deste projeto, esses módulos ocupam uma área reduzida e têm um impacto ambiental significativamente menor, com uma pegada de carbono inferior em comparação com os convencionais.

A análise detalhada das garantias e manutenções de ambos os modelos, conforme abordado por (CASSARES, 2016), revela que os módulos CPV apresentam desafios significativos nesse aspecto. Sua limitada disseminação no território nacional contribui para uma disponibilidade insuficiente de informações, tornando difícil identificar as causas dos problemas relatados.

Além disso, ao considerar o quesito de preço, é imperativo analisar os custos de arrendamento previamente definidos em seções anteriores e realizar uma comparação fun-

damental dos preços de cada equipamento. Nesse sentido, para a construção deste trabalho, foram realizadas algumas tentativas de contato com a fabricante dos módulos CPV e com os autores da dissertação de mestrado citada anteriormente ((CASSARES, 2016)). Ambas as tentativas não foram respondidas.

### 5.4.1 Validação da análise

A partir destes dados obtidos na seção anterior, para que se tenha uma afirmação dos resultados, será utilizado um computador com o software PVsyst instalado, onde será feita uma simulação com um caso de uma usina de geração fotovoltaica utilizando módulos convencionais e uma outra utilizando módulos com concentradores.

O PVsyst é uma aplicação altamente especializada amplamente utilizada para análise e dimensionamento de sistemas de energia solar fotovoltaica. Essa ferramenta desempenha um papel crucial na concepção, modelagem e avaliação de projetos solares, ajudando profissionais e empresas a entenderem o desempenho esperado de sistemas fotovoltaicos em diversas situações.

O software possibilita a modelagem detalhada de sistemas solares, incluindo a disposição de painéis solares, configuração de inversores e sistema de montagem. Ele também calcula a produção prevista de energia elétrica com base em dados meteorológicos e características locais, levando em conta fatores como inclinação e orientação dos painéis, sombreamento e perdas por temperatura.

Além disso, o PVsyst oferece ferramentas para análises financeiras, como o cálculo de ROI, payback e LCOE, ajudando os investidores a avaliar a viabilidade econômica dos projetos solares. O software também permite a modelagem precisa de sombreamento, considerando obstáculos como árvores e edifícios.

Com um amplo banco de dados de componentes solares, o PVsyst facilita a seleção dos equipamentos adequados para cada projeto. Ele gera relatórios detalhados que incluem informações sobre produção de energia, desempenho do sistema, valores financeiros e muito mais.

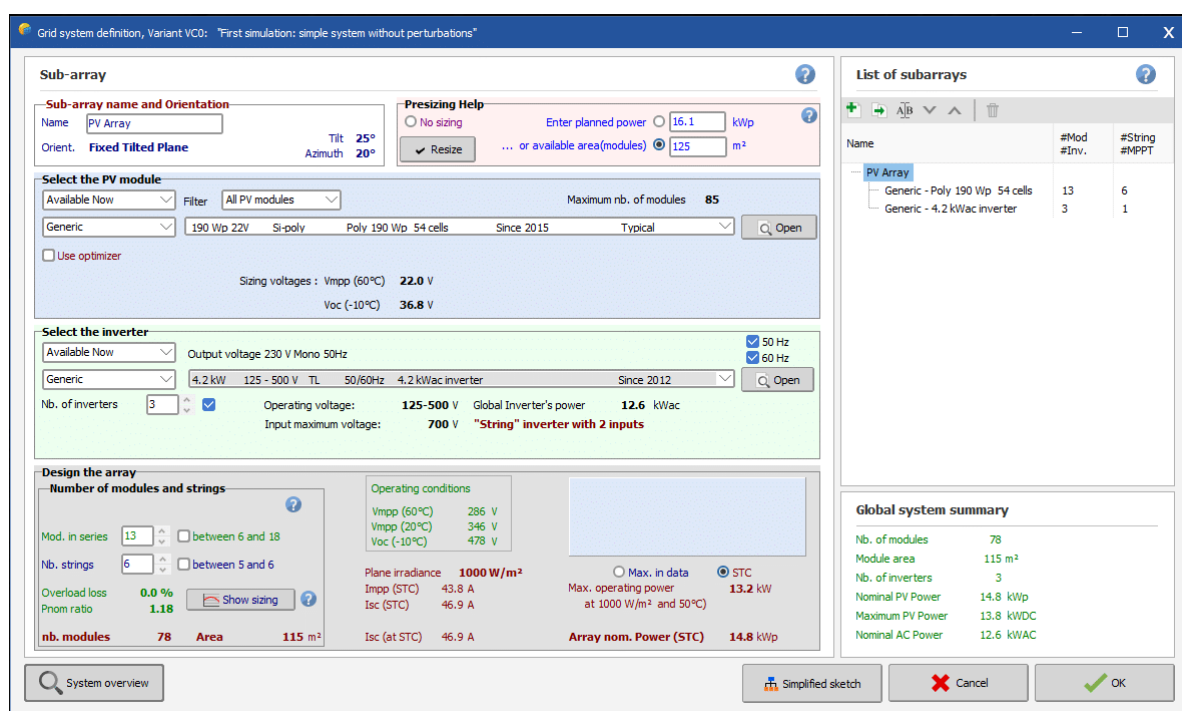
Além disso, tal software pode ser usado tanto para projetos de sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica quanto para sistemas autônomos (off-grid). Também é útil na avaliação do impacto ambiental de projetos solares, incluindo a redução de emissões de gases de efeito estufa e a contribuição para a sustentabilidade energética.

Em resumo, o PVsyst é uma ferramenta poderosa e essencial para profissionais da indústria solar, engenheiros, projetistas e investidores que desejam projetar, dimensionar e avaliar sistemas de energia solar fotovoltaica com precisão e eficiência, abordando aspectos técnicos, econômicos e ambientais.

Neste trabalho, esta ferramenta auxiliará com a simulação de geração de energia entre ambas as usinas, da mesma forma com o cálculo de retorno financeiro e compatibilidade de módulos com os inversores, já que no ramo de energia solar fotovoltaica, utiliza-se também este software para verificar a compatibilidade e a melhor combinação entre módulos e inversores.

Na figura abaixo pode-se observar como é a interface de tal software e os dados que ele fornece a partir do dimensionamento do sistema fotovoltaico:

Figura 8 – Interface do software PVsyst.



Fonte: Autoria própria, adaptado de (PVSYST, 2023)

Com o decorrer da simulação e a validação pelas tabelas anteriormente construídas, pode-se então comparar os dados obtidos a fim de obter os resultados esperados.



## 6 Conclusões

Conforme os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável estabelecidos pela ONU, o Objetivo 7 - Energia Limpa e Acessível - visa a busca por fontes de energia limpas e eficientes. A energia solar fotovoltaica emerge como uma via promissora para atender a esse objetivo. Portanto, torna-se imperativa a análise das novas tecnologias nesse campo, assim como a realização de comparações com as tecnologias já existentes.

Este estudo teve como propósito a comparação entre a tecnologia amplamente difundida dos painéis solares convencionais e os concentradores solares, que, por sua vez, não desfrutam da mesma popularidade. Nesse contexto, foram delineados critérios de comparação e os resultados foram apresentados quanto à área ocupada, impactos ambientais, geração de energia e custos associados.

Diante das consideráveis vantagens dos módulos CPV, como a eficiência na ocupação de espaço e a redução da pegada de carbono, torna-se evidente que essa tecnologia representa um passo importante em direção à sustentabilidade na geração de energia. A capacidade de concentrar a radiação solar, minimizando o espaço necessário para a mesma produção de energia, alinha-se não apenas com a eficiência econômica, mas também com os esforços globais para preservar o meio ambiente.

Em última análise, este estudo, fundamentado na comparação de dois conjuntos, visou explorar diversos quesitos relevantes. Apesar do promissor futuro dos módulos CPV, uma lacuna importante foi identificada, sem uma solução imediata prevista. Conclui-se que esses módulos, embora promissores, ainda enfrentam desafios significativos. Sua verdadeira inovação será percebida quando forem devidamente difundidos no mercado mundial, trazendo consigo propostas transformadoras.





## Referências

- ANTONINI, A. Photovoltaic concentrators – fundamentals, applications, market prospective. *Solar Collectors and Panels*, 2010.
- ARZON SOLAR. 2023. Disponível em: <<https://www.arzonsolar.com/wp-content/uploads/2015/02/uM6-Datasheet.pdf>>. Acesso em: 17 mar. 2023.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA. 2023. Disponível em: <<https://www.absolar.org.br/>>. Acesso em: 28 jun. 2023.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DOS COMERCIALIZADORES DE ENERGIA. 2021. Disponível em: <<https://abraceel.com.br/wp-content/uploads/post/2021/12/Boletim-Abraceel-Dezembro.pdf>>. Acesso em: 17 mar. 2023.
- AZIZ, J. A.; AUGÉARD, A.; CABRIEL, C.; BERRE, C.L.; PAN M.AND YANG, X. Concentrateurs solaires et production électrique). *Instrumentation Mesure Métrologie*, 2014.
- CÂMARA DE COMERCIALIZAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA (CCEE). 2012. Disponível em: <<http://www.ccee.org.br>>. Acesso em: 8 dez. 2012.
- CASSARES, M. A. R. *AVALIAÇÃO OPERACIONAL DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS COM SEGUIMENTO SOLAR: SISTEMAS COM E SEM CONCENTRAÇÃO*. 2016.
- CEFIC, M. s. G. Poly methyl methacrylate (pmma) eco-profiles and environmental product declarations of the european plastics manufacturers. *Energies*, 2015.
- CHEMISANA, D.; IBÁÑEZ, M.; BARRAU, J. Comparison of fresnel concentrators for building integrated photovoltaics. *Energy Conversion and Management*, 2009.
- CORREIA, J. R. L. S. Estudo e aplicação de um sistema de concentração fotovoltaica (cpv) com utilização de células multijunção. *INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA*, 2018.
- ENEL GREEN POWER. 2021. Disponível em: <<https://www.enelgreenpower.com/pt/nossos-projetos/highlights/parque-solar-sao-goncalo.>> Acesso em: 05 dez. 2022.
- ENSOLARE. 2020. Disponível em: <<https://www.ensolare.com.br/blog/feito-fotovoltaico-como-a-energia-e-gerada>>. Acesso em: 09 fev. 2024.
- FEICA, THE ASSOCIATION OF THE EUROPEAN ADHESIVE SEALANT INDUSTRY,. 2019. Disponível em: <<https://www.feica.eu/>>. Acesso em: 16 dez. 2023.
- GHODBANE, M.; BENMENINE, D.; KHECHEKHOUCHE, A.; BOUMEDDANE, B. Brief on solar concentrators: Differences and applications. *Instrumentation Mesure Métrologie*, 2020.

- HENRIQUE, L. F. Otimização do sistema cchp com cpv/t em comparação com o sistema pv convencional em um hotel com cenários de incertezas. *UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE ESCOLA DE ENGENHARIA*, 2020.
- J., M.-F. A coal-fired power plant with zero-atmospheric emissions. *Engineering For Gas Turbines And Power*, 2008.
- KOLAMROUDI, M. K.; ILKAN, M.; EGELIOGLU, F.; SAFAEI, B. A comparative study of lcpv by mirror reflection against other systems: Recent techniques, implications, and performances. *International Solar Energy Society*, 2023.
- LE, T. S.; NGUYEN, T. N.; BUI, D.-K.; NGO, T. D. Optimal sizing of renewable energy storage: A techno-economic analysis of hydrogen, battery and hybrid systems considering degradation and seasonal storage. *Applied Energy*, 2023.
- LEUTZ, R. Carbon footprint estimate from life cycle analysis for hybrid concentrating photovoltaic power generation. *17TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON CONCENTRATOR PHOTOVOLTAIC SYSTEMS*, 2021.
- NUNES-VILLELA, J.; RAPOZO, F. de O.; DOMINGOS, M. de L. C.; QUELHAS, O. L. G. Energia em tempo de descarbonização: Uma revisão com foco em consumidores fotovoltaicos. *RBCIAMB*, 2017.
- PAYET, J.; GREFFE, T. Life cycle assessment of new high concentration photovoltaic (hcpv) modules and multi-junction cells. *Energies*, 2019.
- PVSYST. 2023. Disponível em: <<https://www.pvsyst.com/features/>>. Acesso em: 08 set. 2023.
- SANTOS, H. F. L.; COSTA, P. V. M. da. Concentradores fotovoltaicos: Uma tecnologia em declínio? *VII Congresso Brasileiro de Energia Solar*, 2018.
- SILVA, P. C. M. D. E. Regulação da abertura do mercado livre de energia elétrica:: Análise da implantação da competição varejista no brasil. 2022.
- SOLAR E SOL. 2023. Disponível em: <<https://www.solaresol.com.br/modulos-placas>>. Acesso em: 17 mar. 2023.
- S&P GLOBAL MARKET INTELLIGENT. 2023. Disponível em: <<https://www.spglobal.com/marketintelligence/pt/index>>. Acesso em: 25 out. 2023.
- VILLALVA, M. G. *ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA*: Conceitos e aplicações sistemas isolados e conectados à rede. 2nd. ed. [S.l.]: ÉRICA SARAIVA, 2016. 224 p.
- ZEPTER, J. M.; LÜTH, A.; GRANADOA, P. C. del; EGGINGA, R. Prosumer integration in wholesale electricity markets:: Synergies of peer-to-peer trade and residential storage. *elsevier*, 2019.