

GRAZIELLE CRISTINA DE ARAUJO

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO E DA VIABILIDADE ECONÔMICA DE
UMA USINA FOTOVOLTAICA COM RASTREADOR SOLAR EM
CONDIÇÕES DE CAMPO

CASCVEL
PARANÁ – BRASIL
MARÇO - 2023

GRAZIELLE CRISTINA DE ARAUJO

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO E DA VIABILIDADE ECONÔMICA
DE UMA USINA FOTOVOLTAICA COM RASTREADOR SOLAR EM
CONDIÇÕES DE CAMPO**

Dissertação apresentada à Universidade Estadual do Oeste do Paraná, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia na Agricultura, para obtenção do título de Mestre.

Orientador: Dr. Jair Antonio Cruz Siqueira

Coorientador: Dr. Carlos Eduardo Camargo Nogueira

CASCADEL
PARANÁ – BRASIL
MARÇO - 2023

Ficha de identificação da obra elaborada através do Formulário de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da Unioeste.

Araujo, Grazielle Cristina de
Avaliação do Desempenho e da Viabilidade Econômica de uma Usina Fotovoltaica com Rastreador Solar em Condições de Campo / Grazielle Cristina de Araujo; orientador Jair Antonio Cruz Siqueira; coorientador Carlos Eduardo Camargo Nogueira. -- Cascavel, 2023.
48 p.

Dissertação (Mestrado Acadêmico Campus de Cascavel) -- Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia na Agricultura, 2023.

1. . I. Cruz Siqueira, Jair Antonio , orient. II. Camargo Nogueira, Carlos Eduardo, coorient. III. Título.

“Dedico aos meus pais que sempre acreditaram em mim e me deram todo o suporte que precisei.”

GRAZIELLE CRISTINA DE ARAUJO

Avaliação do desempenho e da viabilidade econômica de uma usina fotovoltaica com rastreador solar em condições de campo

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia na Agricultura em cumprimento parcial aos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Energia na Agricultura, área de concentração Agroenergia, linha de pesquisa Fontes renováveis e racionalização de energia na agroindústria e agricultura, APROVADA pela seguinte banca examinadora:



Orientador - Jair Antonio Cruz Siqueira
Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Campus de Cascavel (UNIOESTE)



Reginaldo Ferreira Santos
Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Campus de Cascavel (UNIOESTE)



Vander Fábio Silveira
Centro Estadual de Educação Profissional Pedro Boaretto Neto (CEEP)

Cascavel, 15 de março de 2023

AGRADECIMENTOS

Agradeço minha família, tão amada, que sempre me apoiou em tudo.

Em especial, agradeço ao meu orientador, professor Jair Antonio Cruz Siqueira, que em todos os momentos que precisei, me ajudou, prontamente. Embora as vezes me pudesse bater o desânimo ou o desespero, ele esteve sempre me incentivando e me acolhendo, sanando todas as minhas dúvidas. Além de tudo isso, obrigada por todos seus ensinamentos e amizade.

Agradeço ao professor Carlos Eduardo Nogueira, meu coorientador, por seus ensinamentos e toda a ajuda que me foi dada.

Agradeço também, ao Cristiano Fernando Lewandoski, que auxiliou na realização do trabalho proposto, passando todos os dados que eu precisei, inclusive, todo o seu conhecimento, estando sempre à disposição.

Agradeço a todo corpo docente da Universidade Estadual do Oeste do Paraná, por toda a contribuição para o meu conhecimento.

Por fim, agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, pelo suporte a pesquisa no Brasil.

LISTA DE SÍMBOLOS

ABRACEEL	Associação Brasileira dos Comercializadores de Energia
ACL	Ambiente de Contratação Regulada
ACR	Ambiente de Contratação Livre
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CLP	Controlador Lógico Programável
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
EVA	Etileno Acetato de Vinila
IEA	<i>International Energy Agency</i>
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
LCOE	Custo Nivelado de Energia
MME	Ministério de Minas e Energias
SELIC	Sistema Especial de Liquidação e de Custódia
SFVCR	Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede
TIR	Taxa interna de Retorno
TMA	Taxa Mínima de Atratividade
VPL	Valor Presente Líquido

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Participação das matrizes energéticas no Brasil e no mundo.....	4
Figura 2: Participação das fontes renováveis na geração distribuída.	5
Figura 3 - Partes constituintes de um módulo fotovoltaico.	9
Figura 4 - Tipos de células fotovoltaicas.....	9
Figura 5 - Dispositivos básicos de um SFVCR.....	11
Figura 6 - Curva I-V de células fotovoltaicas de silício conectadas em paralelo.	13
Figura 7 - Curva I-V de células fotovoltaicas de silício conectadas em série.....	14
Figura 8 - Influência da irradiância na Curva I-V de células fotovoltaicas.....	15
Figura 9 - Influência da temperatura na Curva I-V de células fotovoltaicas.	15
Figura 10 - Sistema de rastreamento de eixo único: a) horizontal; b) vertical.	17
Figura 11 - Sistema de rastreamento de eixo duplo.	18
Figura 12 – Localização da cidade de Cascavel, Paraná.....	25
Figura 13 – Localização e orientação da Usina com rastreadores.	26
Figura 14 - Localização e orientação da Usina com painéis fixos.....	26
Figura 15 – Ilustração e localização da usina com rastreador.....	27
Figura 16 – Usina com painéis fixos.....	27
Figura 17 - Módulos fotovoltaico Risen Solar Technology – RSM150-8-500M.....	28
Figura 18 - Sistema rastreador: a) Motor b) Módulo para alimentação do motor	29
Figura 19: Inversor Sofar de 100 kW.....	30
Figura 20 - Disjuntor ABB XT4N250.....	31
Figura 21 - CLP Delta	32
Figura 22 - Medidor Bidirecional Landis+Gyr E750.	33
Figura 23 – Geração de Energia Elétrica no ano de 2022.....	37
Figura 24 – Gráfico do Fluxo de Caixa da Usina com Rastreadores.....	40
Figura 25 – Gráfico do Fluxo de Caixa da Usina com Painéis Fixos.....	40

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Especificações técnicas do módulo RSM150-8-500M.....	28
Tabela 2 - Especificações técnicas do Inversor Sofar 100kW.....	30
Tabela 3 - Especificações técnicas do disjuntor XT4N250.....	31
Tabela 4 - Especificações técnicas do Medidor Bidirecional.....	33
Tabela 5 – Custo de implantação das Usinas	34
Tabela 6 – Meses com maior geração de Energia Elétrica	38
Tabela 7 – Meses com a menor geração de Energia Elétrica	38
Tabela 8 – Capacidade de geração das Usinas.....	39
Tabela 9 – Custo evitado com a geração de energia das usinas.....	39
Tabela 10 – Valor presente líquido das usinas.....	41
Tabela 11 – Taxa interna de retorno das usinas	41
Tabela 12 – Custo Nivelado de Energia das Usinas em kWh	42

ARAUJO, Grazielle Cristina de. Universidade Estadual do Oeste do Paraná, março, 2023. **Avaliação do desempenho e da viabilidade econômica de uma usina fotovoltaica com rastreador solar em condições de campo**. Professor Orientador: Dr. Jair Antonio Cruz Siqueira.

RESUMO

O homem está cada vez mais dependente do uso da energia elétrica para o seu desenvolvimento. Em função disso, as preocupações com o esgotamento das fontes não renováveis de energia, além da emissão de gases poluidores e provocadores do efeito estufa, vêm aumentando substancialmente. Uma alternativa que tem sido muito utilizada, dentro das fontes de energia renovável é a energia solar fotovoltaica. O Brasil se destaca devido aos seus bons índices de radiação solar por estar numa localização favorável nesse quesito. O objetivo do estudo proposto é avaliar, comparar o desempenho e a viabilidade econômica de duas usinas fotovoltaicas. Para a análise do desempenho, serão avaliados os dados de geração de energia durante um ano, das duas usinas. Ambas as usinas possuem capacidade instalada de 300kVA, com 810 módulos cada uma. A diferença entre elas é que uma possui rastreador solar e a outra é fixa. Para a análise de viabilidade econômica serão calculados os custos evitados, bem como determinados os índices de VPL, TIR e LCOE, e ainda, o tempo de retorno para o capital investido nos sistemas. Com os resultados obtidos, confirmou-se que a usina com rastreadores possui uma maior geração de energia, devido ao fato que o rastreador segue o sol e proporciona uma radiação incidente muito maior, o que já era esperado. O VPL da usina móvel foi de R\$802.647,46 e o da usina fixa foi de R\$1.303.752,23. Para a TIR, obteve-se os valores de 12,17% e 19,65%, para a usina móvel e a usina fixa, respectivamente. Já o tempo de retorno dos investimentos, foi de 13 anos para a usina móvel e 7 anos para a usina fixa. Com esses valores, é possível concluir que ambos os sistemas são economicamente viáveis, sendo que o sistema com rastreadores demora um pouco mais para retornar o valor que foi investido. Isso acontece porque um sistema móvel necessita de um investimento muito maior e, além disso, possui mais gastos com manutenção.

“Este presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001”

PALAVRAS-CHAVE: sistema solar fotovoltaico; custo nivelado de energia; valor presente líquido.

ARAUJO, Grazielle Cristina de. State University of Western Paraná, 2023, march. **Evaluation of the performance and economic viability of a photovoltaic plant with solar tracker under field conditions.** Teacher advisor: Dr. Jair Antonio Cruz Siqueira.

ABSTRACT

Man is increasingly dependent on the use of electricity for his development. As a result, concerns about the depletion of non-renewable energy sources, in addition to the emission of polluting and greenhouse gases, have been increasing substantially. An alternative that has been widely used within renewable energy sources is photovoltaic solar energy. Brazil stands out due to its good levels of solar radiation for being in a favorable location in this regard. The objective of the present study is to evaluate and compare the performance and economic viability of two photovoltaic plants. For the performance analysis, the energy generation data for one year from two plants will be evaluated. Both plants have an installed capacity of 300kVA, with 810 modules each. The difference between them is that one has a solar tracker and the other is fixed. For the feasibility analysis, the avoided costs will be calculated, as well as the net present value (NPV), internal rate of return (IRR) and return on investment (discounted payback) rates for the capital invested in the systems. With the results obtained, it was confirmed that the plant with trackers has a higher energy generation, due to the fact the tracker follows the sun and provides a much higher incident radiation, which was already expected. The NPV of the mobile plant was R\$802.647,46 and that of the fixed plant was R\$1.303.752,23. For the IRR, values of 12,17% and 19,65% were obtained for the mobile plant and the fixed plant, respectively. The return in investment time was 13 years for the mobile plant and 7 years for the fixed plant. With these values, it's possible to conclude that both systems are economically viable, and the system with trackers takes a little longer to return the value that was invested. This happens because a mobile system requires a much greater investment and, in addition, has more maintenance costs.

“This study was financed in part by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Finance Code 001”

KEYWORDS: photovoltaic solar system; levelized cost of energy; net present value.

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO.....	Erro! Indicador não definido.
1.1 Objetivos	3
1.1.1 Objetivo geral.....	3
1.1.2 Objetivos específicos.....	3
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	Erro! Indicador não definido.
2.1 Geração de energia através de fontes renováveis	4
2.2 Energia Solar	6
2.3 Energia Solar Fotovoltaica	7
2.4 Características técnicas e construtivas de um módulo fotovoltaico	8
2.5 Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede.....	10
2.5.1 Avaliação de desempenho de SFVCR	12
2.5.2 SFVCR fixos	16
2.5.3 SFVCR com rastreador solar.....	16
2.6 Avaliação econômica	18
2.7 Avaliação econômica de sistemas conectados à rede	19
2.8 Análise energética.....	20
2.8.1 Conceitos.....	20
2.8.2 Contratação de energia – Tarifas	21
2.8.3 Modalidades tarifárias.....	22
2.9 Modelos de contratação de energia no Brasil	23
3. MATERIAIS E MÉTODOS	Erro! Indicador não definido.
3.1 Descrição dos locais do experimento.....	25
3.2 Características técnicas dos módulos e dispositivos utilizados.....	27
3.3 Aquisição de dados.....	32
3.4 Métodos	33
3.4.1 Determinação da energia elétrica gerada nas usinas.....	33
3.4.2 Custo da implantação das usinas.....	34
3.4.3 Custo evitado com a geração fotovoltaica nas usinas	34
3.4.4 Viabilidade econômica de cada sistema.....	34
3.4.4 Comparação da geração de energia entre os dois sistemas.....	36
3.4.5 Comparação da viabilidade econômica entre os dois sistemas.....	36
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	Erro! Indicador não definido.

4.1	Geração de energia elétrica e custo evitado	37
4.2	Análise econômica	39
5.	CONCLUSÕES.....	Erro! Indicador não definido.
6.	REFERÊNCIAS	Erro! Indicador não definido.

1. INTRODUÇÃO

Houve muitos fatores que impulsionaram a busca diferenciada pela oferta de energia, dentre eles, a crise do petróleo em 1970, as restrições ambientais em relação aos combustíveis fósseis, os fortes impactos ambientais causados por algumas formas de geração de energia (MANIENIYAN, et al., 2009). Uma saída para esses problemas é o incentivo à geração distribuída por meio de fontes renováveis de energia, utilizando-a não como substituta da energia centralizada, mas sim como complemento a ela.

A geração distribuída também tem fundamental papel quando se fala nas regiões que não têm acesso à energia elétrica, como, por exemplo, as propriedades rurais. No Brasil, há muitos casos em que moradores não têm eletricidade em suas propriedades, sendo que as linhas de transmissão passam nessas mesmas terras (FEDRIZZI, 1997; WALTER, 2000).

As fontes renováveis de energia têm se destacado quando o assunto é o possível esgotamento das reservas de petróleo. Além disso, há uma grande preocupação com o desmatamento e a emissão de gases poluentes e provocadores do efeito estufa. Nos dias de hoje, o homem está cada vez mais dependente da energia elétrica e é por isso que ela é fundamental para o desenvolvimento da sociedade. O uso dessa energia depende de alguns fatores muito relevantes, como o tipo do recurso energético disponível, a sua viabilidade técnica e econômica, além dos impactos ambientais causados por ela.

No que concerne à geração distribuída no Brasil, a geração fotovoltaica se destaca substancialmente representando 97% do total, dentre as outras fontes como hídrica, biomassa e eólica. Essa intensa utilização se deve à fácil disponibilidade de radiação solar em todo o país, além do barateamento dos equipamentos e flexibilidade de fontes de financiamento (BEZERRA, 2021). Mesmo que a geração fotovoltaica não seja tão eficiente e não tenha tanta competitividade quanto a geração hidrelétrica, por exemplo, ela ainda tem muitas vantagens, como operação silenciosa e livre de emissões poluentes (pelo menos da sua etapa de operação), baixo impacto ambiental devido sua instalação, baixa manutenção, vida útil superior a 15 anos e a disponibilidade da radiação solar, que acontece em todo o território de forma abundante (MELO, 2017).

Bezerra (2021) profere que no Brasil e no mundo a energia solar fotovoltaica vem crescendo de forma significativa dentre as demais fontes de geração de energia na geração distribuída, principalmente após a consolidação da Resolução Normativa ANEEL 482/2012, que teve um papel muito importante na viabilização e incentivo à geração distribuída no Brasil.

Fedrizzi (1997) e Facuri (2004) ressaltam que, embora a hidroeletricidade tenha um peso significativo na matriz elétrica brasileira, ainda há muitos geradores à combustível fóssil em áreas remotas, especialmente nas regiões Norte e Nordeste do país. Sabe-se que esse tipo de geração de energia provoca grandes impactos no Meio Ambiente, tanto na fase de operação, quanto na fase de refino e transporte.

Em 2021, o Brasil enfrentou uma crise hídrica muito séria, o que provocou muitos aumentos na tarifa de energia elétrica, devido à grande parte da energia gerada no país ser baseada na hidroeletricidade (SOARES e COSTA, 2022). Sem a energia gerada pelas hidroelétricas, faz-se necessária a utilização de fontes térmicas não renováveis, o que impacta também nas emissões de gases de efeito estufa. Assim como a hidroeletricidade, a energia solar também é dependente dos fatores climáticos, mas não em níveis tão críticos. Outro fator de destaque é que a energia solar fotovoltaica, na sua etapa de operação, não emite gases poluentes.

Em setembro de 2022, a potência instalada brasileira chegou a 197.870MW, sendo 9,1% desse valor advindo da energia solar fotovoltaica, representando 18.654 MW. Já no contexto da geração distribuída, a energia solar fotovoltaica é responsável por 99,9% do total (ABSOLAR/ANEEL, 2022).

A eficiência de um módulo fotovoltaico depende diretamente da radiação solar que atinge a superfície dele. Como o Sol se move ao longo do dia, obviamente, um sistema fotovoltaico fixo obterá em determinados períodos do dia, uma eficiência de conversão menor. Com o uso de um sistema com rastreador solar, o módulo estará sempre perpendicular à incidência da luz solar, aumentando assim, a sua potência de saída. De acordo com Bairi (1990), a precisão do ângulo de inclinação e a orientação de um painel fotovoltaico são essenciais para o desempenho do mesmo, pois geram até 40% de energia a mais do que painéis instalados com inclinação fixa.

Tendo em vista esse cenário de aumento expressivo da utilização da energia solar fotovoltaica para geração de energia elétrica, é de suma importância que sejam analisados e aplicados alguns critérios de análise econômica a fim de verificar a

viabilidade do projeto, além de conhecer todos os fatores que influenciam diretamente no desempenho dos painéis fotovoltaicos, sejam eles fixos ou com rastreadores solares.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

O objetivo desse trabalho é avaliar o desempenho de um sistema fotovoltaico com rastreador solar de um eixo conectado à rede comparativamente com um sistema fotovoltaico fixo também conectado à rede. Ainda, avaliar a viabilidade econômica comparando os dois sistemas.

1.1.2 Objetivos específicos

- Determinar a geração de energia elétrica do sistema fotovoltaico conectado à rede com rastreador solar;
- Identificar a geração de energia elétrica do sistema fotovoltaico conectado à rede fixo;
- Comparar as diferenças de geração de energia entre os dois sistemas;
- Avaliar economicamente o sistema fotovoltaico com rastreador solar;
- Avaliar economicamente o sistema fotovoltaico fixo;
- Comparar as diferenças de viabilidade econômica entre os dois sistemas.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Geração de energia por meio de fontes renováveis

No ano de 2021, houve um aumento de 4,5% na oferta interna de energia, comparado ao ano anterior. Devido à crise hídrica sofrida, houve uma queda da participação das hidrelétricas na matriz energética enquanto que as usinas termelétricas obtiveram acréscimo de participação (EPE, 2022). A Figura 1 mostra a participação das matrizes energéticas no Brasil e no mundo.

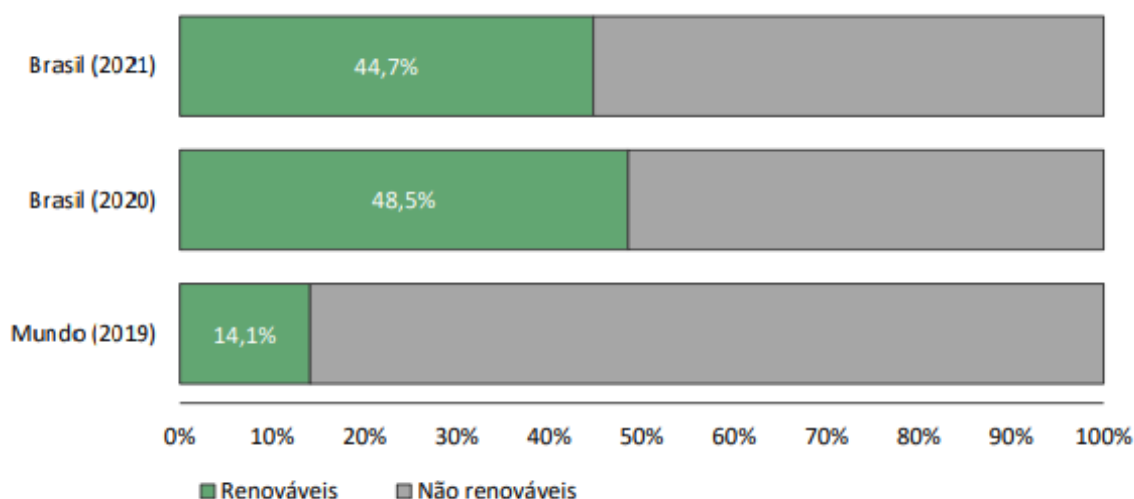


Figura 1: Participação das matrizes energéticas no Brasil e no mundo.
Fonte: Adaptado de EPE (2022)

As fontes renováveis obtiveram aumentos expressivos no ano de 2021. A geração eólica obteve um crescimento de 26,7% em relação a 2020, e a geração solar, incluindo geração centralizada e mini/micro geração distribuída, obtiveram avanço de 55,9% em relação ao ano anterior (EPE, 2022).

Ainda de acordo com a EPE (2022), dos 44,7% da matriz energética renovável no ano de 2021, 16% são relativos à biomassa da cana, 11% da energia hidráulica, 8,7% da lenha e carvão vegetal e 8,7% de outras fontes renováveis. Os 8,7% referentes à outras fontes renováveis, são, em ordem decrescente de participação: lixívia, eólica, biodiesel, solar fotovoltaica, outras biomassas, solar térmica, biogás e gás industrial de carvão vegetal.

Quando o assunto é micro e minigeração distribuída utilizando fontes renováveis, no ano de 2021 houve um aumento de 84% em relação a 2020, chegando a 9.810GWh em 2021. A participação das fontes renováveis de energia inclui as fontes mostradas na Figura 2. Somente a energia solar fotovoltaica representou cerca de 88,3% de toda a geração, sendo a principal responsável pelo aumento ocorrido na micro e minigeração distribuída (EPE, 2022).

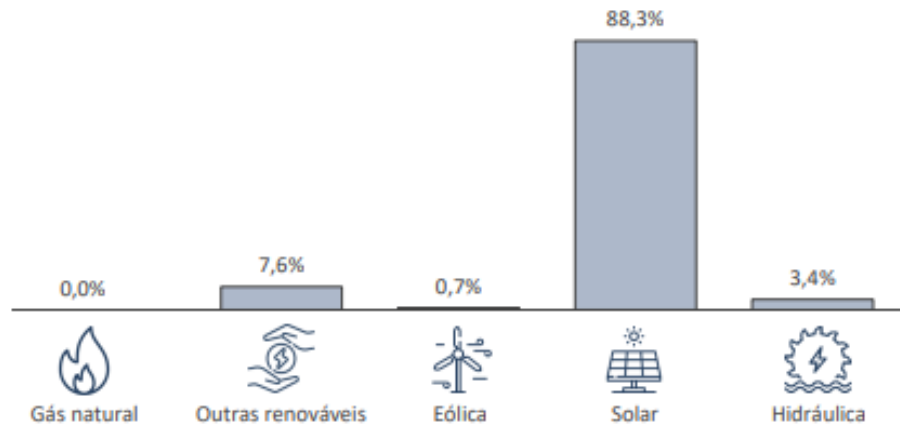


Figura 2: Participação das fontes renováveis na geração distribuída.
Fonte: Adaptado de EPE (2022).

Na matriz elétrica brasileira, em 2022, a energia solar fotovoltaica ficou em terceiro lugar na geração de energia, com 18.654MW, perdendo para a hídrica que representa 109.599MW e depois a eólica, com 22.330MW (ABSOLAR/ANEEL, 2022). Em relação à potência instalada no Brasil, com usinas outorgadas do mercado regulado e do mercado livre, os estados com maiores potenciais são: Minas Gerais, Bahia e Piauí.

Os primeiros sistemas fotovoltaicos utilizados ocorreram de forma isolada, para abastecer locais distantes da rede convencional de distribuição de energia elétrica. Em 1999, a indústria fotovoltaica já representava cerca de 30% de toda a potência instalada no planeta, ou seja, dos 200MWp instalados no ano de 1999, 60MWp eram referentes aos sistemas fotovoltaicos conectados à rede (ZILLES *et al.*, 2012). Em 2006, 90% da potência total instalada no mundo era advinda de sistemas fotovoltaicos conectados à rede (IEA, 2010). Ao longo dos anos, houveram muitos incentivos na área da energia solar e muitos países, dentre eles, a Espanha, Holanda, Austrália, Japão e Suíça começaram a investir nessa área.

Com base no Relatório da *Solar Power Europe*, em 2012, a capacidade

instalada de energia solar mundial era de 100GW. Em 2019, que foi um ano caracterizado por muitos programas de recuperação econômica devido à pandemia da COVID-19, pressupôs-se que a crise energética e alta nos preços em todo o mundo faria com que o consumo de energia diminuísse nesse período. Contrariando as expectativas, no ano de 2020 a rede global conectada à rede chegou ao valor de 139,2GW de capacidade solar, e no ano seguinte, obteve um aumento de 21%, chegando ao valor de 167,8GW. No mesmo relatório, em abril de 2022, atingiu-se a marca de 1TW de capacidade solar no mundo, o que significa um aumento muito expressivo da utilização da energia solar no mundo (MICHAEL *et al.*, 2022). Ainda conforme Pereira *et al.* (2017), a geração de energia fotovoltaica apresentou um grande crescimento em relação à matriz energética mundial.

2.2 Energia Solar

A energia do Sol que chega ao sistema Terra/Atmosfera cobre uma vasta faixa do espectro eletromagnético. Essa energia alimenta muitos processos como a fotossíntese, o ciclo hidrológico, a dinâmica da atmosfera e oceanos. Podemos citar também os processos e tecnologias que utilizam desenvolvimento científico e tecnológico, como aquecimento solar, a geração de eletricidade, a climatização de ambientes (PEREIRA *et al.*, 2017). A energia gerada pelo Sol, é hoje, uma das alternativas de geração de energia elétrica mais prósperas para o desenvolvimento humano. Pode-se dizer que a maioria das fontes de energia dependem da energia advinda do Sol.

De acordo com o IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*), que publicou o Relatório Especial sobre Fontes Renováveis de Energia e Mitigação da Mudança Climática, a energia solar direta está separada em cinco blocos (PINHO e GALDINO, 2014):

- Solar passiva, onde se insere a arquitetura bioclimática;
- Solar ativa, onde estão inseridos o aquecimento e a refrigeração solares;
- Solar Fotovoltaica;
- Geração de energia a partir de concentradores solares térmicos para altas temperaturas;

- Inspirado na fotossíntese, o processo que utiliza o oxigênio como combustível para alimentar uma célula, quando a quebra da molécula da água por meio da luz solar.

Esses cinco blocos podem ser resumidos em energia solar térmica e energia fotovoltaica. A radiação solar incidente por unidade de área pode ser de dois tipos: direta ou difusa. A radiação solar direta não sofre nenhuma mudança de direção durante o seu percurso. E a radiação solar difusa é enviada pelo Sol, mas ela pode sofrer mudança na sua direção original, o que é causado devido as reflexões e espalhamentos causados pela atmosfera (FERREIRA, 1993).

Pereira et al. (2017) mencionam que a quantidade de radiação solar disponível em cada localidade depende de vários fatores astronômicos, dentre eles os movimentos da Terra. A Terra possui dois tipos de movimento: translação e rotação. Por intermédio do movimento de rotação da Terra, que dura aproximadamente 24 horas, nota-se o movimento aparente do Sol, que vai de leste à oeste. O outro movimento é o de translação, quando a Terra gira em torno do Sol, com duração de aproximadamente 365 dias. Devido ao movimento de translação, é que surgem as diferenças na duração dos dias e as estações do ano.

2.3 Energia Solar Fotovoltaica

Para Ferreira (1993), Edmond Becquerel relatou o efeito fotovoltaico, pois a partir da absorção de luz, há o aparecimento de uma diferença de potencial nos extremos da estrutura composta por um material semicondutor. Para que esse efeito ocorra são necessárias duas condições: 1) A energia dos fótons precisa ser igual ou superior ao valor da banda proibida do material; 2) Deverá existir uma barreira nesse material, capaz de separar os elétrons e lacunas foto geradas.

O efeito fotovoltaico é o processo onde a radiação eletromagnética é convertida em energia elétrica, por meio de dispositivos chamados de células solares. Um módulo fotovoltaico é um conjunto de células solares interligadas em série ou paralelo. Os sistemas fotovoltaicos produzem corrente elétrica a partir da luz solar captada, onde a corrente é coletada e processada por equipamentos controladores e conversores, e pode ser armazenada em baterias ou então ser utilizada diretamente nos sistemas conectados à rede elétrica (VILLALVA e GAZOLI, 2015).

A eletricidade gerada também pode ser armazenada de outra maneira, em forma de ar comprimido. Essa técnica é mais complexa do que um sistema de bombeamento de água, mas exige reservatórios menores, para a mesma capacidade, além de possuir maior flexibilidade em relação ao local de instalação. Outra maneira de armazenamento seria baseada no hidrogênio, mas de futuro a médio prazo. Existem ainda outras formas, mas que não são nosso objeto de estudo (AQUINO e SILVA, 2018).

2.4 Características técnicas e construtivas de um módulo fotovoltaico

Existem três gerações de tecnologias quando se fala em produção de células fotovoltaicas. Na primeira geração, em que as tecnologias são consideradas consolidadas, confiáveis e possuem maior eficiência, encontram-se as cadeias produtivas do silício monocristalino (m-Si) e do silício policristalino (p-Si), que equivalem mais de 85% do mercado (PINHO e GALDINO, 2014). O aperfeiçoamento expressivo da tecnologia do silício e a abundância desse material na natureza são as principais razões para que ele predomine no mercado das células fotovoltaicas (ZILLES *et al.*, 2012).

Segundo Buhler *et al.* (2018), dentre os módulos comerciais, o de silício monocristalino apresenta maior eficiência de conversão de energia. Castro (2007) menciona que a uniformidade da estrutura molecular do silício monocristalino é ideal para potencializar o efeito fotovoltaico. Sua eficiência pode chegar a 24% em laboratório, embora em operação, esse valor seja de 15%. Já as células de silício policristalino possuem uma eficiência de 12%, e em laboratório conseguem atingir valores próximos de 18%. No momento atual, a tecnologia dos módulos policristalinos tem maior visibilidade devido ao seu processo de fabricação ser mais barato, se comparado ao do monocristalino (BUHLER *et al.*, 2018).

Um módulo fotovoltaico é constituído, basicamente, de um conjunto de células agrupadas, que são encapsuladas, normalmente por um polímero transparente e isolante (EVA). A fim de proteger as células de danos externos, o encapsulamento é feito com materiais especiais para adquirir o devido isolamento elétrico e a resistência mecânica do conjunto (ZILLES *et al.*, 2012). Os módulos ainda contam com uma cobertura de vidro temperado e antirreflexivo e, por fim, uma estrutura metálica para a sustentação do equipamento. A Figura 3 ilustra as partes constituintes de um módulo

fotovoltaico com células de silício cristalino.

A segunda geração é composta pelos chamados filmes finos, que são denominados assim em razão dos materiais com espessura na ordem de $1\mu\text{m}$, que se comparados aos de lâminas de silício, possuem uma espessura 100 vezes menor (BUHLER *et al.*, 2018).

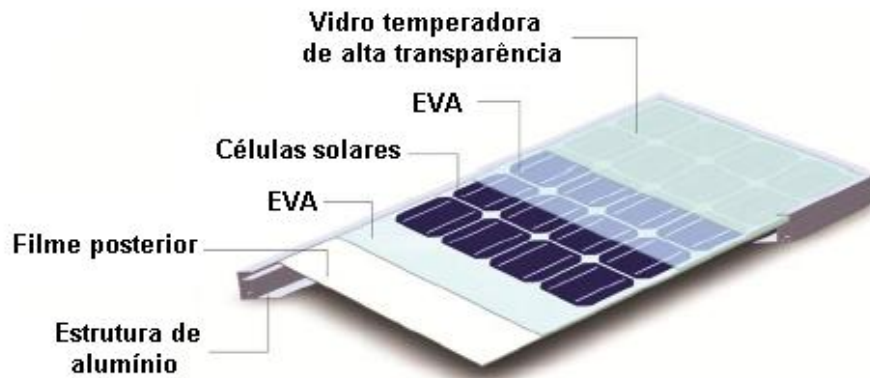


Figura 3 - Partes constituintes de um módulo fotovoltaico.
Fonte: Energia3s (2022)

Os filmes finos são divididos em três cadeias produtivas: silício amorfo (a-Si), disseneleto de cobre e índio (CIS) ou disseneleto de cobre, índio e gálio (CIGS) e telureto de cádmio (CdTe). Nesta última, ainda existem dificuldades quanto à disponibilidade dos materiais, vida útil, rendimentos das células, e no caso de alguns elementos, sua alta toxicidade, que dificultam sua utilização em grande escala (PINHO e GALDINO, 2014). Na Figura 4, é possível visualizar as células de silício cristalino, silício policristalino e de filmes finos.

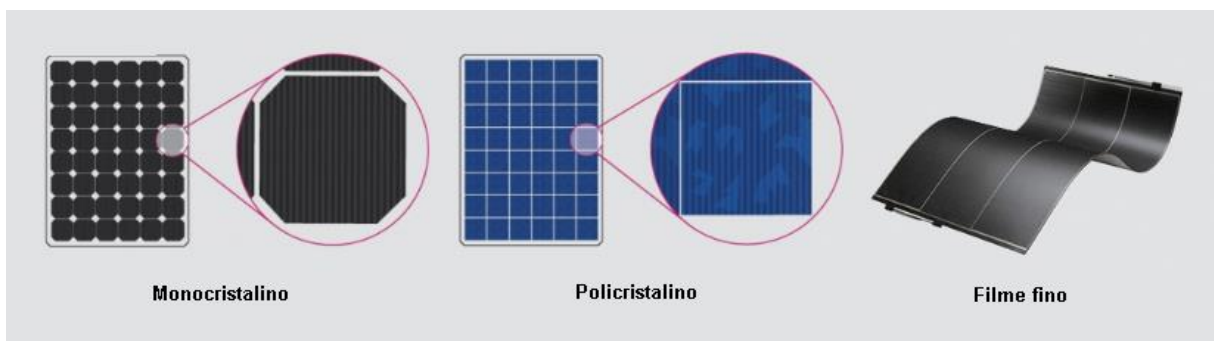


Figura 4 - Tipos de células fotovoltaicas.
Fonte: Adaptado de Neosolar (2022)

Conforme Oliveira (2008), as células de filmes finos possuem eficiência em torno de 5% a 8%, embora tenham sido feitos testes em laboratório e obtido resultados de até 14%. O mesmo autor cita que esse tipo de célula tem uma característica muito interessante: mesmo sob efeito de iluminação artificial, ele consegue fazer a conversão de energia em bons índices. Ainda, apesar de apresentarem uma eficiência maior na especificação do produto, após o primeiro ano de operação, ocorre uma perda de eficiência em torno de 15% a 20%, devido a uma degradação que essas células sofrem.

Tendo em vista o processo de fabricação dos filmes finos, essa tecnologia apresenta custos bem reduzidos se comparados com as tecnologias da primeira geração. Mesmo que os custos tenham tido uma redução, não se observou uma maior procura por esse tipo de tecnologia pois os módulos da primeira geração também obtiveram essa diminuição do preço, além de já terem conquistado seu espaço nesse mercado (BUHLER, *et al.*, 2018).

Ainda conforme Buhler *et al.* (2018), a terceira geração diz respeito às células solares que utilizam materiais orgânicos, como as células solares orgânicas e as células solares sensibilizadas por corante, mas não são o nosso objetivo de estudo.

2.5 Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede

A geração distribuída tem como definição a geração de energia próxima ao consumidor final, visto que a instalação se encontra no mesmo local e é utilizada para atendimento prioritário deste consumidor, podendo ou não ser gerado excedente energético comercializável (EPE, 2016). Para a geração de energia elétrica, as fontes geradoras de energia podem ser instaladas de duas formas distintas. Uma delas é de forma isolada, pois normalmente atende cargas onde não há rede elétrica em suas proximidades. Neste caso, são necessárias baterias para o armazenamento dessa energia. A outra forma indicada está relacionada aos sistemas conectados à rede, pois a fonte é conectada à carga e à rede elétrica também.

Um sistema fotovoltaico conectado à rede – SFVCR possui energia em condições adequadas para que se possa injetá-la na rede convencional. Esse sistema possui basicamente um gerador fotovoltaico, um inversor CC/CA e as devidas proteções elétricas (LAMIGUEIRO, 2013). A Figura 5 mostra os dispositivos básicos utilizados em um SFVCR.



Figura 5 - Dispositivos básicos de um SFVCR.
Fonte: CSR Energia Solar (2022)

Quando o sistema é conectado à rede, ele pode ser enquadrado como micro ou minigeração distribuída, cujas definições são mostradas a seguir, conforme a Resolução Normativa Aneel nº 687/2015:

- Microgeração distribuída: central geradora de energia elétrica, com potência instalada menor ou igual a 75kW, que utilize fontes de energia hidráulica, solar, eólica, biomassa ou cogeração qualificada;
- Minigeração distribuída: central geradora de energia elétrica, com potência instalada superior a 75kW e menor ou igual a 3MW, que utilize fontes hídricas e menor ou igual a 5MW para cogeração qualificada;

Dentro do contexto da geração distribuída, existe um sistema de compensação de energia elétrica, muito incentivado pela ANEEL, que é a agência responsável pela regulamentação desses sistemas, elaboração das normas e impostos envolvidos, aqui no Brasil.

O sistema de compensação chamado medição líquida (*net metering*) representa um grande passo no que se refere à geração distribuída no país. (BEZERRA, 2021). Ainda, conforme Ozanski (2021), a introdução da medição líquida por meio da Resolução Normativa – RN 482, foi um marco na regulamentação dos sistemas fotovoltaicos conectados à rede, pois acabou reduzindo as barreiras para que as pequenas usinas de energia renovável possam se conectar à rede de distribuição. Em um sistema conectado à rede, se a geração excede a demanda de carga, essa potência produzida a mais pode ser injetada na rede, gerando créditos junto a empresa fornecedora de energia, medidos em quilowatt-hora (kWh). Portanto,

nesse modelo de compensação, o usuário pagará somente a diferença entre a energia consumida e a energia gerada, se houver. Além disso, o proprietário também pode fazer o abatimento em outros postos tarifários que foram registrados por ele (BEZERRA, 2021; LAMIGUEIRO, 2013). O proprietário tem um prazo de 60 meses para utilizar os créditos que foram gerados no sistema de compensação (ANEEL, 2015).

O outro sistema é denominado de tarifa *feed-in*. Essa política de compensação incentiva a produção de energia elétrica por meio de fontes renováveis de energia, de modo que por intermédio de uma regulamentação governamental, a energia gerada é comprada pela concessionária local (DALVI, 2017).

2.5.1 Avaliação de desempenho de SFVCR

Antes da instalação de qualquer sistema fotovoltaico, é imprescindível verificar alguns fatores essenciais para o desempenho dos sistemas. Entre os fatores principais estão a localização, a orientação e a inclinação dos módulos fotovoltaicos.

Em relação ao local de instalação, é necessário verificar o histórico de condições climáticas. O local de instalação deve ter uma boa incidência de irradiação solar. Além disso, deve-se analisar se próximo ao local existem construções ou elementos que possam fazer qualquer sombreamento nos módulos. Conforme Alonso-García (2005), caso ocorra um sombreamento em um módulo fotovoltaico, ele pode ser danificado irreversivelmente. Quando parte de um módulo é sombreado, as células tornam-se polarizadas reversamente, o que acaba fazendo com que elas atuem como cargas ao invés de geradores, e se o sistema não tiver as devidas proteções, provavelmente, ocorrerão sérios problemas ao sistema. Ademais, de acordo com Zilles *et al.* (2012), em situações em que os módulos estão expostos à luz solar de maneira diferente, como quando há sombra ou até acúmulo de sujeira sobre eles, ocorre um sobreaquecimento nas células, podendo até queimá-las.

No que se refere à orientação do módulo fotovoltaico, ele deverá sempre estar orientado em direção à linha do Equador, assim, ele poderá atingir uma maior radiação solar ao longo do ano (ZILLES *et al.*, 2012). A inclinação e orientação ideal de um módulo fotovoltaico dependem do clima e da latitude local, e quando é utilizado o ângulo de inclinação igual à latitude do local, esse sistema recebe radiação máxima.

(MONDOL *et al.*, 2006). Em alguns lugares, por conta dos padrões climáticos, o verão ou o inverno não possuem um padrão simétrico de radiação durante manhã e tarde, ou então pode ser um local que permaneça mais nublado. Segundo Duffie e Beckman (1991), a máxima radiação no verão é adquirida com uma superfície inclinada de 10 a 15°C a menos que a latitude; e para o inverno, inclinação de 10 a 15°C a mais que a latitude local.

Uma célula solar individual, com tamanho de aproximadamente 100mm², irá gerar cerca de 0,5 a 1V em seus terminais, com uma corrente na casa dos miliampères. Como a intensidade dessa corrente é muito pequena, são feitas associações entre as células, ou seja, elas podem ser montadas em série ou paralelo. Por meio dessas associações entre as células, é possível obter maiores valores de tensão e corrente, dependendo da necessidade da aplicação (AQUINO e SILVA, 2018). Quando o intuito é obter um maior valor de corrente no circuito, o ideal é conectar os módulos em paralelo. Quando se deseja obter uma maior tensão, o recomendado é fazer a associação em série. As Figura 6 e Figura 7 mostram a curva I-V de células conectadas individualmente ou quando associadas em série ou paralelo.

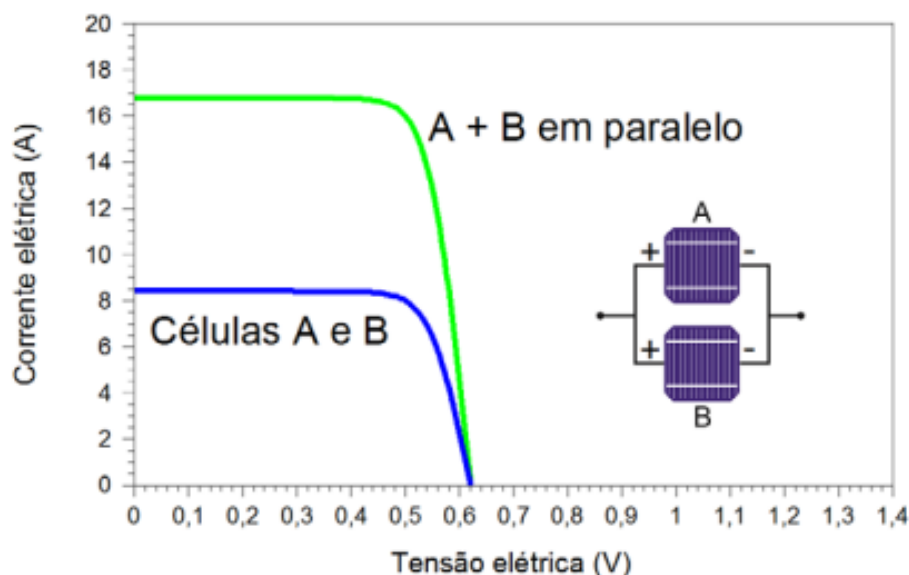


Figura 6 - Curva I-V de células fotovoltaicas de silício conectadas em paralelo.
Fonte: PINHO e GALDINO (2014)

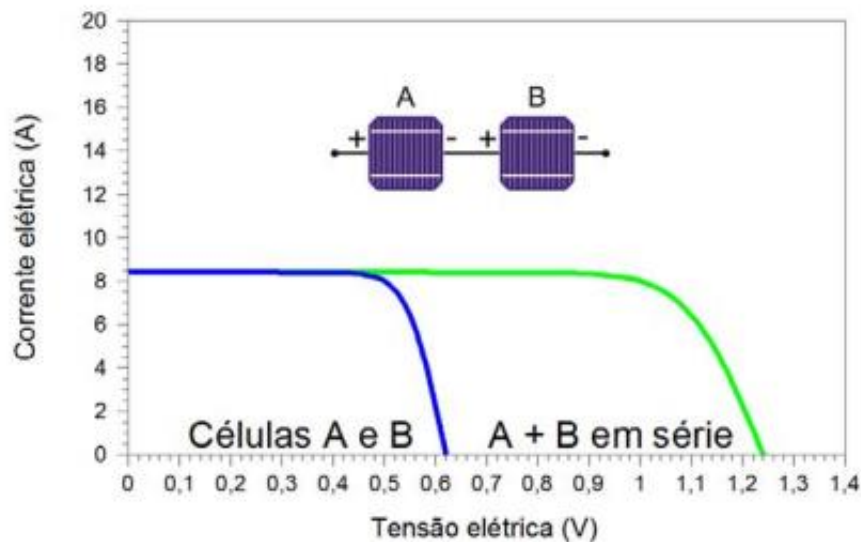


Figura 7 - Curva I-V de células fotovoltaicas de silício conectadas em série.
Fonte: PINHO e GALDINO (2014)

Quando o módulo está desenergizado, sem carga e estiver sob efeito da luz, aparecerá em seus terminais uma tensão chamada de tensão de circuito aberto (V_{oc}). Quando o módulo é energizado, ocorrerá a circulação de uma corrente, entre a carga e a célula. Essa corrente é chamada de corrente de curto-circuito (I_{sc}). Com base nisso, é possível caracterizar uma célula de acordo com seus parâmetros elétricos de saída e a partir de alguns fatores como irradiância e temperatura da célula. Os parâmetros elétricos são a corrente, tensão e a potência nominal do módulo, que são fornecidos pelo fabricante. Quando se obtém a corrente de máxima potência (I_{MP}) e a tensão de máxima potência (V_{MP}), atinge-se a máxima potência de um módulo fotovoltaico, representada por P_{MP} .

A eficiência de um módulo fotovoltaico é medida a partir da razão entre o ponto em que se atinge a máxima potência de conversão de energia e a potência da energia solar incidente sobre ela (P_L). A eficiência pode ser calculada através da Equação 1:

$$\eta = \frac{I_{mp} \cdot V_{mp}}{P_L} \quad 1$$

Os outros fatores que são determinantes para o desempenho de um sistema fotovoltaico, são a irradiação solar e a temperatura ambiente. Para Pinho e Galdino (2014), a corrente elétrica gerada por uma célula fotovoltaica aumenta linearmente

com o aumento da irradiância solar incidente sobre ela. Já a tensão de circuito aberto aumenta de forma logarítmica, ao passo que a temperatura permanece a mesma. É possível visualizar na Figura 8 a influência da irradiância solar na curva característica I-V células fotovoltaicas em condições padrão de teste. As condições padrão de teste utilizam temperatura de 25°C, irradiância de 1000W/m² (ZILLES *et al.*, 2012).

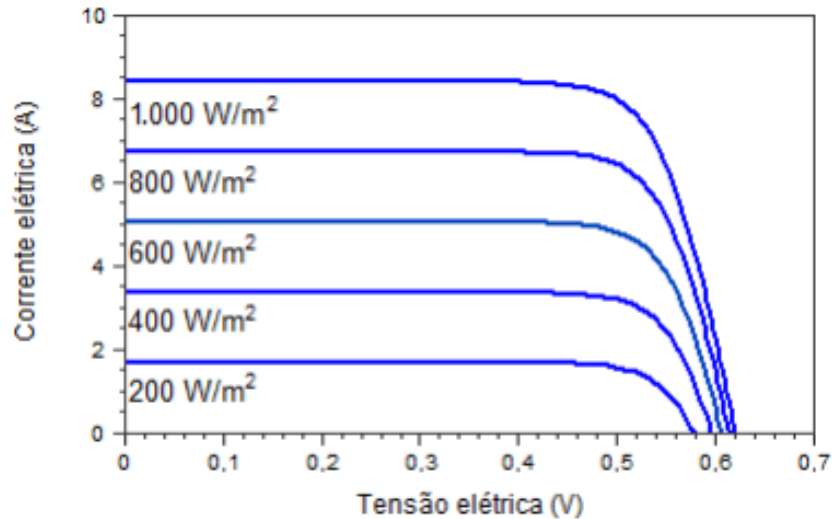


Figura 8 - Influência da irradiância na Curva I-V de células fotovoltaicas.
Fonte: PINHO e GALDINO (2014)

Conforme a irradiância incidente ou a temperatura ambiente aumenta, a temperatura da célula também aumenta, mas essa temperatura tem um limite. Se a temperatura da célula estiver fora dos padrões estipulados pelo fornecedor, ela começa a apresentar uma redução na sua eficiência. A Figura 9 mostra a influência da temperatura na célula fotovoltaica.

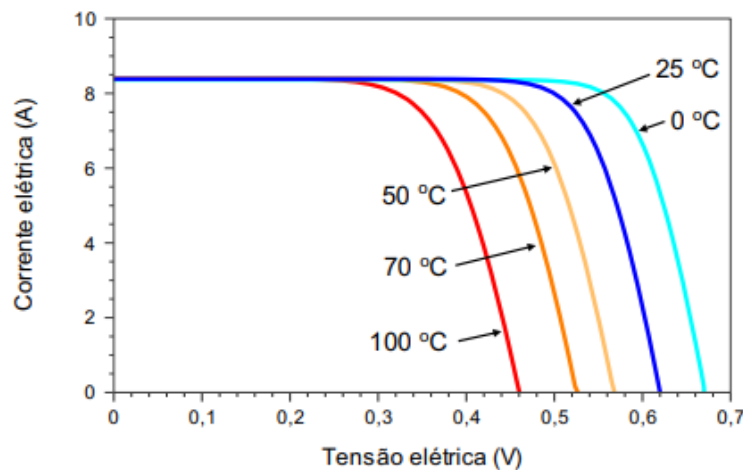


Figura 9 - Influência da temperatura na Curva I-V de células fotovoltaicas.
Fonte: PINHO e GALDINO (2014)

2.5.2 SFVCR fixos

A instalação de um sistema fotovoltaico pode ser realizada diretamente no solo ou sobre edificações. Um sistema instalado no solo tem como objetivo o melhor uso do solo, com a utilização da menor área possível. Os sistemas instalados no solo podem ser estáticos, com inclinação e orientação fixas ou sistemas com rastreamento.

Mondol *et al.* (2006) estudaram os efeitos da inclinação e orientação dos módulos em um SFVCR localizado na Irlanda no Norte. As coordenadas geográficas do local são aproximadamente 54° de latitude norte e 6° de longitude oeste. Ele comprovou que uma inclinação e orientação adequada influencia diretamente na potência de saída do sistema. No inverno, ele obteve a máxima irradiação solar com a superfície orientada para o Sul, com inclinação de 60°. Com uma superfície horizontal, ele alcançou 42% a menos de irradiação e com uma superfície vertical, ele obteve 12% de irradiação a menos. No verão, obteve a máxima radiação com a superfície voltada para o Sul, com inclinação de 20°. Para uma superfície horizontal e vertical, obteve, respectivamente, 2% e 40% a menos de irradiação.

2.5.3 SFVCR com rastreador solar

Para Lamigueiro (2013), o rastreamento em módulos fotovoltaicos tem duas razões principais: a primeira é que a radiação incidente aumenta conforme o módulo segue o sol; e a segunda é que as perdas por reflexão são diminuídas quando isso acontece. Há várias técnicas de rastreamento solar, todas com objetivo de obter maior aproveitamento do terreno e um maior desempenho, com estruturas mais economicamente viáveis.

Os rastreadores solares são controlados via sistema automatizado e são um conjunto de módulos fotovoltaicos que seguem o sol, de modo a aumentar a potência de geração de energia, então conforme o dia passa, eles literalmente rastreiam o sol. Lewandoski *et al.* (2022) ressaltam que o desempenho e a segurança de um rastreador solar dependem muito da tecnologia utilizada para controlá-lo. Nesse contexto, existem três tipos de rastreadores solares: de eixo único, de eixo duplo e triplo.

Os rastreadores solares de eixo único se movimentam em torno de um eixo,

que pode ser horizontal ou vertical. De acordo com Azman (2014), para os países localizados na zona tropical, onde o sol permanece no ponto mais alto do céu, recomenda-se o uso de rastreadores de eixo único do tipo horizontal. Já os países em que o sol geralmente fica na parte mais baixa, na maior parte do tempo, é então recomendado que se utilize o sistema de eixo único vertical. A Figura 10 ilustra o sistema de rastreamento com eixo único vertical e horizontal.

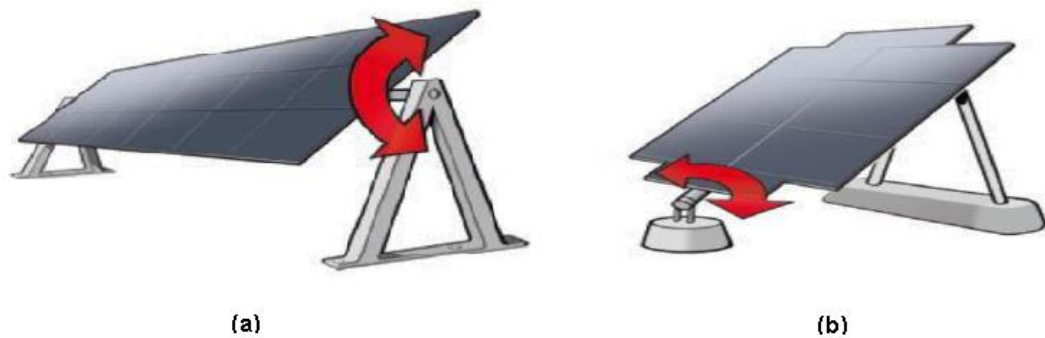


Figura 10 - Sistema de rastreamento de eixo único: a) horizontal; b) vertical.
Fonte: Zakariah *et al.* (2015)

Bakos (2006) cita que a inclinação e instalação de módulos fixos seguem o ângulo de latitude local, voltado diretamente para o Sol. Em razão disso, no período de inverno e verão, a energia gerada é bem menor, pois ocorre uma mudança de altitude do Sol.

Evidentemente, um sistema rastreador com eixo duplo é mais eficiente e preciso que um sistema de eixo único. Os sistemas de eixo duplo irão movimentar-se para leste, oeste, norte e sul. Um sistema automatizado irá controlar os motores que fazem a orientação dos eixos a partir de um sensor acoplado ao painel, que medirá a corrente e tensão gerada para posteriormente ser efetuado o controle (ZAKARIAH *et al.*, 2015). Na Figura 11, pode-se visualizar os dois sentidos de rotação de um rastreador solar de eixo duplo.



Figura 11 - Sistema de rastreamento de eixo duplo.
Fonte: Zakariah et al. (2015)

Perpiñan (2009) analisou estatisticamente um sistema de painéis fotovoltaicos com rastreamento de duplo eixo, onde o painel consegue apontar para o sol com precisão, durante todo o percurso. Lamigueiro (2013) profere que quanto mais preciso for o sistema de rastreamento, menos eficiente é o uso da terra. Portanto, quando o terreno é limitado, a melhor opção são os sistemas estáticos.

2.6 Avaliação econômica

Assaf Neto (2009) ressalta que os métodos de taxa interna de retorno (TIR) e valor presente líquido (VPL) possuem maior utilização e rigor conceitual nas análises de operações financeiras e de projetos de investimento.

Quando o problema é uma decisão para investir, a técnica do valor presente líquido é a mais recomendada por especialistas financeiros, pois ela considera o valor do dinheiro no tempo (OLIVEIRA *et al.*, 2015). Por isso, antes de efetuar a análise do valor presente líquido, é necessária a definição prévia da taxa de desconto a ser empregada na atualização dos fluxos de caixa.

A taxa interna de retorno (TIR) está diretamente relacionada com o VPL. Essa taxa indica o valor que vai fazer com que o VPL seja igual a zero. Também podemos avaliar o investimento comparando a TIR com a TMA. Se no fim dos cálculos, a TIR for maior que a TMA, significa que o projeto é financeiramente viável. Caso a TIR seja menor que a TMA, o investimento não é atrativo, ou seja, inviável. Caso a TIR e a

TMA forem iguais, então, o investimento é indiferente quanto à avaliação financeira.

Quando um investimento é feito, existe um tempo para que o capital investido seja recuperado. Esse tempo para recuperar o investimento é chamado de *payback*. Existem dois métodos de *Payback*: o simples e o descontado. No *payback* simples, a desvalorização do dinheiro ao longo do tempo não é considerada. Já no *payback* descontado, aplica-se uma taxa mínima de juros, chamada de custo de capital. Para Marquezan e Brondani (2012), a análise do *payback* atrelado ao uso de outros indicadores pode dar informações muito relevantes sobre o tempo de retorno de um investimento.

Além desses indicadores citados, há um outro muito utilizado para os sistemas fotovoltaicos. Esse indicador é chamado de Custo Nivelado de Energia (LCOE), que é uma métrica mais efetiva para a avaliação da viabilidade econômica para esses tipos de sistemas. Ela surgiu com o objetivo de comparar as várias formas de geração de energia e verificar qual delas é a mais competitiva. Basicamente, ela pode ser calculada por meio da Equação 2:

$$LCOE = \frac{CT}{EP} \quad 2$$

Onde CT é o custo total da usina (R\$), incluindo custos operacionais e capital investido; E o EP é a energia total produzida ao longo da vida útil da usina (kWh).

2.7 Avaliação econômica de sistemas conectados à rede

Para a instalação de um sistema gerador de energia, é necessário ter conhecimentos dos muitos fatores a serem inclusos na tarifa. Além do valor pago pela disponibilidade da energia, em 24 horas, 7 dias por semana, é necessário arcar com custos relativos ao uso do sistema de distribuição e transmissão, custos com perdas técnicas e não técnicas, encargos diversos e tributos cobrados pelo governo (DANTAS e POMPERMAYER, 2018). Os autores ainda citam que a incidência de impostos e encargos pode representar mais de 40% do valor total da tarifa, dependendo do estado.

Outro fator que tem influência direta na tarifa de energia elétrica é a bandeira

tarifária, que depende de fatores climáticos, como volume de chuvas, disponibilidade hídrica, etc. Existem três bandeiras tarifárias atualmente que dependem do custo variável de geração térmica: verde, amarela e vermelha. Na tarifa verde, não há acréscimo de fatura; na amarela, há um acréscimo de R\$0,02 por kWh. A bandeira vermelha possui dois patamares: no patamar 1, há acréscimo de R\$0,03 por kW; e no patamar 2, de R\$ 0,035 (DANTAS e POMPERMAYER, 2018).

Dassi *et al.* (2015) analisaram a viabilidade econômico-financeira de um sistema solar fotovoltaico, utilizando o VPL, *payback* descontado e taxa interna de retorno. Concluiu que o projeto é viável, utilizando uma TMA de 10%, com um período projetado de 15 anos. Com a análise do *payback* descontado, por exemplo, em 13,5 anos o sistema estaria totalmente pago. Ao analisar a economia acumulada em 8 anos, o valor já ultrapassa o custo investido.

Mohammadi *et al.* (2018) avaliaram o desenvolvimento de usinas fotovoltaicas de 5MW em várias cidades do Irã. Analisaram tecnicamente, economicamente e ambientalmente a utilização dessas usinas, comparando três tipos de sistemas: fixo, com rastreador de um eixo e com rastreador de dois eixos. Obteve os seguintes valores para a geração de eletricidade: 7.681,2 a 8.772,5 MWh/ano para o sistema fixo; 9.889,7 a 11.649,1 MWh/ano para o sistema rastreador de um eixo; e 10.180,0 à 12.009,3 MWh/ano para o sistema com dois eixos.

Em relação à avaliação econômica, ele fez uma análise crítica considerando algumas incertezas, como mudanças em variáveis críticas: custos iniciais, taxa de inflação, taxa de desconto, taxa de juros, entre outros. Mesmo tendo em vista uma redução de 15% da tarifa *feed-in* e um aumento de 15% nos custos iniciais, as usinas com rastreadores de um eixo propostas ainda são economicamente viáveis em todas as cidades analisadas (MOHAMMADI, *et al.*, 2018).

2.8 Análise energética

2.8.1 Conceitos

Para o entendimento de análise energética, é necessário, antes, conhecer alguns conceitos. Esses conceitos estão listados a seguir (ELETROBRÁS, 2005):

- Energia ativa: é a energia que produz trabalho, ou seja, promove o funcionamento de equipamentos elétricos e eletrônicos. Sua unidade de medida é o quilowatt-hora (kWh);
- Energia reativa: é a energia responsável pela formação dos campos magnéticos, que são necessários em alguns equipamentos com motor ou indutor. Sua unidade de medida é o quilovar-hora (kVARh);
- Potência: é a quantidade de energia por unidade de tempo. Sua unidade é o quilowatt (kW);
- Demanda: é a média das potências elétricas ativas ou reativas, durante um intervalo de tempo especificado;
- Demanda contratada: demanda de potência ativa a ser obrigatoriamente disponibilizada pela concessionária. É expressa em quilowatts (kW).
- Demanda de ultrapassagem: parcela da demanda que excede o valor da demanda contratada. É expressa em quilowatts (kW).
- Horário de ponta: período definido pela concessionária, composto por três horas consecutivas, com exceção de finais de semana e feriados nacionais, no qual a energia elétrica é mais cara.
- Horário fora de ponta: são as horas complementares às três horas do horário de ponta, acrescidas dos sábados, domingos e feriados nacionais. Neste intervalo, a energia elétrica é mais barata.

2.8.2 Contratação de energia – Tarifas

Para a Agência Nacional de Energia Elétrica, a distribuidora de energia deve analisar e classificar a unidade consumidora, de acordo com a atividade exercida no local e o objetivo da utilização da energia elétrica.

No Brasil, as unidades consumidoras são agrupadas segundo o nível de tensão e, conseqüentemente, em função da demanda (kW). Há dois grupos tarifários que englobam as unidades consumidoras. O grupo A (alta tensão), que possui tarifa binômica e o grupo B (baixa tensão), possui tarifa monômica. Na tarifa monômica, os preços são aplicáveis somente no consumo de energia elétrica ativa (R\$/kWh). Na aplicação da tarifa binômica, o preço aplicável tem base no consumo de energia elétrica ativa (R\$/kWh) e na demanda faturável (R\$/kW) (BORBA, et. al,2015).

Os consumidores atendidos com tensão maior ou igual à 2.300 V ou que são atendidos por sistema subterrâneo, com tensão menor que 2.300V são classificados no grupo A, listados a seguir, conforme a Resolução Normativa nº1000, de 7 de setembro de 2021.

- A1 – 230kV ou mais;
- A2 – 88kV A 138kV;
- A3 – 69kV;
- A3a – 30kV a 44kV;
- A4 – 2,3kV a 25kV;
- AS – Até 2,3kV com sistema subterrâneo;

Com base na Resolução Normativa nº1000, citada anteriormente, as unidades consumidoras com tensão menor do que 2.300 volts são classificados no grupo B. Nesse grupo, estão inclusas as residências, lojas, pequenas oficinas, edifícios residenciais, agências bancárias e a maioria dos prédios públicos federais, na maioria deles, subdivididos em quatro subgrupos, com tensão de 127V ou 220V (ROCHA e MONTEIRO, 2005):

- B1 – residencial;
- B2 – rural;
- B3 – demais classes;
- B4 – iluminação pública.

2.8.3 Modalidades tarifárias

Consoante a categoria de fornecimento, há um conjunto de tarifas aplicáveis com base no consumo de energia e/ou demanda de potência ativa, chamada de modalidade tarifária. Há três tipos de modalidade para o grupo A: horária azul e horária verde. Para o grupo B, há a modalidade convencional monômnia e a horária branca. (ANEEL, 2022).

Na modalidade horária azul, as tarifas são diferenciadas para o consumo e a demanda de potência, de acordo com a utilização nas horas do dia. A modalidade horária verde possui tarifa diferenciada para o consumo de energia conforme as horas do dia e de uma tarifa de demanda de potência.

A modalidade convencional monômnia possui tarifa única de energia elétrica,

independente da hora do dia em que é utilizada. Já a modalidade horária branca possui tarifa diferenciada dependendo da hora do dia que é utilizada a energia. Ela não está disponível para o subgrupo B4 e para a subclasse baixa renda do subgrupo B1.

2.9 Modelos de contratação de energia no Brasil

Dentro do mercado de energia elétrica brasileira, há dois grupos que podem ser destacados: o ambiente de contratação regulada (ACR) e o ambiente de contratação livre (ACL). Ambos os ambientes são regulamentados pelas Leis nº10.847 e nº10.848, de 15 de março de 2004, e pelo Decreto nº5.163, de 30 de julho de 2004.

No ACR, a energia contratada é feita por meio de leilões, realizados pela Aneel e pelo Ministério de Minas e Energia (MME). Todas as tarifas são fixadas pela Aneel, que incluem custos de compra, transmissão e distribuição da energia. O ACR é formado por consumidores chamados cativos, que consomem a energia elétrica da distribuidora local e estão submetidos aos preços estipulados pela Aneel, como é o caso das residências e pequenos comércios. O valor da tarifa a ser paga pelo consumidor cativo depende dos acordos feitos pelo governo, geradoras e distribuidoras de energia, além de valores aplicados em relação às bandeiras tarifárias. Nesse caso, o consumidor não pode escolher qual será a composição da sua tarifa e está sujeito a pagar o valor vigente de acordo com o seu consumo.

Já no ACL, ocorre uma livre negociação entre os consumidores, geradoras e comercializadoras de energia. Dentro desse ambiente, existem dois tipos de consumidores: os livres e os especiais. Os consumidores livres podem escolher um ou mais fornecedores de energia, livremente, negociando as condições para a compra, incluindo quantidade, preço, prazos e até condições de pagamento. Os consumidores livres pagam uma ou mais faturas por mês, quando uma fatura se refere ao uso da rede de distribuição, que é paga à distribuidora local; as outras faturas são das comercializadoras ou geradoras de energia, na qual o consumidor negocia contratos de curto a longo prazo.

O consumidor livre apresenta demanda a partir de 1000kW e pode adquirir qualquer tipo de energia, advinda de fontes renováveis ou não. Os consumidores

especiais possuem demanda entre 500kW e 1000kW, podendo somente adquirir energia de usinas que utilizam fontes renováveis.

Conforme a Associação Brasileira dos Comercializadores de Energia – ABRACEEL, em média, as tarifas para o mercado livre são de R\$ 177/MWh e para o mercado regulado são de R\$ 332/MWh. Quanto mais longo for o contrato, menor é o custo das tarifas. Por exemplo, contratos a longo prazo normalmente possuem um custo 47% menor.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Descrição dos locais do experimento

O trabalho foi desenvolvido fazendo uma comparação de duas usinas fotovoltaicas, instaladas na cidade de Cascavel, Paraná. Uma usina possui rastreadores solares e a outra tem os painéis fixos.

A cidade de Cascavel possui um clima subtropical, com verões quentes, índice de temperatura média anual de 20°C, pluviosidade média anual de 1841mm, umidade de 75,75% (CLIMATE-DATA.ORG, 2022). Para o Laboratório de Modelagem e Estudos de Recursos Renováveis de Energia – LABREN (2022), a cidade apresenta um índice de irradiação solar média anual de 4,73 kWh/m².dia no plano horizontal. A cidade de Cascavel fica localizada no Sul do Brasil e no Oeste do estado do Paraná, como é possível observar na Figura 12.

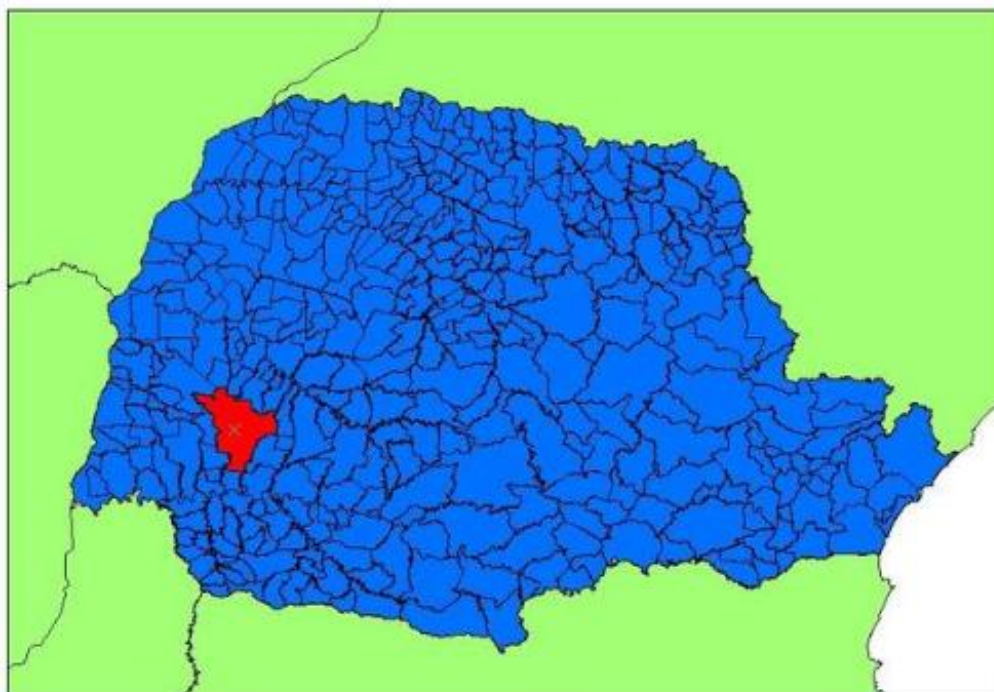


Figura 12 – Localização da cidade de Cascavel, Paraná.

Fonte: Researchgate.com, 2023.

A usina com rastreadores foi implantada na zona rural da cidade de Cascavel, Paraná, onde estão localizadas outras cinco usinas solares fotovoltaicas, todas com rastreadores solares, que giram de leste à oeste. O local tem como coordenadas geográficas latitude 25°02'28,3" Sul e longitude 53°30'53,6" Oeste, com altitude de

aproximadamente 745m. A Figura 13 mostra a localização das usinas, destacando a orientação do norte geográfico.

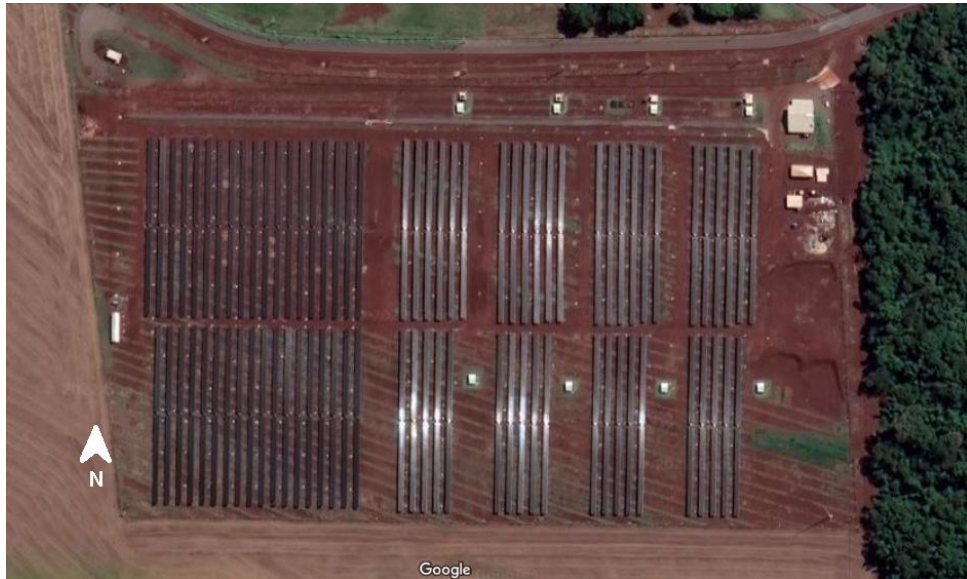


Figura 13 – Localização e orientação da Usina com rastreadores.
Fonte: Google Maps, 2022.

A usina com painéis fixos pode ser visualizada na Figura 14, com representação do norte geográfico na parte inferior, à esquerda. Os painéis estão inclinados a um ângulo de 25°.



Figura 14 - Localização e orientação da Usina com painéis fixos.
Fonte: Lewandoski, 2022.

3.2 Características técnicas dos módulos e dispositivos utilizados

Em relação à usina com rastreadores, a análise será feita na usina da esquerda, que possui potência instalada de 300 kVA, com total de 810 módulos, podendo ser visualizado na Figura 15.



Figura 15 – Ilustração e localização da usina com rastreador.
Fonte: Lewandoski, 2022.

A usina com painéis fixos possui a mesma potência instalada e quantidade de módulos da usina com rastreador, podendo ser visualizada na Figura 16.



Figura 16 – Usina com painéis fixos.
Fonte: Lewandoski, 2022.

Ambas as usinas utilizam os módulos da marca *Risen Solar Technology*, de 500W, conforme a Figura 17. As especificações técnicas são apresentadas na Tabela 1, consoante as condições padronizadas de teste, já citadas anteriormente.



Figura 17 - Módulos fotovoltaico *Risen Solar Technology* – RSM150-8-500M.
Fonte: A própria autora.

Tabela 1 – Especificações técnicas do módulo RSM150-8-500M

Características		Especificações
Modelo	-	RSM150-8-500M
Classe	-	A
Máxima Potência	P_{max}	500W
Coeficiente de temperatura para a Potência	T_{pm}	-0,37%/°C
Temperatura de Operação	-	-40°C ~ +85°C
Tensão de máxima Potência	V_{mp}	42,45 V
Corrente de máxima Potência	I_{mp}	11,80 A
Corrente de Curto Circuito	I_{sc}	12,50 A
Tensão de Circuito Aberto	V_{oc}	51 V
Tensão máxima do Sistema	V_{sist}	1500 V
Eficiência do Módulo	η	20,3%
Tipo de Célula	-	Monocristalino
Número de Células	-	150 (5x15 + 5x15)
Peso Total	-	28,5 Kg

Fonte: Adaptado de *Risen Solar Technology*.

O sistema rastreador possui um eixo, contendo um servo motor para fazer movimento de inclinação, de leste à oeste. O motor é alimentado por 24 V em corrente contínua e há um painel exclusivo para fazer a alimentação desse motor. Esse sistema possui também um controlador de carga e duas baterias, sendo a estrutura da marca

Sparkin, que podem ser visualizados na Figura 18. Ao contrário de muitos rastreadores que se baseiam na irradiação solar ao longo dia, para que possam se movimentar e estar sempre perpendiculares aos raios solares, esse rastreador se baseia por um sistema de hora, dia, mês e ano.



Figura 18 - Sistema rastreador: a) Motor b) Módulo para alimentação do motor
Fonte: A própria autora.

Abaixo, serão apresentados alguns dos equipamentos utilizados e suas respectivas especificações técnicas.

Como os sistemas são conectados à rede e produzem energia em corrente contínua, é necessário transformar essa corrente em corrente alternada. Para isso, utiliza-se um inversor, que pode ser visualizado na Figura 19:. A usina com rastreadores possui três inversores de 100kW, onde suas especificações técnicas podem ser visualizadas na Tabela 2. A usina com painéis fixos possui cinco inversores do mesmo modelo, mas com uma potência de 60kW cada um.



Figura 19: Inversor Sofar de 100 kW.
Fonte: New Solar (2022)

Tabela 2 - Especificações técnicas do Inversor Sofar 100kW

Características	Especificações
Modelo	100KTL
Tensão Nominal de Entrada (CC)	600V
Faixa de Tensão em MPPT (CC)	500-850V
Potência Nominal (CA)	100 kW
Potência Máxima (CA)	110 kVA
Corrente Máxima de Saída (CA)	160 A
Faixa de tensão da rede (CA)	310 - 480 Vca
Eficiência Máxima	98,6%

Fonte: Sofar Solar.

Os disjuntores são dispositivos de proteção que desenergizam o circuito caso ocorra uma sobrecarga ou curto-circuito. Quando isso acontece, ele desarma e evita que os danos sejam transferidos ao resto do sistema. Os disjuntores utilizados nos circuitos são da marca ABB, como é possível visualizar na Figura 20 - Disjuntor , com especificações técnicas conforme Tabela 3.



Figura 20 - Disjuntor ABB XT4N250.
Fonte: ABB (2022)

Tabela 3 - Especificações técnicas do disjuntor XT4N250

Características	Especificações
Modelo	TMAX XT4N250
Tensão Nominal	690 V
Frequência Nominal	50/60 Hz
Corrente Nominal	250 A
Tensão Suportável de Impulso	8 kV
Corrente Instantânea de Curto Circuito	1250 - 2500 A
Tensão Nominal Máxima	1000 V

Fonte: Alfatronic, 2022.

É interessante destacar que a usina com rastreadores possui um anemômetro instalado no local. Pelo fato dos painéis de deslocarem durante o dia, poderiam ocorrer momentos em que esse deslocamento seria de forma contrária à direção do vento, o que poderia causar algum dano ao sistema se esse vento fosse muito forte. Então, caso esteja ventando muito, por volta dos 60Km/h ou mais, os painéis se deslocam para uma posição de segurança, onde eles ficam estacionados com a face dos painéis virados para cima, ou seja, os painéis ficam na horizontal.

3.3 Aquisição de dados

Para a obtenção e armazenamento de dados elétricos, foi utilizado um CLP, da marca Delta, conforme a Figura 21.



Figura 21 - CLP Delta
Fonte: A própria autora.

Nas residências, há um medidor instalado pela concessionária de energia local, que mede o consumo de energia elétrica. Em um sistema fotovoltaico, há um medidor também, chamado de medidor bidirecional, que serve para registrar o consumo de energia elétrica (chamada de direta) e para registrar a energia que está sendo injetada na rede da concessionária (chamada de reversa) (ELYSIA ENERGIA SOLAR, 2022). É com base nesse medidor que acontece a compensação de créditos.

Para Zampiva (2021), esse dispositivo é projetado para operar em redes bifásicas ou trifásicas, além de registrar o consumo de energia ativa e reativa.

O medidor utilizado nesse sistema é da marca Landis+Gyr, como mostrado na Figura 22. Figura 22 - Medidor Bidirecional Landis+Gyr E750. As especificações técnicas seguem na Tabela 4.



Figura 22 - Medidor Bidirecional Landis+Gyr E750.
Fonte: Bruver (2022)

Tabela 4 - Especificações técnicas do Medidor Bidirecional

Características	Especificações
Modelo	E750
Tensão Nominal	120/240V
Corrente Máxima	10 A
Temperatura de Operação	-10°C até +70°C
Classe	D (0,2) ou C (0,5)
Frequência	50/60 Hz

Fonte: Bruver (2022).

3.4 Métodos

3.4.1 Determinação da energia elétrica gerada nas usinas

Foram obtidos os dados de geração anual de energia elétrica de ambas as usinas, por meio do CLP mencionado anteriormente.

3.4.2 Custo da implantação das usinas

Foram levantados os custos de implantação de ambas as usinas, incluindo mão de obra, fixação, equipamentos e demais acessórios, assim como os valores gastos com manutenção e outras despesas. Dentre as despesas e manutenções, também estão inclusos os custos com lavagem dos painéis, reaperto dos mancais (para a usina com rastreadores) e a revisão dos inversores após o oitavo ano de uso. Cada fabricante recomenda uma periodicidade da lavagem dos painéis, que pode ser duas, três e até quatro vezes ao ano. No caso da usina com painéis fixos, são necessárias quatro lavagens por ano, enquanto a usina com rastreadores necessita somente de duas lavagens por ano. A Tabela 5 mostra o custo total de implantação de cada usina:

Tabela 5 – Custo de implantação das Usinas

Sistema	Valor do investimento (R\$)
Usina com rastreadores	2.147.871,59
Usina com painéis fixos	1.195.314,67

3.4.3 Custo evitado com a geração fotovoltaica nas usinas

O custo evitado com a geração de energia dos sistemas fotovoltaicos foi obtido por meio do potencial de geração de energia elétrica multiplicada pelo valor de venda do MWh, do atual contrato das usinas, tendo em vista que as duas usinas se encaixam no Ambiente de Contratação Livre. O custo evitado pode ser calculado conforme a Equação 3:

$$\text{Custo Evitado} = \text{Energia gerada} \times \text{Valor do MWh} \quad 3$$

3.4.4 Viabilidade econômica de cada sistema

A avaliação de viabilidade econômica será feita com base no valor presente líquido (VPL) que, segundo Silva e Fontes (2005), é definido pela soma algébrica de

todas as entradas e saídas de recursos financeiros. Ele expressa o valor presente do fluxo de caixa, sejam saídas ou entradas, menos o valor do investimento inicial do projeto. Se o projeto em análise apresentar o VPL maior que zero, ou seja, positivo, significa que o mesmo é viável economicamente. Caso contrário, o projeto torna-se inviável. O projeto que apresentar o maior valor de VPL é o melhor.

O VPL pode ser calculado pela Equação 4:

$$VPL = \sum_{t=1}^n \frac{FC_t}{(1 + TMA)^t} \quad 4$$

Onde:

FC_t: Fluxo de caixa;

TMA: Taxa de desconto (taxa mínima de atratividade);

t: Número de anos.

Para a análise econômica, também será utilizado o método do *payback* descontado. O fluxo de caixa nesse método é a diferença entre as receitas e as despesas, então, conforme as receitas vão entrando no fluxo de caixa, que inicia com o capital investido, esse valor vai diminuindo, fazendo com que em determinado tempo, o saldo atinja o valor zero ou valor negativo, representando que o tempo de retorno do investimento foi atingido.

Para o cálculo do *payback* descontado, serão calculados alguns parâmetros, como a taxa mínima de atratividade (TMA) e a variação média anual da tarifa de energia elétrica dos últimos 5 anos, somada à depreciação energética.

A Selic é uma taxa básica de juros da economia, sendo muito utilizada como instrumento de política monetária do Banco Central no controle da inflação. Ela também serve como base para a rentabilidade de investimentos. Então, a taxa Selic impacta diretamente no valor do retorno investido no mercado brasileiro. Com isso, foi utilizada uma TMA baseada na média SELIC dos últimos 10 anos, chegando a um valor de 8,6% (BCB,2022). A variação média da tarifa de energia será calculada através da média de cada ano, durante os últimos 5 anos.

Tendo em vista que um sistema de geração fotovoltaico perde uma certa eficiência ao longo dos anos, será considerada uma taxa de 0,8% por ano. Com isso,

da variação média da tarifa de energia será descontado esse valor.

Outro detalhe a ser levado em conta é a vida útil de cada equipamento. Para os inversores, foi considerado uma vida útil de 10 anos e para os módulos fotovoltaicos, 25 anos.

3.4.5 Comparação da geração de energia entre os dois sistemas

Após serem coletados os dados de geração de energia elétrica de cada sistema, eles serão comparados. Será verificado qual sistema possui um maior valor de energia gerada ao longo do ano avaliado.

3.4.6 Comparação da viabilidade econômica entre os dois sistemas

Após levantados os índices de VPL e TIR, assim como o tempo de retorno de cada sistema, os mesmos serão comparados a fim de avaliar qual dos sistemas costuma ser mais economicamente viável. Também será determinado o sistema que possui um tempo de retorno menor.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Geração de energia elétrica e custo evitado

É possível observar a geração mensal das usinas na Figura 23, durante o período de um ano.

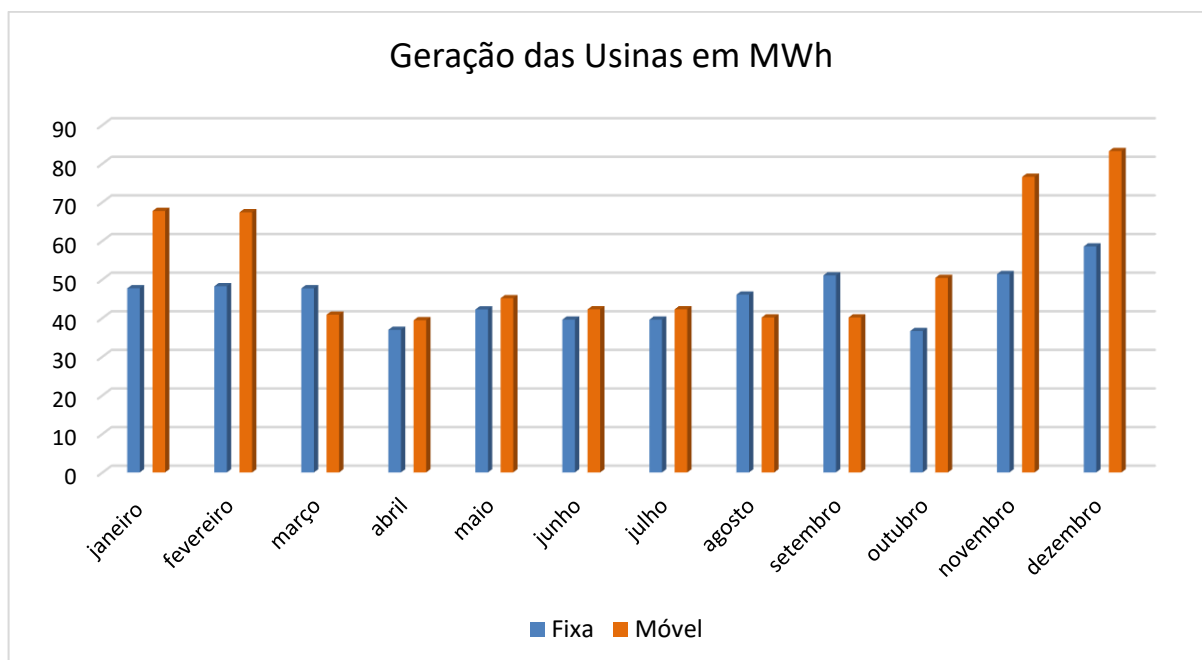


Figura 23 – Geração de Energia Elétrica no ano de 2022.
Fonte: A própria autora, 2022.

Ao comparar os valores, facilmente, pode-se notar que a usina com rastreadores gera um valor muito maior de energia elétrica, comparando mês a mês. Ambas as usinas tiveram maior geração de energia no mês de dezembro, sendo 83,2MWh gerados pela usina com rastreadores e 58,5MWh pela usina com painéis fixos. No mês de dezembro, a usina com rastreadores gerou 29,68% de energia a mais que a usina com painéis fixos.

Zacariah *et al.* (2015) utilizaram um sistema rastreador de duplo eixo, com implementação de lógica Fuzzy e obteve uma melhoria de 18,13% na eficiência do sistema quando comparado a um sistema de painéis fixos. Bakos (2006) projetou um sistema rastreador de dois eixos e obteve 46,46% de ganho no sistema, comparado com um sistema fixo, em condições climáticas normais. Hoffmann *et al.* (2018)

compararam um sistema fixo e um sistema móvel com dois eixos e obteve ganhos mensais de geração de energia em torno de 17,2 a 31,1% em relação ao sistema fixo.

A Tabela 6 mostra os três meses com maior geração para cada uma das usinas.

Tabela 6 – Meses com maior geração de Energia Elétrica

Sistema	Mês	Geração Mensal
Usina com rastreadores	Dezembro	83,2 MWh
	Novembro	76,5 MW/h
	Janeiro	67,7 MWh
Usina com painéis fixos	Dezembro	58,5 MWh
	Novembro	51,3 MWh
	Setembro	51,0 MWh

Conforme a tabela acima, observa-se uma significativa diferença de geração de energia, entre os três meses citados. Ao compararmos a geração do mês de novembro, que foi o segundo mês mais produtivo, observa-se que os painéis móveis obtiveram um desempenho 32,9% maior.

Comparando os três meses de menor geração, obteve-se os valores mostrados na Tabela 7:

Tabela 7 – Meses com a menor geração de Energia Elétrica

Sistema	Mês	Geração Mensal
Usina com rastreadores	Abril	39,4 MWh
	Agosto	40,1 MWh
	Setembro	40,11 MWh
Usina com painéis fixos	Outubro	36,6 MWh
	Abril	36,9 MWh
	Junho	39,5 MWh

Nos meses de menor geração, nota-se que a diferença entre as duas usinas é bem menor. A menor geração da usina móvel, com 39,4MWh no mês de abril, se

comparada a menor geração da usina fixa, com 36,6MWh no mês de outubro, obteve uma diferença de 7,1%. Comparando os meses de abril de ambas as usinas, a usina móvel atingiu um desempenho de 6,34% a mais que a usina fixa.

A Tabela 8 mostra a capacidade de geração das duas usinas, durante o ano de 2022 e a média mensal de cada uma delas.

Tabela 8 – Capacidade de geração das Usinas

Sistema	Geração Anual	Geração Média Mensal
Usina com rastreadores	635,21 MWh	52,93 MWh
Usina com painéis fixos	545,13 MWh	45,43 MWh

Tal como mostrado na tabela anterior, na geração anual, a usina móvel obteve um desempenho 14,18% maior que a usina fixa. Com os dados da geração anual, pôde-se calcular o custo evitado de cada usina. A Tabela 9 indica esses valores.

Tabela 9 – Custo evitado com a geração de energia das usinas

Usina	Custo evitado de Energia (R\$/ano)
Usina com rastreadores	285.844,50
Usina com painéis fixos	245.308,50

Segundo a tabela anterior, nota-se uma diferença de R\$40.536,00 no custo evitado entre as usinas, por ano. Ao longo dos 25 anos, que foi o período considerado para a análise econômica, esse valor corresponde a uma diferença de R\$1.013.400,00, o que impacta diretamente no fluxo de caixa, e consequentemente, nos indicadores econômicos calculados.

4.2 Análise econômica

Nas Figura 24 e Figura 25, são mostrados os fluxos de caixa de ambas as usinas.

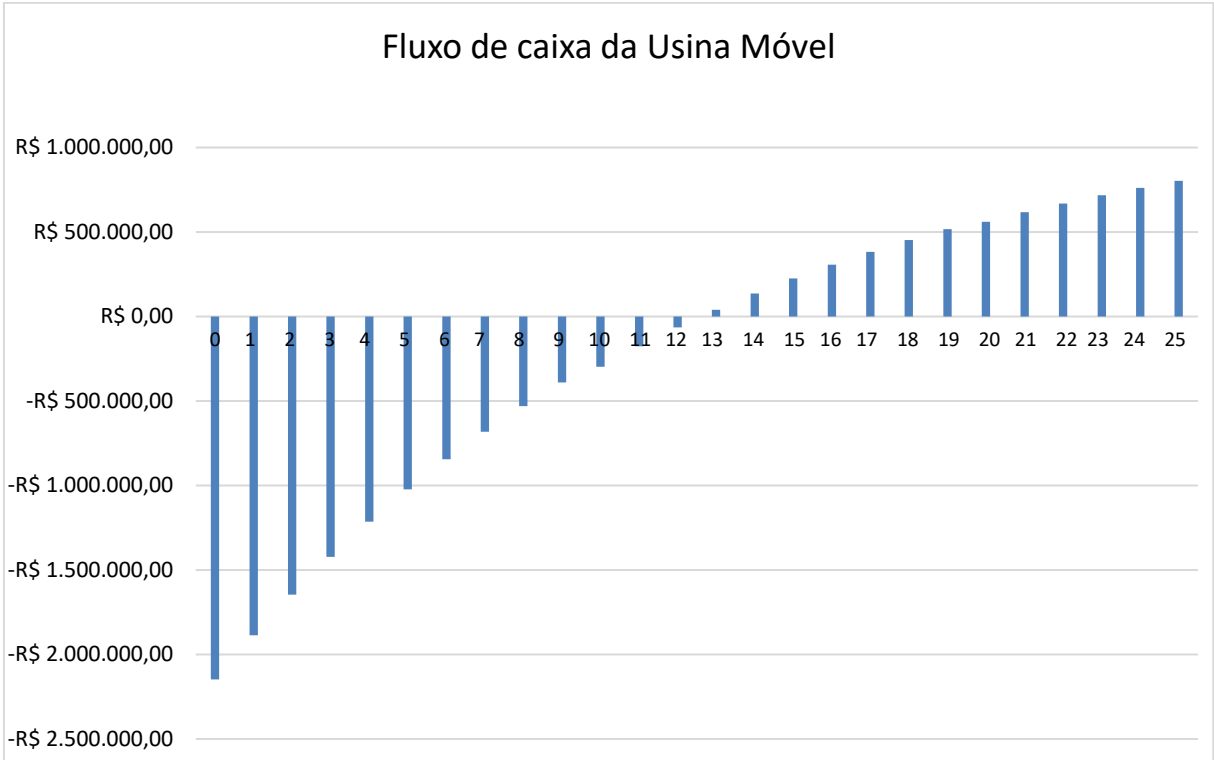


Figura 24 – Gráfico do Fluxo de Caixa da Usina com Rastreadores
 Fonte: A própria autora.

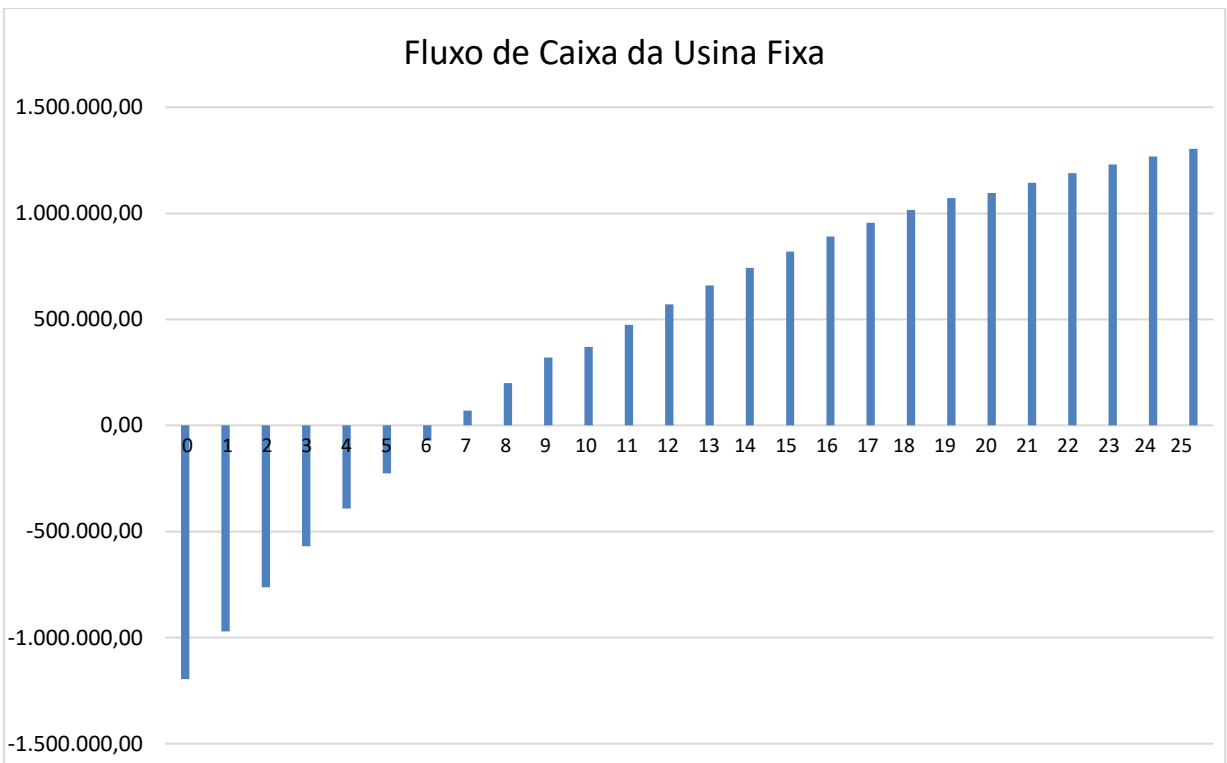


Figura 25 – Gráfico do Fluxo de Caixa da Usina com Painéis Fixos
 Fonte: A própria autora.

Observando os fluxos de caixa acima, conclui-se que o tempo de retorno para a usina móvel e a usina fixa, foi de 13 anos e 7 anos, respectivamente. Então, embora a usina com rastreadores possua uma maior geração de energia elétrica, o que aumenta o custo evitado com a energia elétrica, no caso de uma análise de viabilidade econômica, ela ainda possui altos custos de instalação, sem contar nas manutenções que representam boa parte dos custos operacionais.

Com base no fluxo de caixa de cada usina, foi calculado o VPL de cada uma delas, levando em consideração uma TMA de 8,6% a.a., com um horizonte temporal de 25 anos. Os valores são mostrados na Tabela 10.

Tabela 10 – Valor presente líquido das usinas

Usina	VPL
Usina com rastreadores	R\$ 802.647,46
Usina com painéis fixos	R\$ 1.303.752,23

É possível notar que a usina com painéis fixos possui um maior valor presente líquido, chegando a uma diferença de R\$501.104,77 em relação à usina móvel, sendo necessário levar em conta o que já foi mencionado em relação ao custo de implantação dela, que é bem menor do que a usina com rastreadores. Outro fator, é que a usina com rastreadores possui mais custos com manutenção.

A Tabela 11 mostra o cálculo das taxas internas de retorno, onde é possível notar que a taxa interna de retorno da usina com painéis fixos também é maior.

Tabela 11 – Taxa interna de retorno das usinas

Usina	TIR
Usina com rastreadores	12,17%
Usina com painéis fixos	19,65%

De acordo com a tabela anterior, é possível concluir que há uma diferença de 38,06% entre as taxas internas de retorno das usinas.

Por fim, o último indicador calculado foi o custo nivelado de energia (LCOE), que obteve os resultados mostrados na Tabela 12.

Tabela 12 – Custo Nivelado de Energia das Usinas em kWh

Usina	LCOE
Usina com rastreadores	R\$ 0,15
Usina com painéis fixos	R\$ 0,11

O referido índice foi calculado tendo em vista uma vida útil de 25 anos para a geração de energia elétrica, que é o valor da vida útil dos painéis fotovoltaicos. Podemos observar que a usina com painéis fixos possui um menor custo por kilowatt-hora, chegando a um valor de R\$0,11/kWh. E a usina com rastreadores obteve um valor de R\$ 0,15/kWh. Bhakta e Mukherjee (2017) analisaram a viabilidade de sistemas fotovoltaicos autônomos fixos e móveis de dois eixos, na região nordeste da Índia, onde ainda há muitos locais sem energia elétrica. Eles alcançaram o índice de LCOE em uma faixa de 0,383\$ à 0,497\$/kWh. Kassem *et. al.* (2021) desenvolveram um sistema fotovoltaico com rastreadores de dois eixos, em cidades árabes. Eles obtiveram um custo médio de 0,033\$ à 0,047\$/kWh, para a produção de energia. (Cotação: 1USD = R\$5,45).

5. CONCLUSÕES

Com base nas análises viabilizadas no estudo proposto, verifica-se que é possível implantar um sistema solar fotovoltaico para geração de energia elétrica, seja ele com painéis fixos ou com rastreadores solares, utilizando-se do ambiente de contratação livre. Ambos os tipos de usinas estudadas se mostraram viáveis economicamente.

Devido ao alto custo de implantação de uma usina com rastreadores solares, podemos observar que o valor presente líquido, quando comparado à usina com painéis fixos, é um pouco menor, alcançando o valor de R\$ 802.647,46. Já a usina com painéis fixos obteve um valor presente líquido de R\$ 1.303.752,23.

A usina com rastreadores necessita de 13 anos para que o valor investido possa ser recuperado, ao passo que a usina com painéis fixos precisa somente de 7 anos para que isso aconteça. Essa grande diferença de tempo de retorno pode estar atrelada a vários fatores, como o custo inicial do investimento, custos com manutenção e a quantidade de geração de energia elétrica.

A taxa interna de retorno, que deve ser maior que a TMA utilizada, atingiu o valor de 12,17% para a usina com rastreadores e 19,65% para a usina com painéis fixos, o que são valores esperados com base no valor presente líquido calculado.

O cálculo do custo nivelado de energia para a usina com painéis fixos foi de R\$ 0,11 e para a usina com rastreadores foi de R\$ 0,15. Deve-se reconhecer que esse indicador é importante e faz parte da análise, mas também não deve ser utilizado individualmente para tomar decisões sobre a análise da viabilidade econômica de um projeto.

Para trabalhos futuros, aconselha-se analisar em quais casos uma usina com rastreadores solares não seria viável em relação a uma usina fixa, tendo em vista seu alto custo de implantação. Ademais, é fundamental verificar qual o mínimo de potência instalada para que uma usina com rastreadores solares seja viável economicamente. Recomenda-se também fazer uma avaliação dos tipos de sistemas de controle para o rastreamento, verificando qual deles é mais preciso e eficiente.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABB (2022). Disponível em: <https://new.abb.com/products/pt/1SDA068090R1/xt4n-250-tma-200-2000-3p-f-f>. Acesso em: 24 de junho de 2022.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL/ABSOLAR, 2022. **Energia Solar Fotovoltaica no Brasil**. Infográfico ABSOLAR.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **Resolução normativa nº 687, de 24 de novembro de 2015**. Brasil, 2015. 25p. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2015687.pdf>>. Acesso em: 25 de junho de 2022.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **Resolução normativa nº 482, de 17 de abril de 2012**. Brasil, 2012. 14p. Disponível em: <<https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>>. Acesso em: 30 de novembro de 2022.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **Resolução normativa nº 1000, de 7 de dezembro de 2021**. Brasil, 2021. 272p. Disponível em: <<https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>>. Acesso em: 30 de novembro de 2022.

ALONSO-GARCIA, M.C.; RUIZ, J.M.; CHENLO, F. Experimental study of mismatch and shading effects in the I–V characteristic of a photovoltaic module. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, v.90, p. 329–340, 2006.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. **Guia do Empreendedor de Pequenas Centrais Hidrelétricas**. Brasília, 2003. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/livros/-/asset_publisher/kJiuwvnAZ2eL/content/guia-do-empreendedor-de-pequenas-centrais-hidreletricas>. Acesso em: 27 outubro de 2020.

AQUINO, P. S. A.; SILVA, J. D. C. Geração Solar. **Brazilian Applied Science Review**. Pará, 2018. Disponível em: <<https://www.brazilianjournals.com/index.php/BASR/article>>. Acesso em: 06 novembro de 2020.

ASSAF NETO, A. 2009. **Matemática financeira e suas aplicações**. Editora Atlas S.A. 11 ed. São Paulo.

AZMAN, A. A. b. **A Solar Tracking System With Multiple Parameter Input For Maximize Efficiency**. 2014. Dissertação - Universiti Teknologi Malaysia, Malasia, 2014.

BAIRI, A. 1990. **Solar and Wind Technology**.

BAKOS, G. C. Design and construction of two-axis sun tracking system for parabolic trough collector (PTC) efficiency improvement. **Renewable Energy**, v.31, p.2411-

2421, 2006.

BARRETO, E. J. F. **Tecnologias de energias renováveis: Soluções energéticas para a Amazônia**. 1st ed. Brasília: Ministério de Minas e Energia (MME); 2008.

BANCO CENTRAL DO BRASIL - BCB. Taxas de juros básicas – Histórico. Disponível em: <<https://www.bcb.gov.br/controleinflacao/historicotaxasjuros>>. Acesso em: 05 jan. 2023.

BEZERRA, F. D. **Micro e minigeração distribuída**. Banco do Nordeste. Caderno Setorial Etene, n.155, 15p, 2021.

BHAKTA, S.; MUKHERJEE, V. Techno-economic viability analysis of fixed-tilt and two axis tracking stand-alone photovoltaic power system for Indian bio-climatic classification zones. **Journal of Renewable and Sustainable Energy**, v.9, 2017.

BORBA, A. J. V., et al. **Guia para eficiência energética nas edificações públicas**. Centro de Pesquisas de Energia Elétrica – CEPEL; Ministério de Minas e Energia – MME – Rio de Janeiro, 2015. 229 p.

BÜHLER, A. J.; SANTOS, F. H.; GABE, I. J. Uma revisão sobre as tecnologias fotovoltaicas atuais. **VII Congresso brasileiro de energia solar**. Gramado, Rio Grande do Sul. Abr. 2018.

CASTRO, R. M. G. **Introdução à energia fotovoltaica**. Instituto Superior Técnico. Universidade Técnica de Lisboa. Portugal, 2007, 2. Ed.

Climate-data.org. Clima: Cascavel, Paraná. Disponível em: <https://pt.climate-data.org/america-do-sul/brasil/parana/cascavel-5965/>

CSR Energia Solar. 2022. Disponível em: <http://www.csrenergiasolar.com.br/blog/sistema-fotovoltaico-conectado-a-rede---sfcron-grid>. Acesso em: 22 de junho de 2022.

DALVI, G. G. et al. **Feed-in Tariff como alternativa de incentivo ao desenvolvimento da geração de energia elétrica por fontes renováveis no Brasil**. 2017. 88p. Dissertação – Universidade Federal de Viçosa, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola. 2017.

DANTAS, S. G.; POMPERMAYER, F. M. **Viabilidade econômica de sistemas fotovoltaicos no Brasil e possíveis efeitos no setor elétrica**. Texto para discussão, n.2388, Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA), Brasília, 2018.

DASSI, J. A., et al. Análise da viabilidade econômico-financeira da energia solar fotovoltaica em uma instituição de ensino superior do sul do Brasil. **Anais do Congresso Brasileiro de Custos – ABC**. Instituição de Ensino Superior do Sul do Brasil, 2015.

DUFFIE, J.A.; BECKMAN, W. A. **Solar engineering of thermal processes**, 2nd ed.

Wiley; 1991.

Elysia Energia Solar. Conhecendo o sistema fotovoltaico: relógio bidirecional. Disponível em: <<https://elysia.com.br/relogio-bidirecional>>. Acesso em: 24 de junho de 2022.

Energia3s. Composição dos módulos fotovoltaicos. 2022. Disponível em: <<https://energia3s.com.br/2021/06/07/composicao-dos-modulos-fotovoltaicos>>. Acesso em: 22 de junho de 2022.

Empresa de Pesquisa Energética - EPE. **Eficiência Energética e Geração Distribuída para os próximos 10 anos (2015-2024)**. Relatório Técnico, Rio de Janeiro, 2016.

FACURI, M. F. **A implantação de usinas hidrelétricas e o processo de licenciamento ambiental: a importância da articulação entre os setores elétrico e de meio ambiente no Brasil**. 2004. 77p. Dissertação - Universidade Federal de Itajubá, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia. 2004.

FEDRIZZI, M. C. **Fornecimento de Água com Sistemas de Bombeamento Fotovoltaicos**. 1997. 151p. Dissertação – Universidade de São Paulo, Programa de Pós-Graduação em Energia. 1997.

FERREIRA, M. J. G. **Inserção da Energia Solar Fotovoltaica no Brasil**. 1993. 155p. Dissertação - Universidade de São Paulo, Programa de Pós-Graduação em Energia. 1993.

HOFFMANN, et al. Monthly profile analysis based on a two-axis solar tracker proposal for photovoltaic panels. **Renewable Energy**, v.115, p.750-759, 2018.

IEA – International Energy Agency, 2010. World Energy Outlook 2010.

KASSEM, Y.; Gokçekus, H.; Lagili, H. S. A. A Techno-Economic Viability Analysis of the TwoAxis Tracking Grid-Connected Photovoltaic Power System for 25 Selected Coastal Mediterranean Cities. **Engineering, Technology & Applied Science Research**, v.11, p.7508-7514, 2021.

LABREN (2022). Disponível em: <http://labren.ccst.inpe.br/atlas2_tables/PR_glo.html>. Acesso em: 23 de junho de 2022.

LAMIGUEIRO, O. P. **Energia solar fotovoltaica**, 2013. Disponível em: <https://www.researchgate.net/profile/Oscar-Perpinan-Lamigueiro/publication/249012821_Energia_Solar_Fotovoltaica/links/02e7e51e80783f1d9f000000/Energia-Solar-Fotovoltaica.pdf>. Acesso em: 25 de março de 2022.

LEWANDOSKI, et al. Study of the efficiency of the Solar Tracker system compared to the fixed solar generation system. **Research, society and Development**, v.11, n.6, 2022.

MANIENIVAN, V.; THAMBIDURAI, M.; SELVAKUMAR, R. Study on energy crisis and the future of fossil fuels. **Proc. SHEE**, p. 2234-3689, 2009.

MARQUEZAN, L. H. F.; BRONDANI, G. **Análise de investimentos**. Revista eletrônica de contabilidade, v.3, n.1, 2006.

MELO, A. G., et al. Development of a closed and open loop solar tracker technology. **Acta Sci. Technology**, v.39, p.177–183, 2017.

MICHAEL, S., et al. **Global Market Outlook for Solar Power/2018–2022**. Global Solar Council, 2022.

MOHAMMADI, et al. Economic feasibility of developing grid-connected photovoltaic plants in the southern coast of Iran. **Energy**, n.156, p. 17-31, 2018.

MONDOL, J. D. et al. The impact of array inclination and orientation on the performance of a grid-connected photovoltaic system. School of the Built Environment, University of Ulster, Northern Ireland. **Renewable Energy**, v.32, n.1, p.118-140, 2007.

Neosolar. Energia solar fotovoltaica. 2022. Disponível em: <<https://www.neosolar.com.br/aprenda/saiba-mais/energia-solar-fotovoltaica>>. Acesso em: 22 de junho de 2022.

New Solar. String inverter (three phase) Sofar 100KTL. Disponível em: <https://newsolar.bg/en/mrezhovi-trifazen-invertor-sofar-100kti-100kw.html>. Acesso em: 24 de junho de 2022.

OLIVEIRA, H. E. **Tecnologia fotovoltaica em filmes finos (películas delgadas)**. 2008. 46p. Dissertação - Universidade Federal de Lavras, Programa de Pós-Graduação em Formas alternativas de Energia. 2008.

OLIVEIRA, S. M. M.; FRANCISCO, A. C.; ESMANHOTO, E. **O uso das técnicas de valor presente líquido, taxa interna de retorno e payback descontado: um estudo de viabilidade de investimentos no grupo Breda Ltda**. Desafio online, Campo Grande, v.3, n.1, 2015.

OZANSKI, A. C. **Viabilidade de implantação de fazendas fotovoltaicas rurais com relação a produção agropecuária**. 2021. 52 p. Dissertação – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2021.

PEREIRA, E. B., et al. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. 2.ed. São José dos Campos. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2017.

PERPEÑÁN, O. Statistical analysis of the performance and simulation of a two-axis tracking PV system. **Solar Energy**, v.83, p.2074-2085, 2009

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. Rio de Janeiro: Cepel-Cresesb, 2014.

RESEARCHGATE, 2023. Localização da cidade de Cascavel.

ROCHA, L. R. R.; MONTEIRO, M. A. G. Eletrobrás. **Guia técnico de gestão energética**, 2005. 188 p. Disponível em: <<http://docplayer.com.br/682973-Guia-tecnico-gestao-energetica.html>>. Acesso em: 01 de junho de 2021.

SILVA, M. L.; FONTES, A. A. Discussão sobre os critérios de avaliação econômica: Valor Presente Líquido (VPL), Valor Anual Equivalente (VAE) e Valor Esperado da Terra (VET). **Revista Árvore**, v.29, n.6, p.931-936, 2005.

SOARES, M.; MEDEIROS COSTA, H. K. O segmento de distribuição de energia elétrica no Brasil: uma avaliação das crises hídricas enfrentadas em 2001 e 2021. **Conjecturas**, v. 22, p. 307–321.

VILLALVA, M. G.; GAZOLI, J. R. **Energia Solar Fotovoltaica: Conceitos e Aplicações – Sistemas Isolados e Conectados à Rede**. São Paulo: Érica, 2012. 224p.

ZAKARIAH, A. et al. Medium Size Dual-Axis Solar Tracking System With Sunlight Intensity Comparison Method and Fuzzy Logic Implementation. **Jurnal Teknologi**, p.145-157, 2015.

ZILLES, R. et al. **Sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica**. São Paulo: Oficina de Textos, 2012.

WALTER, A. **Fomento à geração elétrica com fontes renováveis de energia no meio rural brasileiro: barreiras, ações e perspectivas**. Encontro de Energia no Meio Rural, 3., 2000. Disponível em: <http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=MSC0000000022000000100028&lng=pt&nrm=abn>. Acesso em 12 de janeiro de 2023.