



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE ARQUITETURA E URBANISMO

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ARQUITETURA E URBANISMO

REINALDO DE JESUS DA COSTA FARIAS

**PROPOSTA DE GERAÇÃO FOTOVOLTAICA PARA O IFB *CAMPUS*
TAGUATINGA E SEUS IMPACTOS ECONÔMICOS E AMBIENTAIS**

BRASÍLIA/ DF:

2024

REINALDO DE JESUS DA COSTA FARIAS

**PROPOSTA DE GERAÇÃO FOTOVOLTAICA PARA O IFB *CAMPUS*
TAGUATINGA E SEUS IMPACTOS ECONÔMICOS E AMBIENTAIS**

Dissertação de Mestrado submetida ao departamento de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de Brasília como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de mestre.

Professor Orientador: D. Sc. João da Costa Pantoja

BRASÍLIA/ DF:

2024

FICHA CATALOGRÁFICA

FARIAS, Reinaldo de Jesus Da Costa. Proposta de geração fotovoltaica para o IFB *campus* Taguatinga e seus impactos econômicos e ambientais, 2024. 138 p., 210 x 297 mm (PPGFAU/ UnB, Mestre, Arquitetura e Urbanismo, 2024). Dissertação de Mestrado - Universidade de Brasília, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo. 1. Fotovoltaica 2. IFB 3. *campus* Taguatinga 4. Impactos econômicos e ambientais I. PPGFAU/ UnB II. Mestre

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

FARIAS, R. J. C. (2024). Proposta de geração fotovoltaica para o IFB *campus* Taguatinga e seus impactos econômicos e ambientais. Dissertação de Mestrado, Publicação G.TD-XXX/05, Departamento de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 129 p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Reinaldo de Jesus da Costa Farias.

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO: Proposta de geração fotovoltaica para o IFB *campus* Taguatinga e seus impactos econômicos.

GRAU: Mestre ANO: 2024.

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta Dissertação de Mestrado para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

Reinaldo de Jesus da Costa Farias.

QNM 40, Área Especial 1.

72146-050 - Taguatinga/ DF - Brasil

Fone: (61) 2103-2204.

TERMO DE APROVAÇÃO

REINALDO DE JESUS DA COSTA FARIAS

**PROPOSTA DE GERAÇÃO FOTOVOLTAICA PARA O IFB *CAMPUS*
TAGUATINGA E SEUS IMPACTOS ECONÔMICOS E AMBIENTAIS**

Defesa de Dissertação de Mestrado apresentada à seguinte Banca Examinadora:

Prof. D. Sc. João da Costa Pantoja
Orientador (UnB)

Prof. D. Sc. Iberê Pinheiro de Oliveira
Examinador Externo (Correios)

Prof. D. Sc. Leonardo da Silveira Pirillo Inojosa
Examinador Interno (UnB)

Brasília, 20 de novembro de 2024

Dedico esta Dissertação a todos aqueles que buscam um mundo melhor, especialmente meus caros alunos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, nosso criador, o qual permitiu-me chegar até aqui.

Aos meus pais, Antônio Negrão Farias (*in memorian*) e Maria Piedade da Costa e irmãos: Rildo, Rideci, Rosinaldo, Rosângela e Reginaldo por sempre me incentivarem e acreditarem em mim, minha esposa Gesiane Farias por sempre torcer e acreditar em mim, paciência e compreensão durante todo o percurso deste mestrado. Aos meus queridos sobrinhos Ranieri, Raissa, Gabriel, Benjamim, Davi e Francisco.

À Universidade de Brasília, pela oportunidade de cursar um mestrado tão rico e valioso para a minha carreira profissional.

Ao meu orientador, Professor Dr. João da Costa Pantoja, por sua orientação, paciência e apoio incondicional ao longo deste processo. Agradeço também aos professores do PPGFAU-UnB que em muito contribuíram para a realização deste trabalho, especialmente ao Professor Dr. Márcio Buzar, Professora Dra. Chenia Figueiredo, Professor Dr. Caio Frederico e Silva, Professora Dra. Erondina Lima, cujas aulas e conselhos foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho e a todos os demais servidores que nos apoiaram.

Ao IFB, pela liberação para fazer este mestrado tão rico e construtivo para a minha profissão e atuação como docente. Aos amigos professores do IFB – *campus* Taguatinga e a todos os demais servidores que contribuíram para o meu crescimento acadêmico e profissional.

Aos caros pesquisadores do LABRAC - Laboratório de Reabilitação do Ambiente Construído da UnB.

Às instituições que forneceram dados e subsídios relevantes: MME, MCTI, ANEEL, GDF, CEB NEOENERGIA e CRESEB.

Ao Prof. Dr. Rogério Diógne, que desde a graduação tem me ajudado a crescer profissionalmente. Aos professores e amigos da Escola Técnica de Brasília, especialmente: Aramis, Cláudio Dornellas, Moisés Carneiro da Silva, Gilton (*in memorian*), Wilkar Anaximandro Ramirez, Ozias, Gabriel Antonio, Antonio Domingos, Janduí e demais.

Aos amigos da graduação: Keyson Patrick Amoras Silva, e família, Julierme Jorge de Sá Franco, Armando Silva Alves (*in memorian*) e demais amigos especiais.

Aos amigos conterrâneos do querido Estado do Pará: Alberto Silva Alves e família, Jorge Prudente Silva, Pedro Costa Ferreira, Dra. Maricilene Isaira e Família, Mário, Alexandre Maranata e demais amigos.

Sem deixar de mencionar aos especiais amigos que adquiri durante o mestrado: JB Carvalho (grandes foram suas contribuições) e família, Eudes e família, Pr Marinho e família e demais amigos, Cristiano e família, Israel Romão, Carlos Magno e família, Aílton e família, Pr Marcelo Magalhães e família, Werbethi Viana e família, à família Comunidade das Nações, Rosilda e família. São incontáveis os meus agradecimentos.

Por fim, agradeço a todos que indiretamente contribuíram para esta pesquisa, cujas contribuições foram essenciais para a realização deste estudo. Sem a colaboração de vocês, este trabalho não teria sido possível.

RESUMO

A presente dissertação explora a trajetória do uso de energias primárias, destacando a evolução desde as fontes renováveis naturais até os combustíveis fósseis, como carvão e petróleo, que impulsionaram o progresso industrial, mas também geraram graves impactos ambientais. Com o avanço das mudanças climáticas e a busca por sustentabilidade, a transição para fontes renováveis tornou-se essencial, sendo a energia solar fotovoltaica uma das alternativas mais promissoras.

O trabalho propõe uma análise financeira e ambiental para o *campus* Taguatinga do Instituto Federal de Brasília (IFB), avaliando três tipos de placas fotovoltaicas (policristalinas, bifaciais e amorfas) por meio do software RETScreen e dados de consumo de energia elétrica. Os objetivos incluem examinar a viabilidade econômica, o retorno do investimento e os benefícios ambientais, como a redução de emissões de gases de efeito estufa.

Além disso, a dissertação aborda as motivações educacionais e institucionais para adoção da energia solar em instituições de ensino, ressaltando seus impactos positivos na conscientização ambiental, redução de custos operacionais, inovação tecnológica e resiliência energética.

Por meio de uma metodologia estruturada em cinco capítulos, a pesquisa combina revisão bibliográfica, simulação de cenários e análise de dados, culminando em considerações finais e sugestões para futuros estudos. A relevância da temática reflete-se no papel estratégico das instituições educacionais na promoção de tecnologias sustentáveis e no alinhamento com metas nacionais e internacionais de energia renovável.

Palavras-Chave: Energia solar fotovoltaica; Sustentabilidade; Fontes renováveis de energia; eficiência energética; Instituições de ensino; Políticas ambientais; Redução de emissões; Viabilidade econômica; Simulação energética (RETScreen); Matrizes energéticas.

ABSTRACT

This dissertation explores the trajectory of primary energy use, highlighting the evolution from natural renewable sources to fossil fuels such as coal and oil, which have driven industrial progress but also caused significant environmental impacts. With the advancement of climate change and the pursuit of sustainability, the transition to renewable sources has become essential, with solar photovoltaic energy emerging as one of the most promising alternatives.

The study proposes a financial and environmental analysis for the Taguatinga *campus* of the Federal Institute of Brasília (IFB), evaluating three types of photovoltaic panels (polycrystalline, bifacial, and amorphous) using the RETScreen software and energy consumption data. The objectives include assessing economic feasibility, return on investment, and environmental benefits such as reducing greenhouse gas emissions.

Additionally, the dissertation addresses the educational and institutional motivations for adopting solar energy in educational institutions, emphasizing its positive impacts on environmental awareness, operational cost reduction, technological innovation, and energy resilience.

Through a methodology structured into five chapters, the research combines a literature review, scenario simulation, and data analysis, culminating in final considerations and suggestions for future studies. The relevance of this topic is reflected in the strategic role of educational institutions in promoting sustainable technologies and aligning with national and international renewable energy goals.

Key-words: Solar photovoltaic energy; Sustainability; Renewable energy sources; Energy efficiency; Educational institutions; Environmental policies; Emission reduction; Economic feasibility; Energy simulation (RETScreen); Energy matrices.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Histórico das Transições Energéticas (Fonte: Ministério de Minas e Energia via site thetricontinental.org)	25
Figura 2.2 - Impacto Socioeconômico Ambiental (Fonte: https://brasilecola.uol.com.br/o-que-e/geografia/o-que-e-impacto-ambiental.htm)	26
Figura 2.3 - Futuro das Energias Renováveis (Fonte: https://valor.globo.com/empresas/esg/noticia/2023/01/18/watt-verde-impulsiona-ebulicao-no-setor-de-energia-eletrica-no-brasil.ghtml)	29
Figura 2.4 - Mercado Fotovoltaico Mundial em 2023 (Fonte: Adaptado de Snapshot of Global Photovoltaic Markets, 2023).....	31
Figura 2.5 - Evolução do Preço Médio (US\$/MWh) da Fonte Solar Fotovoltaica em Leilões de Energia em Mercado Regulado (a) e Evolução da Fonte Solar Fotovoltaica no Brasil no Período de 2012 a Julho de 2024 (b)	34
Figura 2.6 - Ranking da Geração Distribuída no País da Potência Instalada (MW) Estadual, em 2024	39
Figura 2.7 - Ranking da Geração Distribuída no País da Potência Instalada (MW) Municipal, em 2024	40
Figura 2.8 - Órbita da Terra em torno do Sol, com seu eixo N-S. Fonte: CRESESB (2006) ...	41
Figura 2.9 - Distribuição espectral da radiação solar. Fonte: CRESESB, 2004	44
Figura 2.10 - Componentes da radiação solar ao nível do solo. Fonte: CRESESB, 2006.....	45
Figura 2.11 - Trajetória dos raios de Sol na atmosfera e definição do coeficiente de "Massa de Ar" (AM). Fonte: CRESESB (2006)	46
Figura 2.12 - Heliógrafo Capbell-Stokes. Fonte: CRESESB, 2006	47
Figura 2.13 - Célula de silício monocristalino. Fonte: CRESESB, 2006.....	56
Figura 2.14 - Célula de silício policristalino. Fonte: CRESESB, 2006.....	56
Figura 2.15 - Conexão de células em paralelo. Fonte: CRESESB, 2006	58
Figura 2.16 - Conexão de células em paralelo. Fonte: CRESESB, 2006	58
Figura 2.17 - Possível ligação para um diodo bypass entre células. Fonte: CRESESB,	

2006.....	59
Figura 2.18 - Diodo de bloqueio. CRESESB, 2006	59
Figura 2.19 - Curva característica IxV mostrando a corrente Isc e a tensão Voc (a), Curva típica de potência versus tensão (b), Parâmetros de potência máxima (c), Efeito causado pela variação de intensidade luminosa (d) e Efeito causado pela temperatura na célula (e). Fonte: CRESESB, 2006	60
Figura 2.20 - Aquecedor solar com um reservatório de capacidade de 200 litros (Mundo da Educação, 2023)	62
Figura 2.21 - Configuração básica de um sistema fotovoltaico. Fonte: CRESESB, 2006.....	62
Figura 2.22 - Diagrama de sistemas fotovoltaicos em função da carga utilizada. Fonte: CRESESB, 2006.....	63
Figura 2.23 - Exemplo de sistema híbrido. Fonte: CRESESB, 2006	64
Figura 2.24 - Sistema conectado à rede. Fonte: CRESESB, 2006	65
Figura 2.25 - Irradiação solar diária média mensal para o IFB – <i>campus</i> Taguatinga	66
Figura 2.26 - Tela inicial em que os detalhes do projeto e localização são escolhidos	77
Figura 2.27 – Selecionando dados climáticos. (Fonte: < https://pt.dsisolar.com/info/7-most-popular-solar-pv-system-design-and-simu-34904845.html >. Acesso em: 12 abr. 2018).....	78
Figura 2.28 – Módulo de seleção e classificação desejada.....	78
Figura 2.29 – Estimativas de geração de energia geradas juntamente com análise financeira e de emissões.....	79
Figura 2.30 – Fachada do IFB - <i>campus</i> Taguatinga. Fonte: Google Maps (11/06/2024)	85
Figura 4.1 – Área total aproximada do IFB <i>campus</i> Taguatinga. Fonte: Google Maps.....	93
Figura 4.2 – Área Livre aproximada do IFB <i>campus</i> Taguatinga. Fonte: Google Maps	93
Figura 4.3 – Custo de redução de GEE (R\$/tCO ₂) - Anos 2019 a 2023 – placas policristalinas.....	101
Figura 4.4 – Custo de redução de GEE (R\$/tCO ₂) - Anos 2019 a 2023 – placas bifaciais ...	101
Figura 4.5 – Custo de redução de GEE (R\$/tCO ₂) - Anos 2019 a 2023 – placas amorfas.....	102
Figura 4.6 – Valor Presente Líquido (VPL) por potência - Anos 2019-2023 – Placa	

policristalina	105
Figura 4.7– Valor Presente Líquido (VPL) por potência - Anos 2019-2023 – Placa bifacial.	105
Figura 4.8– Valor Presente Líquido (VPL) por potência - Anos 2019-2023 – Placa amorfa.	105
Figura 4.9 – Relação entre o VPL e o custo total da usina - anos 2019 a 2023. Placa policristalina.....	106
Figura 4.10 – Relação entre o VPL e o custo total da usina - anos 2019 a 2023. Placa bifacial.	117
Figura 4.11 – Relação entre o VPL e o custo total da usina - anos 2019 a 2023. Placa amorfa.	107
Figura 4.12 – Retorno do Capital Próprio - Anos 2019-2023. Placas policristalinas.....	110
Figura 4.13 – Retorno do Capital Próprio - Anos 2019-2023. Placas bifaciais.....	111
Figura 4.14 – Redução anual líquida de emissões de GEE - 2019-2023. Placas policristalinas.....	114
Figura 4.15 – Redução anual líquida de emissões de GEE - 2019-2023. Placas bifaciais.....	114
Figura 4.16 – Redução anual líquida de emissões de GEE - 2019-2023. Placas amorfas	114

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 - Potência das placas	91
Tabela 4.2 - “Áreas ocupada”, em m ² , comparativa – placas policristalinas, bifaciais e amorfas.....	91
Tabela 4.3 - Resultados obtidos para a realização da análise financeira e ambiental – Placas fotovoltaicas policristalinas	94
Tabela 4.4 - Resultados obtidos para a realização da análise financeira e ambiental – Placas fotovoltaicas bifaciais	94
Tabela 4.5 - Resultados obtidos para a realização da análise financeira e ambiental – Placas fotovoltaicas amorfas.....	95
Tabela 4.6 – Custos do Projeto	96
Tabela 4.7 – Economia anual no ciclo de vida	98
Tabela 4.8 - Alguns benefícios ambientais pela redução anual líquida de GEE. Placas bifaciais.....	115

LISTA DE ABREVIACÕES

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica
BPC - Benefício de Prestação Continuada
CCEE - Câmara de Comercialização de Energia Elétrica
CEB - Companhia Energética de Brasília
CEPEL - Centro de Pesquisas de Energia Elétrica
CODEPLAN - Companhia de Planejamento do Distrito Federal
CPTEC - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
CRESESB - Centro de Referência para Energia Solar e Eólica
DF - Distrito Federal
DMA - Divisão de Clima e Meio Ambiente
EBC - Empresa Brasileira de Comunicação
EDB - Energia do Brasil
EPA - Environmental Protection Agency
ESG - Environmental Social and Governance
FGTS - Fundo de Garantia do Tempo de Serviço
FP - Fora da Ponta
GDF - Governo do distrito Federal
GEE - Gases de Efeitos Estufa
GRI - Global Reporting Initiative
IEA - Internacional Energy Association
IFB - Instituto Federal De Brasília
INMET - Instituto Nacional de Meteorologia
INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change
IPEA - Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada
IPTU - Imposto Predial e Territorial Urbano
IRENA - Internacional Renewable Energy Agency
LabSolar - Laboratório de Energia Solar
LEPTEN - Laboratórios de Engenharia de Processos de Conversão e Tecnologia
MA - Massa de ar
MCTI - Ministério da Ciência e Tecnologia e da Inovação
MEC - Ministério da Educação

NREL - National Renewable Energy Laboratory
NASA - National Aeronautics and Space Administration
ODS - Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
O&M - Operação e Manutenção
ONS - Operador Nacional do Sistema
ONU - Organização das Nações Unidas
PDIFF - Plano Diretor de Infraestrutura Física
PROGD (Programa de Desenvolvimento da Geração Distribuída de Energia Elétrica)
PV - Photovoltaic
PVPS - Photovoltaic Power Systems Programme
REBE - Renda Básica e Energética
REN – Resolução Normativa
REN21 - Renewable Energy Policy Network for the 21st Century
RETScreen - Renewable Energy Technology Screen
ROE - Return On Equity
SAM - System Advisor Model
SEBRAE - Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas
STEM - Science, Technology, Engineering, and Mathematics
SIN - Sistema Interligado Nacional
TIR - Taxa Interna de Retorno
UFSC - Universidade Federal de Santa Catarina
UN - UNITED NATIONS
UNFCCC - United Nations Framework Convention on Climate Change
VPL - Valor Presente Líquido
WHO - World Health Organization
WMO - World Meteorology Organization

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	19
1.1 OBJETIVOS E JUSTIFICATIVAS	22
1.1.1 Objetivo Geral	22
1.1.2 Objetivos Específicos	22
1.1.3 Justificativas da Pesquisa.....	22
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	24
2.1 HISTÓRICO DAS TRANSIÇÕES ENERGÉTICAS.....	24
2.2 IMPACTO SÓCIO ECONÔMICO E AMBIENTAL.....	25
2.3 POLÍTICAS E REGULACÕES AMBIENTAIS.....	27
2.4 FUTURO DAS ENERGIAS RENOVÁVEIS.....	28
2.5 ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA – CONTEXTO MUNDIAL	29
2.6 ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA – CONTEXTO NACIONAL	33
2.7 ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA – CONTEXTO DISTRITO DEFERAL	35
2.7.1 URBANIZAÇÃO DO DISTRITO FEDERAL	35
2.8 ENERGIAS RENOVÁVEIS.....	40
2.8.1 Hidrogênio Verde.....	40
2.8.2 Energia Eólica.....	41
2.8.3 Energia Solar	42
2.8.4 Energia Solar Fotovoltaica	53
2.9 IRRADIAÇÃO SOLAR E POSIÇÃO DAS PLACAS	65
2.10 APROVEITAMENTO DA SOBRA DE ENERGIA FOTOVOLTAICA	67
2.10.1 Métodos de aproveitamento.....	67
2.10.2 Armazenamento em baterias.....	67
2.10.3 Injeção na rede elétrica	67
2.10.4 Programação de uso de equipamentos.....	68

2.10.5 Integração com outros sistemas energéticos.....	68
2.10.6 Uso de veículos elétricos	68
2.10.7 Benefícios econômicos e ambientais.....	69
2.10.8 Desafios e considerações.....	69
2.11 AGREGADORAS DE ENERGIA NO BRASIL.....	70
2.11.1 Redução de Custos.....	71
2.11.2 Sustentabilidade.....	71
2.11.3 Eficiência Energética.....	71
2.12 IMPORTÂNCIA DA SIMULAÇÃO DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA....	72
2.13 SOFTWARES DE SIMULAÇÃO E DESIGN DE SISTEMA SOLAR FOTOVOLTAICO MAIS UTILIZADOS	72
2.14 SOFTWARE “RETSCREEN”	76
2.14.1 Histórico e Contexto de Desenvolvimento.....	77
2.14.2 Objetivos e Funcionalidades Principais.....	79
2.14.3 Arquitetura e Componentes do Software.....	80
2.14.4 Módulos Disponíveis e Suas Aplicações.....	80
2.14.5 Requisitos de Sistema e Compatibilidade	80
2.14.6 Metodologia de Análise e Modelagem de Dados	81
2.14.7 Princípios de Análise de Viabilidade Econômica e Ambiental.....	81
2.14.8 Casos de Estudo e Aplicações Práticas.....	81
2.14.9 Exemplos de Projetos de Energias Renováveis Analisados	82
2.14.10 Impacto e Importância do RETScreen no Contexto de Sustentabilidade.....	82
2.14.11 Contribuições para a Mitigação das Mudanças Climáticas	82
2.14.12 Desafios e Limitações Atuais do Software.....	83
2.14.13 Pontos Fortes e Pontos a Serem Aprimorados.....	83
2.14.14 Perspectivas Futuras e Desenvolvimentos Potenciais	83

2.14.15 Novas Funcionalidades e Atualizações Previstas	83
2.15 O CAMPUS TAGUATINGA DO IFB	84
3. METODOLOGIA ADOTADA.....	86
4. ANÁLISES E DISCUSSÕES DOS RESULTADOS OBTIDOS	88
4.1 PROJETO DA USINA	89
4.2 ÁREAS OCUPADAS PELA PLACAS FOTOVOLTAICAS	91
4.3 ANÁLISE FINANCEIRA	94
4.3.1 Custo Total da Usina Fotovoltaica.....	95
4.3.2 Economia Anual no Ciclo de Vida	97
4.3.3 Custo de Redução de Gases de Efeito Estufa (GEE).....	99
4.3.4 <i>Payback</i> Simples ou Retorno Simples.....	102
4.3.5 Valor Presente Líquido (VPL).....	103
4.3.6 Taxa Interna de Retorno (TIR)	107
4.3.7 Retorno do Capital Próprio.....	109
4.4 ANÁLISE AMBIENTAL.....	111
4.4.1 Redução Líquida de Emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE).....	112
5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS.....	117
5.1 CONCLUSÕES.....	117
5.2 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS.....	119
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	121

1 INTRODUÇÃO

Desde a pré-história e a antiguidade, o homem tem buscado utilizar as energias primárias, como solar, eólica e hidráulica, para atender às suas necessidades básicas de aquecimento, iluminação, navegação e alimentação. O desenvolvimento dessas fontes energéticas deu origem a mecanismos para aproveitar o vento, a água e o vapor, especialmente com a ascensão do carvão como o primeiro combustível fóssil em larga escala, impulsionando a industrialização global. Posteriormente, o petróleo emergiu como uma nova fonte primária de energia, substituindo gradualmente o carvão (Farias e Sellito, 2011).

A introdução do petróleo e seus derivados, juntamente com o advento da eletricidade, como uma forma de energia secundária, provocou uma evolução significativa nas matrizes energéticas globais. Esse cenário impulsionou o crescimento econômico, geração de empregos e aumento da renda, acompanhados pelo surgimento de novas tecnologias e pela expansão da industrialização em todo o mundo (Farias e Sellito, 2011).

No entanto, ao longo das décadas, a intensificação do uso de combustíveis fósseis, como o petróleo, acarretou graves problemas ambientais, incluindo a emissão exacerbada de dióxido de carbono (CO₂) na atmosfera, contribuindo para alterações climáticas prejudiciais e até irreversíveis, como o efeito estufa (Field e Field, 2014).

Para mitigar os impactos da poluição, políticas ambientais tornaram-se fundamentais, juntamente com o investimento em fontes de energia renováveis. Essas iniciativas incluem certificados negociáveis de poluição, empregos verdes e acordos internacionais como o Tratado de Kyoto (Bakker e Young, 2012).

O aumento do uso de energias renováveis não apenas reduz os danos ambientais, mas também influencia positivamente os setores tecnológicos, industriais e econômicos, resultando em redução de custos e mudanças na produtividade do trabalho (Goldemberg, 2004). No entanto, apesar do alto custo inicial, o investimento em energias renováveis tende a se diluir ao longo do tempo, trazendo benefícios a longo prazo (Alves, 2010).

Embora muitos países ainda careçam de políticas públicas robustas para promover o uso eficiente de energias renováveis, há esperança de que essas iniciativas contribuam de forma sustentável para a preservação do meio ambiente.

A geração solar fotovoltaica no Brasil tem apresentado um crescimento exponencial nos últimos anos, impulsionada por uma combinação de fatores como abundância de radiação solar, políticas públicas favoráveis e a busca por fontes de energia renováveis e sustentáveis. Desde a implementação do Sistema de Compensação de Energia Elétrica (REN 482/2012) pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), o país tem incentivado a geração distribuída, permitindo que consumidores produzam sua própria eletricidade a partir de sistemas fotovoltaicos. Além disso, programas como o PROGD (Programa de Desenvolvimento da Geração Distribuída de Energia Elétrica) têm facilitado o acesso ao crédito e tecnologias mais acessíveis. Atualmente, o Brasil se destaca como um dos principais mercados emergentes no setor solar, ocupando posições de liderança na América Latina em capacidade instalada. Esse avanço reflete não apenas no setor energético, mas também no econômico, com a geração de empregos diretos e indiretos, e no ambiental, com a significativa redução das emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE). Apesar desse cenário promissor, desafios como a falta de políticas estáveis de longo prazo e barreiras burocráticas ainda representam obstáculos para o pleno desenvolvimento do setor fotovoltaico no país (ANEEL, 2012; ABSOLAR, 2024; EPE, 2024).

No Distrito Federal, a geração fotovoltaica tem ganhado destaque como uma solução sustentável para atender à crescente demanda por energia elétrica, impulsionada por políticas públicas e iniciativas acadêmicas. Destaca-se aqui iniciativas tanto para projetos práticos quanto para pesquisas acadêmicas. Um exemplo marcante é o projeto de instalação de usinas fotovoltaicas no *campus* Gama da UnB, uma iniciativa que alia ensino, pesquisa e sustentabilidade, além de promover a autonomia energética da instituição. Em Reis (2021) avalia-se a viabilidade técnica e econômica de sistemas solares aplicados ao *campus*. Outros trabalhos afins tem sido feito através de parceria entre a antiga CEB (atual Neoenergia Brasília), fortalecendo o vínculo entre pesquisa acadêmica a aplicação prática para a expansão sustentável da geração solar na região.

Este trabalho está dividido em cinco capítulos. No capítulo 1 (Introdução), é feita uma breve discussão a respeito das diversas fontes de energia, seus problemas e soluções. No capítulo 2 (Revisão Bibliográfica) é estudado a respeito do investimento e expansão da capacidade para o consumo de energias renováveis assim como seus impactos econômicos e ambientais, algumas energias renováveis, com ênfase na energia solar fotovoltaica, além de softwares que ajudam simular os referidos impactos. No capítulo 3 é apresentado a parte da Metodologia que será utilizada neste trabalho. No capítulo 4, serão feitas as análises dos dados

simulados, discutindo seus resultados. E por fim, no Capítulo 5, serão feitas as devidas considerações finais e sugestões de trabalhos futuros.

Quanto à motivação da pesquisa, instalar placas fotovoltaicas em Institutos Federais de Educação Tecnológicas ou similares pode trazer uma série de benefícios significativos:

Quanto a educação ambiental, a instalação de placas fotovoltaicas em Institutos Federais de Educação ou similares pode servir como uma ferramenta educacional valiosa para os alunos. Os mesmos podem aprender sobre energia renovável, sustentabilidade ambiental e a importância da redução das emissões de carbono, promovendo uma consciência ambiental desde cedo até a pesquisas mais aprofundadas devido a oferta de cursos superiores e pós graduação também, além dos já tradicionais cursos técnicos subsequentes e cursos técnicos integrados.

No que tange à redução de custos, ao gerar parte ou toda a energia consumida pela escola a partir de fontes solares, as instituições podem reduzir significativamente os custos com energia elétrica. Isso libera recursos financeiros para investir em outras áreas, como programas educacionais, infraestrutura escolar e equipamentos.

Outro ponto a considerar seria o bom exemplo de sustentabilidade. Sabe-se que escolas que adotam energia solar demonstram um compromisso com a sustentabilidade e a responsabilidade ambiental. Isso pode inspirar outras instituições e a comunidade local a considerarem soluções sustentáveis em suas próprias atividades.

Em relação ao estímulo à inovação, a implementação de tecnologias de energia solar em escolas pode estimular a inovação e o interesse dos alunos nas ciências, tecnologia, engenharia e matemática (STEM). Eles podem se envolver em projetos relacionados à energia solar, pesquisa sobre eficiência energética e desenvolvimento de soluções sustentáveis.

A respeito da resiliência energética, as escolas com sistemas fotovoltaicos podem se tornar mais resilientes a cortes de energia e flutuações nos preços da eletricidade, garantindo um fornecimento estável de energia durante emergências e situações adversas.

No tocante à redução das emissões de carbono, ao utilizar energia solar, as escolas contribuem para a redução das emissões de gases de efeito estufa, ajudando a combater as mudanças climáticas e promover um ambiente mais saudável para as gerações futuras.

Em suma, a instalação de placas fotovoltaicas em escolas não apenas reduz os custos de energia, mas também promove a educação ambiental, estimula a inovação, fortalece a resiliência energética e demonstra um compromisso com a sustentabilidade e a responsabilidade social. Além do mais, a existência de pouco material na literatura para o Instituto Federal de Brasília e em especial para o *campus* Taguatinga com grande relevância científica e social também motivou a presente pesquisa.

1.1 OBJETIVOS E JUSTIFICATIVAS

1.1.1 Objetivo Geral

Como objetivo geral, tem-se de apresentar uma análise financeira e ambiental propondo três cenários de geração fotovoltaica para o *campus* Taguatinga do Instituto Federal de Brasília (IFB) através da comparação da eficiência de placas fotovoltaicas policristalinas, bifaciais e amorfas.

1.1.2 Objetivos Específicos

Como objetivos específicos, têm-se:

a) apresentar uma análise financeira de viabilidade econômica e retorno do investimento em placas fotovoltaicas através três cenários de geração de energia solar usando o software de simulação RETScreen e faturas de consumo de energia elétrica do *campus* Taguatinga do Instituto Federal de Brasília (IFB);

b) apresentar uma análise ambiental devido à redução de emissões de Gases de Efeito Estufa com o uso de placas fotovoltaicas através do software de simulação RETScreen e faturas de consumo de energia elétrica do *campus* Taguatinga do Instituto Federal de Brasília (IFB).

1.1.3 Justificativas da Pesquisa

Existem várias justificativas significativas para o uso de placas fotovoltaicas em institutos federais de educação no Brasil:

Em relação à educação ambiental exemplar, os institutos federais desempenham um papel importante na formação educacional e profissional dos estudantes. Ao adotar energia solar, eles podem demonstrar um compromisso com a sustentabilidade e a responsabilidade ambiental, promovendo uma educação ambiental exemplar para os alunos e a comunidade.

No tocante a redução de custos, a energia solar pode reduzir significativamente os custos operacionais dos institutos federais, especialmente em relação às despesas com eletricidade. Isso libera recursos financeiros que podem ser direcionados para melhorias na infraestrutura, equipamentos educacionais e programas acadêmicos.

No que tange ao assunto exemplo para a comunidade, os institutos federais são referências locais de educação e inovação. Ao adotar tecnologias sustentáveis, como as placas fotovoltaicas, eles podem inspirar outras instituições, empresas e a comunidade em geral a considerar soluções ambientalmente responsáveis.

A respeito do apoio às políticas de energia renovável, o Brasil possui metas ambiciosas de expansão de energia renovável, conforme estabelecido em políticas como o Plano Nacional de Energia 2050 e o Acordo de Paris. Os institutos federais podem contribuir para essas metas ao adotar fontes limpas e renováveis de energia, como a solar.

Para a questão do estímulo à pesquisa e inovação, a implementação de sistemas fotovoltaicos pode estimular a pesquisa e o desenvolvimento de tecnologias relacionadas à energia solar. Os estudantes e pesquisadores dos institutos federais podem se envolver em projetos de inovação, eficiência energética e desenvolvimento de soluções sustentáveis.

No quesito resiliência energética, os sistemas fotovoltaicos proporcionam uma fonte de energia mais resiliente e estável em comparação com a dependência exclusiva da rede elétrica. Isso pode ser especialmente valioso em áreas propensas a apagões ou instabilidade na rede.

Portanto, as justificativas para o uso de placas fotovoltaicas em institutos federais de educação no Brasil estão relacionadas à promoção da sustentabilidade, redução de custos, estímulo à inovação, apoio às políticas energéticas e fortalecimento da resiliência energética, contribuindo para um ambiente educacional mais eficiente e responsável.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 HISTÓRICO DAS TRANSIÇÕES ENERGÉTICAS

A trajetória do desenvolvimento energético humano é uma narrativa de inovação contínua e mudanças profundas nas fontes de energia. Durante a Revolução Industrial no século XVIII, o carvão emergiu como o principal propulsor do progresso industrial. Antes disso, a biomassa (principalmente madeira) era a fonte de energia dominante, usada para aquecimento e como combustível para processos industriais simples. A transição para o carvão foi motivada pela sua abundância e maior densidade energética, permitindo uma produção industrial mais eficiente e em maior escala (Smil, 2017).

O carvão também desempenhou um papel crucial na evolução das tecnologias de geração de energia. A invenção da máquina a vapor por James Watt, que foi significativamente melhorada em 1776, revolucionou o uso do carvão, transformando-o no motor do crescimento industrial (Nuvolari, 2004). Essa transformação não apenas impulsionou as indústrias de mineração e manufatura, mas também estimulou o desenvolvimento do transporte ferroviário, ampliando o alcance geográfico da industrialização.

A descoberta e a exploração do petróleo no final do século XIX inauguraram uma nova era energética. O petróleo oferecia vantagens significativas sobre o carvão, incluindo maior eficiência energética e facilidade de transporte e uso. A primeira descoberta comercial de petróleo nos Estados Unidos em 1859, na Pensilvânia, marcou o início da indústria do petróleo, que rapidamente se expandiu globalmente (Yergin, 1991). A introdução do motor de combustão interna e o desenvolvimento subsequente de automóveis e aeronaves aceleraram a demanda por derivados de petróleo, solidificando sua posição como a espinha dorsal da matriz energética moderna.

Cada transição energética foi acompanhada por inovações tecnológicas que, por sua vez, abriram novas frentes de desenvolvimento econômico. No entanto, essas transições também trouxeram consigo desafios socioambientais significativos. A dependência do carvão e, posteriormente, do petróleo, levou a problemas ambientais, como a poluição do ar e as mudanças climáticas e suas consequências (McCormick, 2012).

Atualmente, as consequências desses impactos estão sendo gerenciadas por meio de políticas e tecnologias voltadas para a redução das emissões e a transição para fontes de energia

mais limpas” (IPCC, 2021, p. 45) e esforços estão voltados para mitigar essas consequências por meio de estratégias de redução de emissões e adoção de fontes de energia renováveis” (Smith et al., 2023, p. 78).

Essa análise histórica das transições energéticas não apenas destaca a natureza cíclica da inovação e substituição à matriz energética, mas também oferece insights sobre os desafios futuros que serão enfrentados na transição para fontes de energia mais sustentáveis. A Figura 2.1 apresenta a evolução histórica da transição energética.



Figura 2.1 - Histórico das Transições Energéticas (Fonte: Ministério de Minas e Energia via site thetricontinental.org).

2.2 IMPACTO SÓCIO ECONÔMICO E AMBIENTAL

A utilização de combustíveis fósseis teve um papel indiscutível no desenvolvimento econômico global, mas também foi acompanhada por custos socioambientais significativos. A queima de carvão e petróleo para energia liberou enormes quantidades de dióxido de carbono (CO₂), um dos principais gases do efeito estufa, na atmosfera. Este aumento na concentração de CO₂ contribuiu para o aquecimento global e mudanças climáticas, com uma série de efeitos adversos sobre o clima, ecossistemas e comunidades humanas (IPCC, 2014).

Do ponto de vista econômico, a dependência de combustíveis fósseis fomentou o crescimento e a prosperidade em muitas regiões, impulsionando a industrialização e a

urbanização. No entanto, essa dependência também exacerbou desigualdades econômicas, tanto dentro dos países quanto entre eles. Países ricos em petróleo, por exemplo, acumularam vasta riqueza, enquanto outros, sem esses recursos, muitas vezes ficaram mais atrás em termos de desenvolvimento econômico (Sachs e Warner, 1995).

Os efeitos ambientais do uso de combustíveis fósseis são igualmente graves. A poluição atmosférica resultante da queima de carvão e petróleo tem sido associada a uma série de problemas de saúde, incluindo doenças respiratórias e cardiovasculares, resultando em milhões de mortes prematuras anualmente (World Health Organization, 2016). Além disso, a extração de recursos energéticos frequentemente resulta em danos ambientais diretos, como derramamentos de petróleo e destruição de habitats.

A resposta a esses desafios tem sido complexa e multifacetada. Políticas de desenvolvimento sustentável têm sido promovidas para equilibrar o crescimento econômico com a proteção ambiental. Iniciativas como a transição para energias renováveis e a implementação de tecnologias mais limpas estão sendo adotadas para reduzir a pegada de carbono dos sistemas energéticos. Essas mudanças não são apenas uma resposta aos problemas ambientais, mas também oferecem novas oportunidades econômicas, como empregos no setor de tecnologia verde e desenvolvimento de novos mercados (Jacobson e Delucchi, 2011). A Figura 2.2 faz referência aos impactos sócio econômicos e ambientais.



Figura 2.2 - Impacto Socioeconômico Ambiental (Fonte: <https://brasilecola.uol.com.br/o-que-e/geografia/o-que-e-impacto-ambiental.htm>).

2.3 POLÍTICAS E REGULACÕES AMBIENTAIS

Esta seção explorará as medidas regulatórias adotadas para gerenciar os impactos ambientais do uso de energia, focando na eficácia dessas políticas e nos desafios enfrentados na implementação.

A crescente conscientização sobre os impactos ambientais do uso intensivo de combustíveis fósseis levou à adoção de políticas e regulações ambientais em níveis nacional e internacional. Essas políticas têm como objetivo reduzir as emissões de gases de efeito estufa, minimizar a degradação ambiental e promover o uso de fontes de energia mais limpas e sustentáveis.

Um dos primeiros e mais significativos acordos internacionais foi o Protocolo de Kyoto, adotado em 1997. Este tratado vinculativo comprometeu os países industrializados a reduzir suas emissões de gases de efeito estufa em pelo menos 5% abaixo dos níveis de 1990, no período entre 2008 e 2012 (UNFCCC, 1998). Apesar de suas limitações, como a não participação de grandes emissores como os Estados Unidos, o Protocolo de Kyoto representou um passo fundamental na cooperação global para o combate às mudanças climáticas.

Nacionalmente, muitos países implementaram leis e regulamentos para promover a eficiência energética, reduzir a poluição e incentivar a geração de energia a partir de fontes renováveis. Por exemplo, a União Europeia estabeleceu metas ambiciosas para a energia renovável e a eficiência energética através de diretivas que exigem que os Estados-membros alcancem pelo menos 20% de sua geração de energia a partir de fontes renováveis até 2020 (European Commission, 2009).

Os Estados Unidos, por sua vez, têm uma abordagem mais descentralizada, com políticas variando significativamente entre os estados. Califórnia e Nova York, por exemplo, são conhecidos por suas políticas progressistas em energia limpa e regulamentações ambientais rigorosas, que incluem padrões de emissões para veículos e incentivos para energia solar e eólica (Rabe, 2010).

No entanto, a implementação dessas políticas enfrenta diversos desafios. Questões como a oposição política, os interesses econômicos de indústrias baseadas em combustíveis fósseis e a inadequação de infraestruturas para novas tecnologias são barreiras significativas. Além disso, a eficácia das políticas é frequentemente limitada por lacunas na fiscalização e na

conformidade, bem como pela variabilidade nas capacidades administrativas e financeiras dos países para implementar mudanças (Harrison, 2010).

2.4 FUTURO DAS ENERGIAS RENOVÁVEIS

À medida que o mundo enfrenta desafios crescentes relacionados às mudanças climáticas e à sustentabilidade ambiental, as energias renováveis surgem como uma solução crucial para o futuro da produção energética. Com a tecnologia avançando e os custos declinando, fontes de energia como solar, eólica, hidrelétrica e biomassa estão se tornando cada vez mais viáveis e competitivas em relação aos combustíveis fósseis.

Uma das principais tendências no setor de energias renováveis é a inovação tecnológica, que continua a reduzir os custos e a aumentar a eficiência dos sistemas de energia renovável. Por exemplo, os avanços na tecnologia fotovoltaica e nos sistemas de armazenamento de energia estão permitindo uma maior integração da energia solar em redes elétricas nacionais e regionais. Estes desenvolvimentos são cruciais para superar um dos maiores desafios das energias renováveis: a intermitência da geração de energia (IEA, 2020).

Além disso, políticas governamentais e compromissos internacionais estão desempenhando papéis fundamentais no incentivo ao crescimento das energias renováveis. Acordos globais como o Acordo de Paris reforçam a importância das metas de redução de emissões e de transição para energias limpas. Governos em todo o mundo estão implementando incentivos fiscais, subsídios e tarifas de alimentação que facilitam investimentos em infraestrutura renovável e desenvolvimento tecnológico (REN21, 2021).

O mercado global de energias renováveis também está sendo impulsionado pela crescente demanda dos consumidores por soluções mais sustentáveis e pelo aumento do investimento corporativo em energia limpa. Empresas de vários setores estão comprometidas em reduzir suas pegadas de carbono, o que inclui a adoção de energias renováveis para operações e cadeias de suprimentos (Goldman Sachs, 2019).

No entanto, apesar desses avanços positivos, ainda existem desafios significativos. A infraestrutura existente em muitos países não está totalmente adaptada para integrar e maximizar o uso de energias renováveis. Além disso, questões políticas e econômicas, como a resistência de indústrias de combustíveis fósseis e a instabilidade política em regiões-chave,

podem desacelerar o progresso das energias renováveis (World Bank, 2018). A Figura 2.3 apresenta uma ilustração sobre o futuro das energias renováveis. Nesta figura é apresentada o processo evolutivo dos modelos de energias desde a utilização da queima da vegetação até os dias atuais em que se tem passado pela transição para fontes de energias renováveis, como o hidrogênio verde, energia eólica e a fotovoltaica.

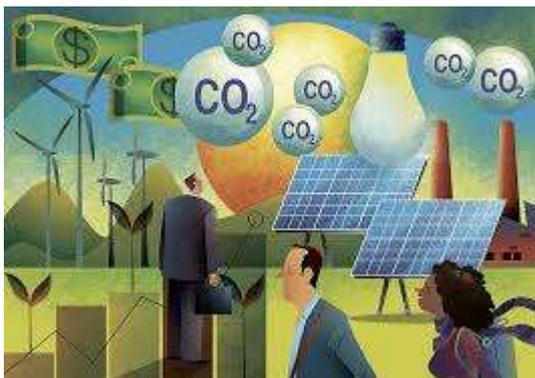


Figura 2.3 - Futuro das Energias Renováveis (Fonte: <https://valor.globo.com/empresas/esg/noticia/2023/01/18/watt-verde-impulsiona-ebulicao-no-setor-de-energia-eletrica-no-brasil.ghtml>).

2.5 ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA – CONTEXTO MUNDIAL

Em 2023 o mundo alcançou a capacidade acumulada global de energia fotovoltaica (PV) de 1,6 TW, um aumento em relação aos 1,2 TW de 2022, contribuindo para atendimento de 8% da demanda elétrica global. Após vários anos de alta nos custos de materiais e transporte, os preços dos módulos caíram significativamente devido ao excesso de oferta no mercado, mantendo a competitividade da PV, mesmo com a queda nos preços da eletricidade após os picos históricos de 2022 conforme relatório (IEA, 2024). Alguns dados desse relatório são relevantes, tais como:

a) Com políticas de desenvolvimento ativas, a China atingiu um recorde de 235 GWDC (ou até 277 GW. A capacidade oficial reportada pela China está abaixo da avaliação preliminar do IEA-PVPS, que estima 277 GW, instalados em 2023, levando a uma capacidade acumulada de 704 GW), representando mais de 60% da nova capacidade global e elevando a capacidade

acumulada total a 662 GW. Esta capacidade anual representa mais de 15% da capacidade global acumulada total e quase iguala a segunda maior capacidade acumulada, a da Europa. A capacidade instalada anual mais que dobrou em comparação com os 105,5 GW de 2022 e os 54,9 GW de 2021;

b) A Europa continuou a crescer significativamente, instalando 61 GW (sendo 55,8 GW na UE), com destaque para a Alemanha (14,3 GW), e aumentos volumosos na Polônia (6,0 GW), Itália (5,3 GW) e Países Baixos (4,2 GW), enquanto a Espanha teve uma leve redução para 7,7 GW;

c) Nas Américas, ambos os principais mercados cresceram: os EUA instalaram 33,2 GW após um ano lento em 2022, e o Brasil manteve o dinamismo do mercado de 2022, com 11,9 GW instalados, posicionando sua capacidade acumulada entre as dez maiores do mundo;

d) A Índia teve um crescimento um pouco mais lento, com 16,6 GW, principalmente em sistemas centralizados. Outros mercados da Ásia-Pacífico também desaceleraram, incluindo a Austrália (3,8 GW), enquanto a Coreia (3,3 GW) e o Japão (6,3 GW) mantiveram estabilidade. O crescimento do mercado fora da China foi de 30%, enquanto o crescimento doméstico na China superou 120%, o que explica o desenvolvimento acelerado do mercado de PV.

O Brasil está entre os 18 países do mundo em que a energia solar tem taxa de penetração superior a 10%; mostra estudo do Programa de Sistema Fotovoltaico da Agência Internacional de Energia (IEA PVPS, 2023). Países com populações menores, como Espanha, Países Baixos, Chile e Grécia, lideraram, mas países mais populosos, como Alemanha e Japão, também ultrapassaram 10%. Apesar da congestão na rede, medidas políticas, soluções técnicas e armazenamento estão ajudando a aumentar a penetração da PV.

Bastian (2023) discorre que, no contexto mundial, a partir da década de 1990 ocorreu um crescimento no uso da tecnologia fotovoltaica, no momento em que a capacidade instalada passou de 110 MWp em 1993 para 7.841 MWp em 2007. Porém, esse aumento ficou concentrado basicamente em quatro países (China, Alemanha, Japão e Estados Unidos), sendo que a Alemanha foi o país que mais investiu em incentivos e redução de tarifas.

O mercado chinês cresceu em um ritmo muito acelerado de mais de 125%, e como dito anteriormente em (IEA, 2024), instalando no mínimo 235 GW (de acordo com relatórios oficiais da China) e possivelmente até 277 GW* em 2023, um aumento em relação aos 106 GW instalados em 2022 e 55 GW em 2021. Com 55,8 GW de novas instalações anuais, a União

Europeia ficou em segundo lugar, seguida pelos EUA, que instalaram 33,2 GW (recuperando volumes fortes após um ano mais lento em 2022), e pela Índia, que teve um mercado ligeiramente reduzido com 16,6 GW. A Alemanha, com um crescimento muito forte de 14,3 GW, superou o Brasil, que ainda teve um desempenho robusto com 11,9 GW, alcançando o quarto lugar (IEA PVPS, 2024). A Figura 2.4 retrata esses valores, exibindo a capacidade anual instalada e a capacidade acumulada para o mercado fotovoltaico mundial em 2023.

CAPACIDADE ANUAL INSTALADA				CAPACIDADE ACUMULADA			
1		China	235.5 GW*	1		China	662.0 GW
(2)		European Union	55.8 GW	(2)		European Union	268.1 GW
2		United States	33.2 GW	2		United States	169.5 GW
3		India	16.6 GW	3		India	95.3 GW
4		Germany	14.3 GW	4		Japan	91.4 GW
5		Brazil	11.9 GW	5		Germany	81.6 GW
6		Spain	7.7 GW	6		Spain	37.6 GW
7		Japan	6.3 GW	7		Brazil	35.5 GW
8		Poland	6.0 GW	8		Australia	34.6 GW
9		Italy	5.3 GW	9		Italy	30.3 GW
10		Netherlands	4.2 GW	10		Korea	27.8 GW

Figura 2.4 - Mercado Fotovoltaico Mundial em 2023 (Fonte: Adaptado de Snapshot of Global Photovoltaic Markets, 2023).

*A capacidade oficial reportada pela China está abaixo da avaliação preliminar do IEA-PVPS, que estima 277 GW, instalados em 2023, levando a uma capacidade acumulada de 704 GW.

Os mercados individuais ainda são sensíveis ao apoio político e aos preços da eletricidade doméstica, embora a competitividade seja alta em muitos segmentos de mercado. A continuidade de projetos de manufatura local iniciados anteriormente é incerta, pois o aumento significativo na capacidade de fabricação na China levou a um excesso de oferta global e a preços recorde baixos dos módulos, o que afetou negativamente a fabricação local (IEA PVPS, 2024). Ou seja, isso destaca a dinâmica complexa do mercado de energia solar, onde fatores políticos e econômicos locais desempenham um papel crucial na viabilidade e competitividade dos projetos.

Apesar da alta competitividade em muitos segmentos, a incerteza que cerca os projetos de manufatura local enfatizam os desafios enfrentados pela indústria, especialmente diante do domínio da China na produção de módulos solares. O aumento da capacidade de fabricação chinesa, resultando em excesso de oferta e queda nos preços globais, impõe pressão significativa sobre os fabricantes locais, dificultando a sustentabilidade desses projetos e a

manutenção de uma cadeia de suprimentos independente. Isso reforça a necessidade de políticas de apoio robustas e estratégias inovadoras para fortalecer a produção local em um mercado globalmente competitivo.

Em 2023, a energia fotovoltaica (PV) teve um impacto significativo na redução das emissões de CO₂ da eletricidade, respondendo por mais de 75% da nova capacidade renovável instalada no ano e gerando quase 60% da produção proveniente dessa nova capacidade renovável (IEA PVPS, 2024). Isso evidencia o papel crucial da energia fotovoltaica (PV) na transição para fontes de energia mais limpas em 2023, sublinhando seu impacto na redução das emissões de CO₂ no setor elétrico. Com mais de 75% da nova capacidade renovável instalada no ano e responsável por quase 60% da produção dessa nova capacidade, a PV demonstra seu crescente protagonismo na matriz energética global. Esses números indicam que a energia solar está se consolidando como uma das principais alternativas para mitigar as mudanças climáticas e promover um futuro mais sustentável.

O excesso de oferta de módulos PV em 2023 revelou as dificuldades em equilibrar a produção e a demanda em um ambiente altamente variável. Embora a capacidade de produção tenha aumentado consideravelmente na China, a demanda global enfrentou restrições em mercados como os EUA, Índia, Coreia e Austrália. Fora da China, o crescimento ocorreu em um número limitado de países, e o suporte político desigual em alguns mercados também contribuiu para as dificuldades no desenvolvimento de instalações de fabricação local de PV em um mercado já saturado (IEA PVPS, 2024). Tal afirmação destaca os desafios enfrentados pelo mercado de módulos fotovoltaicos (PV) em 2023 devido ao desequilíbrio entre oferta e demanda.

A China, com sua capacidade de produção significativamente ampliada, gerou um excesso de módulos no mercado global, mas a demanda não acompanhou esse crescimento, especialmente em mercados importantes como os EUA, Índia, Coreia e Austrália, onde restrições e suporte político desigual limitaram o crescimento. Esse cenário de saturação global e dificuldades de expansão fora da China enfatiza a complexidade de manter um equilíbrio sustentável entre produção e demanda no mercado de PV, além de evidenciar a necessidade de políticas mais consistentes e de uma expansão mais equilibrada da indústria em nível global.

2.6 ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA – CONTEXTO NACIONAL

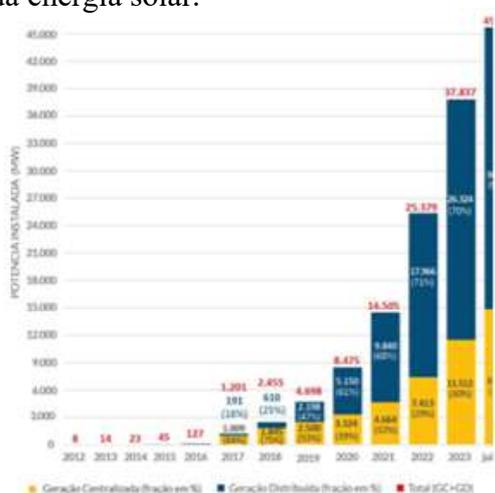
O relatório Whitepaper - 10 Cleantech Trends in 2023, apresentou que em 2022 a geração fotovoltaica distribuída consolidaria sua posição como opção de fornecimento de energia elétrica em muitos mercados estabelecidos e, em 2023, a tecnologia se espalharia para novos segmentos de consumo. O mesmo documento mostrou ainda que os setores residencial e de pequenas empresas teriam acesso a soluções solares compartilhadas, expandindo ainda mais a presença da geração distribuída. E ainda, a publicação anterior deste relatório (2022) também considerava o Brasil como um mercado em expansão, devido aos incentivos para a instalação de sistemas nos telhados residenciais, bem como em programas de etiquetagem para eficiência energética em edificações. Essa tendência reflete o aumento da acessibilidade e da adoção de energia solar distribuída, consolidando sua importância na matriz energética global.

Embora haja um grande potencial de geração de energia solar fotovoltaica no Brasil, essa fonte ainda tinha pouca participação na matriz elétrica nacional em 2019, ocupando o 7º lugar de acordo com (Bastian, 2023) que discorreu sobre as agendas a favor do uso adequado e eficiente dos recursos naturais e de formas mais eficientes. Observou-se também, de acordo com o relatório da ANEEL/ABSOLAR (2024), que a partir desse ano (2019) foi experimentado um crescimento vertiginoso dessa modalidade de energia, devido a fonte solar fotovoltaica estar entre as mais competitivas do país por causa de seu preço mais acessível. Esse avanço sinaliza um movimento importante na direção de uma matriz energética mais diversificada e sustentável.

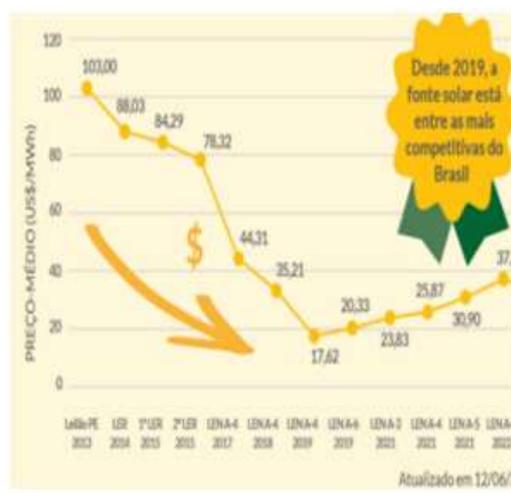
Segundo dados da Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica – ABSOLAR de 2024, a Figura 2.5 (a) mostra a evolução da fonte solar no país desde 2012 a julho de 2024 (evidenciando o crescimento significativo da energia solar fotovoltaica no Brasil), atingindo 45.736 MW de potência instalada no último levantamento, dos quais 14.877 MW (33%) são de geração centralizada e 30.859 MW (67%) são de geração distribuída, revelando uma maioria de pequenos consumidores, devido as políticas de popularização e incentivo à energia solar, que têm proporcionado a adoção em residências e pequenos negócios, consolidando a energia solar como uma opção acessível e amplamente adotada no país. Ressalte-se que quanto à popularização, tem-se como exemplo, o Projeto de Lei Nº 624/2023 que institui o Programa Renda Básica e Energética (REBE) e prevê a instalação em casa de famílias que recebem o

Benefício de Prestação Continuada (BPC), que se destina a idosos e pessoas com deficiência de baixa renda.

Outro dado relevante que o documento da ABSOLAR de 2024 apresenta é relativo à evolução do preço médio (US\$/MWh) da fonte solar fotovoltaicas em leilões de energia no mercado regulado, no período de 2013 a 2022, representado pela Figura 2.5 (b) em que há uma queda significativa a partir de 2013 a 2019, e que a partir deste ano manteve-se entre as mais competitivas no país, contribuindo assim para uma maior adesão a esta fonte de energia renovável. (CRESESB, 2008) já discutia acerca da redução do custo de produção da célula fotovoltaica influenciando o preço final desta fonte de energia - os dados atuais confirmam essa previsão, sublinhando o impacto positivo da tecnologia e da economia de escala na viabilidade da energia solar.



(a) Evolução da Fonte Solar Fotovoltaica.
Fonte: ANEEL/ABSOLAR, 2024.



(b) Evolução do Preço.
Fonte: CCEE/ABSOLAR, 2024.

Figura 2.5 - Evolução do Preço Médio (US\$/MWh) da Fonte Solar Fotovoltaica em Leilões de Energia em Mercado Regulado (a) e Evolução da Fonte Solar Fotovoltaica no Brasil no Período de 2012 a julho de 2024 (b).

A energia solar fotovoltaica ocupa hoje, o 2º lugar na configuração da matriz elétrica brasileira representando cerca de 19,4%, segundo dados da (ANEEL/ABSOLAR, 2024). Neste mesmo ano, a ONS/MME informou que esta modalidade de energia atingiu novos recordes de geração de energia elétrica no Sistema Interligado Nacional (SIN) com uma máxima produção diária de 27.597 MW às 11h, equivalendo a 29,77% da demanda nacional naquele instante. Ainda em novembro 2023, mais de 10% da oferta de energia elétrica no Brasil foi gerada pela fonte solar fotovoltaica. Esses marcos refletem a expansão e a eficácia da energia solar como uma alternativa energética significativa, evidenciando a crescente adesão e a confiabilidade da tecnologia no suprimento energético do país.

Os autores Losekann e Tavares (2019, p.28) afirmam que no setor de fontes renováveis, além da realização de leilões que garantem a expansão da capacidade energética, o Brasil possui programas específicos que oferecem financiamento diferenciado para fontes como a energia eólica e solar. Eles ainda enfatizam que, é provável que essas duas fontes se tornem predominantes nova capacidade instalada até 2040, em consonância com o objetivo 7 dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Organização das Nações Unidas (ONU), Energia Acessível e Limpa, e a meta 7.2 que trata de manter até 2030 elevada a participação de energias renováveis na matriz energética nacional (IPEA, 2024). Essa previsão sublinha a crescente importância dessas tecnologias renováveis e a estratégia do Brasil para atender a metas globais de sustentabilidade e transição energética.

2.7 ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA – CONTEXTO DISTRITO FEDERAL

2.7.1 URBANIZAÇÃO DO DISTRITO FEDERAL

O Distrito Federal é o menor território autônomo do Brasil que, por determinação constitucional, não pode ser dividido em municípios. É formado pela capital federal (Brasília) e suas Regiões Administrativas (RAs). A construção da cidade foi precedida de um concurso para a escolha do melhor projeto urbanístico e teve suas obras iniciadas em 1956 (BRASIL, 1956). Brasília foi inaugurada em 21 de abril de 1960 com projeto urbanístico produzido por Lúcio Costa e arquitetura de Oscar Niemayer. Segundo o IBGE, em 2022, a população era de 2.817.381 habitantes e a densidade demográfica era de 489,06 habitantes por quilômetro quadrado.

De acordo com estudos da CODEPLAN (2021) as populações urbanas são responsáveis por significativos impactos ambientais locais e globais. A velocidade e forma com que a urbanização ocorre variam de região para região. A capital do Brasil vem passando por intenso processo de urbanização, acarretando diversos problemas socioambientais. O estudo analisa o padrão espacial da expansão urbana do DF, seus principais vetores e impactos na paisagem no período 1960-2019.

Os resultados apontam que o Distrito Federal continua em processo acelerado de urbanização, não havendo tendência de redução desse ritmo em um futuro próximo. A expansão tem ocorrido de forma heterogênea, com forte fragmentação nos últimos anos. Compreender as

principais tendências da urbanização que irão se desdobrar nos próximos anos é crucial para a implementação do desenvolvimento sustentável das cidades e comunidades, incluindo os esforços para forjar um novo quadro de desenvolvimento urbano (UNITED NATIONS, 2019).

Nesse contexto, a energia solar fotovoltaica pode desempenhar um papel crucial no desenvolvimento sustentável das cidades e comunidades do DF. À medida que a urbanização avança, a demanda por energia aumenta, o que pode exacerbar os impactos ambientais se continuar dependente de fontes não renováveis. A incorporação de energia solar fotovoltaica na infraestrutura urbana do DF oferece uma solução sustentável, permitindo que a região cresça de forma mais ecológica. Telhados solares, painéis instalados em áreas públicas e sistemas descentralizados de geração de energia podem contribuir para reduzir a pressão sobre a rede elétrica e diminuir as emissões de carbono, alinhando-se com os esforços globais de desenvolvimento sustentável.

Além disso, a fragmentação urbana sugere a oportunidade de integrar sistemas solares em novas construções e áreas de expansão, promovendo um modelo de urbanização que aproveite os recursos naturais locais de forma eficiente. Assim, a energia solar fotovoltaica não só auxilia na mitigação dos impactos ambientais, mas também fortalece a resiliência energética da região frente ao crescimento populacional e urbanístico.

Segundo (SEBRAE, 2024), este afirma que o Distrito Federal apresenta condições favoráveis de tornar-se um impulsionador da energia solar fotovoltaica. Algumas condições climáticas favoráveis confirmam essas condições:

a) 5,2 kWh/m².dia de irradiação solar diária , que ao longo do ano atinge valores acima da média nacional (em Agosto chega a ser 5,9 kWh/m².dia) e sendo uma das melhores do Centro-Oeste (SEBRAE, 2024; CRESESB, 2024);

b) Baixo índice de nebulosidade e pluviometria;

c) Temperatura média inferior à do Nordeste;

d) Cada metro quadrado de módulos fotovoltaicos instalados em Brasília é capaz de gerar 696 Wh/dia, o que corresponde a 254,04 kWh/ano.

Vale ressaltar que a temperatura média influencia a eficiência dos painéis solares. Temperaturas muito altas podem reduzir a eficiência dos painéis. Uma temperatura média inferior, comparada ao Nordeste, sugere que os painéis solares em Brasília podem operar de

forma mais eficiente do que em regiões mais quentes. Segundo (PBMC, 2015), em meados do século (2041-2070), estima-se que a temperatura do ar aumentará entre 3°C e 3,5°C, enquanto a precipitação diminuirá entre 20% e 35%. No final do século (2071-2100), o aumento da temperatura poderá alcançar entre 5°C e 5,5°C, e a redução da chuva será ainda mais acentuada, variando entre 35% e 45%, com intensificação das variações sazonais.

(Rodrigues, M A O et al, 2018) discorre que a redução das chuvas afeta diretamente a geração hidrelétrica, pois a disponibilidade de água nas bacias hidrográficas é fundamental para o funcionamento das usinas. No Brasil, as bacias das regiões Sul e Sudeste são responsáveis por 80% da capacidade instalada de geração hidrelétrica. A diminuição das chuvas pode reduzir a quantidade de água disponível para geração de energia, o que pode levar a uma diminuição na produção de eletricidade.

Além disso, de acordo com o mesmo autor, a não estacionariedade das séries de vazões, ou seja, a variabilidade das vazões ao longo do tempo pode impactar significativamente o cálculo da energia assegurada. A energia assegurada é uma medida da quantidade de energia que uma usina hidrelétrica pode garantir em um período de tempo, considerando variações na disponibilidade de água. Mudanças na intensidade e na regularidade das chuvas podem tornar mais difícil prever e garantir a produção de energia, afetando a confiabilidade do fornecimento e a gestão dos recursos hídricos para geração elétrica.

Em resumo, apesar dos dados anteriormente descritos, destaca-se que Brasília possui condições climáticas muito favoráveis para a energia solar, com alta irradiação solar, baixo índice de nebulosidade e uma temperatura média que contribui para uma eficiência superior dos sistemas fotovoltaicos. Essas características fazem de Brasília uma excelente localização para investimentos em energia solar fotovoltaica, além de ser o centro político e, portanto, possuir grande visibilidade no cenário nacional.

Quanto ao apoio formalizado do Governo do Distrito Federal - GDF para implantação de sistemas de energia solar fotovoltaica, esses dados do SEBRAE citam:

a) Plano Estratégico 2019-2060: Incentiva o uso da energia fotovoltaica, englobando um conjunto de iniciativas, metas e ações que projetam a cidade até o seu centenário. A meta é que este plano seja consolidado como um plano de Estado, e não apenas de governo;

b) Lei Nº 6.274 de 27/01/2019: Estabelece diretrizes para a Política Distrital de Incentivo à Geração e ao Aproveitamento de Energia Solar, Eólica, Biomassa e à Cogeração.

c) Decreto Nº 37.717 de 19/10/2016: Cria o Programa Brasília Solar, que visa estimular o uso de energia solar fotovoltaica no Distrito Federal. Um dos principais objetivos deste programa é estabelecer uma capacidade de governança política, jurídica e institucional entre os tomadores de decisão para promover a geração descentralizada de energia solar e a eficiência energética no DF;

Portanto, O Plano Estratégico 2019-2060, juntamente com a Lei Nº 6.274/2019 e o Decreto Nº 37.717/2016, representam um avanço significativo na promoção da energia renovável no Distrito Federal. Essas iniciativas não apenas estabelecem uma visão de longo prazo para a sustentabilidade energética da região, mas também visam transformar a energia solar fotovoltaica em uma peça-chave da matriz energética local. A proposta de consolidar o plano estratégico como uma política de Estado garante continuidade e resiliência, independentemente das mudanças de governo, assegurando que o desenvolvimento sustentável se mantenha como uma prioridade ao longo das décadas.

O Programa Brasília Solar, em particular, destaca-se por seu foco em criar uma infraestrutura de governança que facilite a geração descentralizada de energia solar e a eficiência energética. Ao equipar os tomadores de decisão com as ferramentas políticas, jurídicas e institucionais necessárias, o programa busca criar um ambiente propício para a expansão da energia solar no DF. Essa abordagem integrada, que une planejamento estratégico com medidas legislativas e programas de incentivo, coloca o Distrito Federal em uma posição de destaque na adoção de energias renováveis, contribuindo para a redução das emissões de carbono e para o fortalecimento da economia verde.

Em se tratando de instalação de placas fotovoltaicas, o sistema On Grid é indicado para instalações em qualquer tipo de residência ou empresa que esteja próxima à rede de distribuição de energia elétrica. Ele oferece uma instalação simplificada e baixa manutenção, pois não requer o uso de baterias. A energia excedente gerada pelo sistema é enviada para a rede elétrica, convertendo-se em créditos. Para cada kWh gerado em excesso, recebe-se 1 crédito de kWh que pode ser utilizado nos próximos 60 meses. Os créditos de energia são regulamentados pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), com regras específicas que variam de acordo com a localização e classe de consumo (residencial, comercial ou industrial) (SEBRAE, 2024).

Quando a produção de energia supera o consumo, esses créditos podem ser usados para reduzir as contas de energia futuras, através de um sistema de crédito solar que permite a compensação do excedente por até 60 meses. O autoconsumo remoto é outra modalidade

comum de instalação de energia solar, especialmente para empresas. Se a demanda de energia for alta e não houver espaço suficiente no telhado para suprir toda a necessidade energética, o autoconsumo remoto possibilita que a geração de energia ocorra em outro local, com os créditos sendo aplicados para abater o consumo na empresa (SEBRAE, 2024).

Portanto, O sistema on grid é uma solução eficiente e acessível para residências e empresas que buscam reduzir custos com energia elétrica e contribuir para a sustentabilidade. Ao permitir a conversão do excesso de energia gerada em créditos que podem ser utilizados por até 60 meses, ele oferece uma forma prática de aproveitar ao máximo a energia solar. Além disso, o autoconsumo remoto amplia as possibilidades para empresas com alta demanda energética e limitações de espaço, mostrando-se como uma alternativa inteligente para otimizar o uso da energia solar em diferentes locais. Isso reflete um avanço significativo na gestão energética, tornando-a mais flexível e adaptável às necessidades específicas de cada consumidor.

Atualmente, conforme as Figura 2.6 e Figura 2.7, o mercado do Distrito Federal cresceu o dobro a um ritmo notável, passando de 74.3 MW em 2021 para 152.9 MW em setembro de 2022, no ranking estadual da Geração Distribuída. No ranking a nível municipal, destaca-se como o segundo colocado, com referida potência instalada (MW) e percentual de 1,2%.

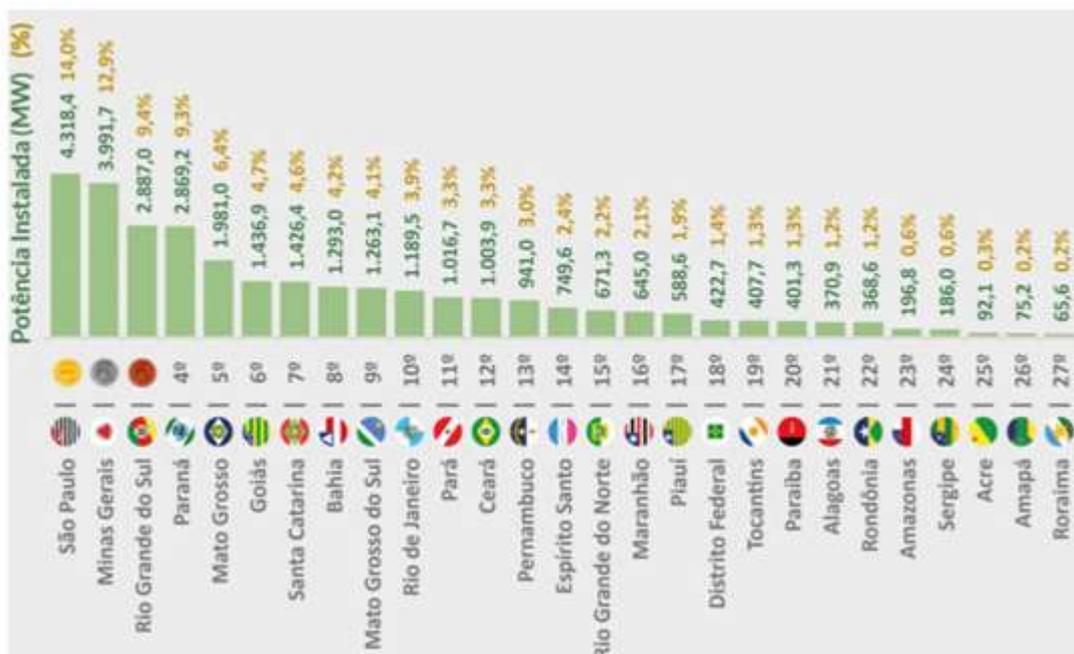


Figura 2.6 - Ranking da Geração Distribuída no País da Potência Instalada (MW) Estadual, em 2024.



Figura 2.7 - Ranking da Geração Distribuída no País da Potência Instalada (MW) Municipal, em 2024.

2.8 ENERGIAS RENOVÁVEIS

Neste item, para melhor conhecimento, apresenta-se uma breve descrição sobre as energias renováveis como o hidrogênio verde, a energia eólica, solar e a fotovoltaica.

2.8.1 Hidrogênio Verde

Recentemente, o foco no desenvolvimento da cadeia do hidrogênio como vetor energético tem se tornado um objetivo estratégico para muitos países, especialmente no contexto da descarbonização de suas economias. O hidrogênio verde (H2V), produzido a partir de fontes renováveis de energia, é agora reconhecido como um elemento fundamental para alcançar as metas de redução de emissões de gases de efeito estufa (GEE) estabelecidas no Pacto de Glasgow de 2021 por diversos países.

No Brasil, o desenvolvimento da cadeia de H2V está atualmente orientado principalmente para a exportação do produto. Ao direcionar o uso do excedente de energia elétrica para a produção de H2V destinado à exportação, o país perde a oportunidade de

empregar o produto para descarbonizar setores de difícil eletrificação, aumentar a resiliência de sua matriz elétrica e impulsionar a adoção adicional de fontes renováveis intermitentes.

2.8.2 Energia Eólica

Desde os anos 1970, a busca por energias alternativas aumentou consideravelmente, impulsionada pelas crises do petróleo que levaram muitos países a procurar maior segurança no fornecimento de energia e a reduzir a dependência de combustíveis importados. Nos tempos mais recentes, as preocupações ambientais se tornaram um grande impulsionador para a busca por métodos mais limpos de geração de energia. Entre essas alternativas, a energia eólica tem recebido considerável atenção ao longo das últimas décadas.

As preocupações com as mudanças climáticas e os esforços para reduzir as emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE), especialmente após a assinatura do Protocolo de Quioto em 1997, estimularam a busca por alternativas que pudessem atender às necessidades econômicas sem causar impactos ambientais significativos. Entre as medidas adotadas, o investimento crescente em fontes renováveis de energia, como a energia eólica, tornou-se uma das mais populares. De acordo com o Painel Intergovernamental para as Mudanças Climáticas (IPCC), essa forma de energia possui um grande potencial para a redução das emissões de GEE. A nível global, embora sua distribuição entre os países não seja uniforme, o potencial técnico da energia eólica supera a produção mundial de eletricidade. Apesar das barreiras políticas, econômicas e tecnológicas, estima-se que até 2050 a energia eólica poderia suprir cerca de 20% da demanda mundial de eletricidade (IPCC, 2011).

Inicialmente, os altos custos iniciais e o estágio de desenvolvimento da tecnologia eólica em comparação com as tecnologias tradicionais conferiam-lhe uma baixa competitividade. Para superar essas barreiras, foram necessários incentivos econômicos e regulatórios, o que resultou na adoção de políticas de apoio às energias renováveis em muitos países. Em 2005, apenas 55 países tinham algum tipo de incentivo para fontes renováveis, enquanto em 2011 esse número aumentou para 118 países (REN21, 2011).

Os incentivos para a energia eólica levaram a um aumento de sua participação em vários países, com um crescimento significativo observado desde 1996, especialmente a partir de 2004. Em 2011, a capacidade instalada de energia eólica em todo o mundo atingiu 238 GW

(GWEC, 2012). No entanto, a crise financeira de 2008 reduziu o mercado de energia eólica na Europa e nos Estados Unidos, que são os principais mercados para essa tecnologia. Isso fez com que grandes empresas diversificassem suas operações, voltando-se para mercados emergentes, como o Brasil.

No Brasil, a contribuição da energia eólica para a capacidade de geração de energia elétrica ainda é baixa, e sua participação na matriz energética é ainda menor. No entanto, nos últimos anos, houve um rápido aumento no número de projetos de energia eólica contratados, e a capacidade instalada deve aumentar em mais de 450% em apenas cinco anos. A indústria de aerogeradores também está experimentando um rápido crescimento, com expectativas de aumento significativo na capacidade de produção entre 2012 e 2013.

De acordo com (Simas & Pacca, 2013), a energia eólica no Brasil passou por um período de lento crescimento, porém, os projetos contratados nos últimos três anos deverão quintuplicar a capacidade instalada. É a tecnologia limpa que mais tem crescido na última década, trazendo benefícios ambientais e sociais para diversos países. Assim, a energia eólica deverá contribuir decisivamente para o desenvolvimento sustentável do país.

2.8.3 Energia Solar

A utilização da energia solar, que é abundante na escala de tempo terrestre e pode ser aproveitada tanto como fonte de calor quanto de luz, é indiscutivelmente uma das alternativas energéticas mais promissoras para enfrentar os desafios do novo milênio. É importante lembrar que o Sol é a fonte primordial de praticamente todas as outras formas de energia, o que significa que, em última análise, todas as fontes de energia na Terra são derivadas do Sol.

A energia solar desempenha um papel fundamental na evaporação, que é o ponto de partida para o ciclo da água. Esse ciclo, por sua vez, viabiliza o represamento de água e, conseqüentemente, a produção de eletricidade através da hidroeletricidade. Além disso, a radiação solar é responsável por induzir a circulação atmosférica em larga escala, o que resulta na formação dos ventos. Vale notar que o petróleo, o carvão e o gás natural são produtos derivados de resíduos de plantas e animais que, em última análise, obtiveram a energia necessária para o seu crescimento a partir da radiação solar.

Em se tratando de radiação solar, à medida que a Terra realiza seu movimento anual em torno do Sol, ela segue uma órbita elíptica e inclinada em relação ao plano equatorial, com um ângulo de aproximadamente 23,5 graus. Essa inclinação é a responsável pela variação na altura aparente do Sol no horizonte em um determinado horário ao longo dos dias, criando as estações do ano e tornando complexos os cálculos para determinar a posição solar em datas específicas.

A posição angular do Sol ao meio-dia solar em relação ao plano equatorial (com o Norte positivo) é conhecida como Declinação Solar (d). A Figura 2.8 ilustra os movimentos de rotação e translação desse processo e mostra esse ângulo variando ao longo do ano e dentro dos seguintes limites:

$$-23,45^\circ < d < 23,45^\circ$$

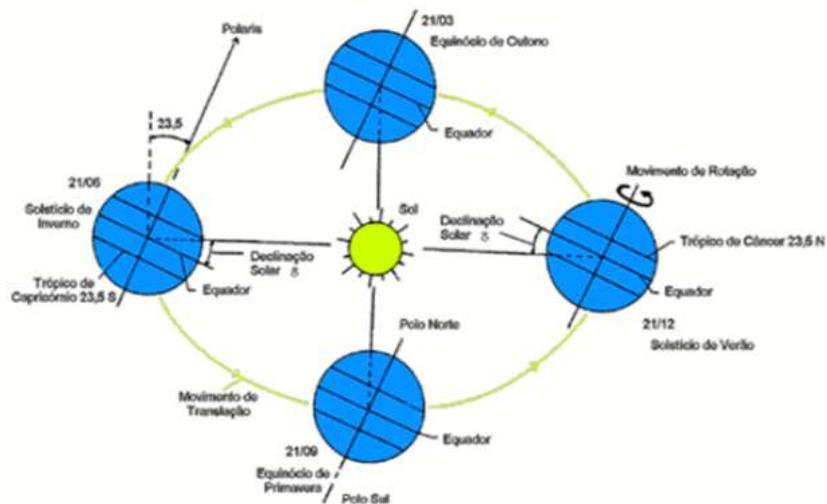


Figura 2.8 - Órbita da Terra em torno do Sol, com seu eixo N-S. Fonte: CRESESB (2006).

A combinação da declinação solar com a latitude local determina a trajetória aparente do movimento solar em um dia específico e em uma localização particular na Terra. A radiação solar que alcança a parte superior da atmosfera terrestre origina-se da fotosfera solar, uma camada fina com cerca de 300 km de espessura e uma temperatura superficial de aproximadamente 5800 K. No entanto, essa radiação não segue um padrão regular devido à influência das camadas externas do Sol, como a cromosfera e a coroa, que apresentam variações de temperatura, pontos quentes e frios, e ocorrências como erupções cromosféricas.

Apesar dessas variações, é possível estabelecer um valor médio para a quantidade de radiação solar que incide normalmente sobre uma superfície localizada na parte superior da atmosfera. Segundo dados da WMO (Organização Meteorológica Mundial), a radiação extraterrestre tem uma média de aproximadamente 1367 W/m². Utilizando fórmulas

matemáticas, é possível calcular a variação dessa radiação extraterrestre ao longo do ano, levando em conta a órbita elíptica da Terra.

A radiação solar é uma forma de radiação eletromagnética que se propaga a uma velocidade de 300.000 km/s, exibindo características tanto de ondas quanto de partículas. Em termos de comprimento de onda, a radiação solar abrange a faixa espectral de 0,1 μm a 5 μm , com seu pico de densidade espectral em 0,5 μm , que corresponde à luz verde (CRESESB, 2008).

A teoria das ondas é usada para definir as propriedades de absorção e reflexão da radiação solar em diversos materiais. Na faixa de comprimento de onda de 0,75 a 100 μm , que corresponde ao infravermelho, são definidas as propriedades de absorção, reflexão e emissão. A Figura 14 ilustra a distribuição espectral da radiação solar.

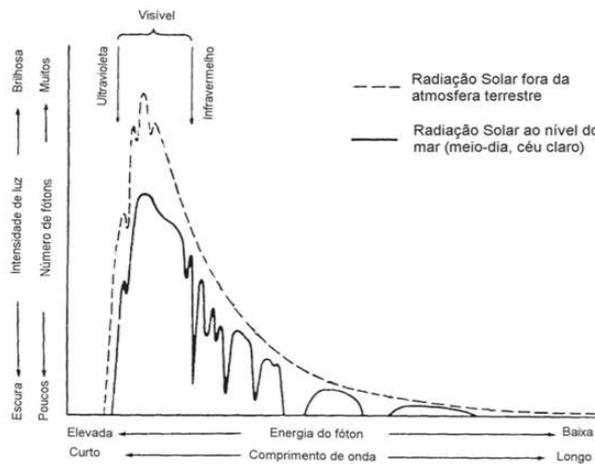


Figura 2.9 - Distribuição espectral da radiação solar. Fonte: CRESESB, 2004.

A energia solar incidente no meio material pode ser refletida, transmitida e absorvida. A parcela absorvida dá origem, conforme o meio material, aos processos de fotoconversão e termoconversão.

Da totalidade da radiação solar que chega às camadas mais altas da atmosfera, apenas uma parte atinge a superfície terrestre, devido à reflexão e absorção dos raios solares pela própria atmosfera. A parcela que alcança o solo é composta por dois componentes: um componente direto, também conhecido como feixe solar, e um componente difuso. A Figura 2.10 ilustra os componentes da radiação solar ao nível do solo.

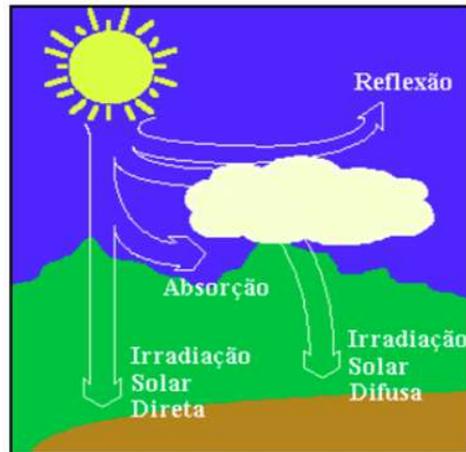


Figura 2.10 - Componentes da radiação solar ao nível do solo. Fonte: CRESESB, 2006.

Vale ressaltar que, quando a superfície receptora se encontra inclinada em relação à horizontal, ocorre uma terceira componente de radiação refletida pelo ambiente circundante, como o solo, a vegetação e outros obstáculos. A capacidade dessas superfícies em refletir a radiação solar é medida pelo coeficiente denominado "albedo".

Antes de chegar ao solo, a radiação solar sofre modificações em suas características, como intensidade, distribuição espectral e ângulo de incidência, devido às interações com a atmosfera. Essas alterações são influenciadas pela espessura da camada atmosférica, também conhecida como "Massa de Ar" (MA), e, conseqüentemente, pelo ângulo zenital do Sol, a distância Terra-Sol e as condições atmosféricas e meteorológicas.

Devido às variações diárias, sazonais e às influências de fatores como nuvens e chuvas, a disponibilidade de energia solar apresenta uma considerável flutuação. Isso muitas vezes requer a implementação de sistemas eficazes de armazenamento para a energia gerada a partir do processo de conversão.

É importante destacar que apenas a componente direta da radiação solar pode ser concentrada por meio de técnicas como espelhos parabólicos e lentes. Essa concentração permite reduzir a área de absorção solar e aumentar significativamente sua temperatura, otimizando o aproveitamento energético. A Figura 2.11, ilustra a trajetória dos raios de Sol na atmosfera e definição do coeficiente de "Massa de Ar" (AM).

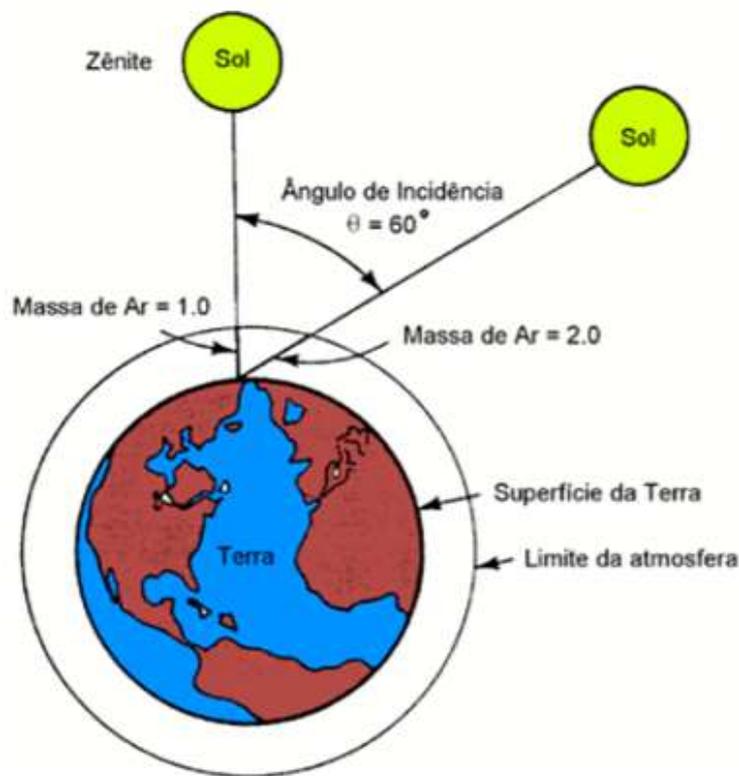


Figura 2.11 - Trajetória dos raios de Sol na atmosfera e definição do coeficiente de "Massa de Ar" (AM).
Fonte: CRESESB (2006).

A medição da radiação solar, abrangendo tanto a componente direta quanto a componente difusa na superfície terrestre, desempenha um papel fundamental no estudo das influências das condições climáticas e atmosféricas. Ao registrar históricos dessas medidas, torna-se possível planejar a instalação de sistemas de energia térmica e fotovoltaica em uma determinada região, garantindo um aproveitamento máximo ao longo do ano, dado que as variações na intensidade da radiação solar sofrem alterações significativas.

Para manter padrões de precisão confiáveis, a Organização Mundial de Meteorologia (OMM) estabeleceu normas que determinam limites de precisão para quatro categorias de instrumentos: instrumentos de referência ou padrão, instrumentos de primeira, segunda e terceira classe. As medições de referência incluem a radiação global e difusa no plano horizontal, bem como a radiação direta normal. Essas normas são essenciais para garantir a qualidade e a confiabilidade das medições de radiação solar realizadas em todo o mundo por instituições de pesquisa científica.

A energia solar é a energia eletromagnética proveniente do sol, onde é produzida através de reações nucleares, e que, propagando-se através do espaço interplanetário, incide na

superfície da Terra. O total de energia solar que incide na superfície da terra em 1 ano é superior a 10.000 vezes o consumo anual de energia bruta da humanidade. Essa energia é medida por instrumentos denominados piranômetros, pireliômetros, heliógrafos (apresentado na Figura 17), solarímetros, radiômetros e actinógrafos.

Os piranômetros são dispositivos utilizados para a medição da radiação solar global. Esses instrumentos se destacam pelo emprego de uma termopilha que avalia a discrepância de temperatura entre duas superfícies, ambas expostas à mesma iluminação, sendo uma delas pintada de preto e a outra de branco. A expansão térmica dessas superfícies gera um potencial elétrico diferencial, o qual, ao ser quantificado, proporciona uma leitura instantânea do nível de energia solar presente.

Os pireliômetros são instrumentos que medem a radiação direta. Ele se caracteriza por apresentar uma pequena abertura de forma a "visualizar" apenas o disco solar e a região vizinha denominada circumsolar. O instrumento segue o movimento solar onde é constantemente ajustado para focalizar melhor a região do sensor. O heliógrafo (Figura 2.12) é o instrumento que registra a duração do brilho solar. O actinógrafo é o instrumento usado para medir a radiação global. Este instrumento é composto de sensores baseados na expansão diferencial de um par bimetálico. Os sensores são conectados a uma pena que, quando de suas expansões, registram o valor instantâneo da radiação solar.



Figura 2.12 - Heliógrafo Capbell-Stokes. Fonte: CRESESB, 2006.

A potência solar instantânea que incide em determinado ponto é normalmente medida em W/m² (potência/área) e o total de energia em um dia que atinge este ponto é normalmente medido em kWh/m².dia (energia/área/dia). Muitas outras unidades são também utilizadas correntemente (J/m², cal/cm².min, BTU/ft².dia, etc.), de forma que muitas vezes se faz necessária uma tabela de conversão.

Conforme é esperado, o Brasil, com seu território situado em sua maioria em latitudes entre o Equador e o Trópico de Capricórnio, apresenta uma incidência de energia solar bastante favorável. A potência instantânea incidente na superfície terrestre pode atingir valores superiores a 1000W/m². A média anual de energia incidente na maior parte do Brasil varia entre 4kWh/m².dia e 5kWh/m².dia. No Brasil, existem alguns trabalhos consolidados sobre o levantamento do potencial solar em todo o território, são eles:

a) Atlas de Irradiação Solar do Brasil, baseado em dados de satélite, desenvolvido pelo INMET e LabSolar da Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC (disponível em <http://www.labsolar.ufsc.br>);

b) Atlas Solarimétrico do Brasil com base em medições terrestres, desenvolvido pela Universidade Federal de Pernambuco em parceria com o CEPEL (disponível para aquisição no CRESESB); e

c) Atlas Brasileiro de Energia Solar com base em dados de satélite, desenvolvido através de uma parceria entre a DMA / CPTEC / INPE e o LEPTEN / UFSC (antigo LabSolar).

Geralmente, a disponibilidade de energia solar varia em decorrência das estações do ano (mínimo no inverno e máximo no verão), bem como do clima do local. Existem duas formas principais de aproveitamento da energia solar:

a) Fotovoltaico – geração de energia elétrica através de módulos fotovoltaicos;

b) Térmico – aproveitamento sob forma de calor para aquecimento de água, secagem de produtos agropecuários, geração de energia elétrica através de processo termodinâmico, etc.

As fontes de energia denominadas “alternativas” ou “renováveis” são aquelas que não dependem do consumo de um combustível, e sim de energias disponíveis na natureza. Normalmente são consideradas alternativas ou renováveis as seguintes fontes de energia:

a) Hidroelétrica - aproveitamento do potencial hidráulico dos rios para geração de energia elétrica;

- b) Solar – aproveitamento da energia proveniente do sol;
- c) Eólica – aproveitamento da energia do ar em movimento (ventos);
- d) Marés – aproveitamento das diferenças de altura das águas dos oceanos causadas pelas marés para a geração de energia;
- e) Ondas – aproveitamento da energia das ondas dos oceanos;
- f) Biomassa – aproveitamento de matéria orgânica de diversas origens para a geração de energia;
- g) Geotérmica – aproveitamento do calor das rochas do interior da Terra (fontes termais, áreas vulcânicas, etc.) para geração de energia.

Com exceção da energia hidroelétrica, que já é uma tecnologia dominada, estas fontes estão em diferentes níveis de desenvolvimento técnico e econômico ao redor do mundo, sendo que algumas já estão disponíveis comercialmente, enquanto que outras são apenas experimentais.

O Brasil conta com alto potencial de energia solar, porém ainda pouco explorado. A Alemanha, apesar de ter um potencial solar menor que o do Brasil o explora muito mais, revelando que seu uso e, portanto, seus benefícios advêm de uma consciência benéfica juntamente com políticas e programas governamentais que impulsionam seu uso ainda mais. (Pereira et al., 2017). Porém, é interessante ressaltar que O Brasil possui e continua a desenvolver diversos programas para incentivar o uso de fontes renováveis de energia. No entanto, é crucial reconhecer que a situação do Brasil é distinta da Alemanha, que historicamente dependia de energia nuclear e térmica importada da Rússia.

Após o acidente nuclear de Fukushima, a Alemanha enfrentou um dilema político e decidiu intensificar o uso de energia fotovoltaica distribuída, enquanto desativava suas usinas nucleares. Isso levou a uma diminuição na segurança energética do país e a um aumento da dependência da geração térmica russa. Além disso, o excesso de geração de energia fotovoltaica distribuída na Alemanha causa uma queda significativa na produção de eletricidade ao anoitecer (o efeito do crepúsculo), que precisa ser compensada por termelétricas a gás da Rússia. Com os conflitos entre Rússia e Ucrânia, a Alemanha se vê forçada a considerar a reintegração das usinas nucleares em sua matriz energética e a explorar a incorporação de sistemas de armazenamento de energia (Kreibich, 2017, p. 123).

A aplicação da tecnologia de geração distribuída, notadamente a solar fotovoltaica, é tida por muitos como uma das soluções para a geração de energia elétrica sustentável, através de uma fonte inesgotável e a carbono neutro (não poluente na geração), proporcionando benefícios ambientais e eficiência energética na matriz de energia brasileira (Marinoski et al., 2004).

A frequente escassez anual de recursos hídricos no Brasil traz à tona a necessidade de diversificação da matriz elétrica, com o objetivo de garantir a segurança de continuidade de fornecimento energético, de forma sustentável e que reduza os impactos ambientais pois até o momento a principal fonte de energia é proveniente de usinas hidrelétricas e termelétricas, que causam impactos ambientais como o agravamento do efeito estufa, além de impactos para a saúde devido à poluição do ar. A Geração Distribuída (e aqui se inclui, além da energia solar, a energia eólica, a biomassa, etc.) traz diversos benefícios em relação a geração centralizada, que é formada por centrais de produção de energia elétrica, apesar de que a geração hidrelétrica se sobressai quanto a questão da segurança energética, muito citada na literatura científica.

Sabe-se que com o uso da energia solar fotovoltaica obtém-se a vantagem de não emitir GEE no processo de geração e, portanto, as perdas de energia elétrica também são reduzidas (Lira et al., 2019), possibilitando também a redução da participação das usinas convencionais (térmicas e hidrelétricas), tornando-se uma alternativa de tecnologia no país. Logo, deve-se buscar um maior estímulo das políticas públicas no afã de aumentar a capacidade instalada desta modalidade de produção de energia elétrica o que, conseqüentemente, reduz emissões de CO₂, por exemplo.

O aumento do consumo de energia elétrica cresce proporcionalmente ao aumento populacional e com o avanço tecnológico, portanto, o uso dos combustíveis fósseis para produção de energia tem como consequência produção de CO₂, o qual contribui para o aquecimento global e retém oxigênio da atmosfera comprometendo a disponibilidade de O₂ para as próximas gerações.

Segundo dados da IEA (Agência Internacional de Energia) (IEA, 2012) se a população continuar consumindo energia como faz atualmente, em um século, vai ocorrer dificuldades de explorar tais recursos, e que as consequências já são e serão ainda mais prejudiciais ao meio ambiente e à saúde dos indivíduos desta e das próximas gerações. Além do mais, a mesma agência afirma que as reservas produtoras de petróleo atualmente sendo exploradas estarão cerca de 60% menos produtivas em 2035 em relação a 2000.

Na percepção de (Giddens, 2010), a questão climática estabelece-se como um dos grandes desafios científicos e políticos do presente século, portanto, os limites ecossistêmicos estariam sendo ultrapassados pelas sociedades modernas ao utilizar cada vez mais intensamente recursos naturais limitados e pela contínua degradação socioambiental, que se manifesta, entre outros, nas emissões de GEE e nas vulnerabilidades sociais e ambientais (Vitousek et al., 1997). Para conseguir matéria prima para produção de energia elétrica o homem agride ainda mais a natureza. Assim, a forma como a energia é produzida está na origem de muitos problemas ambientais atuais (Tester et al., 2012; Zhang et al., 2014). Portanto, há uma grande oportunidade de mitigação de emissões globais em se tratando da obtenção das fontes de energia.

É oportuno ressaltar que de acordo com (Lira et al., 2019), uma das causas de um crescimento de 92,42% (de 198 para 381) de unidades consumidoras conectadas à rede elétrica no Estado do Ceará, de 2013 a 2017, se deve ao fato desta unidade da federação ter fomentado ações de incentivo a esta matriz energética e tais números justificam os resultados advindos das políticas públicas realizadas no Estado, em alguns benefícios para os consumidores como, isenção de impostos, financiamentos por bancos e normas que contribuem para o crescimento no mercado (Santos, 2018), ações tais que têm sido consideradas imprescindíveis para o sucesso de implementação de sistemas fotovoltaicos e outras fontes sustentáveis. Desde então, os custos e modalidades de contratação de energia fotovoltaica caíram muito de preço e a curva de adoção em todo o país permanece subindo, mesmo após a retirada dos incentivos.

Em se tratando de Alemanha, por exemplo, a maioria das unidades instaladas em operação naquele país encontram-se em residências, com potências entre 10 e 100 kW (IDEAL, 2016), faixa de potência maior que a do Brasil, devido a menores irradiações solares e a possibilidade de venda do excedente à rede, o que não é permitido no Brasil. Esta maior representatividade no setor residencial pode ser justificado pela maior consciência por parte dos moradores de centros urbanos em utilizar-se de fontes alternativas de energias renováveis, em especial de fontes solares, que oferecem aos consumidores uma maior economia na conta de energia, além de estar reduzindo os impactos ambientais causados por fontes convencionais originadas por combustíveis fósseis e o possível acionamento das termelétricas que atuam na contribuição no aumento dos gases do efeito estufa, gerando impactos globais, além de provocarem impactos locais trazendo risco à população do entorno. (Lira et al., 2019). Esse dado revela que uma política de conscientização se torna muito eficaz e se espera que em uma instituição como o IFB, quando comparada a unidades residenciais, terá um efeito bem maior.

Ainda de acordo com (Lira et al., 2019) e com o senso comum, em se tratando de pessoa física, mas que pode ser aplicado e adaptado para pessoas jurídicas (IFB), torna-se necessário mais investimentos por parte dos órgãos públicos, sugerindo mais estudos e implementações acerca de novas linhas de financiamento com taxas de juros menores, a criação de um fundo de incentivo, a possibilidade de utilizar o FGTS para a instalação de placas, a instalação nos prédios públicos e um IPTU reduzido para os proprietários de imóveis que gerem energia, pois mesmo com o incremento nesta matriz alternativa no decorrer dos anos de 2013 à 2017 no estado do Ceará, observa-se que ainda cresce timidamente o uso de fontes solares, possuindo apenas 0,5 % desta matriz energética, portanto têm-se ainda uma enorme caminhada de oportunidades e debates para incentivar cada vez mais essa matriz, visto que os principais acordos internacionais sobre o clima incentivam as fontes alternativas de energia limpa (Alencar et al., 2018). Vale mencionar que, para o caso do IPTU reduzido, esta medida compromete o orçamento da maioria dos municípios, pois esta é a maior fonte de arrecadação destes necessitando, portanto, de outras medidas mais compatíveis.

A reduzida necessidade de manutenção e a disponibilidades do recurso solar reforçam a necessidade de uma maior implementação de sistemas fotovoltaicos no Brasil, e o Distrito Federal entra em cena devido a considerável intensidade de radiação solar e, além do mais, a geração pode ser feita mais perto do consumidor, reduzindo custos e perdas no transporte de energia (Rendeiro, 2013). Cabe mencionar que no sistema de compensação de energia a rede das distribuidoras é utilizada seja para injetar energia na rede ou para receber a compensação. Ainda não há um controle granular para saber se a energia gerada por um usuário e entregue para a rede está sendo utilizada por um usuário próximo ou se deslocando muito, estando sujeita às perdas.

Citando (Lira et al., 2019), é necessário fazer planejamentos e investimentos no setor energético brasileiro, considerando os impactos ambientais e socioeconômicos que cada setor pode ocasionar, apresentando mudanças nas matrizes elétricas brasileiras de fontes convencionais para fontes alternativas de energias renováveis, mudando assim o quadro que nos encontramos que apresenta um aumento do fator de impacto nacional para gases de efeito estufa, com 0,0740 tCO₂/MWh em 2018; 0,075 t CO₂/MWh em 2019; 0,0617 em 2020 (redução, provavelmente devido à pandemia global) e uma média de 0,1061 em 2021 até o mês de Julho (MCTI, 2015 - Fator médio - Inventários corporativos), apresentando a devida necessidade de políticas que garantem a redução de GEE.

Portanto, a solução para emissão excessiva de GEE (o que acarreta não somente impactos ambientais, mas econômicos e sociais) perpassa não apenas pelo uso de placas fotovoltaicas, mas atividades, por exemplo, de eficiência energética evitando desperdícios de energia, entre outras atividades, honrando compromissos firmados entre nações do mundo todo, como na RIO+20, no afã da mitigação dos impactos ambientais.

2.8.4 Energia Solar Fotovoltaica

Entende-se por Energia Solar Fotovoltaica a obtenção de energia por meio da conversão direta da luz em eletricidade, conhecida como Efeito Fotovoltaico. O Efeito Fotovoltaico, inicialmente descrito por Edmond Becquerel em 1839, ocorre quando a luz é absorvida por um material semicondutor, criando uma diferença de potencial nos extremos desse material. Em 1876, o primeiro dispositivo fotovoltaico foi criado como resultado dos estudos sobre estruturas de estado sólido. No entanto, apenas em 1956, com o avanço da microeletrônica, a produção industrial começou a ganhar força. A célula fotovoltaica é a unidade fundamental desse processo de conversão.

No início, o desenvolvimento da tecnologia se concentrou na busca de fontes de energia para sistemas de telecomunicações em áreas remotas. Posteriormente, a "corrida espacial" desempenhou um papel importante como fator impulsionador. As células solares se mostraram o meio mais adequado, devido ao seu menor custo e peso, para fornecer energia suficiente durante missões espaciais de longa duração. Além disso, a necessidade de energia para satélites também contribuiu para o avanço das células solares.

A crise energética de 1973 renovou e ampliou o interesse nas aplicações terrestres da tecnologia solar. No entanto, para tornar economicamente viável a conversão de energia solar, foi necessário reduzir drasticamente os custos de produção das células solares em relação às utilizadas em explorações espaciais, muitas vezes em até 100 vezes. Isso também resultou em uma mudança no perfil das empresas envolvidas no setor, com empresas de petróleo nos Estados Unidos diversificando seus investimentos para incluir a produção de energia a partir da radiação solar (CRESESB, 2008).

Um dos principais desafios iniciais para a utilização em larga escala da energia solar fotovoltaica era o alto custo das células fotovoltaicas. As primeiras células eram produzidas a

um custo de US\$ 600 por watt para os programas espaciais (CRESESB, 2008). No entanto, à medida que o mercado cresceu e várias empresas se concentraram na produção de células fotovoltaicas, os preços começaram a diminuir ao longo dos anos.

Hoje em dia, sistemas fotovoltaicos são amplamente utilizados em instalações remotas, permitindo uma variedade de projetos sociais, agropecuários, de irrigação e comunicações. As vantagens dos sistemas fotovoltaicos, como modularidade, baixos custos de manutenção e longa vida útil, tornaram-nos vitais para instalações em áreas que não possuem acesso à rede elétrica bem como junto à rede convencional de eletricidade.

O efeito fotovoltaico é um fenômeno que ocorre em materiais semicondutores, que possuem características específicas em relação à energia, sendo amplamente utilizado na conversão da luz solar em eletricidade. Esses semicondutores, como o silício, possuem duas bandas de energia: a banda de valência, onde os elétrons podem ser encontrados, e a banda de condução, que geralmente está vazia. O silício, por exemplo, é um semicondutor comumente utilizado na fabricação de células fotovoltaicas. Ele possui uma estrutura cristalina na qual cada átomo de silício está ligado a quatro outros átomos, compartilhando elétrons de valência. Esse compartilhamento cria uma rede cristalina estável que é essencial para o funcionamento das células fotovoltaicas (Green, 1982).

A introdução de impurezas no silício, processo conhecido como dopagem, é fundamental para a criação de células fotovoltaicas eficientes. Quando átomos como o fósforo, que têm cinco elétrons de ligação, são introduzidos no silício, um dos elétrons de ligação fica fracamente ligado ao átomo de origem. Esse elétron adicional pode ser facilmente liberado e migrar para a banda de condução, transformando o material em um semicondutor do tipo n, ou seja, com excesso de elétrons livres. O fósforo, nesse contexto, é chamado de dopante doador de elétrons (Shah, 2004).

Por outro lado, a dopagem com átomos de boro, que possuem apenas três elétrons de ligação, cria uma situação oposta, na qual há uma falta de elétrons conhecida como buraco ou lacuna. Esses buracos podem ser preenchidos por elétrons de átomos vizinhos com pouca energia, tornando o material um semicondutor do tipo p, caracterizado pela presença de buracos como portadores de carga positiva. O boro, nesse caso, é denominado aceitador de elétrons (Sze, 2007).

A junção de semicondutores tipo p e tipo n em um único cristal de silício cria o que é conhecido como junção pn. Na junção pn, os elétrons livres do lado n tendem a migrar para o lado p, onde encontram os buracos que os capturam, gerando uma região de carga negativa no lado p e uma de carga positiva no lado n. Esse processo gera um campo elétrico permanente na junção, que impede a migração contínua de elétrons e, conseqüentemente, a recombinação com os buracos. Esse equilíbrio é essencial para o funcionamento da célula fotovoltaica (Luque, 2011).

Quando uma junção pn é exposta à luz solar, os fótons com energia suficiente para superar a energia de gap do material geram pares elétron-lacuna. Esses pares são separados pelo campo elétrico da junção pn, com os elétrons sendo acelerados para o lado n e os buracos para o lado p, gerando assim uma corrente elétrica. Esse movimento de cargas, provocado pela incidência de luz, resulta na diferença de potencial que é a base do efeito fotovoltaico.

Conectando as extremidades do material a um circuito externo, é possível gerar corrente elétrica contínua, que é o princípio de funcionamento das células fotovoltaicas (Wurfel, 2005). As células fotovoltaicas são predominantemente fabricadas com silício (Si) e podem ser classificadas em três principais tipos: monocristalinas, policristalinas e amorfas.

Historicamente, as células de Silício monocristalino (Figura 2.13) têm sido as mais amplamente usadas e comercializadas para a conversão direta de energia solar em eletricidade. O processo de fabricação dessas células começa com a extração do cristal de dióxido de silício, que é purificado e solidificado. A pureza do silício atinge cerca de 98 a 99%, o que é eficiente em termos de energia e custos.

No entanto, para uso em eletrônica, o silício deve ter uma estrutura monocristalina e maior pureza, chegando a 99,9999%. O processo mais comum para alcançar essas qualidades é conhecido como "processo Czochralski", no qual o silício é fundido com uma pequena quantidade de dopante, geralmente boro. Isso resulta na formação de um grande cilindro de silício monocristalino levemente dopado, que é cortado em fatias finas e, em seguida, exposto a vapor de fósforo para criar a junção. As células fotovoltaicas monocristalinas são conhecidas por sua alta eficiência e desempenho. De fato, elas costumam ter as maiores eficiências entre os diferentes tipos de células fotovoltaicas, atingindo até 15% nas versões comerciais e podendo chegar até 18% em experimentos de laboratório. Essa alta eficiência as torna especialmente adequadas para aplicações onde o espaço é limitado, permitindo a geração de mais energia em

uma área menor. O desempenho das células monocristalinas também é reconhecido por sua estabilidade ao longo do tempo, o que as torna uma opção confiável para sistemas de energia solar de longo prazo (Cremasco et al., 2022).

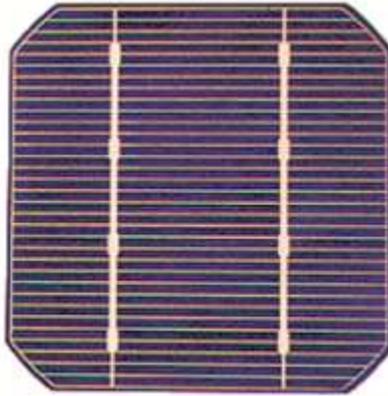


Figura 2.13 - Célula de silício monocristalino. Fonte: CRESESB, 2006.

As células de silício policristalino (Figura 2.14) são mais econômicas que as monocristalinas, devido a um processo de preparação menos rigoroso. A eficiência, no entanto, é ligeiramente menor em comparação com as células monocristalinas. O processo de pureza do silício utilizado na produção de células policristalinas é semelhante ao das células monocristalinas, permitindo níveis de eficiência comparáveis. As técnicas de fabricação são basicamente as mesmas, mas com menos controle rigoroso. A eficiência máxima alcançada ao longo dos anos para células policristalinas tem sido de cerca de 12,5% em escalas industriais.

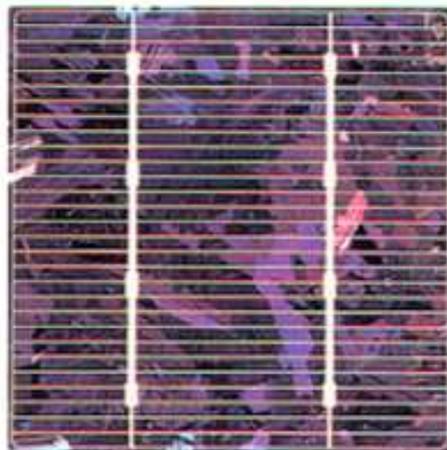


Figura 2.14 - Célula de silício policristalino. Fonte: CRESESB, 2006.

As células de silício amorfo diferem das demais por apresentarem uma estrutura atômica altamente desordenada. O silício amorfo é vantajoso devido às suas propriedades elétricas e ao

processo de fabricação. Pode absorver radiação solar na faixa visível e ser produzido por meio de deposição em vários substratos, tornando-o uma tecnologia forte para sistemas fotovoltaicos de baixo custo. No entanto, apresenta uma eficiência de conversão mais baixa em comparação com as células de silício monocristalino e policristalino e sofre degradação nos primeiros meses de operação, reduzindo sua eficiência ao longo da vida útil. As vantagens incluem um processo de fabricação simples e econômico, a possibilidade de fabricar células de grande área e baixo consumo de energia na produção.

De acordo com a HCC Energia Solar (2024), os painéis de filme fino são fabricados a partir de células solares orgânicas, compostas por polímeros semicondutores que absorvem a luz solar. Essas células transportam a carga gerada para um conversor, onde a eletricidade é produzida pelo efeito fotoelétrico.

A produção desse material utiliza um processo chamado "roll to roll", em que as células orgânicas são impressas em um substrato leve, flexível e transparente, permitindo que os filmes finos se adaptem facilmente a diferentes superfícies.

A simplicidade do processo de fabricação torna esses painéis mais acessíveis economicamente. No entanto, sua eficiência é baixa, resultando em uma menor produção de energia por metro quadrado. Conseqüentemente, é necessária uma área maior para gerar a mesma quantidade de energia que os painéis fotovoltaicos convencionais, o que pode aumentar os custos de instalação.

Apesar dessa limitação, os painéis de filme fino são uma tecnologia promissora. Com o avanço da eletrônica orgânica e o aumento da eficiência energética, esses painéis podem se tornar uma solução ideal para fachadas de edifícios, indústrias e coberturas de estacionamentos. Essas são as principais características dos diferentes tipos de células fotovoltaicas, cada uma com suas próprias vantagens e desvantagens, adequadas para diferentes aplicações e orçamentos.

Os módulos fotovoltaicos são compostos por várias células fotovoltaicas, as quais são agrupadas devido à sua baixa tensão e corrente de saída individual. Essas células podem ser conectadas de duas maneiras principais: em série ou em paralelo ilustrada na Figura 2.15.

Na conexão em paralelo, as correntes de cada célula são somadas, e a tensão do módulo é igual à tensão de uma única célula. No entanto, devido às características típicas das células

(corrente máxima de cerca de 3A e tensão muito baixa, em torno de 0,7V), essa configuração raramente é usada, a menos em circunstâncias muito específicas.

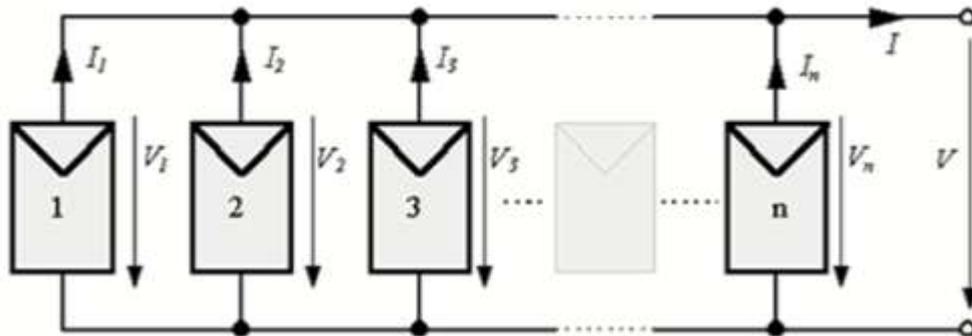


Figura 2.15 - Conexão de células em paralelo. Fonte: CRESESB, 2006.

A conexão mais comum das células fotovoltaicas nos módulos é a conexão em série (Figura 2.16). Isso envolve agrupar o maior número possível de células em série, somando suas tensões individuais para atingir um valor final de cerca de 12V. Essa tensão é adequada para carregar baterias, que geralmente operam na faixa de 12V.

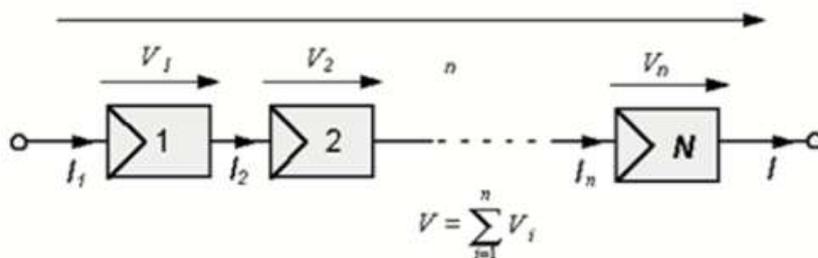


Figura 2.16 - Conexão de células em paralelo. Fonte: CRESESB, 2006.

Um problema comum que pode ocorrer é quando uma célula dentro de um módulo está obstruída ou com mau desempenho, o que pode reduzir drasticamente a saída de energia do módulo e afetar todo o conjunto, uma vez que as células estão em série. Para evitar esse problema, são usados diodos de passagem ou "bypass". Esses diodos fornecem um caminho alternativo para a corrente e evitam que a célula com mau desempenho limite toda a produção de energia do módulo. Geralmente, um único diodo de bypass é usado em grupos de células, o que é mais econômico do que usar um diodo em cada célula conforme mostra a Figura 2.17.

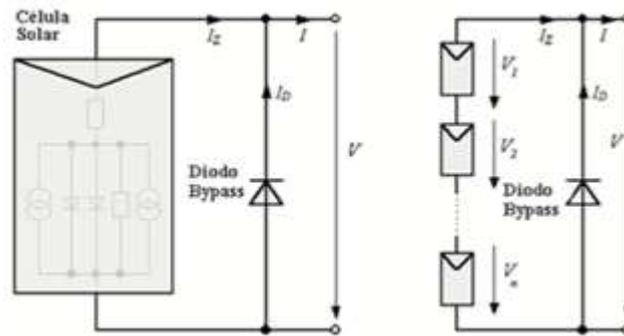


Figura 2.17 - Possível ligação para um diodo bypass entre células. Fonte: CRESESB, 2006.

Outro problema potencial é a corrente reversa fluindo pelas células, o que significa que o módulo está recebendo mais energia do que está gerando. Isso pode prejudicar a eficiência das células e, em casos extremos, desconectar uma célula do arranjo, resultando na perda total de energia do módulo. Para evitar isso, são usados diodos de bloqueio, apresentado na Figura 2.18, que impedem correntes reversas quando o módulo está conectado diretamente a uma bateria ou acumulador.

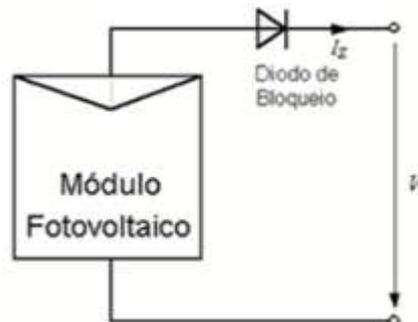


Figura 2.18 - Diodo de bloqueio. CRESESB, 2006.

Quanto as características elétricas dos módulos fotovoltaicos, além da potência de pico, que é a medida comum da potência dos módulos, existem outras características elétricas que descrevem o desempenho dos módulos:

a) Tensão de Circuito Aberto (V_{oc}): A tensão máxima que o módulo pode atingir quando nenhum fluxo de corrente está presente;

Corrente de Curto Circuito (I_{sc}): A corrente máxima que o módulo pode fornecer quando a tensão é zero;

b) Potência Máxima (P_m): A potência máxima que o módulo pode gerar sob condições ideais;

c) Voltagem de Potência Máxima (V_{mp}): A tensão do módulo no ponto de máxima potência;

d) Corrente de Potência Máxima (I_{mp}): A corrente no ponto de máxima potência.

Essas características são determinadas sob condições padrão, com radiação de 1000W/m^2 e temperatura da célula de 25°C . É importante notar que a eficiência da célula diminui com o aumento da temperatura, isso também acontece com a corrente em relação a voltagem, conforme ilustra a Figura 2.19 (a) – (d).

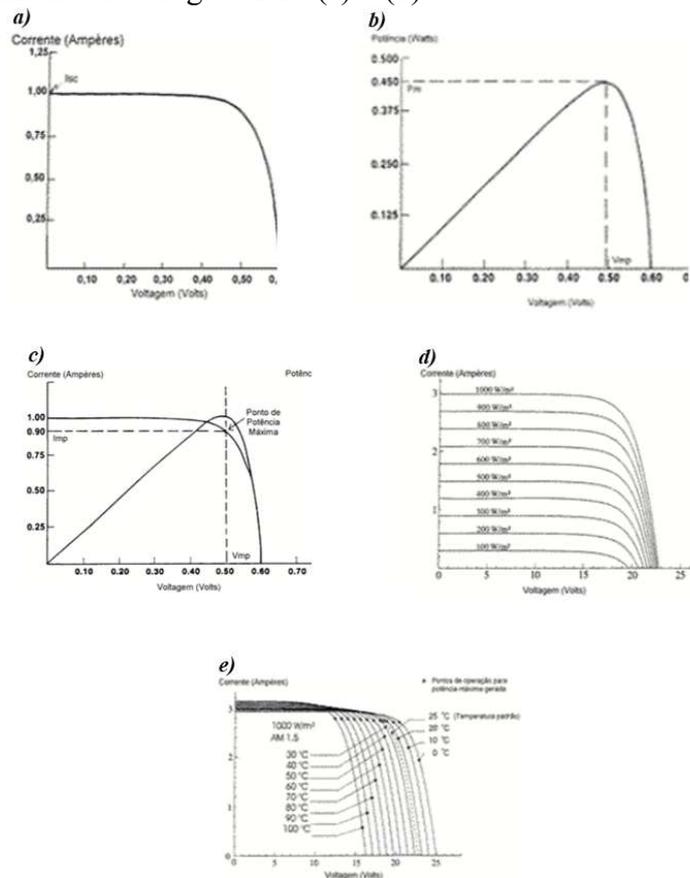


Figura 2.19 - Curva característica $I \times V$ mostrando a corrente I_{sc} e a tensão V_{oc} (a), Curva típica de potência versus tensão (b), Parâmetros de potência máxima (c), Efeito causado pela variação de intensidade luminosa (d) e Efeito causado pela temperatura na célula (e). Fonte: CRESESB, 2006.

Os fatores principais afetam as características elétricas dos módulos fotovoltaicos são a intensidade luminosa e a temperatura das células. A corrente gerada nos módulos aumenta linearmente com o aumento da intensidade luminosa. No entanto, o aumento da temperatura nas células reduz a eficiência do módulo, levando a uma diminuição dos pontos de operação de potência máxima.

Portanto, os módulos fotovoltaicos são dispositivos que convertem a energia luminosa diretamente em energia elétrica em corrente contínua (CC), os quais, quando expostos à radiação solar funcionam como geradores de energia elétrica.

Em se tratando de capacidade real de geração de energia, os módulos fotovoltaicos são medidos em determinadas condições de padrão internacional, utilizadas por todos os fabricantes. A potência produzida nestas condições é expressa em uma unidade denominada Wp (Watts pico). Porém, deve-se considerar que a produção de energia dos módulos fotovoltaicos não é constante neste valor, mas varia de forma diretamente proporcional à luminosidade incidente.

Mesmo em tempo nublado os módulos fotovoltaicos funcionam, mas a geração será sempre proporcional à luminosidade incidente, podendo variar aproximadamente entre 60% e 10% da geração verificada em um dia de céu limpo. Em um dia pouco encoberto poderá atingir os 60%, enquanto que em dias pesadamente encobertos poderá ser de menos de 10% (CRESESB, 2008). Esses módulos não consomem qualquer tipo de combustível, não geram nenhum tipo de emissão, não têm partes móveis e não produzem qualquer ruído. Na sua composição não existem substâncias tóxicas ou nocivas ao meio ambiente.

Mundialmente existem dezenas de fabricantes desses módulos, os quais podem ser utilizados em sistemas fotovoltaicos devidamente projetados e que podem fornecer energia para alimentar quaisquer cargas elétricas. A principal limitação para a aplicação de tais sistemas em larga escala é normalmente a viabilidade econômica, muito embora existam ainda algumas limitações técnicas. Embora seja tecnicamente possível utilizar a energia elétrica gerada por módulos fotovoltaicos para o aquecimento de água, isto não é economicamente viável. Para o aquecimento de água a partir de energia solar são utilizados outros dispositivos denominados coletores solares térmicos, conforme mostrado na Figura 2.20.

Um sistema fotovoltaico pode ser classificado em três categorias distintas: sistemas isolados (ou autônomos), híbridos e conectados à rede. Todos esses sistemas possuem uma configuração básica, que inclui uma unidade de controle de potência e, em sistemas isolados, uma unidade de armazenamento (Figura 2.21).



Figura 2.20 - Aquecedor solar com um reservatório de capacidade de 200 litros (Mundo da Educação, 2023).

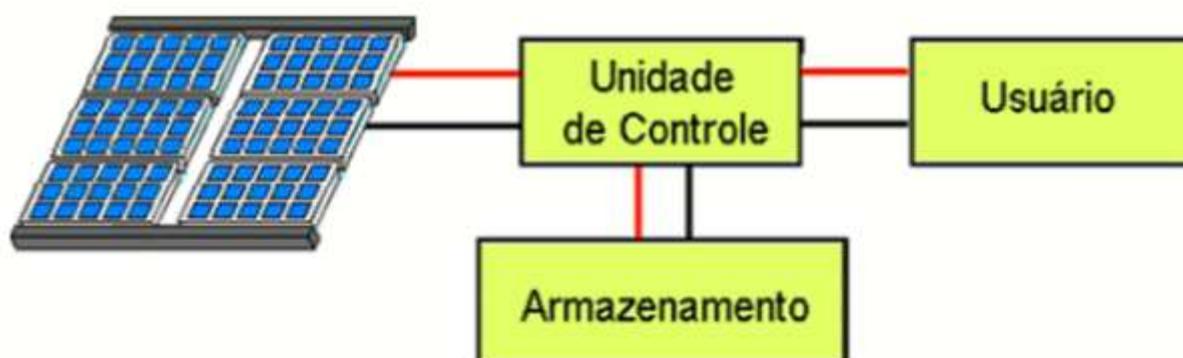


Figura 2.21 - Configuração básica de um sistema fotovoltaico. Fonte: CRESESB, 2006

Os sistemas isolados normalmente envolvem alguma forma de armazenamento de energia. Isso pode ser feito usando baterias quando se deseja alimentar aparelhos elétricos ou armazenando energia de forma gravitacional, como em sistemas de bombeamento de água para tanques de abastecimento. Alguns sistemas isolados não requerem armazenamento, como no caso da irrigação, onde a água bombeada é consumida diretamente ou armazenada em reservatórios.

Para sistemas que utilizam armazenamento de energia em baterias, é essencial um dispositivo chamado "controlador de carga". Sua função principal é evitar danos às baterias

causados por sobrecarga ou descarga profunda. Esse controlador é utilizado em sistemas de pequena escala, onde os dispositivos operam em baixa tensão e corrente contínua (CC).

Para alimentar equipamentos de corrente alternada (CA), é necessário um inversor. Geralmente, esse dispositivo incorpora um rastreador de ponto de máxima potência, que otimiza a potência gerada. Essa configuração é usada quando se deseja alimentar aparelhos convencionais de forma mais confortável (Figura 2.22).

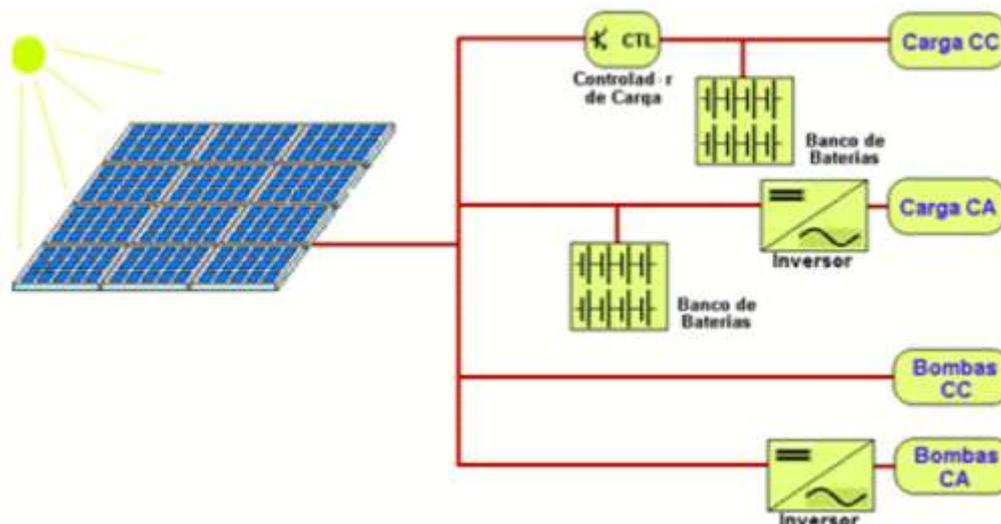


Figura 2.22 - Diagrama de sistemas fotovoltaicos em função da carga utilizada. Fonte: CRESESB, 2006.

Os sistemas fotovoltaicos isolados são usados no Brasil, tradicionalmente para eletrificação rural, atendendo a cargas elétricas distantes da rede elétrica convencional. Nestes casos tais sistemas são naturalmente viáveis economicamente, em função dos elevados custos de expansão da rede elétrica. Por exemplo, pequenos sistemas fotovoltaicos autônomos de geração de energia elétrica (100Wp a 150Wp) para atender a uma residência (iluminação básica e pequena TV) rural distante da rede elétrica já são bastante conhecidos em muitas regiões rurais do mundo, inclusive o Brasil. Em países como o Japão, Estados Unidos e diversos países da Europa, estão se tornando comuns sistemas fotovoltaicos interligados à rede elétrica, que eliminam o uso de acumuladores (CRESESB, 2008), porém no Brasil essa realidade tem sido cada vez mais presente e estimulada.

Os sistemas híbridos (Figura 2.23) combinam várias fontes de geração de energia, como turbinas eólicas, geradores a diesel e módulos fotovoltaicos, entre outras. A utilização de múltiplas fontes de energia elétrica exige um controle eficiente para garantir a máxima

eficiência na entrega de energia aos usuários. Geralmente, sistemas híbridos são empregados em média ou grande escala para atender a um número maior de usuários. Como esses sistemas trabalham com corrente contínua, também incorporam um inversor. A complexidade da otimização do sistema depende da combinação específica de fontes de energia utilizadas. Estes sistemas são geralmente de porte relativamente grande e destinam-se a atender ao consumo de uma aldeia ou comunidade (CRESESB, 2008).

Os sistemas conectados à rede (Figura 2.24) usam um grande número de painéis fotovoltaicos e não requerem armazenamento de energia, pois toda a energia gerada é entregue diretamente à rede elétrica convencional. Esses sistemas complementam o suprimento de energia elétrica da rede elétrica de grande escala à qual estão conectados. Todos os arranjos são conectados a inversores, que devem atender aos requisitos de qualidade e segurança para evitar afetar a rede elétrica. Esse tipo de sistema é comumente usado para a geração de energia em larga escala.

Em muitos países (Japão, Estados Unidos, Alemanha, Itália) existem programas governamentais para subsidiar a instalação deste tipo de sistema, pois eles ainda não são economicamente viáveis, se comparados com o custo da energia convencional disponível. É importante ressaltar que o termo "economicamente viável" é no sentido tradicionalmente utilizado nos estudos de viabilidade econômica, ou seja, não estão sendo levados em conta os custos ambientais, que dependem de análise específica de cada caso.



Figura 2.23 - Exemplo de sistema híbrido. Fonte: CRESESB, 2006.

Os sistemas conectados à rede geralmente não são dotados de armazenamento de energia (baterias), de forma que produzem energia somente durante o dia, atendendo, portanto, apenas parcialmente ao consumo da instalação. Neste trabalho será considerado – e simulado, o sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica convencional.

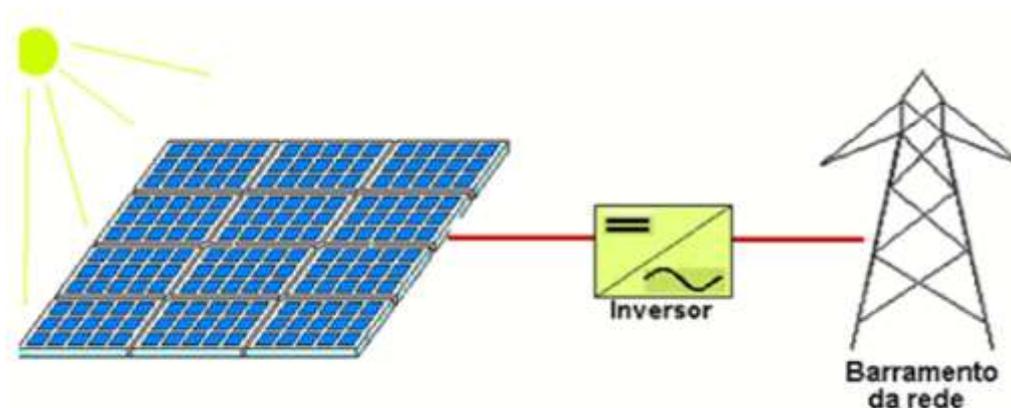


Figura 2.24 - Sistema conectado à rede. Fonte: CRESESB, 2006.

Os sistemas fotovoltaicos são bastante duráveis e precisam de pouca manutenção. Os módulos fotovoltaicos normalmente tem garantia de 20 anos e vida útil estimada em 30 anos. Os dispositivos eletrônicos (inversor, controlador de carga) têm vida útil superior a 10 anos. As necessidades de manutenção são mínimas: os módulos fotovoltaicos são normalmente mantidos limpos pela ocorrência natural de chuva, mas em locais de muito pouco pluviosidade podem necessitar de limpeza periódica; as baterias, caso não seja sem manutenção, necessitam de reposição periódica (6 meses em média) de água destilada. Não é recomendável o uso de baterias automotivas, pois sua vida útil neste tipo de aplicação é estimada em cerca de 2 anos. Recomenda-se a utilização de baterias estacionárias de ciclo profundo, que tem uma vida útil média de 4 a 5 anos (CRESESB, 2008).

2.9 IRRADIAÇÃO SOLAR E POSIÇÃO DAS PLACAS

A respeito da irradiação e posição das placas fotovoltaicas, uma referência interessante a ser consultada é o site, cuja referência é CRESESB, 2018. Neste, quando inserido os dados de latitude e longitude do local (no caso para o IFB – *campus* Taguatinga estes dados são 15.7941885 Sul e 48.1021024 Oeste) fornece a irradiação local assim como a posição necessária para as placas fotovoltaicas, como ilustra a Figura 2.25.

Cálculo no Plano Inclinado

Estação: Brasília
Município: Brasília, DF - BRASIL
Latitude: 15,801° S
Longitude: 48,149° O
Distância do ponto de ref. (15,794189° S; 48,102102° O): 5,1 km

#	Ângulo	Inclinação	Irradiação solar diária média mensal [kWh/m ² .dia]												Média	Delta
			Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez		
<input checked="" type="checkbox"/>	Plano Horizontal	0° N	5,33	5,57	5,01	4,98	4,84	4,71	4,90	5,85	5,68	5,53	5,10	5,41	5,24	1,14
<input checked="" type="checkbox"/>	Ângulo igual a latitude	16° N	4,93	5,34	5,05	5,36	5,57	5,62	5,78	6,56	5,90	5,38	4,77	4,95	5,43	1,79
<input checked="" type="checkbox"/>	Maior média anual	18° N	4,87	5,29	5,04	5,39	5,63	5,71	5,86	6,62	5,90	5,34	4,71	4,88	5,44	1,91
<input checked="" type="checkbox"/>	Maior mínimo mensal	5° N	5,23	5,53	5,05	5,13	5,10	5,03	5,21	6,11	5,79	5,51	5,02	5,29	5,33	1,09

Figura 2.25 - Irradiação solar diária média mensal para o IFB – *campus* Taguatinga.

Para a localidade selecionada, são fornecidos valores de irradiação solar convertidos do plano horizontal para planos inclinados em três ângulos diferentes: o ângulo igual à latitude, o ângulo que resulta na maior média diária anual de irradiação solar, e o ângulo que proporciona o maior valor mínimo diário anual de irradiação solar.

Esses ângulos são apenas sugestões para a instalação de painéis fotovoltaicos, sendo a escolha baseada no tipo de aplicação e nas necessidades específicas do projeto, como uso doméstico, industrial ou turístico. Geralmente, o ângulo igual à latitude é usado, mas para maximizar a geração anual de energia, o ângulo com maior média diária anual é preferido, especialmente em sistemas conectados à rede, no caso do Sistema de Compensação de Energia, definido pela Resolução Normativa ANEEL N° 1.059 (BRASIL, 2023). O ângulo que fornece o maior valor mínimo mensal é uma opção mais conservadora, ideal para atividades em que o fornecimento contínuo de energia é crítico.

Os valores de irradiação solar servem como diretrizes para o dimensionamento de sistemas fotovoltaicos, baseados em dados históricos que podem variar ao longo do tempo. A quantidade de irradiação solar depende da localização geográfica da instalação. Os três conjuntos de valores mostram as irradiações diárias médias mensais para os ângulos de Latitude, Maior Média e Maior Mínimo, com algumas observações importantes, como o arredondamento dos ângulos de inclinação devido à precisão dos instrumentos de medição e a recomendação de uma inclinação mínima de 10° para evitar o acúmulo de sujeira e água.

A inclinação ideal é calculada dentro de um intervalo de Latitude - 20° a Latitude + 20°, com variações de 1° para melhor precisão. As orientações dos módulos fotovoltaicos são limitadas às direções Norte ou Sul. A conversão dos valores de irradiação do plano horizontal para o plano inclinado é feita com base no método isotrópico de Liu & Jordan (1962), com extensão de Klein (1977).

2.10 APROVEITAMENTO DA SOBRA DE ENERGIA FOTOVOLTAICA

A sobra de energia fotovoltaica ocorre quando um sistema gera mais eletricidade do que o necessário para o consumo imediato. Esse fenômeno é mais frequente em dias ensolarados, quando a produção pode ultrapassar as necessidades energéticas de uma residência ou empresa. A gestão dessa sobra é fundamental para maximizar os benefícios da energia solar e evitar desperdícios (PISCIOTTA, 2022).

2.10.1 Métodos de aproveitamento

Entre os métodos de aproveitamento da sobra de energia fotovoltaica destacam-se o armazenamento em baterias, a injeção na rede elétrica, a programação de uso de equipamentos, a integração com outros sistemas energéticos e o uso de veículos elétricos. Esta seção fará uma breve discussão de cada um desses métodos, bem como os benefícios econômicos e ambientais e os desafios a serem superados diante desse cenário em expansão.

2.10.2 Armazenamento em baterias

Uma das soluções mais eficazes para aproveitar a sobra de energia é o uso de baterias. Sistemas de armazenamento em baterias permitem que a energia gerada durante o dia seja armazenada e utilizada em momentos de maior demanda, como à noite ou em dias nublados. Isso não só aumenta a autossuficiência do consumidor, mas também reduz a dependência da rede elétrica. Com o avanço da tecnologia, as baterias estão se tornando mais acessíveis e eficientes, tornando-se uma opção viável para muitos usuários (MEDEIROS, 2023).

2.10.3 Injeção na rede elétrica

Outra alternativa viável é a injeção da energia excedente na rede elétrica, um processo conhecido como "net metering" ou medição líquida. Nesse sistema, os usuários podem vender a energia não utilizada para a concessionária local, recebendo créditos que podem ser utilizados para abater custos em meses subsequentes. Essa prática não apenas gera economia para o

consumidor, mas também estimula a adoção de energia renovável em larga escala, contribuindo para uma matriz energética mais limpa (MARQUES, 2024).

2.10.4 Programação de uso de equipamentos

Outra estratégia eficaz para o aproveitamento da sobra de energia é a programação do uso de aparelhos elétricos. Equipamentos como máquinas de lavar, secadoras e aquecedores podem ser programados para funcionar durante os períodos de pico de geração solar. Essa abordagem ajuda a consumir a energia gerada no momento, reduzindo a quantidade de energia que precisa ser armazenada ou injetada na rede (SANTOS, 2022).

2.10.5 Integração com outros sistemas energéticos

A integração de sistemas fotovoltaicos com outras fontes de energia renovável, como a energia eólica ou biomassa, pode otimizar ainda mais o aproveitamento da sobra. Essa diversificação permite uma geração de energia mais constante, reduzindo a dependência de uma única fonte. Sistemas híbridos são uma tendência crescente, especialmente em locais onde a variabilidade das fontes pode ser um desafio (PINHEIRO, 2020).

2.10.6 Uso de veículos elétricos

Com a popularização dos veículos elétricos (VEs), surge uma nova oportunidade de aproveitar a energia excedente. Os proprietários de VEs podem utilizar a energia solar gerada para recarregar suas baterias, especialmente em horários de pico de produção solar. Essa abordagem não só maximiza o uso da energia gerada, mas também contribui para a descarbonização do transporte, uma das áreas mais desafiadoras em termos de emissões de gases de efeito estufa (SHIKI, 2022; DOS SANTOS RODRIGUES, 2022).

2.10.7 Benefícios econômicos e ambientais

O aproveitamento da sobra de energia fotovoltaica traz uma série de benefícios. Do ponto de vista econômico, os consumidores podem experimentar uma redução significativa em suas contas de luz. A venda de energia excedente pode gerar receita adicional, enquanto o armazenamento em baterias permite economizar em horários de alta tarifa (NASCIMENTO, 2024).

Ambientalmente, o uso da energia solar ajuda a reduzir as emissões de carbono, uma vez que diminui a necessidade de energia gerada por fontes fósseis. A adoção de práticas que maximizam o aproveitamento da energia fotovoltaica também promove uma maior consciência sobre o consumo energético, incentivando um estilo de vida mais sustentável (OLIVEIRA, 2023).

2.10.8 Desafios e considerações

Apesar dos muitos benefícios, ainda existem desafios associados ao aproveitamento da sobra de energia fotovoltaica. A variabilidade da produção solar pode dificultar a gestão eficiente da energia, especialmente em locais com climas menos ensolarados. Além disso, o custo inicial dos sistemas de armazenamento em baterias pode ser um obstáculo para alguns consumidores, embora os preços estejam em queda (SANTOS, 2023).

Outra consideração importante é a regulação do setor energético. Políticas públicas que incentivem o uso da energia solar e a venda de excedentes são fundamentais para a expansão desse modelo. A promoção de tarifas justas e acessíveis pode aumentar a adesão de novos usuários, tornando a energia solar uma escolha ainda mais atraente (DA LUZ, 2023).

Isso posto, o aproveitamento da sobra de energia fotovoltaica é um aspecto crucial para maximizar os benefícios da energia solar. Com soluções como o armazenamento em baterias, a injeção na rede elétrica e o uso estratégico de equipamentos, é possível aumentar a eficiência energética e contribuir para uma economia mais sustentável. À medida que a tecnologia avança e mais pessoas adotam a energia solar, o futuro promete um uso inteligente e responsável dessa fonte renovável, beneficiando tanto os consumidores quanto o meio ambiente.

2.11 AGREGADORAS DE ENERGIA NO BRASIL

A Agência Brasil de Notícias (EBC, 2024) noticiou recentemente que O Brasil encerrou o primeiro semestre de 2024 com um aumento de 5,7 gigawatts (GW) na potência instalada de sua matriz elétrica, resultado da entrada em operação de 168 novas usinas. Esse crescimento representa um impressionante incremento de 18,7% em comparação ao mesmo período de 2023, marcando o maior avanço dos últimos 27 anos. Em junho de 2024, o país adicionou 889,51 megawatts (MW) com a inauguração de 27 usinas, das quais 13 são eólicas, 10 fotovoltaicas e quatro termelétricas.

A Agência Brasil (2024) informa ainda que de acordo com a Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel), a previsão para o crescimento da geração de energia elétrica no Brasil em 2024 é de 10,1 GW, um pouco abaixo dos 10,3 GW registrados no ano anterior. Atualmente, a capacidade instalada de energia elétrica no Brasil atinge 203,8 gigawatts. Deste total, impressionantes 84,62% das usinas são classificadas como renováveis (EBC, 2024).

Esses dados confirmam que nos últimos anos o setor energético brasileiro tem passado por transformações significativas, impulsionadas pela busca por eficiência e pela diversificação das fontes de energia. Nesse contexto, as empresas agregadoras de energia desempenham um papel fundamental, oferecendo soluções inovadoras que visam otimizar o consumo energético e promover a sustentabilidade (SANTOS JÚNIOR, 2024).

Nesse cenário, as empresas agregadoras de energia atuam como intermediárias entre consumidores e fornecedores de energia. Elas oferecem serviços que permitem aos consumidores gerenciar melhor seu consumo e, frequentemente, acessar tarifas mais competitivas. Isso é especialmente relevante em um país como o Brasil, onde a matriz elétrica é amplamente composta por fontes renováveis, como hidrelétricas, usinas solares e eólicas.

Essas empresas também podem atuar na comercialização de energia no mercado livre, permitindo que grandes consumidores compitam por melhores preços e condições. Além disso, elas oferecem serviços de monitoramento e gestão do consumo energético, ajudando empresas a identificar ineficiências e a implementar soluções para reduzir custos (FERREIRA, 2020).

Entre os benefícios proporcionados pelos agregadores de energia estão a redução de custos, a sustentabilidade e a eficiência energética.

2.11.1 Redução de Custos

Uma das principais vantagens de trabalhar com empresas agregadoras é a possibilidade de redução de custos. Ao analisar o consumo energético e negociar tarifas, essas empresas ajudam seus clientes a economizar em suas contas de luz. A atuação no mercado livre também pode proporcionar preços mais atraentes em comparação ao mercado regulado (DA SILVA, 2022).

2.11.2 Sustentabilidade

As agregadoras promovem a utilização de fontes de energia renovável, ajudando empresas a adotar práticas mais sustentáveis. Com a crescente demanda por energia limpa, essas empresas também auxiliam na certificação de energia renovável, permitindo que seus clientes se alinhem às metas de sustentabilidade (DA SILVA, 2022).

2.11.3 Eficiência Energética

Por meio de tecnologias de monitoramento e gestão, as empresas agregadoras ajudam os consumidores a otimizar seu uso de energia. Isso não só gera economia, mas também reduz a pegada de carbono das empresas, contribuindo para um futuro mais sustentável (DA SILVA, 2022).

No Brasil, várias empresas têm se destacado nesse setor. Algumas das mais conhecidas incluem:

EDP Brasil (EDP). Atua na comercialização de energia no mercado livre e oferece soluções personalizadas para diferentes perfis de consumo.

Light. Além de ser uma das principais distribuidoras de energia do país, a Light também atua como agregadora, oferecendo serviços de eficiência energética e gestão de consumo.

Energia do Brasil (EDB). Focada na comercialização de energia e na promoção de fontes renováveis, a EDB oferece soluções para empresas que buscam reduzir custos e melhorar sua sustentabilidade.

Por outro lado, apesar das oportunidades, as empresas agregadoras de energia enfrentam desafios significativos, como a complexidade regulatória e a necessidade de adaptação a um mercado em rápida evolução. No entanto, com a crescente conscientização sobre a importância da eficiência energética e a adoção de fontes renováveis, espera-se que o setor continue a se expandir (SANTOS JÚNIOR, 2024).

Com a evolução das tecnologias e o aumento do interesse por soluções sustentáveis, as empresas agregadoras de energia têm um papel essencial na transformação do setor elétrico no Brasil. Elas não apenas ajudam a otimizar o consumo e a reduzir custos, mas também contribuem para um futuro energético mais limpo e eficiente (SANTOS JÚNIOR, 2024).

2.12 IMPORTÂNCIA DA SIMULAÇÃO DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

A simulação de energia solar fotovoltaica desempenha um papel crucial na concepção e análise de projetos de geração de energia sustentável. Por meio da modelagem de dados, é possível realizar previsões precisas de produção de energia, identificar potenciais problemas operacionais, estimar o desempenho do sistema em diferentes condições climáticas e financeiras, bem como testar diferentes cenários para encontrar a configuração mais eficiente. Essas simulações são fundamentais para garantir a viabilidade e eficácia dos projetos, reduzindo riscos e maximizando o retorno sobre o investimento.

2.13 SOFTWARES DE SIMULAÇÃO E DESIGN DE SISTEMA SOLAR FOTOVOLTAICO MAIS UTILIZADOS

A simulação de energia solar fotovoltaica é essencial para o planejamento e implementação eficiente de sistemas de energia solar. Com o avanço da tecnologia, a utilização de software de simulação tornou-se uma prática comum no setor, permitindo o dimensionamento preciso de sistemas, a avaliação do potencial de geração de energia e a otimização do layout dos painéis solares. Neste contexto, é fundamental conhecer as opções disponíveis no mercado e suas principais características para tomar decisões informadas e alcançar resultados satisfatórios. A seguir, apresentam-se softwares bastante utilizados na área de sistemas para simulação de energia solar fotovoltaica, com ênfase maior para o software “RETScreen” que foi utilizado para o desenvolvimento deste trabalho.

O Homer Pro é um software de simulação de energia solar fotovoltaica desenvolvido pela Homer Energy, sediada nos EUA. Suas principais características incluem a capacidade de modelagem de sistemas híbridos, integração de várias fontes de energia renovável e previsão de custos e desempenho. Além disso, o software oferece ferramentas avançadas de análise de viabilidade econômica e financeira, o que o torna uma escolha popular para projetos comerciais e industriais de energia solar fotovoltaica (Jesus, 2023).

As características principais do Homer Pro incluem a capacidade de modelar sistemas de energia solar fotovoltaica combinados com outras fontes de energia renovável, como eólica e hidrelétrica. Além disso, o software oferece análise avançada de viabilidade econômica e financeira, incluindo cálculos de custos de projeto, retornos financeiros e fluxos de caixa. A interface amigável e as opções de relatórios personalizados também são aspectos destacados pelos usuários (Sena, 2023).

O Homer Pro é amplamente utilizado para simular e dimensionar sistemas de energia solar fotovoltaica em diversos cenários, como aplicações em sistemas isolados, micro-redes e instalações comerciais e industriais. Além disso, o software é frequentemente utilizado para realizar estudos de viabilidade e análise de custo-benefício de projetos de energia solar fotovoltaica, fornecendo dados precisos para tomada de decisão e planejamento estratégico.

O software PV F-Chart, desenvolvido nos Estados Unidos, possui funcionalidades que permitem a modelagem precisa de sistemas fotovoltaicos, incluindo a capacidade de prever o desempenho da energia solar em diferentes condições climáticas e geográficas. Ele também oferece a possibilidade de dimensionar sistemas, realizar análises financeiras e otimizar a inclinação e orientação dos painéis solares. Quanto às vantagens, destaca-se a interface amigável e a capacidade de realizar simulações rápidas. No entanto, suas desvantagens incluem a limitação em lidar com sistemas complexos e a falta de atualizações regulares para acompanhar as mudanças no setor (Mahmoud et al., 2023).

As funcionalidades do PV F-Chart abrangem desde a modelagem da radiação solar incidente sobre uma superfície inclinada até a estimativa do desempenho da energia solar fotovoltaica. Ele possibilita o cálculo de sombreamentos, a análise de desempenho de sistemas interconectados à rede, a previsão de produção de energia ao longo do tempo e a visualização de gráficos e relatórios. Além disso, oferece a funcionalidade de otimização da inclinação e orientação dos painéis solares, auxiliando na maximização da geração de energia (Santos, 2021).

Entre as vantagens do PV F-Chart, destaca-se a interface intuitiva que facilita a utilização por profissionais e não especialistas. Além disso, o software permite a realização de simulações rápidas e oferece ferramentas de dimensionamento e análise financeira. No entanto, suas desvantagens incluem a limitação na modelagem de sistemas complexos, como sistemas com rastreamento solar, e a falta de atualizações frequentes para acompanhar as mudanças no setor de energia solar fotovoltaica (Nascimento, 2021).

O pvPlanner é um software de simulação de energia solar fotovoltaica desenvolvido pela SolarGis, sediada na Eslováquia. Este software oferece aos usuários a capacidade de realizar simulações precisas e personalizadas, levando em consideração dados de radiação solar, sombreamento, inclinação e orientação dos painéis solares. Além disso, o pvPlanner permite a análise do desempenho energético ao longo do tempo, auxiliando na tomada de decisões estratégicas para projetos solares. Com uma interface amigável e ferramentas avançadas, o pvPlanner é amplamente utilizado por profissionais do setor para dimensionar sistemas solares com eficiência e precisão (Da Silva; e, Shayani, 2020).

O software pvPlanner, desenvolvido pela SolarGis na Eslováquia, é uma ferramenta de simulação de energia solar fotovoltaica que possui uma interface intuitiva e fácil de usar. Ele é capaz de gerar relatórios detalhados sobre o potencial de geração de energia solar em um determinado local, levando em consideração informações como a inclinação do telhado, sombreamento, e a irradiação solar. Além disso, o pvPlanner oferece suporte para múltiplas fontes de dados GIS, o que aumenta a precisão das simulações realizadas. Com uma série de ferramentas de análise integradas, o software permite a avaliação de viabilidade de projetos fotovoltaicos de forma eficiente e precisa (Simon; and, Hola2021).

O PVSyst é um software de simulação de energia solar fotovoltaica desenvolvido pela empresa suíça Pvsyst SA. Suas principais funcionalidades incluem a modelagem de sistemas fotovoltaicos em diversos cenários, simulação de sombreamento e cálculo do desempenho energético. Além disso, o software oferece ferramentas de otimização de projetos e análise financeira. Quando comparado com outros softwares, o PVSyst se destaca pela precisão nos cálculos de irradiação e sombreamento, bem como pela capacidade de simular sistemas fotovoltaicos complexos em diferentes locais e condições climáticas (De Paula et al., 2022).

O PVSyst oferece uma ampla gama de funcionalidades para simulação de energia solar fotovoltaica, incluindo modelagem precisa de sistemas, cálculo de irradiação solar, simulação de sombreamento e previsão de produção de energia. Além disso, o software permite a

otimização de projetos, a análise financeira e a geração de relatórios detalhados. Sua interface intuitiva e capacidade de lidar com projetos complexos são algumas das principais vantagens do PVsyst em comparação com outros softwares similares (Oliveira, 2024).

Em comparação com outros softwares de simulação de energia solar fotovoltaica, o PVsyst se destaca pela precisão nos cálculos de irradiação, pela capacidade de modelar sistemas complexos e pelo suporte a diferentes tecnologias fotovoltaicas. Além disso, o software oferece ferramentas de otimização de projetos e análise financeira, tornando-o uma escolha popular entre os profissionais da área. Embora existam outros softwares com funcionalidades semelhantes, o PVsyst é reconhecido por sua confiabilidade e precisão na simulação de sistemas fotovoltaicos (Matos e Felix, 2022).

O System Advisor Model (SAM) é um *software* que foi desenvolvido pelo National Renewable Energy Laboratory (NREL) dos EUA. O projeto teve início em 2004 com o objetivo de fornecer uma plataforma aberta e gratuita para análise de sistemas de energia renovável, incluindo energia solar fotovoltaica. Desde então, o SAM tem passado por várias atualizações e melhorias para atender às necessidades do setor de energia. Sua origem está ligada à necessidade de planejamento e análise técnica e econômica de projetos de energia solar fotovoltaica, e seu desenvolvimento contínuo reflete o compromisso do NREL com a inovação e avanço da tecnologia solar (Sulyok, 2020).

O SAM é amplamente utilizado para análise e modelagem de sistemas de energia solar fotovoltaica em uma variedade de aplicações e setores. Ele é empregado em projetos de geração distribuída, sistemas conectados à rede, sistemas isolados e projetos de grande escala, proporcionando dados precisos e confiáveis para dimensionamento e avaliação de viabilidade econômica. Além disso, o SAM é aplicado em estudos de integração de sistemas solares em edifícios comerciais e residenciais, bem como em projetos de instalações industriais e comerciais.

O uso do SAM oferece diversas vantagens, tais como a capacidade de realizar simulações de sistemas de energia renovável de forma integrada, considerando aspectos financeiros, técnicos e ambientais. Além disso, o software possui uma interface amigável e uma vasta biblioteca de modelos e dados climáticos. No entanto, algumas limitações incluem a necessidade de conhecimentos técnicos avançados para operar o software eficientemente, bem como a alta demanda de recursos computacionais para simulações detalhadas de sistemas de

grande porte, o que pode restringir sua aplicabilidade em determinados contextos (W. Xi et al., 2023).

O *software* Solar Pro, desenvolvido pela Laplace Systems no Japão, se destaca por suas características e diferenciais, como a capacidade de realizar simulações avançadas e precisas de energia solar fotovoltaica. Além disso, oferece uma interface amigável e intuitiva, facilitando o processo de modelagem e análise. Outro diferencial é a integração de dados meteorológicos em tempo real, o que proporciona resultados mais confiáveis. A precisão e eficiência do Solar Pro o tornam uma ferramenta valiosa para projetos complexos de energia solar, tanto para pequenas instalações quanto para grandes usinas (Kazem et al., 2022).

O Solar Pro da Laplace Systems se destaca por suas características e diferenciais, incluindo um banco de dados global abrangente para análise de dados meteorológicos, modelagem avançada de sombreamento e rápida geração de relatórios para projetos fotovoltaicos. Além disso, o software oferece capacidade de simulação de sistemas de armazenamento de energia e inclui ferramentas para análise financeira, levando em consideração diferentes regimes tarifários e custos de energia (Ruppenthal, 2023).

2.14 SOFTWARE “RETSSCREEN”

O Software RETScreen é uma ferramenta desenvolvida pelo governo do Canadá com o objetivo de apoiar a tomada de decisões relacionadas a projetos de energia renovável e eficiência energética. Com uma interface amigável e recursos poderosos, o software se tornou popular em todo o mundo devido à sua capacidade de realizar análises detalhadas e avaliar o desempenho de projetos de forma precisa e confiável. Sua aplicabilidade abrange desde pequenos projetos residenciais até grandes empreendimentos comerciais e industriais, contribuindo significativamente para a promoção de práticas sustentáveis e a redução do impacto ambiental (BB Freitas, 2022). Apesar de ser um software de origem canadense, é bem adaptável ao Brasil por possuir um amplo banco de dados oriundos da NASA (Agência Espacial Americana).

2.14.1 Histórico e Contexto de Desenvolvimento

O RETScreen foi desenvolvido pelos Recursos Naturais do Canadá, em colaboração com diversas instituições parceiras, ao longo de um extenso processo de pesquisa e desenvolvimento. A sua história remonta ao início dos anos 2000, quando a necessidade de uma ferramenta para avaliação de projetos de energia renovável se tornou evidente. Desde então, o software passou por várias atualizações e aprimoramentos, tornando-se uma referência global em análise de viabilidade econômica e ambiental de projetos de energia limpa (BB Freitas, 2022).

As Figuras 2.26 à 2.29 apresentam as telas do software em que são inseridos os dados para realizar a simulação em energia renovável e eficiência energética.



Figura 2.26 - Tela inicial em que os detalhes do projeto e localização são escolhidos. Fonte: <https://pt.dsisol.com/info/7-most-popular-solar-pv-system-design-and-simu-34904845.html>. Acesso em: 12 abr. 2018.

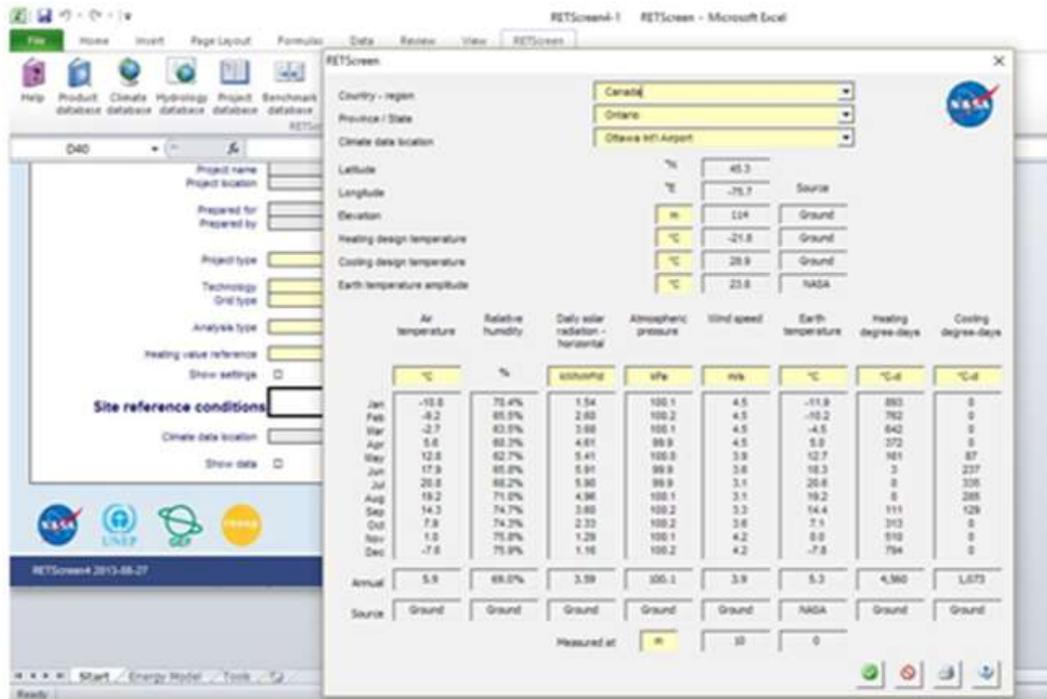


Figura 2.27 – Selecionando dados climáticos. (Fonte: <<https://pt.dsisolar.com/info/7-most-popular-solar-pv-system-design-and-simu-34904845.html>>. Acesso em: 12 abr. 2018).



Figura 2.28 – Módulo de seleção e classificação desejada. Fonte: <<https://pt.dsisolar.com/info/7-most-popular-solar-pv-system-design-and-simu-34904845.html>>. Acesso em: 12 abr. 2018.

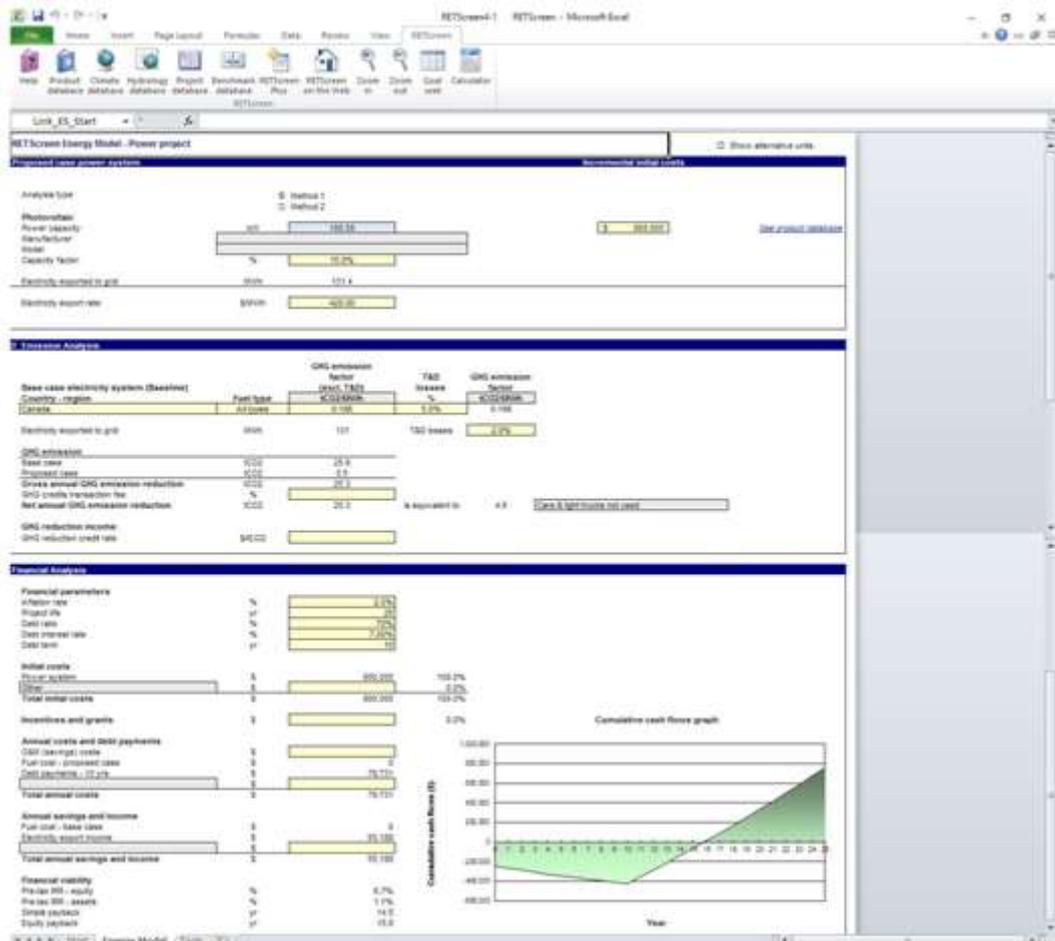


Figura 2.29 – Estimativas de geração de energia geradas juntamente com análise financeira e de emissões.
 Fonte: <<https://pt.dsolar.com/info/7-most-popular-solar-pv-system-design-and-simu-34904845.html>>. Acesso em: 12 abr. 2018.

2.14.2 Objetivos e Funcionalidades Principais

Os principais objetivos do RETScreen incluem fornecer aos usuários uma plataforma intuitiva e de fácil acesso para analisar potenciais investimentos em energia renovável, apoiar as decisões de planejamento e gerenciamento de projetos e promover a difusão de boas práticas e conhecimentos técnicos. As funcionalidades incluem a análise de recursos renováveis, ferramentas de modelagem de sistemas energéticos, avaliação econômica e ambiental, e a geração de relatórios customizados para suportar a tomada de decisão em todas as fases do ciclo de vida dos projetos (J. H. R. MENSAH, 2023).

2.14.3 Arquitetura e Componentes do Software

O software RETScreen é composto por uma arquitetura modular que inclui vários componentes principais, como o módulo de Análise de Viabilidade, o módulo de Projeto de Energia, o módulo de Monitoramento de Desempenho e o módulo de Relatórios. Cada um desses componentes desempenha um papel específico na análise e no planejamento de projetos de energias renováveis, oferecendo uma abordagem abrangente para avaliar a viabilidade técnica, econômica e ambiental de uma determinada iniciativa de energia limpa.

2.14.4 Módulos Disponíveis e Suas Aplicações

Os módulos disponíveis no software RETScreen abrangem uma variedade de aplicações, desde a avaliação de recursos e potencial de energias renováveis, como solar, eólica, biomassa, hidroeletricidade e geotérmica, até a análise detalhada de projetos de eficiência energética em edifícios e indústrias. Cada módulo oferece ferramentas e modelos específicos para realizar cálculos, simulações e projeções com base em dados reais, permitindo uma avaliação precisa e abrangente de diferentes cenários e tecnologias de energia limpa.

2.14.5 Requisitos de Sistema e Compatibilidade

Para utilizar o software RETScreen de maneira eficaz, é fundamental atender aos requisitos de sistema e compatibilidade, que incluem um computador com sistema operacional Windows, acesso à internet para baixar e atualizar o software, além de softwares complementares, como o Microsoft Excel para algumas funcionalidades. Além disso, recomenda-se que o computador tenha capacidade de processamento e memória suficientes para lidar com grandes conjuntos de dados e simulações complexas, garantindo a precisão e eficiência das análises realizadas pelo software.

2.14.6 Metodologia de Análise e Modelagem de Dados

A metodologia de análise e modelagem de dados utilizada no software RETScreen baseia-se em princípios de engenharia e ciências ambientais, com foco na coleta e interpretação de dados relacionados a projetos de energia renovável e eficiência energética. Os usuários são orientados a inserir dados específicos do projeto, como localização, tipo de tecnologia, custos de investimento, operacionais e de manutenção, entre outros, para análises de viabilidade técnica e econômica. Além disso, a modelagem de dados inclui ferramentas para estimar o desempenho do sistema, calcular os impactos ambientais e comparar os resultados com cenários de referência, possibilitando uma avaliação abrangente e detalhada do projeto.

2.14.7 Princípios de Análise de Viabilidade Econômica e Ambiental

Os princípios de análise de viabilidade econômica e ambiental integrados ao RETScreen baseiam-se em métodos reconhecidos internacionalmente, como análise de fluxo de caixa, cálculo de retorno sobre o investimento, taxa interna de retorno, *payback* period, análise do custo nivelado de eletricidade, entre outros. Essas ferramentas permitem aos usuários avaliar a rentabilidade do projeto, considerando fatores financeiros e ambientais, como redução de emissões de gases de efeito estufa, impactos na qualidade do ar e no uso da terra, contribuindo para a tomada de decisão informada e sustentável em projetos de energia renovável e eficiência energética.

2.14.8 Casos de Estudo e Aplicações Práticas

A seção de Casos de Estudo e Aplicações Práticas do software RETScreen inclui uma variedade de exemplos reais de projetos de energias renováveis analisados utilizando a ferramenta. Esses casos de estudo demonstram como o software pode ser aplicado na prática para avaliar a viabilidade econômica e ambiental de projetos de energia solar, eólica, hidrelétrica, biomassa e outras fontes renováveis. Os estudos de caso também mostram como o RETScreen pode ser utilizado para realizar análises de desempenho, prever a produção de energia, estimar os custos operacionais e identificar oportunidades de melhoria em projetos existentes, fornecendo uma visão abrangente das aplicações práticas e benefícios do software.

2.14.9 Exemplos de Projetos de Energias Renováveis Analisados

Dentro da seção de Exemplos de Projetos de Energias Renováveis Analisados, os usuários do RETScreen podem encontrar estudos de caso detalhados e específicos sobre projetos reais que foram avaliados usando o software. Esses exemplos abrangem uma gama de tecnologias e aplicações, apresentando resultados concretos de análises de viabilidade econômica, modelos de previsão de produção de energia e avaliação do desempenho de projetos de energias renováveis. Os exemplos fornecem insights valiosos para profissionais e pesquisadores que buscam compreender melhor como o RETScreen pode ser utilizado para aprimorar o desenvolvimento e a implementação de projetos sustentáveis e energeticamente eficientes em diferentes contextos e locais ao redor do mundo.

2.14.10 Impacto e Importância do RETScreen no Contexto de Sustentabilidade

O software RETScreen desempenha um papel fundamental no contexto da sustentabilidade, pois oferece ferramentas e recursos para a avaliação e análise de projetos de energia renovável e eficiência energética. Ao possibilitar a realização de estudos de viabilidade econômica e ambiental, o RETScreen contribui para a tomada de decisões mais conscientes e sustentáveis em relação ao desenvolvimento de projetos de energia. Sua abordagem holística e foco na redução do impacto ambiental fazem com que o software seja uma ferramenta valiosa para promover a sustentabilidade em diversas áreas, desde a indústria até o setor público.

2.14.11 Contribuições para a Mitigação das Mudanças Climáticas

No que tange à mitigação das mudanças climáticas, o RETScreen oferece análises abrangentes que auxiliam na identificação de oportunidades para reduzir as emissões de gases de efeito estufa e promover a transição para fontes de energia mais limpas e renováveis. Ao fornecer dados e métricas precisas, o software permite que os usuários avaliem o impacto potencial de projetos de energia e implementem medidas que contribuam efetivamente para a redução do aquecimento global. Dessa forma, o RETScreen desempenha um papel significativo na promoção de ações concretas e eficazes no combate às mudanças climáticas.

2.14.12 Desafios e Limitações Atuais do Software

Atualmente, o software RETScreen enfrenta alguns desafios, como a necessidade de constante atualização para acompanhar as mudanças nas tecnologias de energia renovável e as demandas do mercado. Além disso, a complexidade de alguns modelos de análise pode dificultar a utilização por parte de usuários com menos experiência. A interface do software também pode ser aprimorada para tornar a navegação mais intuitiva e simplificada, contribuindo para uma melhor experiência do usuário.

2.14.13 Pontos Fortes e Pontos a Serem Aprimorados

Os pontos fortes do software RETScreen incluem a vasta gama de módulos disponíveis, que permitem a análise de diversas fontes de energia renovável e de eficiência energética. Além disso, a metodologia de análise de viabilidade econômica e ambiental é robusta e amplamente reconhecida. No entanto, um ponto a ser aprimorado é a inclusão de mais casos de estudo e exemplos práticos para auxiliar os usuários na compreensão e aplicação das funcionalidades do software em situações do mundo real.

2.14.14 Perspectivas Futuras e Desenvolvimentos Potenciais

As perspectivas futuras do software RETScreen incluem a expansão para novas fontes de energia renovável, como a energia das ondas, das correntes oceânicas e a energia geotérmica. Além disso, estão previstas atualizações para aprimorar a análise de viabilidade econômica e ambiental, a fim de fornecer resultados mais precisos e abrangentes. Espera-se também que o software incorpore novas ferramentas de visualização de dados e relatórios, tornando a interpretação e comunicação dos resultados mais eficientes e acessíveis aos usuários.

2.14.15 Novas Funcionalidades e Atualizações Previstas

Entre as novas funcionalidades e atualizações previstas para o RETScreen estão a integração de modelos de previsão meteorológica para análise mais precisa do potencial de

geração de energia renovável. Além disso, estão sendo desenvolvidas ferramentas aprimoradas para a análise de riscos e incertezas, levando em consideração variáveis climáticas e econômicas em constante mudança. Espera-se também a implementação de novos casos de estudo e exemplos práticos para uma gama mais diversificada de projetos de energia renovável em diferentes contextos e regiões.

2.15 O CAMPUS TAGUATINGA DO IFB

O *campus* Taguatinga do IFB foi criado em 2008 por meio da Lei 11.892. A unidade atua nas áreas de Vestuário, Eletromecânica, Informática, Licenciatura em Física e Automação. Conta com professores especialistas, mestres e doutores e possui laboratórios de software, hardware, eletrônica, elétrica, mecânica, usinagem, solda, informática, modelagem, corte e costura. Está localizado na QNM 40, Área Especial 01, às margens da BR 070, em Taguatinga (Brasília - DF).

A cerca da infraestrutura física o *campus* Taguatinga tem uma área total de 30.000,00 m² sendo construída uma área de 10.443,80 m² destinada prioritariamente ao desenvolvimento educacional, de pesquisa e extensão e a formação da cidadania em um conjunto com espaço acadêmico. Este *campus* está localizada na zona urbana da cidade satélite de Taguatinga e iniciou suas atividades em agosto de 2009. Funcionando no horário de segunda a sexta, das 8h às 21h, para atendimento registro acadêmico, assistência estudantil e biblioteca, e até 22h para atendimento do público em geral. (PDIF, 2015)

Segundo o Plano Diretor de Infraestrutura Física de 2015, o *campus* é dividido em cinco blocos, sendo um Administrativo, um ginásio, um auditório e dois blocos de salas de aulas. As salas de aula estão divididas em blocos que facilitam a organização e possuem boa estrutura para aulas teóricas. A maioria das salas de aula e dos laboratórios de informática possuem projetor multimídia, um ambiente apropriado para desenvolver o principal objetivo do Instituto. O *campus* Taguatinga foi construído em obediência as normas de sustentabilidade e acessibilidade. Conta com rampas e elevadores acessíveis, que facilitam a mobilidade por todos os ambientes do *campus*.

É uma Instituição Pública Federal ligada ao MEC que oferece cursos técnicos e superiores nas áreas de eletromecânica, Informática e Vestuário, além da execução de projetos

de pesquisa e extensão. Portanto, o *campus* Taguatinga do IFB constitui, entre outros, em um potencial lugar para o estudo e desenvolvimento de experimentos científicos tanto pela sua estrutura física quanto pelo seu potencial humano, gerando oportunidades benéficas para a sociedade. A Figura 3.1 apresenta uma vista geral do IFB *campus* Taguatinga.



Figura 2.30 – Fachada do IFB - *campus* Taguatinga. Fonte: Google Maps (11/06/2024).

3.0 METODOLOGIA ADOTADA

A presente pesquisa adota uma abordagem metodológica diversificada para alcançar seus objetivos de forma abrangente e detalhada. A metodologia empregada é predominantemente descritiva, tendo em vista o mapeamento e apresentação de dados sobre o desempenho e a viabilidade de diferentes tipos de placas fotovoltaicas na região de Brasília. O estudo busca explorar aspectos econômicos, ambientais e técnicos, contribuindo para uma análise que esclareça as vantagens e limitações das tecnologias avaliadas.

A investigação combina métodos qualitativos e quantitativos. A análise qualitativa é aplicada na interpretação de impactos ambientais e econômicos associados ao uso de energia solar, considerando benefícios menos tangíveis, como a mitigação de emissões de carbono e a promoção da sustentabilidade. Por outro lado, a abordagem quantitativa é utilizada para medir e comparar indicadores objetivos, como custos de instalação e retorno sobre o investimento, proporcionando uma visão numérica sólida e confiável.

Adicionalmente, a metodologia possui um caráter comparativo, ao avaliar, lado a lado, o desempenho de três tipos de placas fotovoltaicas — policristalinas, bifaciais e amorfas. Essa análise comparativa é fundamental para identificar a tecnologia mais adequada ao contexto local, considerando fatores como condições climáticas e irradiação solar específica de Brasília.

Por fim, a pesquisa apresenta um viés exploratório, ao investigar possibilidades e padrões que podem emergir dos dados analisados, ampliando o entendimento sobre o uso de placas fotovoltaicas em cenários específicos. Essa abordagem integrada, que combina diferentes métodos e perspectivas, é essencial para assegurar a robustez e a relevância das conclusões alcançadas.

Quanto a pesquisa bibliográfica realizou-se uma revisão de literatura para fundamentar os conceitos relacionados às energias renováveis, irradiação solar e posição das placas, aproveitamento da energia solar fotovoltaica, agregadoras de energia solar no Brasil, softwares de simulação e design de sistema solar fotovoltaicos mais utilizados. Este levantamento incluiu a energia solar fotovoltaica no mundo, no Brasil e em Brasília – DF, tecnologias de painéis fotovoltaicos (policristalinos, bifaciais e amorfos), abordagens de software de simulação para projetos de energia renovável com ênfase no RETScreen.

Para analisar os dados, foram coletadas informações específicas sobre o *campus* Taguatinga do IFB dados do consumo de energia elétrica de 2019 a 2023, incluindo: “Total a pagar” (em R\$), “Histórico de Potência” (em kW), “Consumo de Ponta” e “Consumo Fora de Ponta” (kWh).

Quanto a etapa de simulações no software RETScreen, em relação aos parâmetros de entrada, os seguintes valores foram parametrizados para as simulações no referido software: localização dos dados climáticos (região em estudo); reajuste do custo do combustível: 2% (dados da ANEEL); taxa de inflação: valores anuais obtidos junto ao IBGE; taxa de desconto: 8% (Davi et al, 2022); vida do projeto: 25 anos (valor usado para as placas amorfas também, hipoteticamente); preço da eletricidade: obtido a partir da relação entre custos mensais e consumo; fator de emissão de CO₂: valores extraídos do MCTI. Em relação às configurações das simulações, três cenários foram simulados com potências de usina de 100% (135 kW), 70% (94,5 kW) e 50% (67,5 kW).

Para os resultados extraídos, as análises incluíram: viabilidade econômica: período de retorno do investimento e custo por tonelada de CO₂ evitada.

Na consolidação dos resultados, os resultados foram compilados e comparados para identificar o impacto dos diferentes tipos de painéis na ocupação espacial do *campus* e os seus respectivos benefícios ambientais e financeiros.

A metodologia proposta garante uma abordagem sistemática e fundamentada para avaliar a viabilidade econômica e ambiental da implantação de uma usina fotovoltaica no *campus* Taguatinga do IFB.

4.0 ANÁLISES E DISCUSSÕES DOS RESULTADOS OBTIDOS

Esta seção irá discutir os aspectos financeiros e ambientais do estudo de implantação de uma usina fotovoltaica no IFB – *campus* Taguatinga. Antes, porém, serão abordados os aspectos ESG ante os ODS da ONU.

A integração das questões de Environmental, Social, and Governance (ESG) em um projeto de usina fotovoltaica é essencial para assegurar a sustentabilidade e a responsabilidade corporativa do empreendimento. No âmbito ambiental, as usinas fotovoltaicas oferecem uma solução de energia limpa que reduz as emissões de gases de efeito estufa (GEE), contribuindo para a mitigação das mudanças climáticas. A produção de energia solar não emite poluentes durante a operação, diferentemente das fontes fósseis, e utiliza recursos renováveis abundantes. Estudos indicam que a adoção de energia solar pode desempenhar um papel crucial na redução da pegada de carbono global, sendo uma peça fundamental na transição para uma economia de baixo carbono (IRENA, 2020).

As questões sociais também são um componente vital dos critérios ESG em projetos de usinas fotovoltaicas. Esses projetos podem gerar benefícios significativos para as comunidades locais, incluindo a criação de empregos durante as fases de construção e operação, além de proporcionar acesso a energia limpa e confiável. O envolvimento das comunidades no processo de planejamento e a consideração de seus interesses e preocupações são fundamentais para garantir que os benefícios sociais sejam amplamente distribuídos e que os impactos negativos sejam minimizados. De acordo com a Agência Internacional de Energia (IEA), os projetos de energia renovável, incluindo os solares, têm potencial para fomentar o desenvolvimento econômico local e melhorar a qualidade de vida (IEA, 2021).

No aspecto de governança, a transparência, a responsabilidade e a ética são cruciais para o sucesso e a aceitação de projetos de usinas fotovoltaicas. A governança eficaz inclui práticas como a divulgação de informações financeiras e de desempenho ambiental, a adesão a regulamentos e normas internacionais, e a implementação de políticas de integridade e conformidade. A boa governança assegura que o projeto seja gerido de maneira responsável, aumentando a confiança dos investidores e das partes interessadas. Segundo o Global Reporting Initiative (GRI), a implementação de práticas robustas de governança é fundamental para a longevidade e a resiliência dos projetos de energia renovável (GRI, 2020).

A relação entre as questões ESG e os ODS é direta e significativa.

Os projetos de usinas fotovoltaicas podem contribuir para diversos ODS, incluindo o ODS 7 (Energia Limpa e Acessível), ao fornecer energia sustentável; o ODS 8 (Trabalho Decente e Crescimento Econômico), ao criar empregos verdes; o ODS 13 (Ação Contra a Mudança Global do Clima), ao reduzir as emissões de GEE; e o ODS 12 (Consumo e Produção Responsáveis), ao promover práticas de produção de energia sustentável. A adoção de critérios ESG fortalece o alinhamento dos projetos de energia solar com os ODS, promovendo um desenvolvimento mais equilibrado e sustentável (UN, 2015).

4.1 PROJETO DA USINA

Quanto ao projeto da usina, foram escolhidas três demandas para tal: 135KW (100% da demanda); 94,5 KW (70% da demanda total) e 67,5KW (50% da demanda total). Com base nessas demandas serão simulados e discutidos os aspectos financeiros e ambientais para os anos de 2019 a 2023.

Cada tipo de placa fotovoltaica tem uma eficiência de conversão de energia solar distinta. As policristalinas oferecem uma eficiência moderada (em torno de 15% a 18%), com bom desempenho geral e custo-benefício. As bifaciais podem capturar luz solar de ambos os lados, aumentando a produção de energia em até 30%, especialmente em ambientes com superfícies refletoras. As amorfas, com uma menor eficiência (em torno de 6% a 10%), costumam ser mais baratas, porém são mais adequadas em situações de baixa luminosidade ou em áreas com alta difusão solar.

Projetos que visam a ocupação de menor área devem levar em consideração a eficiência de cada tipo de placa em relação ao espaço ocupado. As placas policristalinas tendem a exigir uma área intermediária para alcançar um determinado nível de produção. As placas bifaciais podem gerar mais energia por metro quadrado devido à captação pela parte traseira, o que as torna atraentes para locais onde o espaço é limitado. As placas amorfas podem ser usadas em grandes áreas, mas com um menor rendimento por metro quadrado, o que pode não ser ideal quando o espaço é uma restrição. A comparação desses fatores é essencial para otimizar o uso de espaço disponível no projeto.

As placas variam em termos de custo inicial e retorno sobre investimento. As placas policristalinas têm um custo moderado, sendo amplamente utilizadas devido à sua combinação

de eficiência e preço. As placas bifaciais podem gerar mais energia, o que pode justificar o investimento a longo prazo. As placas amorfas são mais baratas, mas a menor eficiência pode levar a uma necessidade de maior área instalada para produzir a mesma quantidade de energia. Comparar esses fatores permite identificar a tecnologia que oferece o melhor retorno financeiro para a instituição, considerando o custo de instalação, manutenção e produção de energia ao longo do tempo.

As condições climáticas e o ambiente de instalação afetam significativamente o desempenho das placas solares. As placas policristalinas são menos eficientes em climas quentes, onde o desempenho cai à medida que a temperatura aumenta. As placas bifaciais são mais adequadas em locais com superfícies refletoras (como telhados claros ou áreas arenosas) e climas com alta irradiância. As placas amorfas são mais eficazes em áreas com pouca luz direta ou sombras frequentes, além de serem menos afetadas pela temperatura elevada. Comparar esses tipos permite escolher a tecnologia que melhor se adapta ao clima local, maximizando a produção de energia ao longo do ano.

As três tecnologias também apresentam diferentes níveis de durabilidade e requisitos de manutenção. As placas policristalinas tendem a ser bastante duráveis e têm uma vida útil longa (20-25 anos). As placas bifaciais também têm alta durabilidade, mas exigem mais cuidado com o ambiente de instalação para maximizar o retorno de sua dupla face. As placas amorfas têm uma vida útil menor e podem sofrer maior degradação ao longo do tempo, mas têm um bom desempenho em situações específicas de uso. A comparação desses aspectos garante a escolha de uma solução de baixo custo de manutenção e alta durabilidade.

A escolha da tecnologia também tem implicações ambientais. As placas policristalinas e bifaciais exigem mais materiais no processo de fabricação, o que pode resultar em um impacto ambiental maior. As placas amorfas utilizam menos material semicondutor, o que reduz o impacto ambiental da produção, mas necessitam de maior área instalada.

Comparar o impacto ambiental de cada tipo de placa permite que o projeto escolha a solução mais sustentável, considerando a política de preservação ambiental da instituição.

Comparar placas policristalinas, bifaciais e amorfas é fundamental para equilibrar a eficiência energética, o uso do espaço, o custo-benefício, a adequação climática e a sustentabilidade. Para um projeto em um Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia, essa análise garante que a tecnologia mais adequada seja escolhida, maximizando a produção

de energia e a viabilidade econômica, ao mesmo tempo que minimiza os impactos no ambiente de ensino e no meio ambiente.

Para as devidas comparações, foram levantadas as potências dos três tipos de placas fotovoltaicas como consta na Tabela 4.1 (valor para cada placa).

Tabela 4.1 – Potência das placas

	Placa policristalina	Placa bifacial	Placa amorfa
Potência (W)	300	660	20

Fonte: autor.

4.2 ÁREAS OCUPADAS PELA PLACAS FOTOVOLTAICAS

O parâmetro área ocupada refere-se ao espaço físico necessário para a instalação das placas fotovoltaicas com o objetivo de gerar determinada quantidade de energia elétrica. Quanto menor a área ocupada, mais eficiente em termos de uso de espaço é a tecnologia. Esse parâmetro é especialmente relevante em locais onde o espaço disponível para a instalação é limitado.

De acordo com simulações no *software* RETScreen e suas respectivas análises, as áreas ocupadas pelas placas fotovoltaicas para atender às demandas são as que constam na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - “Áreas ocupadas”, em m², comparativa – placas policristalinas, bifaciais e amorfas.

Potência da Usina (kW)	Placas policristalinas	Placas bifaciais	Placas amorfas
135	748	635	2351
94,5	523	445	1645
67,5	374	318	1175

Fonte: autor.

Para as placas policristalinas, esse parâmetro variou entre 374 m² e 748 m², dependendo do nível de demanda (100%, 70%, 50%). Quanto ao seu desempenho, essa tecnologia apresentou uma ocupação intermediária de espaço, com uma eficiência razoável na captação de

energia por metro quadrado. A respeito da tendência dessa tecnologia, a relação entre área e produção de energia manteve-se estável e proporcional nos diferentes níveis de demanda. Destaca-se aqui o uso equilibrado do espaço, com boa densidade de geração de energia por área.

Para as placas bifaciais, a área ocupada variou entre 318 m² e 635 m², conforme o nível de demanda. Quanto ao seu desempenho, apresentaram a menor área ocupada entre as três tecnologias analisadas, refletindo sua eficiência em captar luz solar em ambas as faces do painel. A respeito da tendência desta tecnologia, a eficiência no uso do espaço se manteve consistente, oferecendo vantagem significativa para locais com restrição física. Destaca-se aqui a maior eficiência espacial, exigindo menos área para a mesma geração de energia.

Para as placas amorfas, esse parâmetro variou entre 1.175 m² e 2.351 m², dependendo do nível de demanda. Quanto ao seu desempenho, essas placas apresentaram a maior área ocupada entre as três tecnologias, exigindo muito mais espaço para gerar a mesma quantidade de energia. A respeito da tendência desta tecnologia, a baixa eficiência energética por metro quadrado resultou em um uso pouco otimizado do espaço disponível. Destaca-se aqui a baixa eficiência espacial, exigindo grandes áreas para atingir níveis adequados de geração de energia.

Essas vantagens/desvantagens destacam a importância de um planejamento eficiente, que combina tecnologias de ponta com um uso consciente do espaço, resultando em um projeto que atende às necessidades energéticas da instituição de maneira sustentável e prática.

Trazendo a situação para a realidade deste trabalho, a área ocupada pelo IFB – *campus* Taguatinga é de aproximadamente 28.500 m² (Figura 4.1), havendo uma área completamente livre de aproximadamente 5.000 m² (Figura 4.2). Em uma eventualidade de essa área livre ser completamente ocupada por alguma edificação, o projeto poderia contemplar a instalação de placas fotovoltaicas na cobertura dessa edificação, o que certamente elevaria o custo de instalação, mas, mesmo assim, apesar de não ser o objeto de estudo desta dissertação, o custo benefício poderia ser compensatório, apenas com maior *payback*. É interessante mencionar que na ocasião do uso desta área livre para instalação de placas fotovoltaicas pode ser que seja necessário o transplante de árvores deste local para outras áreas do *campus* Taguatinga ou outras áreas próximas, conforme dispõe o decreto nº 39.469, de 22 de novembro de 2018 do Distrito Federal.



Figura 4.1 – Área total aproximada do IFB – *campus* Taguatinga



Figura 4.2 – Área Livre aproximada do IFB *campus* Taguatinga. Fonte: Google Maps.

4.3 ANÁLISE FINANCEIRA

Para a análise financeira, foram simulados todos os casos citados no item anterior e exibidos nas tabelas 4.3, 4.4 e 4.5 e posteriormente comparados seus resultados e feitas suas discussões para o período de 2019 a 2023.

Cabe destacar ainda que a análise financeira foi realizada para a usina fotovoltaica constituída por placas policristalinas, por placas bifaciais e placas amorfas. Comparar placas fotovoltaicas policristalinas, bifaciais e amorfas é importante em um projeto de energia solar por várias razões, principalmente porque cada tipo oferece características distintas que podem impactar diretamente na eficiência, custo, ocupação de espaço e adequação às condições ambientais específicas.

Tabela 4.3 - Resultados obtidos para a realização da análise financeira e ambiental – Placas fotovoltaicas policristalinas.

PARÂMETROS DE SAÍDA	RESULTADOS OBTIDOS PARA A REALIZAÇÃO DA ANÁLISE FINANCEIRA E AMBIENTAL - POLICRISTALINA														
	ANO														
	2019			2020			2021			2022			2023		
	100% (135kW)	70% (94,5kW)	50% (67,5kW)	100% (135kW)	70% (94,5kW)	50% (67,5kW)	100% (135kW)	70% (94,5kW)	50% (67,5kW)	100% (135kW)	70% (94,5kW)	50% (67,5kW)	100% (135kW)	70% (94,5kW)	50% (67,5kW)
Demanda															
Número de placas	450	315	225	450	315	225	450	315	225	450	315	225	450	315	225
Área ocupada (m2)	748	523	374	748	523	374	748	523	374	748	523	374	748	523	374
Custo total da usina fotovoltaica (R\$)	452.952	317.066	226.476	452.952	317.066	226.476	452.952	317.066	226.476	452.952	317.066	226.476	452.952	317.066	226.476
Economia anual no ciclo de vida (R\$/ano)	183.890	128.723	91.945	184.053	128.756	91.892	237.981	166.587	118.990	219.763	144.906	95.002	223.845	156.692	111.923
Custo de redução de GEE (R\$/tCO2)	10.554	10.554	10.554	12.840	12.832	12.822	8.104	8.104	8.104	22.206	20.917	19.199	27.142	27.142	27.142
Payback simples ou retorno simples (ano)	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2	2	2	2,1	2,2	2,4	2,1	2,1	2,1
Valor presente líquido - VPL (R\$)	1.962.988	1.374.092	981.494	1.964.719	1.374.442	980.925	2.540.394	1.778.276	1.270.197	2.345.922	1.546.844	1.014.125	2.389.500	1.653.296	1.194.750
Taxa interna de retorno - TIR (%)	44,1	44,1	44,1	44,1	44,1	44,1	54,1	54,1	54,1	50,8	48,4	45,2	51,5	51,5	51,5
Retorno do capital próprio (Ano)	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	1,9	1,9	1,9	2	2,1	2,3	2	2	2
Redução anual líquida de emissões de GEE (tCO2)	17,4	12	9	14	10	7	29	21	15	10	7	5	8	6	4
Redução líquida de GEE durante 25 Anos (tCO2/)	436	305	218	358	251	179	734	514	367	247	173	124	206	144	103
Custo da Usina X VPL	4,33	4,33	4,33	4,34	4,33	4,33	5,61	5,61	5,61	5,18	4,88	4,48	5,28	5,21	5,28

Fonte: autor.

Tabela 4.4 - Resultados obtidos para a realização da análise financeira e ambiental – Placas fotovoltaicas bifaciais.

PARÂMETROS DE SAÍDA	RESULTADOS OBTIDOS PARA A REALIZAÇÃO DA ANÁLISE FINANCEIRA E AMBIENTAL - BIFACIAL														
	ANO														
	2019			2020			2021			2022			2023		
	100% (135kW)	70% (94,5kW)	50% (67,5kW)	100% (135kW)	70% (94,5kW)	50% (67,5kW)	100% (135kW)	70% (94,5kW)	50% (67,5kW)	100% (135kW)	70% (94,5kW)	50% (67,5kW)	100% (135kW)	70% (94,5kW)	50% (67,5kW)
Demanda															
Número de placas	205	143	102	205	143	102	205	143	102	205	143	102	205	143	102
Área ocupada (m2)	635	445	318	635	445	318	635	445	318	635	445	318	635	445	318
Custo total da usina fotovoltaica (R\$)	247.691	173.384	123.846	247.691	173.384	123.846	247.691	173.384	123.846	247.691	173.384	123.846	247.691	173.384	123.846
Economia anual no ciclo de vida (R\$/ano)	203.119	142.183	101.559	203.281	142.216	101.506	257.210	180.047	128.605	238.992	158.366	104.616	243.074	170.152	121.537
Custo de redução de GEE (R\$/tCO2)	11.658	11.658	11.658	14.182	14.174	14.163	8.759	8.759	8.759	24.149	22.860	21.142	29.473	29.473	29.473
Payback simples ou retorno simples (ano)	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,1	1,1	1,1	1,1	1,2	1,3	1,1	1,1	1,1
Valor presente líquido - VPL (R\$)	2.168.249	1.517.774	1.084.124	2.169.980	1.518.125	1.083.555	2.745.654	1.921.958	1.372.827	2.551.183	1.690.527	1.116.756	2.594.760	1.816.332	1.297.380
Taxa interna de retorno - TIR (%)	79	79	79	79	79	79	78,9	54,1	97,4	97,4	91,2	86,8	81	92,5	92,5
Retorno do capital próprio (Ano)	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1	1	1	1,1	1,2	1,3	1,1	1,1	1,1
Redução anual líquida de emissões de GEE (tCO2)	17	12	8,7	14,3	10	7,2	29,4	20,6	14,7	9,9	6,9	4,9	8,2	5,8	4,1
Redução líquida de GEE durante 25 Anos (tCO2/)	436	305	218	358	251	179	734	514	367	247	173	124	206	144	103
Custo da Usina X VPL	8,75	8,75	8,75	8,76	8,76	8,75	11,08	11,08	11,08	10,30	9,75	9,02	10,48	10,48	10,48

Fonte: autor.

Tabela 4.5 - Resultados obtidos para a realização da análise financeira e ambiental – Placas fotovoltaicas amorfas.

PARÂMETROS DE SAÍDA	RESULTADOS OBTIDOS PARA A REALIZAÇÃO DA ANÁLISE FINANCEIRA E AMBIENTAL - AMORFA														
	2019			2020			2021			2022			2023		
	100% (135kW)	70% (94,5kW)	30% (67,5kW)	100% (135kW)	70% (94,5kW)	30% (67,5kW)	100% (135kW)	70% (94,5kW)	30% (67,5kW)	100% (135kW)	70% (94,5kW)	30% (67,5kW)	100% (135kW)	70% (94,5kW)	30% (67,5kW)
Demanda															
Número de placas	6750	4725	3375	6750	4725	3375	430	315	225	430	315	225	430	315	225
Área ocupada (m ²)	2351	1645	1175	2351	1645	1175	748	533	374	748	533	374	748	533	374
Custo total da usina fotovoltaica (R\$)	56.794.989.340	39.754.893.900	28.397.494.620	56.794.989.340	39.754.893.900	28.397.494.620	56.794.989.340	39.754.893.900	28.397.494.620	56.794.989.340	39.754.893.900	28.397.494.620	56.794.989.340	39.754.893.900	28.397.494.620
Economia anual no ciclo de vida (R\$/ano)	-5.320.245.309	-3.724.021.977	-2.660.121.654	-5.320.245.130	-3.724.021.925	-2.660.121.695	-5.320.187.969	-3.723.981.896	-2.660.093.982	-5.320.205.489	-3.724.009.091	-2.660.117.623	-5.320.202.949	-3.724.001.475	-2.660.101.475
Custo de redução de GEE (R\$/tCO ₂)	288.014.702	288.014.702	288.014.702	300.098.896	300.098.894	300.098.914	170.892.957	170.892.957	170.892.957	307.094.342	307.094.342	307.094.342	307.094.342	307.094.342	307.094.342
Payback simples ou retorno simples (ano)	286658,2	286658,2	286658,2	286431,6	286571,1	286754,7	231362,8	231362,8	231362,8	246854,7	246854,7	246854,7	246854,7	246854,7	246854,7
Valor presente líquido - VPL (R\$)	-56.792.427.938	-39.753.108.121	-28.396.213.969	-56.792.425.930	-39.753.100.576	-28.396.214.400	-56.791.815.799	-39.752.672.635	-28.396.007.895	-56.792.000.830	-39.753.898.881	-28.396.320.290	-56.791.975.794	-39.752.784.611	-28.396.087.880
Taxa interna de retorno - TIR (%)	negativo	negativo	negativo	negativo	negativo	negativo	negativo	negativo	negativo	negativo	negativo	negativo	negativo	negativo	negativo
Retorno do capital próprio (Ano)	>projeto	>projeto	>projeto	>projeto	>projeto	>projeto	>projeto	>projeto	>projeto	>projeto	>projeto	>projeto	>projeto	>projeto	>projeto
Redução anual líquida de emissões de GEE (tCO ₂)	18	13	9	15	11	8	31	22	16	10	7	5	9	6	4
Redução líquida de GEE durante 25 Anos (tCO ₂ /Ano)	402	329	231	380	286	190	778	546	389	302	184	131	219	153	109
Custo de tIR no VPL	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00

Fonte: autor.

4.3.1 Custo Total da Usina Fotovoltaica

O custo total de um projeto de usina fotovoltaica engloba uma ampla gama de despesas que vão desde a concepção até a operação e manutenção da usina. Inicialmente, os custos de desenvolvimento incluem estudos de viabilidade, aquisição de terrenos, licenças e autorizações regulatórias. Além disso, há despesas relacionadas ao planejamento e design do projeto, que envolvem engenharia e consultoria especializada. Estes custos iniciais são cruciais para estabelecer a viabilidade econômica e técnica do projeto, bem como para assegurar a conformidade com regulamentações ambientais e de construção.

Na fase de construção, os principais componentes de custo incluem a compra e instalação dos painéis solares, inversores, sistemas de montagem, cabos, e outros equipamentos elétricos. A infraestrutura associada, como sistemas de monitoramento, subestações e conexões à rede elétrica, também representa uma parte significativa do orçamento. Além disso, os custos de mão de obra para a instalação, gerenciamento de projeto e logística são substanciais. A eficiência no gerenciamento desta fase pode resultar em economias significativas, garantindo que a usina seja construída dentro do prazo e orçamento planejados.

Após a construção, a fase de operação e manutenção (O&M) envolve custos contínuos que devem ser considerados no custo total do projeto. Estes incluem a manutenção preventiva e corretiva dos equipamentos, limpeza dos painéis solares, monitoramento da performance da usina e eventuais reparos ou substituições de componentes ao longo da vida útil do projeto. Além disso, os custos de seguros e a gestão administrativa da usina são elementos recorrentes.

Uma gestão eficaz desta fase é essencial para maximizar a produção de energia e garantir a rentabilidade a longo prazo do investimento na usina fotovoltaica.

Em suma, o custo total da usina fotovoltaica representa o investimento inicial necessário para a implementação do sistema de geração de energia solar. Quanto menor o custo total, mais viável financeiramente pode ser o projeto. No entanto, o custo deve ser analisado em conjunto com outros parâmetros, como retorno financeiro, TIR (Taxa Interna de Retorno) e *payback*.

Para o caso da usina fotovoltaica aqui proposta, os custos totais do projeto (Tabela 4.6), conforme a demanda escolhida, são:

Tabela 4.6 – Custos do Projeto.

Potência da Usina (kW)	Placas policristalinas (R\$)	Placas bifaciais (R\$)	Placas amorfas (R\$)
135	452.952,00	247.691,00	56.794.989.240,00
94,5	317.066,00	173.384,00	39.754.893.960,00
67,5	226.476,00	123.846,00	28.397.494.620,00

Fonte: autor.

Os valores para as placas policristalinas foram obtidos a partir de uma consulta de preço de mercado em (ENERGIA TOTAL, 2024). Neste site, o preço por kW obtido foi de R\$ 3.355,20. A partir desse valor foi obtido o que consta na tabela acima. Da mesma maneira foi obtido o valor para as placas bifaciais, o qual foi extraído da fonte (ENERGIA TOTAL, 2024) e seu preço por kW foi de R\$ 1.834,75. Já, para as placas amorfas, o preço por kW obtido foi de R\$ 56.794.989.240,00. Vale ressaltar que o preço, em R\$, do dólar americano convertido, consultado em 10 de dezembro de 2024 foi de 6,08. Tal valor, considerado exorbitante e inviável financeiramente para os propósitos deste trabalho, foi originado de pesquisa de mercado em UCWDK Solar (2024).

Fazendo as análises devidas para as simulações obtidas, o custo total da usina com placas policristalinas variou entre R\$ 226.476,00 e R\$ 452.952,00, dependendo do ano e do nível de demanda (100%, 70%, 50%). Quanto ao seu desempenho, esta tecnologia apresentou um custo inicial intermediário, sendo mais acessível do que as amorfas, mas geralmente mais

caro que as bifaciais. Em relação a tendência ao longo dos anos, o custo manteve-se relativamente estável, com pequenas variações ao longo dos anos analisados. Destaca-se aqui o bom equilíbrio entre custo inicial e desempenho financeiro/ambiental.

Para as placas bifaciais, este parâmetro variou entre R\$ 123.845 e R\$ 247.691, conforme a demanda e o ano. Em relação ao desempenho, apresentam o menor custo total entre as três tecnologias analisadas, o que aumenta significativamente sua atratividade financeira. Quanto a tendência ao longo dos anos, o custo permaneceu estável, reforçando a viabilidade dessa tecnologia. Destaca-se aqui o custo mais baixo com excelente retorno financeiro e ambiental.

Para as placas amorfas, o custo total da usina variou entre R\$ 28.397.494.620,00 e R\$ 56.794.989.240,00 nos diferentes cenários. Quanto ao seu desempenho, o custo é excessivamente elevado, tornando essa tecnologia financeiramente inviável para implementação em larga escala. Em relação a tendência ao longo dos anos, apesar de alguma estabilidade nos valores, o alto custo permanece um grande obstáculo para a viabilidade dessa tecnologia. Destaca-se aqui o custo extremamente elevado e incompatível com o retorno financeiro obtido.

Portanto, os custos do projeto dependem da escolha do tipo da placa. Esses valores estão aquém quando confrontados aos benefícios proporcionados ao IFB, à sociedade e às questões ambientais envolvidas quando observados os valores das placas policristalinas e bifaciais, porém com vantagem financeira para as placas bifaciais. Já para as placas amorfas, torna-se um valor impraticável dada a magnitude do mesmo.

4.3.2 Economia Anual no Ciclo de Vida

A economia anual no ciclo de vida de um projeto de usina fotovoltaica refere-se às reduções de custos e benefícios financeiros que são acumulados ao longo da vida útil da usina, graças a decisões estratégicas tomadas durante as fases de planejamento, construção e operação. Investimentos iniciais em tecnologias eficientes e duradouras, como painéis solares de alta eficiência e inversores de qualidade, podem resultar em maiores custos de instalação, mas garantem economias substanciais ao longo dos anos devido à maior produção de energia e menores necessidades de manutenção. Estas escolhas iniciais são cruciais para assegurar que a usina opere de forma eficiente e econômica durante décadas.

Durante a fase de operação, a implementação de práticas de manutenção preventiva e o uso de sistemas de monitoramento avançados são fundamentais para maximizar a produção de energia e minimizar os custos operacionais. A manutenção regular dos equipamentos e a limpeza periódica dos painéis solares aumentam a eficiência e a durabilidade dos componentes, evitando paradas inesperadas e custos de reparo elevados. Além disso, o monitoramento contínuo da performance da usina permite a identificação rápida de quaisquer problemas, garantindo a operação otimizada e a maximização das receitas provenientes da venda de eletricidade.

Além dos benefícios diretos, a usina fotovoltaica pode gerar economias adicionais através da redução de custos com energia, especialmente em regiões onde a eletricidade da rede é cara. A produção de energia solar pode substituir ou complementar a energia comprada, resultando em economias anuais consideráveis. Ademais, incentivos fiscais e créditos de energia renovável podem proporcionar benefícios financeiros adicionais, melhorando ainda mais a viabilidade econômica do projeto ao longo de seu ciclo de vida. Ao considerar todos esses fatores, a economia anual no ciclo de vida de uma usina fotovoltaica pode ser substancial, garantindo a sustentabilidade e a rentabilidade do investimento a longo prazo.

Desta forma, a economia anual no ciclo de vida (R\$/ano) representa a quantidade de recursos financeiros economizados anualmente pela geração de energia elétrica através das placas fotovoltaicas, comparada ao custo que seria pago à rede elétrica convencional. Quanto maior a economia anual, mais eficiente financeiramente é a tecnologia ao longo do tempo. Esse parâmetro reflete diretamente o retorno do investimento, influenciando na viabilidade econômica do sistema.

Para as simulações deste trabalho, os valores de economia anual de ciclo de vida, no acumulado, são os ilustrados na Tabela 4.7.

Tabela 4.7 – Economia anual no ciclo de vida

Potência da Usina (kW)	Placas policristalinas (R\$)	Placas bifaciais (R\$)	Placas amorfas (R\$)
135	1.049.532	1.145.676	-26.601.086.828,00
94,5	725.664	792.964	-14.287.551.849,00
67,5	509.752	557.823	-13.300.558.429,00

Fonte: autor.

Para as placas policristalinas, este parâmetro variou entre R\$ 91.945,00 e R\$ 183.890,00, conforme os cenários e anos analisados. Quanto ao seu desempenho, essas placas apresentaram uma boa economia anual, com valores consistentes e proporcionais ao nível de demanda. Em relação a tendência ao longo dos anos, a economia manteve-se relativamente estável, com variações proporcionais às condições de demanda. Destaca-se aqui a economia estável e adequada, contribuindo para um bom retorno financeiro.

Para as placas bifaciais, esse parâmetro variou entre R\$ 101.506,00 e R\$ 203.119,00, conforme os diferentes cenários. Quanto ao seu desempenho, apresentaram a maior economia anual entre as três tecnologias analisadas, refletindo a eficiência energética dos painéis bifaciais. Em relação a tendência ao longo dos anos, a economia permaneceu consistente e superior às demais tecnologias, reforçando sua vantagem econômica. Destaca-se aqui a maior economia anual, resultando em um excelente desempenho financeiro.

Para as placas amorfas, esse parâmetro variou entre -R\$ 2.660.122.654,00 e -R\$ 5.320.245.309,00, ao longo dos anos e cenários analisados. Quanto ao seu desempenho, apresentaram a menor economia anual entre as três tecnologias (negativa), refletindo baixa eficiência energética e alto custo de instalação. Em relação a tendência ao longo dos anos, os valores permaneceram baixos e inconsistentes, evidenciando uma viabilidade econômica insatisfatória. Destaca-se aqui a economia muito baixa, inviabilizando o retorno financeiro do investimento.

Todavia, analisar a razão entre a economia anual no ciclo de vida e o custo total da usina é uma abordagem mais abrangente e informativa para projetos fotovoltaicos, pois a energia solar é um investimento com retorno ao longo de vários anos, e a análise dessa razão oferece uma visão completa dos benefícios econômicos futuros, garantindo que o projeto seja financeiramente sustentável e traga economias significativas ao longo de sua vida útil.

4.3.3 Custo de Redução de Gases de Efeito Estufa (GEE)

O custo de redução de gases de efeito estufa (GEE) em um projeto de usina fotovoltaica está relacionado às despesas necessárias para implementar e operar a usina, comparadas aos benefícios ambientais obtidos pela substituição de fontes de energia convencionais por energia solar. As usinas fotovoltaicas, ao gerar eletricidade sem emitir GEE durante a operação,

contribuem significativamente para a mitigação das mudanças climáticas. Os custos iniciais incluem a compra e instalação de painéis solares, inversores e outros equipamentos, bem como as despesas de planejamento e construção. Embora os custos iniciais possam ser altos, os benefícios ambientais a longo prazo e a crescente competitividade da energia solar tornam esses investimentos atraentes.

Em outras palavras, o custo de redução de gases de efeito estufa (GEE) para usinas fotovoltaicas refere-se ao custo associado à redução das emissões de gases como dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) e óxidos de nitrogênio (NO_x) que contribuem para o aquecimento global e as mudanças climáticas. Esse custo é geralmente calculado em termos de quanto dinheiro é gasto para evitar a emissão de uma tonelada de CO_2 equivalente (tCO_2e) ao utilizar energia solar em vez de fontes de energia fósseis, como carvão, gás natural ou petróleo.

Na análise de custo-benefício, o custo de redução de GEE pode ser calculado considerando a quantidade de dióxido de carbono equivalente (CO_2e) evitada ao longo da vida útil da usina. A comparação entre o investimento necessário e a quantidade de GEE reduzida permite determinar o custo por tonelada de CO_2e evitada. Em muitos casos, esse custo é competitivo com outras tecnologias de mitigação de GEE, especialmente quando se leva em conta os incentivos fiscais e subsídios disponíveis para projetos de energia renovável. Além disso, a tecnologia fotovoltaica tem se beneficiado de reduções significativas nos custos de produção e instalação, tornando-a uma das opções mais econômicas para a redução de GEE.

Além dos custos diretos, os projetos de usinas fotovoltaicas proporcionam benefícios adicionais, como a redução da dependência de combustíveis fósseis, a criação de empregos no setor de energia renovável e a melhoria da qualidade do ar. Estes benefícios indiretos contribuem para uma análise mais abrangente dos custos de redução de GEE. Quando considerados em conjunto, os benefícios ambientais, econômicos e sociais fortalecem o argumento a favor do investimento em usinas fotovoltaicas como uma estratégia eficaz e sustentável para a mitigação das mudanças climáticas. Assim, o custo de redução de GEE em projetos de usinas fotovoltaicas não só é justificado pelo impacto positivo no meio ambiente, mas também pelos benefícios econômicos e sociais a longo prazo.

As simulações para as usinas policristalinas demonstraram que, independentemente da potência da usina, à exceção do ano de 2022, o custo de redução de gases de efeito estufa é praticamente constante para as três potências de usinas sugeridas. Desse modo, a instalação da usina de maior potência proporciona maior custo benefício. Entretanto, as simulações

mostraram que esse custo de redução para as placas policristalinas chegou a R\$ 27.142,00/tCO₂ em 2023; apenas no ano de 2021 foi inferior a R\$ 10.000,00/tCO₂, atingindo R\$ 8.104,00/tCO₂ (Figura 4.3), atingindo uma média geral R\$ 15.881,00/tCO₂ enquanto que para as placas bifaciais esta média foi de R\$ 17.356,00/tCO₂ revelando, nesse caso, a placa policristalina ser mais interessante para tal proposta. Para as placas amorfas, obviamente, também nesse quesito, torna-se inviável.

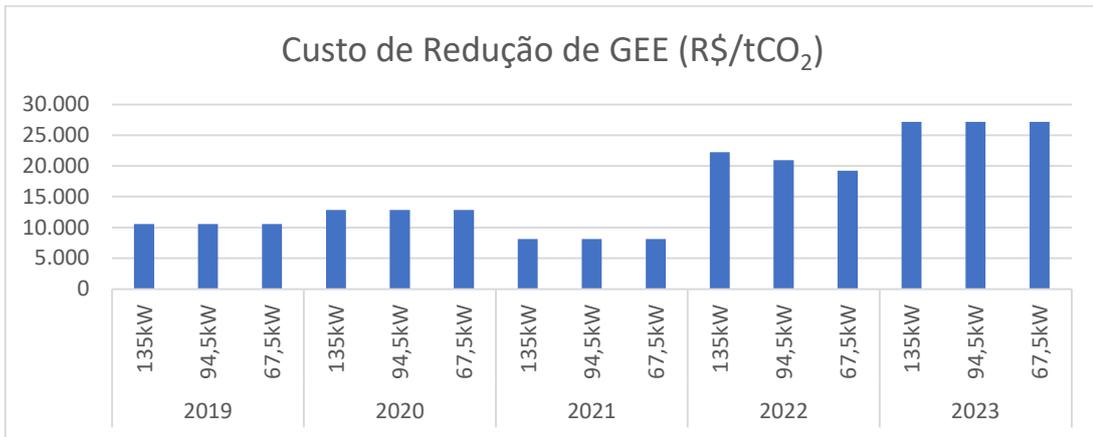


Figura 4.3 – Custo de redução de GEE (R\$/tCO₂) - Anos 2019 a 2023 – placas policristalinas.

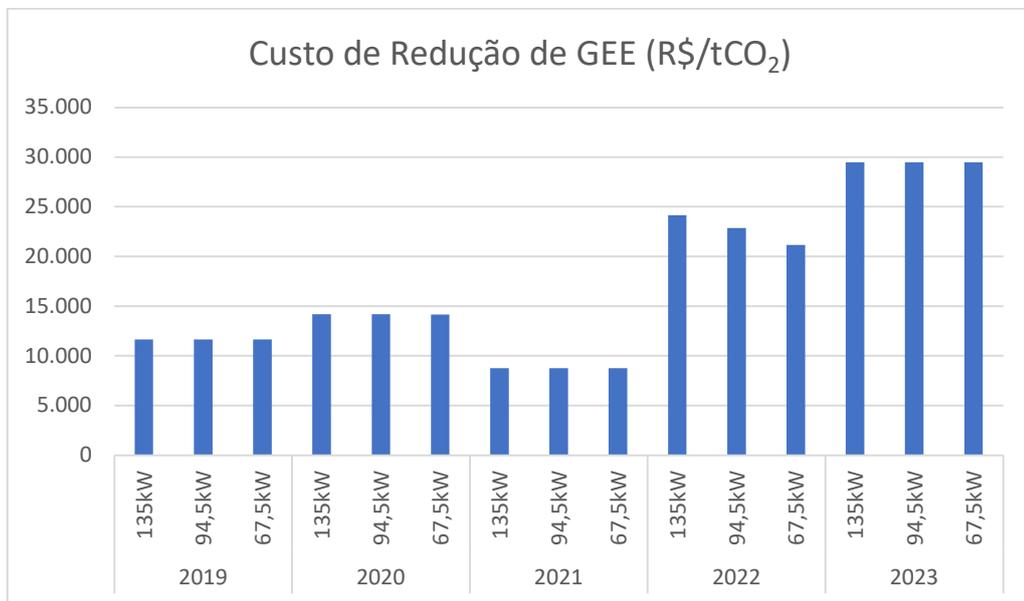


Figura 4.4 – Custo de redução de GEE (R\$/tCO₂) - Anos 2019 a 2023 – placas bifaciais.



Figura 4.5 – Custo de redução de GEE (R\$/tCO₂) - Anos 2019 a 2023 – placas amorfas.

4.3.4 Payback Simples ou Retorno Simples

O *payback* simples em um projeto de usina fotovoltaica refere-se ao período de tempo necessário para recuperar o investimento inicial através das economias de custos e receitas geradas pela produção de energia solar. Este método de avaliação financeira é amplamente utilizado para determinar a viabilidade econômica do projeto, calculando quando o valor investido será compensado pelos benefícios financeiros obtidos. O cálculo do *payback* simples considera os custos totais de instalação e os rendimentos anuais provenientes da venda de energia ou da redução de despesas com eletricidade comprada da rede. Para calcular o *payback* simples, divide-se o custo total do projeto pelo lucro anual líquido gerado pela usina.

Apesar de sua simplicidade, o *payback* simples tem limitações, pois não considera o valor do dinheiro no tempo nem os benefícios e custos que ocorrem após o período de *payback*. Para uma análise mais abrangente, pode-se utilizar o Valor Presente Líquido (VPL) ou a Taxa Interna de Retorno (TIR), que levam em conta o fluxo de caixa ao longo do ciclo de vida do projeto. Contudo, o *payback* simples continua sendo uma ferramenta popular por sua facilidade de uso e capacidade de proporcionar uma primeira impressão sobre a lucratividade do investimento em uma usina fotovoltaica.

Neste trabalho, para as placas policristalinas, o parâmetro *payback* simples varia entre 2,1 a 2,4 anos, dependendo do nível de demanda (100%, 70% ou 50%) e do ano analisado. O desempenho apresenta um tempo de retorno relativamente curto, evidenciando uma boa eficiência econômica e rápida recuperação do investimento inicial. Quanto a tendência ao longo dos anos, a estabilidade no período de retorno sugere consistência no desempenho financeiro.

Para as placas bifaciais, o *payback* simples varia entre 1,1 a 1,3 anos, dependendo do nível de demanda (100%, 70% ou 50%) e do ano analisado. Seu desempenho apresenta o melhor desempenho entre os três tipos, com um tempo de retorno muito mais curto. Quanto a tendência ao longo dos anos, a estabilidade nos valores reforça a alta eficiência financeira desse tipo de tecnologia.

Já para as placas amorfas, o *payback* simples é extremamente elevado, variando entre 20.842 a 28.646 anos, dependendo do nível de demanda e do ano analisado. Seu desempenho apresenta um tempo de retorno que inviabiliza economicamente o uso de painéis amorfos. Quanto a tendência ao longo dos anos, não há melhora perceptível no retorno financeiro ao longo dos anos analisados, indicando uma baixa eficiência econômica crônica.

4.3.5 Valor Presente Líquido (VPL)

O Valor Presente Líquido (VPL) em um projeto de usina fotovoltaica é uma métrica financeira que avalia a viabilidade econômica do projeto ao considerar o valor do dinheiro no tempo. O VPL é calculado descontando os fluxos de caixa futuros gerados pelo projeto ao seu valor presente, usando uma taxa de desconto que reflete o custo de oportunidade do capital. Um VPL positivo indica que os rendimentos esperados superam os custos iniciais, justificando o investimento. No contexto de uma usina fotovoltaica, os fluxos de caixa incluem a economia nas contas de energia, receitas da venda de eletricidade e quaisquer incentivos fiscais ou subsídios recebidos.

Para calcular o VPL, é necessário projetar os fluxos de caixa anuais durante a vida útil da usina, que geralmente varia entre 20 e 30 anos. Estes fluxos de caixa são então descontados à taxa de desconto apropriada, que pode refletir o custo do capital ou a taxa de retorno esperada pelo investidor. O valor presente desses fluxos é somado e subtraído do investimento inicial.

O VPL é uma ferramenta valiosa porque considera não apenas os custos e receitas ao longo do tempo, mas também o valor temporal do dinheiro, proporcionando uma visão mais completa da rentabilidade do projeto. Comparado com outras métricas como o *payback* simples, o VPL oferece uma análise mais robusta, especialmente útil para decisões de investimento de longo prazo. Em projetos de usinas fotovoltaicas, onde os benefícios financeiros se acumulam

ao longo de décadas, o uso do VPL é essencial para capturar a verdadeira viabilidade econômica e assegurar que o projeto ofereça retornos adequados aos investidores.

O *payback* simples e o Valor Presente Líquido (VPL) são duas métricas financeiras usadas para avaliar a viabilidade de um projeto de usina fotovoltaica, mas diferem significativamente em sua abordagem. O *payback* simples calcula o tempo necessário para recuperar o investimento inicial sem considerar o valor do dinheiro no tempo, oferecendo uma visão rápida e intuitiva da recuperação do capital investido. Em contraste, o VPL leva em conta todos os fluxos de caixa futuros descontados ao seu valor presente, proporcionando uma análise mais detalhada e precisa da rentabilidade ao considerar a depreciação do dinheiro ao longo do tempo. Enquanto o *payback* simples pode ser útil para uma avaliação inicial e de curto prazo, o VPL é crucial para uma análise abrangente e de longo prazo, garantindo que o investimento na usina fotovoltaica seja economicamente viável e atraente aos investidores, considerando o fluxo de caixa total e a taxa de retorno esperada.

Para as simulações deste trabalho, o VPL das placas policristalinas variou entre R\$ 1.374.442 e R\$ 2.389.500 (Figura 4.6) ao longo dos anos analisados, dependendo do nível de demanda (100%, 70% ou 50%). Seu Desempenho apresentou um VPL consistentemente positivo, indicando viabilidade financeira estável e um bom retorno sobre o investimento. A respeito da tendência ao longo dos anos, observa-se uma tendência de leve crescimento no VPL, reforçando a atratividade econômica das placas policristalinas.

Para as placas bifaciais, o VPL variou entre R\$ 1.084.124 e R\$ 2.980.551 (Figura 4.7), com valores superiores às placas policristalinas, dependendo da demanda e do ano. Seu desempenho pode ser considerado consistentemente elevado, demonstrando maior retorno financeiro e eficiência econômica. Quanto a tendência ao longo dos anos, seu desempenho financeiro manteve-se estável, reforçando o excelente custo-benefício dessa tecnologia.

Para as placas amorfas, o VPL variou entre R\$ -26.792.937 e R\$ -68.068.609 (Figura 4.8). Seu desempenho é negativo em todos os cenários e anos analisados, indicando que os fluxos de caixa futuros não são suficientes para cobrir o investimento inicial. Quanto a tendência ao longo dos anos, não houve melhora perceptível nos valores negativos, evidenciando inviabilidade financeira crônica.

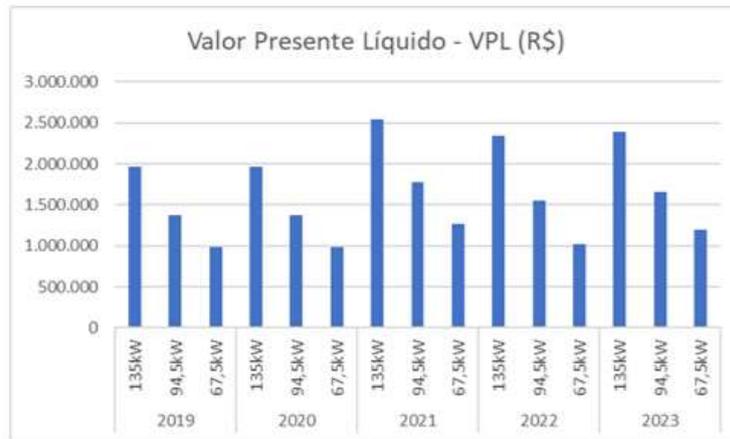


Figura 4.6 – Valor Presente Líquido (VPL) por potência - Anos 2019-2023 – Placa policristalina.

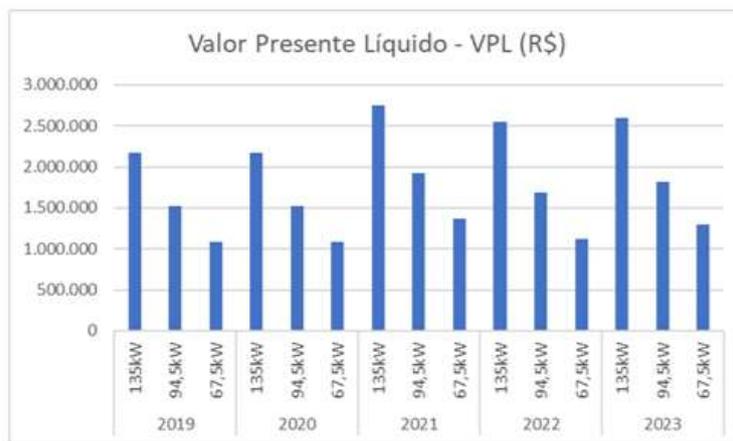


Figura 4.7– Valor Presente Líquido (VPL) por potência - Anos 2019-2023 – Placa bifacial

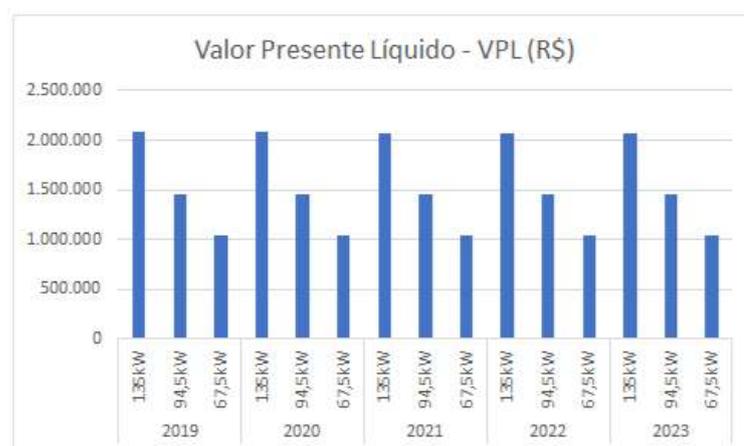


Figura 4.8– Valor Presente Líquido (VPL) por potência - Anos 2019-2023 – Placa amorfa.

Outro dado importante é a relação entre o VPL e o custo total da usina fotovoltaica. Este parâmetro representa a eficiência econômica do investimento em energia fotovoltaica. Quanto maior o valor dessa relação, melhor o retorno financeiro obtido em comparação ao custo da usina. Valores mais baixos sugerem menor retorno econômico, enquanto valores negativos indicam prejuízo.

Para as placas policristalinas esta relação varia entre 4,33 a 5,81 (Figura 4.9) ao longo dos anos e níveis de demanda. Quanto ao seu desempenho, a relação é positiva e estável, indicando um bom aproveitamento do investimento inicial. A respeito da tendência ao longo dos anos, há pequenas variações ao longo dos mesmos, mas sem perda significativa de eficiência econômica. Esta tecnologia, para esta simulação, destaca-se como tendo uma boa relação custo-benefício, sólida do ponto de vista financeiro.

Para as placas bifaciais, essa relação vai de 8,75 a 11,08 (Figura 4.10) ao longo dos anos e demandas. Quanto ao seu desempenho, a relação é significativamente mais alta que a das placas policristalinas, indicando maior retorno financeiro por unidade de investimento. Para a tendência ao longo dos anos, a relação mantém-se estável, reforçando a excelente eficiência econômica dessa tecnologia. Esta tecnologia destaca-se como a melhor em eficiência econômica entre os três tipos de placas analisados.

Para as placas amorfas, essa relação permanece constante em -1,00 (Figura 4.11) em todos os anos e níveis de demanda. Quanto ao seu desempenho, o valor negativo indica que os fluxos de caixa futuros não conseguem cobrir o investimento inicial. A respeito da tendência ao longo dos anos, não há melhora perceptível nos valores negativos, reforçando a inviabilidade financeira crônica dessa tecnologia, destacando-se como totalmente inviável economicamente.

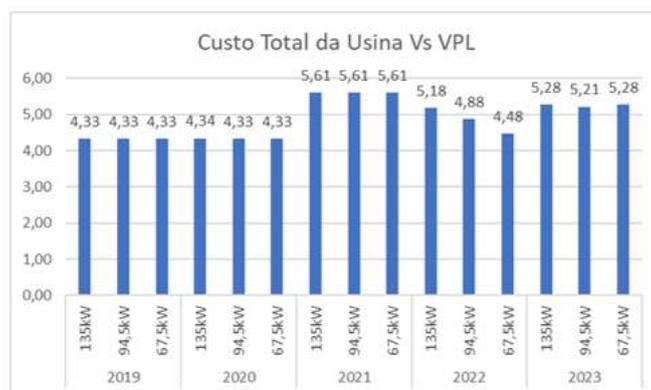


Figura 4.9 – Relação entre o VPL e o custo total da usina - anos 2019 a 2023. Placa policristalina.

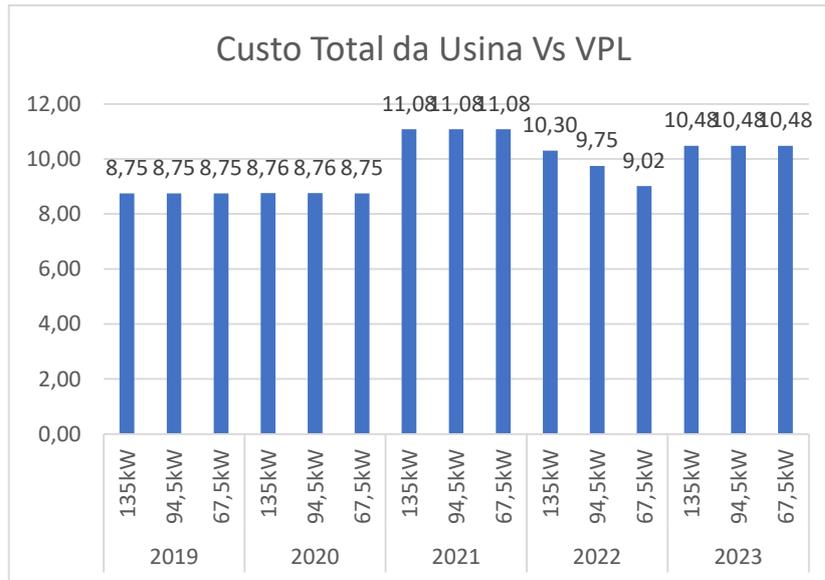


Figura 4.10 – Relação entre o VPL e o custo total da usina - anos 2019 a 2023. Placa bifacial.

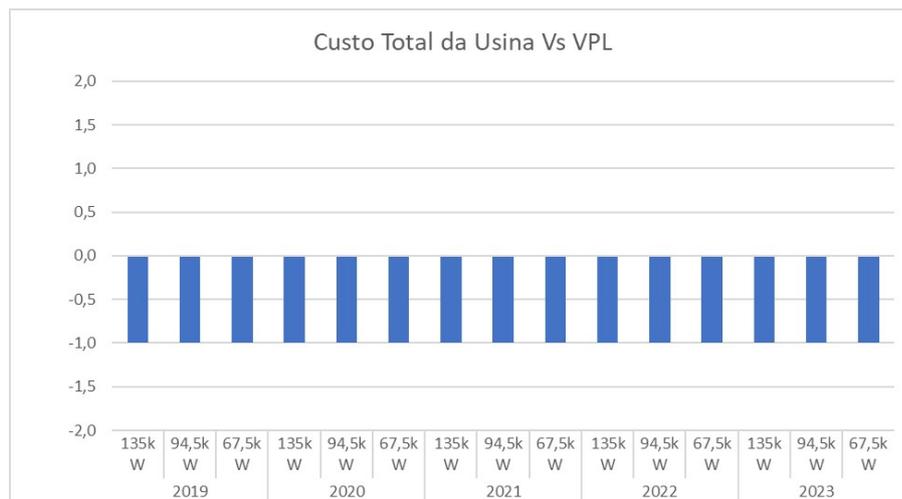


Figura 4.11 – Relação entre o VPL e o custo total da usina - anos 2019 a 2023. Placa amorfa.

4.3.6 Taxa Interna de Retorno (TIR)

A Taxa Interna de Retorno (TIR) em um projeto de usina fotovoltaica é uma métrica financeira utilizada para avaliar a rentabilidade potencial do investimento. A TIR é a taxa de desconto que torna o Valor Presente Líquido (VPL) dos fluxos de caixa futuros iguais a zero.

Em outras palavras, é a taxa de retorno esperada que o projeto gera com base nos fluxos de caixa projetados ao longo de sua vida útil. Se a TIR de um projeto de usina fotovoltaica excede

o custo de capital, o projeto é considerado viável e atrativo para os investimentos, indicando que os rendimentos esperados compensam o investimento inicial e os riscos associados.

Para calcular a TIR, é necessário projetar todos os fluxos de caixa positivos e negativos do projeto, desde os custos iniciais de desenvolvimento e construção até as receitas geradas pela venda de energia e economias de custos operacionais ao longo do tempo. A TIR oferece uma visão clara da eficiência econômica do projeto, permitindo comparar a rentabilidade da usina fotovoltaica com outras oportunidades de investimento. Por ser uma métrica que considera o valor temporal do dinheiro, a TIR é particularmente útil em projetos de longo prazo, como usinas fotovoltaicas, onde os fluxos de caixa se estendem por várias décadas. Em resumo, a TIR é uma ferramenta essencial para investidores e gestores avaliarem se o retorno financeiro esperado de uma usina fotovoltaica justifica o investimento inicial e os riscos assumidos.

Em suma, A Taxa Interna de Retorno (TIR) representa a taxa de desconto que torna o Valor Presente Líquido (VPL) igual a zero. Em termos práticos, a TIR indica a rentabilidade esperada do investimento. Quanto maior a TIR, mais atrativo é o investimento. Uma TIR negativa indica que o projeto não gera retorno suficiente para cobrir o investimento inicial.

Assim, para as placas policristalinas, a TIR variou entre 44,1% a 54,1% ao longo dos anos e níveis de demanda. Quanto ao seu desempenho, essa métrica se manteve positiva e estável, indicando que as placas policristalinas oferecem uma rentabilidade sólida ao longo do tempo. A respeito da tendência ao longo dos anos, pequenas variações foram observadas, mas a taxa permaneceu em níveis elevados, reforçando a viabilidade do investimento. Destaca-se para esta tecnologia que a rentabilidade é consistente e atrativa, com retorno acima de muitas aplicações financeiras tradicionais.

Para as placas bifaciais, essa métrica variou entre 79% a 97,4%, dependendo do ano e nível de demanda. Quanto ao seu desempenho, a TIR é significativamente mais alta em comparação às placas policristalinas, indicando maior retorno financeiro sobre o investimento. A respeito da tendência ao longo dos anos, a TIR permaneceu consistentemente elevada, demonstrando eficiência financeira superior. Destaca-se para esta tecnologia a mais alta rentabilidade obtida, tornando-a a opção mais atrativa financeiramente.

Para as placas amorfas, essa métrica permaneceu negativa em todos os cenários e anos analisados. Quanto ao seu desempenho, a TIR negativa indica que os retornos não são suficientes para cobrir o investimento inicial, resultando em prejuízo. A respeito da tendência

ao longo dos anos não houve qualquer melhora nos valores negativos, evidenciando a inviabilidade financeira crônica desse tipo de tecnologia. Destaca-se aqui, uma tecnologia totalmente inviável economicamente para esta aplicação, sem expectativa de retorno positivo.

4.3.7 Retorno do Capital Próprio

O Retorno do Capital Próprio (Return on Equity, ROE) em um projeto de usina fotovoltaica é uma medida financeira que indica a rentabilidade do investimento realizado. O ROE é calculado dividindo-se o lucro líquido gerado pelo projeto pelo valor do capital próprio investido. Essa métrica reflete a eficiência com que se utiliza o capital para gerar lucros, proporcionando uma visão clara sobre a rentabilidade específica para o investimento que financia a usina fotovoltaica. Um ROE elevado sugere que o projeto está gerando lucros significativos em relação ao capital investido, tornando-se um indicador atraente para o gestor.

Para calcular o ROE de uma usina fotovoltaica, é necessário considerar todos os fluxos de caixa líquidos após a dedução de todos os custos operacionais, manutenção, e despesas financeiras, como juros sobre dívidas. Este lucro líquido é então comparado ao capital próprio investido no projeto. Com a análise do ROE permite-se avaliar a eficiência financeira do projeto, ajudando na tomada de decisões sobre onde alocar seus recursos. Um ROE consistente e crescente ao longo do tempo é um sinal positivo, indicando que o projeto está operando de forma lucrativa e sustentável.

Além de servir como um indicador da rentabilidade do capital próprio, o ROE também oferece insights sobre a gestão financeira. Um ROE alto pode indicar uma gestão eficaz dos recursos e uma capacidade robusta de geração de receitas, enquanto um ROE baixo pode sugerir a necessidade de melhorias operacionais ou estratégicas.

Para projetos de usinas fotovoltaicas, onde os investimentos iniciais são elevados e os retornos são realizados ao longo de muitos anos, um ROE positivo e competitivo é crucial. Em resumo, o ROE é uma métrica fundamental que fornece uma avaliação completa da rentabilidade e eficiência do capital investido em projetos de energia solar, orientando decisões estratégicas e financeiras.

Em suma, o Retorno do Capital Próprio indica em quantos anos o investimento inicial será recuperado pelo fluxo de caixa gerado pela usina fotovoltaica. Quanto menor o número de

anos, mais rápido o investimento é recuperado. Valores muito altos ou indefinidos indicam baixa atratividade econômica.

Para as placas policristalinas, essa métrica variou entre 2,1 a 2,3 anos (Figura 4.12) anos ao longo dos diferentes cenários analisados. Quanto ao seu desempenho, a recuperação do investimento ocorre de forma rápida e consistente, mostrando uma boa performance financeira. A respeito da tendência ao longo dos anos houve estabilidade nesse indicador, reforçando a segurança financeira desse tipo de tecnologia. Destaca-se aqui um retorno do capital em aproximadamente 2 anos, demonstrando alta eficiência no prazo de recuperação.

Para as placas bifaciais, essa métrica variou entre 1,1 a 1,3 anos (Figura 4.13), dependendo do cenário e ano analisado. Quanto ao seu desempenho, o retorno ocorre de forma extremamente rápida, praticamente em metade do tempo das placas policristalinas. A respeito da tendência ao longo dos anos o indicador manteve-se consistente, evidenciando ótima performance financeira. Destaca-se aqui que é o retorno mais rápido entre as três tecnologias, representando alta eficiência financeira.

Para as placas amorfas, o Retorno do Capital Próprio, em todos os anos e cenários analisados, foi registrado como "projeto inviável". Quanto ao seu desempenho, constatou-se a incapacidade de gerar retorno positivo fazendo com que não haja um prazo viável para recuperação do capital investido. A respeito da tendência ao longo dos anos, não houve melhora nesse parâmetro, confirmando a baixa atratividade econômica. Destaca-se aqui como inviável financeiramente, sem possibilidade de recuperação do investimento.



Figura 4.12 – Retorno do Capital Próprio - Anos 2019-2023. Placas policristalinas.



Figura 4.13 – Retorno do Capital Próprio - Anos 2019-2023. Placas bifaciais.

4.4 ANÁLISE AMBIENTAL

A importância dos aspectos ambientais em um projeto de usina fotovoltaica é crucial tanto para a viabilidade do projeto quanto para sua aceitação social e legal. Primeiramente, as usinas fotovoltaicas produzem energia limpa e renovável, contribuindo significativamente para a redução das emissões de gases de efeito estufa (GEE) e mitigação das mudanças climáticas. A transição para fontes de energia renovável é essencial para cumprir metas globais de redução de GEE, como as estabelecidas pelo Acordo de Paris, e projetos de energia solar desempenham um papel central nesse esforço. Estudos mostram que a geração de eletricidade a partir de painéis solares pode reduzir drasticamente a pegada de carbono em comparação com fontes de energia convencionais, como o carvão e o gás natural (International Energy Agency, 2020).

Além das reduções nas emissões de GEE, projetos de usinas fotovoltaicas também trazem benefícios ambientais locais, como a redução da poluição do ar e da água, pois não emitem poluentes nocivos durante a operação e não requerem grandes volumes de água para funcionar, ao contrário de muitas usinas térmicas. Isso é particularmente importante em regiões com escassez de água ou altos níveis de poluição, onde a adoção de energia solar pode melhorar significativamente a qualidade de vida das populações locais. Estudos indicam que a implementação de usinas fotovoltaicas pode contribuir para a melhoria da saúde pública ao reduzir a exposição a poluentes atmosféricos (World Health Organization, 2018).

No entanto, a instalação de usinas fotovoltaicas também apresenta desafios ambientais que precisam ser geridos adequadamente, como o uso de grandes áreas de terra e possíveis impactos sobre a biodiversidade local. A escolha do local e o design do projeto devem minimizar a perturbação dos ecossistemas e a perda de habitat. Medidas de mitigação, como a implementação de corredores ecológicos e a utilização de áreas já degradadas para a instalação dos painéis, são estratégias eficazes para reduzir esses impactos. A avaliação ambiental detalhada e a participação das comunidades locais no planejamento do projeto são essenciais para assegurar que os benefícios ambientais superem os possíveis impactos negativos (Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2019).

4.4.1 Redução Líquida de Emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE)

A redução anual líquida de emissões de gases de efeito estufa (GEE) em um projeto de usina fotovoltaica é um dos principais benefícios ambientais e um indicador crucial da contribuição do projeto para a mitigação das mudanças climáticas. Usinas fotovoltaicas geram eletricidade a partir da luz solar, um processo que não emite GEE durante a operação. Comparativamente, a geração de eletricidade a partir de fontes fósseis, como carvão e gás natural, é uma das principais fontes de emissões de CO₂ e outros GEE. Ao substituir ou complementar a geração de eletricidade a partir de combustíveis fósseis, as usinas fotovoltaicas podem reduzir significativamente as emissões de GEE. De acordo com estudos da International Renewable Energy Agency (IRENA), cada megawatt-hora (MWh) de eletricidade gerada por energia solar pode evitar a emissão de até 0,5 toneladas de CO₂ equivalente, dependendo da matriz energética substituída (IRENA, 2019).

Além das reduções diretas de CO₂, a energia solar também contribui para a redução de outros poluentes atmosféricos associados à queima de combustíveis fósseis, como óxidos de nitrogênio (NO_x) e dióxidos de enxofre (SO₂), que têm impactos negativos na saúde pública e no meio ambiente. A diminuição desses poluentes melhora a qualidade do ar, o que é especialmente importante em áreas urbanas densamente povoadas e industrializadas. Estudos da Environmental Protection Agency (EPA) dos EUA indicam que a redução de poluentes atmosféricos através do aumento do uso de energias renováveis pode resultar em benefícios significativos para a saúde pública, incluindo a redução de doenças respiratórias e cardiovasculares (EPA, 2018).

Além dos benefícios diretos na redução de emissões, os projetos de usinas fotovoltaicas também incentivam o desenvolvimento de tecnologias e práticas sustentáveis em outros setores. O avanço tecnológico impulsionado pela demanda por energia solar tem levado a melhorias na eficiência dos painéis solares e na redução dos custos de produção, tornando a energia solar cada vez mais competitiva economicamente. A adoção de práticas sustentáveis e a integração de energias renováveis na matriz energética global são essenciais para alcançar os objetivos de desenvolvimento sustentável estabelecidos pela ONU, que incluem a ação climática e a redução das emissões globais de GEE (United Nations, 2015). Dessa forma, os projetos de usinas fotovoltaicas desempenham um papel fundamental na transição para uma economia de baixo carbono.

Em suma, a Redução Anual Líquida de Emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) mede a quantidade de dióxido de carbono (CO_2) evitada anualmente pela geração de energia limpa através das placas fotovoltaicas, comparada à geração de energia por fontes fósseis. Quanto maior a redução anual líquida de emissões de GEE, maior o impacto ambiental positivo da usina. Esse parâmetro reflete a contribuição direta para a mitigação das mudanças climáticas.

Para as placas policristalinas, essa métrica variou entre 8,2 a 17,4 tCO_2/ano (Figura 4.14) ao longo dos diferentes cenários e anos analisados. Quanto ao seu desempenho, esta tecnologia apresentou uma redução estável e significativa de emissões, proporcional à demanda atendida. A respeito da tendência ao longo dos anos houve variação conforme o nível de demanda (100%, 70%, 50%), mantendo, no entanto, valores consistentes. Destaca-se aqui uma contribuição ambiental significativa, com redução relevante de GEE anualmente.

Para as placas bifaciais, essa métrica variou entre 8,4 a 17 tCO_2/ano (Figura 4.15), dependendo do ano e nível de demanda. Quanto ao seu desempenho, apesar de apresentar valores próximos aos das placas policristalinas, a tecnologia bifacial mostrou-se ligeira superioridade em alguns cenários. A respeito da tendência ao longo dos anos, os valores permaneceram consistentes, reforçando a eficiência dessa tecnologia na redução de emissões. Destaca-se aqui uma excelente contribuição ambiental, com uma ligeira vantagem sobre as placas policristalinas.

Para as placas amorfas, essa métrica variou entre 1,3 a 4,2 tCO_2/ano (Figura 4.16) ao longo dos anos e cenários. Quanto ao seu desempenho, esta tecnologia apresentou uma redução muito inferior de emissões de GEE, mesmo nos cenários de maior demanda. A respeito da tendência ao longo dos anos, os valores permaneceram muito abaixo dos observados nas

tecnologias policristalina e bifacial, evidenciando baixa eficiência ambiental. Destaca-se aqui um desempenho insatisfatório em termos de mitigação ambiental.

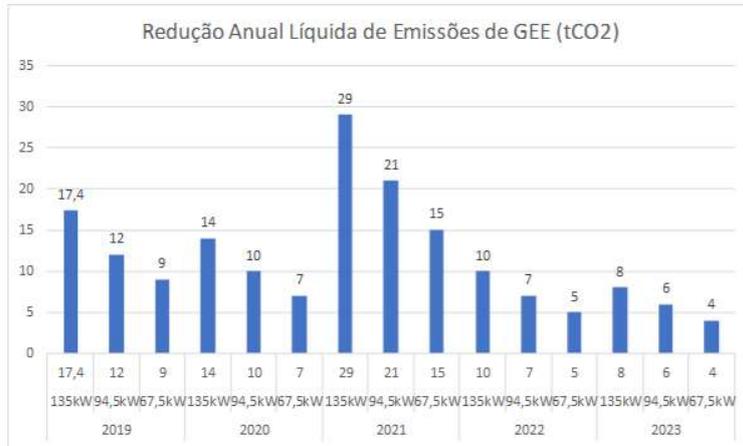


Figura 4.14 – Redução anual líquida de emissões de GEE - 2019-2023. Placas policristalinas.

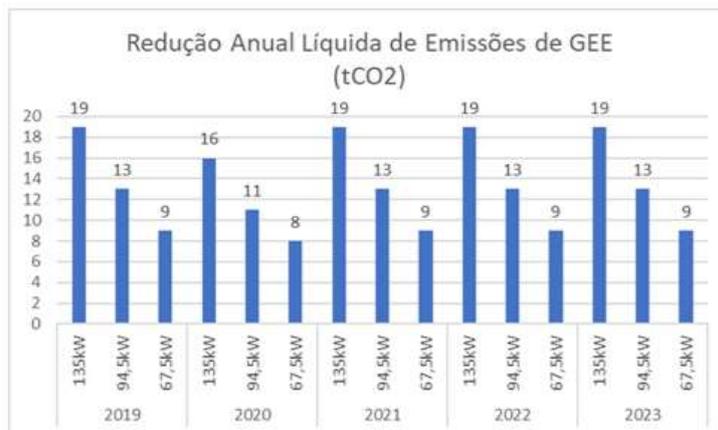


Figura 4.15 – Redução anual líquida de emissões de GEE - 2019-2023. Placas bifaciais.

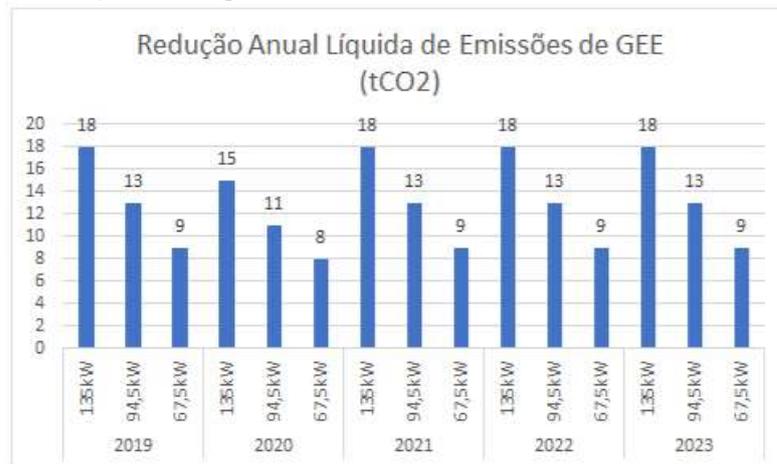


Figura 4.16 – Redução anual líquida de emissões de GEE - 2019-2023. Placas amorfas.

Uma vez que as placas bifaciais se sobressaem nas análises, é interessante mencionar alguns benefícios ambientais equivalentes pela redução das massas de emissões de dióxido de carbono ocasionados pela redução anual líquida de GEE advindos da adoção desta tecnologia para o cenário de usina de 135kW (Tabelas 4.8)

Tabela 4.8 - Alguns benefícios ambientais pela redução anual líquida de GEE. Placas bifaciais.

ALGUNS BENEFÍCIOS AMBIENTAIS		
Ano	Redução Anual Líquida de Emissões de GEE	Benefício Ambiental Equivalente a Usina de 135 kW
2019	17 toneladas tCO ₂	3,2 Carros e camionetes não utilizados; ou
		7476 Litros de gasolina não consumidos; ou
		40,5 Barris de óleo bruto não consumidos; ou
		17,4 Pessoas reduzindo uso de energia em 20%; ou
		4 Acres de floresta absorvendo carbono; ou
		1,6 Hectares de floresta absorvendo carbono; ou
		6 Toneladas de Lixo reciclado.
2020	14,3 toneladas tCO ₂	2,6 Carros e camionetes não utilizados; ou
		6144 Litros de gasolina não consumidos; ou
		33,3 Barris de óleo bruto não consumidos; ou
		14,3 Pessoas reduzindo uso de energia em 20%; ou
		3,3 Acres de floresta absorvendo carbono; ou
		1,3 Hectares de floresta absorvendo carbono; ou
		4,9 Toneladas de Lixo reciclado.
2021	29 toneladas tCO ₂	5,4 Carros e camionetes não utilizados; ou
		12632 Litros de gasolina não consumidos; ou
		68,4 Barris de óleo bruto não consumidos; ou
		29,4 Pessoas reduzindo uso de energia em 20%; ou
		6,7 Acres de floresta absorvendo carbono; ou
		2,7 Hectares de floresta absorvendo carbono; ou
		10,1 Toneladas de Lixo reciclado.
2022	10 toneladas tCO ₂	1,8 Carros e camionetes não utilizados; ou
		4254 Litros de gasolina não consumidos; ou
		23 Barris de óleo bruto não consumidos; ou
		9,9 Pessoas reduzindo uso de energia em 20%; ou
		2,3 Acres de floresta absorvendo carbono; ou
		0,9 Hectares de floresta absorvendo carbono; ou
		3,4 Toneladas de Lixo reciclado

2023	8,2 toneladas tCO ₂	1,5 Carros e camionetes não utilizados; ou
		3523 Litros de gasolina não consumidos; ou
		19,1 Barris de óleo bruto não consumidos; ou
		8,2 Pessoas reduzindo uso de energia em 20%; ou
		1,9 Acres de floresta absorvendo carbono; ou
		0,8 Hectares de floresta absorvendo carbono; ou
		2,8 Toneladas de Lixo reciclado

Fonte: autor.

De acordo com a One Tree Planted (2025), uma árvore pode absorver cerca de 10 kg de CO₂ por ano durante seus primeiros 20 anos de crescimento. Portanto, dividindo o valor total de 78,5 toneladas de CO₂ (17+14,3+29+10+8,2) pelo valor de 10 kg (0,01 toneladas) equivale ao valor de 7850 árvores plantadas. A conscientização sobre o impacto ambiental positivo da instalação de placas fotovoltaicas vai além da simples economia de energia elétrica. Compreender quantas árvores, em média, seriam necessárias para compensar a mesma quantidade de CO₂ evitada pela geração de energia solar permite visualizar, de forma concreta, os benefícios dessa tecnologia para o meio ambiente. Enquanto árvores desempenham um papel essencial no sequestro de carbono e na manutenção do equilíbrio climático, os sistemas fotovoltaicos evitam diretamente a emissão de gases de efeito estufa ao substituir fontes de energia baseadas em combustíveis fósseis. Esse paralelo facilita a sensibilização da sociedade, promovendo uma visão mais clara sobre a contribuição real das energias renováveis para a mitigação das mudanças climáticas. Além disso, reforça a responsabilidade individual e coletiva na busca por práticas sustentáveis, incentivando não apenas a adoção de tecnologias limpas, mas também o compromisso com ações complementares, como o reflorestamento e a conservação ambiental.

5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

5.1 CONCLUSÕES

Esta dissertação teve como objetivo comparar três tecnologias de placas fotovoltaicas - policristalina, bifacial e amorfa (adotando, hipoteticamente, vida útil de 15 anos para esta tecnologia) - com base em parâmetros técnico-econômicos e ambientais. Os resultados obtidos permitiram identificar os principais pontos fortes e fracos de cada tecnologia, oferecendo subsídios para a tomada de decisões estratégicas em projetos de geração fotovoltaica.

A respeito da área ocupada (m^2), a tecnologia bifacial exigiu a menor área ocupada, refletindo maior eficiência espacial enquanto que a policristalina teve uma ocupação intermediária, com uso eficiente do espaço, já a amorfa demandou a maior área ocupada, evidenciando baixa eficiência por metro quadrado. Portanto, as placas bifaciais apresentam o melhor aproveitamento do espaço disponível.

Quanto ao custo total da usina (R\$), as placas bifaciais continuam sendo a melhor tecnologia no comparativo geral, com o menor verificado. Para projetos que buscam otimização econômica, essa tecnologia permanece como a escolha mais recomendada. As placas policristalinas apresentam uma alternativa viável, com um custo intermediário e desempenho equilibrado nos parâmetros analisados. As placas amorfas apresentaram o custo total mais elevado, tornando-se menos viáveis economicamente e tecnicamente e deve ser considerada apenas em casos específicos onde outros fatores sejam determinantes.

A respeito da economia anual no ciclo de vida (R\$/ano), a placa bifacial apresentou a maior economia anual, reforçando sua superioridade econômica. A placa policristalina demonstrou uma boa economia anual, mas inferior à bifacial. A tecnologia amorfa apresentou a menor economia anual, tornando-se menos viável. Portanto, as placas bifaciais garantem a maior economia anual ao longo da vida útil da usina.

Em relação a redução anual líquida de emissões de GEE (tCO_2), a tecnologia bifacial proporcionou a maior redução de emissões de GEE, refletindo sua maior eficiência na geração de energia limpa. As placas policristalinas apresentaram boa redução de emissões, mas inferior

à bifacial. As placas amorfas demonstraram a menor redução de emissões de GEE, devido à baixa eficiência energética. Portanto, as placas bifaciais são mais eficazes na redução de emissões de GEE.

No tocante ao *payback* simples ou retorno simples, a tecnologia bifacial apresentou o menor tempo de retorno do investimento, refletindo uma recuperação mais rápida do capital investido. A tecnologia policristalina teve um desempenho intermediário, com tempo de retorno adequado. Já a amorfa apresentou o maior tempo de retorno, indicando menor viabilidade econômica. Portanto, as placas bifaciais são mais vantajosas em termos de tempo de retorno do investimento.

Para o valor presente líquido (VPL), as placas bifaciais apresentaram o maior VPL, refletindo um retorno financeiro superior ao longo da vida útil da usina enquanto que as policristalinas alcançaram valores de VPL adequados, porém inferiores à tecnologia bifacial, já as amorfas demonstraram um VPL negativo, sugerindo baixa atratividade financeira. Portanto, as placas bifaciais oferecem maior retorno financeiro ao longo do tempo.

Para a taxa interna de retorno (TIR), a tecnologia bifacial apresentou a maior TIR, reforçando sua viabilidade econômica superior. A policristalina apresentou uma TIR estável e favorável, mas inferior à bifacial. A amorfa apresentou a menor TIR (negativa), sugerindo baixa eficiência econômica. Portanto, as placas bifaciais oferecem a melhor TIR, indicando um investimento mais atraente.

Para o retorno do capital próprio (Ano), a tecnologia bifacial proporcionou o menor tempo de retorno do capital próprio, evidenciando maior eficiência financeira. A policristalina apresentou um tempo intermediário de retorno do capital próprio. A amorfa demonstrou um tempo significativamente mais longo, indicando baixa viabilidade. Portanto, as placas bifaciais se destacam no retorno do capital próprio.

Para redução anual líquida de emissões de GEE (tCO₂), a tecnologia bifacial proporcionou a maior redução de emissões de GEE, refletindo sua maior eficiência na geração de energia limpa. A policristalina apresentou boa redução de emissões, mas inferior à bifacial.

A amorfa demonstrou a menor redução de emissões de GEE, devido à baixa eficiência energética. Portanto, as placas bifaciais são mais eficazes na redução de emissões de GEE.

Portanto, as placas bifaciais representam a melhor tecnologia no comparativo geral, destacando-se em praticamente todos os parâmetros analisados, mesmo com um custo inicial mais elevado. As placas policristalinas apresentam uma alternativa viável, com desempenho intermediário em quase todos os parâmetros, sendo uma opção equilibrada entre custo e benefício. As placas amorfas mostraram baixo desempenho geral, com alta demanda por área, baixo retorno econômico e menor eficiência energética, não sendo recomendadas para aplicações que exigem otimização de espaço e retorno financeiro. Além disso, para os propósitos deste trabalho, houve a necessidade de se considerar um tempo de vida útil para esta tecnologia de 25 anos.

Enfim, para projetos que buscam máxima eficiência financeira, energética e ambiental, a tecnologia bifacial é a mais indicada, seguida pela tecnologia policristalina.

5.2 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Com base no estudo realizado sobre o projeto da usina fotovoltaica no IFB - *campus* Taguatinga, várias áreas podem ser exploradas em trabalhos futuros para expandir ainda mais o conhecimento e a aplicação prática de energias renováveis e sustentáveis. Aqui estão algumas sugestões:

Estudo de Otimização de Espaço: Realizar uma análise mais detalhada sobre a melhor utilização do espaço disponível para instalação das placas fotovoltaicas, considerando não apenas o espaço livre, mas também outras áreas potencialmente aproveitáveis, como estacionamentos cobertos ou fachadas solares;

Avaliação de Tecnologias Emergentes: Investigar novas tecnologias e inovações no campo da energia solar, como sistemas de armazenamento de energia, novos materiais para painéis solares e técnicas avançadas de integração arquitetônica, para otimizar ainda mais a eficiência e a rentabilidade do projeto;

Análise de Ciclo de Vida Ampliada: Ampliar a análise de ciclo de vida para incluir não apenas os aspectos financeiros e ambientais, mas também os impactos sociais, como a criação de empregos locais e o desenvolvimento de competências técnicas na comunidade;

Estudo de Viabilidade de Microgrids: Explorar a viabilidade de implementar microgrids ou sistemas de energia distribuída no *campus*, integrando a usina fotovoltaica com outras fontes de energia renovável e tecnologias de armazenamento para aumentar a resiliência do sistema elétrico local;

Análise de Riscos e Incertezas: Realizar uma análise mais abrangente dos riscos e incertezas associados ao projeto, considerando fatores como volatilidade dos preços de energia, mudanças na política energética e eventos climáticos extremos, para desenvolver estratégias de mitigação de riscos mais robustas;

Estudo de Impacto Econômico Regional: Investigar o impacto econômico do projeto não apenas no *campus*, mas também na região circundante, incluindo o potencial de criação de empregos, atração de investimentos e desenvolvimento econômico local;

Avaliação de Programas de Educação Ambiental: Desenvolver e avaliar programas de educação ambiental para alunos e comunidade local, destacando os benefícios da energia solar e incentivando a adoção de práticas sustentáveis em casa e no trabalho;

Monitoramento e Avaliação de Desempenho: Implementar um sistema de monitoramento contínuo para avaliar o desempenho da usina fotovoltaica ao longo do tempo, identificar possíveis melhorias e garantir a máxima eficiência operacional;

Estudo Comparativo com Outras Fontes de Energia: Realizar uma análise comparativa entre a usina fotovoltaica e outras fontes de energia, como energia eólica, hidrelétrica ou térmica, considerando não apenas os aspectos financeiros, mas também os impactos ambientais e sociais;

Projeto Piloto de Integração com Veículos Elétricos: Explorar a viabilidade de implementar um projeto piloto de integração entre a usina fotovoltaica e uma frota de veículos elétricos no *campus*, demonstrando os benefícios da energia solar para a mobilidade sustentável;

Outro importante trabalho a ser conduzido refere-se à avaliação bioclimática do IFB – *campus* Taguatinga a fim de torná-lo aderente às modernas construções que aproveitam a

iluminação ambiente e correntes de ar, entre outros fatores ambientais, que proporcionam menor consumo de energia.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABSOLAR. **Panorama da Energia Solar no Brasil – Relatório Anual**. Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica. Disponível em: <https://www.absolar.org.br/>. Acesso em: 10 set. 2024.

ALENCAR, M.P.; DE ALMEIDA NETO, J.L.; MARANHÃO, T.L.G.; TAVARES, C.V.C.C. **Políticas Públicas para micro e minigeração de energia solar no estado do Ceará: um estudo levando-se em consideração o contexto nacional e municípios no semiárido cearense**. *Id on Line Revista de Psicologia*, v. 12, n. 39, p. 192-223, 2018.

ALVES, J. J. A. Análise regional da energia eólica no Brasil. **Revista Brasileira de Gestão e Desenvolvimento Regional** vol.6 no1, 2010.

ANEEL. **Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012**. Agência Nacional de Energia Elétrica. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/>. Acesso em: 10 set. 2024.

ARDENTE, F., BECCALI, M., CELLURA, M., & MISTRETTA, M. (2013). **Energy and Environmental Benefits in Public Buildings as a Result of Photovoltaic Plants Adoption: A Financial Assessment in the Context of the Italian Legislative Framework**. *Renewable Energy*, 53, 163-173.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA SOLAR (ABSOLAR). **Energia Fotovoltaica no Brasil**. Infográfico ABSOLAR. 2024. Infográfico disponível em: https://www.absolar.org.br/wp-content/uploads/2024/08/Infografico_agosto-1086x1536.jpg. Acesso em: 28 ago. 2024.

BAKKER D. E. L. B; e YOUNG, C.E.F. “**Caracterização do emprego verde no Brasil**” Sociedade Brasileira de Economia Ecológica, 2012.

BASTIAN. A.V. **Morfologia urbana e a geração de energia solar fotovoltaica em Salvador**. 2023. Tese de Doutorado. UFBA. Programa de Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo. Salvador, Bahia. Bloomberg New Energy Finance, Frankfurt-Pnuma, 2015. Disponível em: Acesso em: 04 de abril de 2024.

BRASIL. Lei nº 2.874, de 19 de setembro de 1956. **Dispõe sobre a mudança da Capital Federal e dá outras providências**. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/1950-1969/12874.htm. Acessado em 30 de agosto de 2024.

BRASIL. Resolução Normativa ANEEL Nº 1.059, de 7 de Fevereiro de 2023. **Aprimora as regras para a conexão e o faturamento de centrais de microgeração e minigeração distribuída em sistemas de distribuição de energia elétrica, bem como as regras do Sistema de Compensação de Energia Elétrica; altera as Resoluções Normativas nº 920, de 23 de fevereiro de 2021, 956, de 7 de dezembro de 2021, 1.000, de 7 de dezembro de 2021, e dá outras providências**. Diário Oficial da União: seção 1, p. 65, v. 161, n. 30 e o retificado no Diário Oficial da União de 24 de maio de 2023.

CHANG C. C. **A multivariate causality test of carbon dioxide emissions, energy consumption and economic growth in China**, *Applied Energy*, 2007.

CHEN, W.; KIM, H.; YAMAGUCHI, H. **Renewable energy in eastern Asia: Renewable energy policy review and comparative SWOT analysis for promoting renewable energy in Japan, South Korea, and Taiwan**. *Energy Pollice*, vol. 74, p. 319-329, 2014.

CODEPLAN. **Sessenta anos de ocupação urbana da capital do Brasil: padrões, vetores e impactos na paisagem**. Texto para Discussão Nº 73. 2021. Disponível em: <https://www.codeplan.df.gov.br/wp-content/uploads/2020/07/TD-73-Sessenta-anos-de-ocupacao-urbana-da-capital-do-Brasil-padroes-vetores-e-impactos-na-paisagem-2021.pdf>. Acessado em 20 de agosto de 2024.

CORRÊA, H. L.; XAVIER, L. H. **Concepts, design and implementation of Reverse Logistics Systems for sustainable supply chains in Brazil**. *Journal of Operations and Supply Chain Management*, v. 6, n. 1, p. 1-25, 2013.

CRESESB, 2018 – **Centro de Referência para Energia Solar e Eólica**. Disponível em: <https://cresesb.cepel.br/index.php?section=sundata>. Acesso em: 26 set. 2024. Última modificação: 25.01.2018.

CRESESB, 2006. **Energia solar princípios e aplicações**. Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito. CRESESB. Consultado no site https://www.cresesb.cepel.br/download/tutorial/tutorial_solar_2006.pdf em 20/09/2023.

CRESESB, 2004. **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos**. Grupo de Trabalho de Energia Solar – GTES. CEPEL – CRESESB. Edição Especial. PRC – PRODEM. Rio de Janeiro – Agosto – 2004. Consultado no site https://cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Manual_de_Engenharia_FV_2004.pdf em 02/07/2024.

CRESESB- **Centro de Referência para Energia Solar e Eólica**. Disponível em: <https://cresesb.cepel.br/index.php#data>. Acessado em 02/09/2024.

DA LUZ, Gustavo Leopoldo; BLANCHET, Luiz Alberto. **O modelo regulatório do sistema de compensação de energia elétrica**. Revista do Direito Público, v. 18, n. 3, p. 203-218, 2023.

DA SILVA, Enielma Cunha; SABILLON, Carlos; BAQUERO, John Fredy Franco. **Carregamento Ótimo de VEs para Viabilizar a Participação de Estações de Carregamento no Mercado Local de Energia**. Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos-SBSE, v. 2, n. 1, 2022.

Da Silva, Pedro Henrique Borges; Shayani, Rafael Amaral. **"Estudo de viabilidade técnica de usina solar fotovoltaica flutuante para suprir consumo da Universidade de Brasília"**. Anais Congresso Brasileiro de Energia Solar-CBENS. 2020. emnuvens.com.br

David, P. A.; Sangy, P.E.R.; Brandão, S.Q.; Silva, S.R.; Souza, G. H. B. **XXVI Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica**. Efeitos da taxa de desconto do custo futuro na operação e na expansão do sistema brasileiro. 15 a 18 de Maio de 2022. Rio de Janeiro - RJ

De Paula, João Frederico Souza, et al. **"Análise comparativa de desempenho de um sistema fotovoltaico simulado com as ferramentas pvsyst e sam (system advisor model): pvsyst and system advisor model"**. Congresso Brasileiro de Energia Solar-CBENS. 2022. emnuvens.com.br

DERGIADÉ T., MARTINOPOULOS G, & TSOULFIDIS. **Energy consumption and economic growth: Parametric and non-parametric causality testing for the case of Greece**, 2012

DINÇER, F. **The analysis on photovoltaic electricity generation status, potential and policies of the leading countries**. Solar Energy, v. 15. n. 1, p. 713-720. 2011.

DOS SANTOS RODRIGUES, Tiago Filipe. **Compatibilização da Produção Fotovoltaica com o Carregamento de Veículos Elétricos**. 2022. Dissertação de Mestrado. Instituto Politécnico de Leiria (Portugal).

DUPONT, Sam. Paineis científicos **"The Blue Planet"**, em Viena, Áustria, organizado pela Agência Internacional de Energia Atômica (AIEA) – órgão da ONU que promove o uso pacífico da energia atômica, inclusive em laboratórios nucleares para o estudo da poluição nos oceanos. (Época, 2013)

DUSONCHET, L.; TELARETTI, E.; **Comparative economic analysis of support policies for solar PV in the most representative EU countries**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 42, n. 1, p. 986-998, 2015.

EBC. **Geração de energia no Brasil tem expansão** [https://agenciabrasil.ebc.com.br/economia/noticia/2024-07/geracao-de-energia-no-brasil-tem-expansao-recorde-de-187#:~:text=As%20quatro%20maiores%20fontes%20renov%C3%A1veis,mineral%20\(1%2C7%25\).recorde%20de%2018,7%25](https://agenciabrasil.ebc.com.br/economia/noticia/2024-07/geracao-de-energia-no-brasil-tem-expansao-recorde-de-187#:~:text=As%20quatro%20maiores%20fontes%20renov%C3%A1veis,mineral%20(1%2C7%25).recorde%20de%2018,7%25). Agência Brasil. Disponível em <>. Acesso em 22 set. 2024.

ELLIOTT, D. **PV/T Software Coherence and Applicability**. Thesis. University of Strathclyde. Dept of Endereços de Internet Energias renováveis e o clima, 2017. Site: <https://americadosol.org/energias-renovaveis-e-o-clima/>. Consultado em 01 de novembro de 2021. Energy Policy, 37 (2009), pp. 4021-4028

EPA. (2018). **The Benefits and Costs of the Clean Air Act from 1990 to 2020**. U.S. Environmental Protection Agency. Recuperado de [EPA](<https://www.epa.gov/clean-air-act-overview/benefits-and-costs-clean-air-act-1990-2020-report-documents-and-graphics>)

EPE. Plano Decenal de Expansão de Energia (PDE 2031). Empresa de Pesquisa Energética. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/>. Acesso em: 10 set. 2024.

ERKMAN, S. **Industrial ecology: an historical view**. Journal of Cleaner Production, v. 5, n. 1-2, p. 1-10, 1997.
European Commission. (2009). Directive 2009/28/EC of the European Parliament and of the Council of 23 April 2009 on the promotion of the use of energy from renewable sources. Official Journal of the European Union.

FARIAS, L. M; e SELLITO A. M. “**Uso da energia ao longo da história: evolução e perspectivas futuras**”, ReseachGate, 2011. Disponível em: 40 Acesso em: 04 de abril de 2024.

FERREIRA, João Pedro Dias. **Estudo da Viabilidade da Participação de Agregadores de Consumo no Mercado de Energia de Reserva de Regulação**. 2020.

FIELD, B.C; FIELD. M.K. **Introdução à Economia do Meio Ambiente**. 6ª edição: Amgh. 2014.

GIDDENS, A. **A política da mudança climática**. Rio de Janeiro: Zahar, 2010.

GOLDEMBERG J. e LUCAM O. – **Energia e meio ambiente no Brasil. Estudos Avançados**, 2007.

Goldman Sachs. (2019). The Low Carbon Economy: GS SUSTAIN equity investor’s guide to a low carbon world, 2018-2050. Goldman Sachs Reports.

GREEN, M. A. "**Solar Cells: Operating Principles, Technology, and System Applications**". Prentice-Hall, 1982.

GRI. (2020). **The GRI Standards: The global standards for sustainability reporting**. Global Reporting Initiative. Recuperado de [GRI](<https://www.globalreporting.org/standards>)

GWEC. **Global Wind Statistics**. 2011 Global Wind Energy Council, 2012. Disponível em: <http://www.gwec.net/fileadmin/images/News/Press/GWEC_-_Global_Wind_Statistics_2011.pdf>. Acesso em: 10 fev. 2011.

Harrison, K. (2010). **Environmental Regulation and Federalism: US and EU Perspectives**. Yale Law & Policy Review, 29(2), 111-178.

HCC ENERGIA SOLAR. **Conheça os tipos de painéis solares e suas principais diferenças**. Disponível em <<https://hccenergiasolar.com.br/conheca-os-tipos-de-paineis-solares-e-suas-principais-diferencas/>>. Acesso em 22 set. 2024.

He, M., Su, M., & Chong, W. T. (2017). **A Review of Financial Analyses and Energy Saving Potentials of Solar Photovoltaic Systems in Malaysia**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 74, 1113-1123. <https://pt.dsisolar.com/info/7-most-popular-solar-pv-system-design-and-simu-34904845.html> – Consultado em 28/03/2024 – Lista de programas comumente usados para simulação de sistema solar PV. <https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/emissoes> https://www.ren21.net/gsr-2017/chapters/chapter_03/chapter_03/. Consultado em 21/08/2024.

IBGE. **Panorama do Distrito Federal**. 2024. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/df/brasil/panorama>>. Acessado em 30 agosto de 2024.

IDEAL - Instituto para o Desenvolvimento de Energias Alternativas na América Latina. **O mercado brasileiro de energia fotovoltaica**. Florianópolis: IDEAL, p. 76, 2016.

IEA. (2021). **World Energy Employment Report**. International Energy Agency. Recuperado de [IEA](<https://www.iea.org/reports/world-energy-employment>)

IHS MARKIT. Whitepaper - 10 Cleantech Trends in 2023: **Technologies to Reduce Emissions and Confront Climate Change**. P. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2014). Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2021).

Climate Change 2021: **The Physical Science Basis**. Cambridge University Press.

International Energy Agency (IEA). (2020). **Renewables 2020: Analysis and forecast to 2025**. IEA Publications. INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **Photovoltaic Power Systems Programme. Task 1 Strategic PV Analysis and Outreach**. 2023. Disponível em: <https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2023/04/IEA_PVPS_Snapshot_2023.pdf>. Acessado em 20 de agosto de 2024.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **Photovoltaic Power Systems Programme. Task 1 Strategic PV Analysis and Outreach**. 2024. Disponível em: <https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2024/04/Snapshot-of-Global-PV-Markets_20241.pdf>. Acessado em 29 de agosto de 2024.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **Snapshot of Global PV Markets 2024 Task 1 Strategic PV Analysis and Outreach PVPS**. [s.l: s.n.]. Acessado em 29 de agosto de 2024. Disponível em: <https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2024/04/Snapshot-of-Global-PV-Markets_20241.pdf>.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, **Key World Statistics**. Paris: IEA, 2012.

International Energy Agency. (2020). **Global Energy Review: CO₂ Emissions in 2020**. Recuperado de [IEA](<https://www.iea.org/reports/global-energy-review-co2-emissions-in-2020>)

IPEA. ODS 7 - **Energia Acessível e Limpa** - Ipea - Objetivos do Desenvolvimento Sustentável. Acessado em 29 de agosto de 2024. Disponível em: <<https://www.ipea.gov.br/ods/ods7.html>>.

IRENA. (2019). **Renewable Power Generation Costs in 2018**. International Renewable Energy Agency. Recuperado de [IRENA](<https://www.irena.org/publications/2019/May/Renewable-power-generation-costs-in-2018>)

IRENA. (2020). **Renewable Power Generation Costs in 2019**. International Renewable Energy Agency. Recuperado de [IRENA](<https://www.irena.org/publications/2020/Jun/Renewable-Power-Generation-Costs-in-2019>)

ISENMANN, R. **Industrial ecology**: shedding more light on its perspective of understanding nature as model. Sustainable Development. v. 11, p. 143-158, 2003.

J.E. Payne. **The causal dynamics between US renewable energy consumption, output, emissions, and oil prices**. *Energy Sources Part B*, 7 (4) (2012), pp. 323-330

JACOBSON, M. Z., & Delucchi, M. A. (2011). **Providing all global energy with wind, water, and solar power, Part I**: Technologies, energy resources, quantities and areas of infrastructure, and materials. *Energy Policy*, 39(3), 1154-1169.

JESUS, J. M. M. "**Sistema de Energia Híbrido da ilha Graciosa**: Estudo da sua Expansão." 2023. [HTML] K. Menyah, Y. Wolde-Rufael. CO₂ emissions, nuclear energy, renewable energy and economic growth in the US. *Energy Policy*, 38 (2010), pp. 2911-2915.

KAZEM, Hussein A., et al. "**A systematic review of solar photovoltaic energy systems design modelling, algorithms, and software**." *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects* 44.3 (2022): 6709-6736. [HTML]

KREIBICH, N. (2017). **The Energy Transition in Germany: Opportunities and Challenges**. Springer.

LIRA, A T L; MELO, M L da S; RORIGUES, L M; SOUZA, T R M de. **Contribuição dos Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica para a Redução de CO₂ no Estado do Ceará**. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 34, n. 3, 389-397, 2019.

LOSEKANN, Luciano; TAVARES, Felipe Botelho. **Política Energética no Brics: Desafios da Transição Energética**. Rio de Janeiro: CEPAL, nov. 2019.

LUQUE, A.; HEGEDUS, S. "**Handbook of Photovoltaic Science and Engineering**". John Wiley & Sons, 2011. Mahmoud, Montaser, et al. "Modeling and simulation of solar photovoltaic energy systems." *Renewable Energy-Volume 1: Solar, Wind, and Hydropower*. Academic Press, 2023. 281-295. [HTML] March 2014.

MARINOSKI, L.D.; SALAMONI, I.T.; RUTHER, R. **Pré Dimensionamento de sistema solar fotovoltaico: estudo de caso do edifício sede do CREA-SC**. In: Anais 1º Conferência Latino-Americana de Construção Sustentável, E 10º Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, São Paulo: ENTAC, 2004.

Matos, M. H. H. and Felix, J. L. P. "**Métodos para coleta remota de dados em coberturas e modelagem de irradiação solar**." 2022. ufsc.br

McCormick, J. (2012). **Environmental Policy in the European Union**. Palgrave Macmillan.

MCTI (Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações) (2021) **Fator médio** - Inventários corporativos <https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/dados-e-ferramentas/fatores-de-emissao>

MEDEIROS, Manuel Aurora Melo. **Aproveitamento fotovoltaico com armazenamento em unidade fabril de laboração contínua: otimização da potência a instalar e da capacidade de armazenamento**. 2023. Tese de Doutorado.

NASCIMENTO, F. W. F. "**Desenvolvimento de analisador de eficiência de módulos fotovoltaicos comerciais: uma perspectiva analítica georreferenciada**." 2021. unilab.edu.br

NASCIMENTO, Jordan Vinicius Silva. **Análise de Viabilidade da Implantação de um Sistema Fotovoltaico no campus UERN Natal**. 2024. Tese de Doutorado.

NAYYAR, Z.A; ZAIGHAM, N.A; QADEER, A. **Assessment of present conventional and non-conventional energy scenario of Pakistan**. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 31, n. 1, p. 543-553, 2014

NIDUMOLU, R.; PRAHALAD, C. K.; RANGASWAMI, M. R. **Why Sustainability Is Now the Key Driver of Innovation**. *Harvard Business Review*, 87 (9), p. 56-64, 2009.

NP Cremasco, AC Cordeiro, RR Lautert, "**Estudo de diferentes tecnologias de células fotovoltaicas**," *Revista Científica Inovação e Tecnologia*, 2022. utfpr.edu.br

NUVOLARI, A. (2004). **Collective Invention during the British Industrial Revolution: The Case of the Cornish Pumping Engine**. *Cambridge Journal of Economics*, 28(3), 347-363.

OLIVEIRA, A. A. C. "**Estudo de viabilidade econômica para introdução de um sistema de energia fotovoltaica em uma serraria localizada em Felipe Guerra/RN**." 2024. ufersa.edu.br.

OLIVEIRA, João Victor Gonçalves. **O consumo de energia elétrica na Universidade Federal de Ouro Preto, campus Morro do Cruzeiro, e o impacto da geração fotovoltaica**. 2023.

One Tree Planted. (2025). **How much CO₂ does a tree absorb?** Consultado em 2 de janeiro de 2025, de <https://onetreepanted.org/blogs/stories/how-much-co2-does-tree-absorb>

PBMC -**Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas**, 2015. Base Científica Das Mudanças Climáticas, Volume 1 –Primeiro Relatório de Avaliação Nacional. Disponível em: <http://www.pbmc.coppe.ufrj.br/pt/>. 108p

PDF. **Plano Diretor de Infraestrutura Física**. Brasília, 2015. Encontrado em: < [https://www.ifb.edu.br/attachments/article/4577/Plano%20Diretor%20de%20Infraestrutura%20R.01%20\(6\).pdf](https://www.ifb.edu.br/attachments/article/4577/Plano%20Diretor%20de%20Infraestrutura%20R.01%20(6).pdf) >. Data do acesso em 03 de junho de 2024.

PEREIRA, J. W. C.; CATALDI, M.; MIRANDA, N.; "**Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica no Brasil**", p. 1172-1181. In: São Paulo: Blucher, 2017.

PISCIOTTA, Alex. **Análise da Viabilidade Técnica e Econômica de um Sistema de Geração Fotovoltaica Desconectado da Rede de Distribuição Elétrica em Área Urbana no Vale do Paraíba**. Revista H-TEC Humanidades e Tecnologia, v. 8, n. 01, p. 32-46, 2024.

R.A. Salim, S. Rafiq. **Why do some emerging economies proactively accelerate the adoption of renewable energy?** Energy Econ., 34 (2012), pp. 1051-1057

RABE, B. G. (2010). **Statehouse and Greenhouse: The Emerging Politics of American Climate Change Policy**. Brookings Institution Press.

REIS, Alex. **Análise Energética e Proposta de Implementação de Geração Distribuída Fotovoltaica na Faculdade UnB Gama**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Energia) – Faculdade UnB Gama, Universidade de Brasília, Brasília, 2021.

REN21 (2017). **Renewables 2021 Global Status Report**. Disponível em https://www.ren21.net/gsr-2017/chapters/chapter_03/chapter_03/

REN21. (2021). **Renewables 2021 Global Status Report**. REN21 Secretariat.

REN21. Renewables 2011 **Global Status Report Renewable Energy Policy Network for the 21st Century**, 2011. Disponível em: http://www.ren21.net/Portals/97/documents/GSR/REN21_GSR2011.pdf

RENDEIRO, G. **Martifer solar: case study of Cabo Verde**. In: Portugal exportador 2011. Lisboa: IPDAL, 2013. Renewable and Sustainable Energy Reviews. (2019). Environmental impacts of solar energy systems: A review. Recuperado de [ScienceDirect](<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S136403211930460X>)

RODRIGUES, M A O et al. **Análise de impactos técnico e social da utilização da energia solar fotovoltaica no distrito federal**. VII Congresso Brasileiro de Energia Solar – Gramado, 17 a 20 de abril de 2018.

RUPPENTHAL, E. T. P. "**Desenvolvimento de algoritmo para detecção de arco elétrico série no lado cc em sistemas de geração fotovoltaica utilizando máquina de vetores de suporte**." 2023. ufsm.br

RUTOVITZ, J.; ATHERTON, A. **Energy Sector Jobs to 2030: A Global Analysis**. Institute for Sustainable Futures, 2009. Disponível em: <http://www.greenpeace.org/brasil/PageFiles/3751/energy-sector-jobs-to-2030.pdf>

SACHS, J. D., & Warner, A. M. (1995). **Natural resource abundance and economic growth**. NBER Working Paper No. 5398.

SANTOS, B. C. "**Mecanismos de incentivo a geração distribuída de energia fotovoltaica aplicadas ao Estado do Rio de Janeiro**." 2021. uerj.br.

SANTOS, Camille Marçal dos et al. **Projeto de desidratador de frutas com sistema de controle de temperatura e alimentação fotovoltaica**. 2022.

SANTOS, Diego Resende et al. **Desafios e soluções para o armazenamento de energia renovável**. Brazilian Journal of Production Engineering, v. 9, n. 4, p. 76-88, 2023.

SANTOS, E.P.; CONTI, T. **Mercado profissional para a área de energia e eficiência energética no Brasil**. Revista Internacional de Ciências, v. 7, n. 2, p. 142-178, 2018.

SANTOS, L. A., Silva, A. C. F., & Menegasse, S. B. (2020). **Viabilidade Econômica e Financeira da Energia Solar Fotovoltaica em uma Escola de Educação Básica em Maringá-PR**. Revista de Iniciação Científica da Universidade Cesumar - RVICTUS, 6(4), 231-239.

SANTOS JUNIOR, Jovanio Silva dos. **Agregador de dados de medição**: aspectos conceituais e tecnológicos caracterizando sua relevância para o processo de abertura do mercado de energia elétrica brasileiro. 2024. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

SEBRAE. Potencial solar do DF: Varejo. 2024. DISPONIVEL EM: <<https://sebrae.com.br/Sebrae/Portal%20Sebrae/UFs/DF/Sebrae%20de%20A%20a%20Z/SEB%20EnSolar%20Varejo.pdf>>. Acessado em: 30 de agosto de 2024.

SENA, V. O. "Análise técnico-econômica de um sistema de geração de energia solar distribuída compartilhada para consumidores residenciais de baixa renda." 2023. ufop.br

SERRANO, C. A., Silva, C. F., & Mastroberti, T. (2018). **Estudo de Viabilidade Econômica de um Sistema Fotovoltaico em uma Escola Pública Municipal**. Revista Ambiente & Sociedade, 21(3), 153-172.

SHAFIEI S. e SALIM R. A. **Energy Policy Non-renewable and renewable energy consumption and CO₂ emissions in OECD countries**: A comparative analysis, by Ted Trainer, 2013.

SHAH, A. V. et al. "**Photovoltaic Technology**: The Case for Thin-Film Solar Cells". Science, 2004.

SHIKI, Laís Ayumi. **Viabilidade da energia solar fotovoltaica como fonte alternativa de eletricidade**: uma análise baseada na projeção de cenários e na percepção do consumidor final. 2022.

SIMAS, M.I; Pacca, S II. **Energia eólica, geração de empregos e desenvolvimento sustentável**. 2012.

SIMON, Pavel, and Michaela Hola. "**Technical potential of the built-up area of the Slovak Republic to produce electricity from solar radiation**." 2021 25th International Conference Electronics. IEEE, 2021. researchgate.net

SIQUEIRA, J. A. C., & Dourado, V. C. (2019). **Análise Econômica da Implementação de Energia Solar Fotovoltaica em Escolas Municipais**: Estudo de Caso em Maringá, PR. Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental, 23(23), 1602-1615.

SMIL, V. (2017). **Energy and Civilization**: A History. MIT Press.

SMITH, J., Thompson, R., & Wang, L. (2023). **Energy Transition and Environmental Impacts**: The Shift Towards Renewable Sources. Oxford University Press.

SULYOK, C. "**Innovation and economics of distributed photovoltaic electricity generation in Brazil/Inovação e economia da geração distribuída de eletricidade fotovoltaica no**" 2020. ufba.br

SZE, S. M.; NG, K. K. "**Physics of Semiconductor Devices**". John Wiley & Sons, 2007.

TESTER, J.W.; DRAKE, E.M.; DRISCOLL, M.J.; GOLAY, M. W.; PETERS, W.A. **Sustainable energy**: choosing among options. Cambridge, MA: MIT Press, 2005, 870 pp.

UCWDK SOLAR. 20W Amorphous Silicon Solar Panel. Disponível em: <https://pt.ucwksolar.com/products/20w-amorphous-silicon-solar-panel>. Acesso em: 18 dez. 2024.

UN. (2015). Transforming our world: the 2030 **Agenda for Sustainable Development**. United Nations. Recuperado de [UN](<https://sdgs.un.org/2030agenda>)

UNEP/ILO/IOE/ITUC. Green Jobs: **Towards Decent Work in a Sustainable, Low-carbon World**, 2008. Disponível em: http://www.unep.org/labour_environment/PDFs/Greenjobs/UNEP-Green-Jobs-Report.pdf
United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC). (1998). Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change. UNFCCC.

United Nations. (2015). **Transforming our world**: the 2030 Agenda for Sustainable Development. Recuperado de [UN](<https://sdgs.un.org/2030agenda>)

UNITED NATIONS. **Department of Economic and Social Affairs. Population Division World Urbanization Prospects: The 2018 Revision.** ST/ESA/SER.A/420, Nova York, 2019. Disponível em: <https://population.un.org/wup/Publications/Files/WUP2018-Report.pdf>. Acesso em: 30 de agosto de 2024.

UNITED NATIONS. **Report of the World commission on environment and Development: Our Common Future,** 1987. Disponível em: <http://www.un-documents.net/wced-ocf.htm>

VAUGHAN, A. “**UK Green Energy Investment Halves after Policy Changes**”. The Guardian, seç. Business, 16 de janeiro de 2018. Disponível em: Acesso em: 04 de abril de 2024.

VITOUSEK, P.M.; MOONEY, H.A.; LUBCHENCO, J.; MELILLO, J.M. **Human domination of earth's ecosystems.** Science, v. 277, n. 5325, p. 494-499, 1997.

W. Xi, M. Boyd, M. Ruth, and P. Kurup, "Electrolyzers in the System Advisor Model (SAM): A Techno-Economic Potential Study," 2023. [osti.gov](https://www.osti.gov)

WIKIPÉDIA. **Energia termelétrica no Brasil.** Disponível em https://pt.wikipedia.org/wiki/Energia_termel%C3%A9trica_no_Brasil. Acesso em: 10/06/2024.

WORLD BANK. (2018). **State and Trends of Carbon Pricing 2018.** World Bank Publications.

WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO). (2016). **Ambient air pollution: A global assessment of exposure and burden of disease.** WHO.

WORLD HEALTH ORGANIZATION. (2018). **Ambient Air Pollution: Health Impacts.** Recuperado de [WHO](<https://www.who.int/airpollution/ambient/health-impacts/en/>)

WURFEL, P. "**Physics of Solar Cells: From Basic Principles to Advanced Concepts**". Wiley-VCH, 2005.

Yergin, D. (1991). **The Prize: The Epic Quest for Oil, Money & Power.** Simon & Schuster.

ZERVOS A. REN21. **Renewables: Global Status Report, Global Overview 2017.**

ZERVOS, A. e LINS C. REN21. **Renewables: Global Status Report, Global Overview 2016.**

ZERVOS, A. REN21. **Renewables: Global Status Report, Global Overview, 2018.**

Nome do arquivo: DORNELAS Dissertação Reinaldo 04 01 2025 Sab
Diretório: C:\Users\Pessoal\Documents
Modelo: C:\Users\Pessoal\AppData\Roaming\Microsoft\Templates\Normal.dotm
Título:
Assunto:
Autor: Pessoal
Palavras-chave:
Comentários:
Data de criação: 04/01/2025 18:19:00
Número de alterações: 2
Última gravação: 04/01/2025 18:19:00
Salvo por: Pessoal
Tempo total de edição: 0 Minutos
Última impressão: 04/01/2025 18:33:00
Como a última impressão
Número de páginas: 129
Número de palavras: 38.674 (aprox.)
Número de caracteres: 208.841 (aprox.)