

CENTRO UNIVERSITÁRIO UNIFAAT

EDSON CHAVES ALBINO FILHO

FELIPE GABRIEL DE OLIVEIRA

RAFAEL TORRES DA SILVA

REINALDO ELOY DA SILVA

VINÍCIUS MOTA ALVES

GERAÇÃO DE ENERGIA FOTOVOLTAICA:

ESTUDO DE CASO DA INSTALAÇÃO DO CENTRO UNIVERSITÁRIO UNIFAAT

ATIBAIA

2023

EDSON CHAVES ALBINO FILHO
FELIPE GABRIEL DE OLIVEIRA
RAFAEL TORRES DA SILVA
REINALDO ELOY DA SILVA
VINÍCIUS MOTA ALVES

GERAÇÃO DE ENERGIA FOTOVOLTAICA:
ESTUDO DE CASO DA INSTALAÇÃO DO CENTRO UNIVERSITÁRIO UNIFAAT

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao centro universitário UNIFAAT como parte das exigências do Curso de Engenharia Elétrica em formas alternativas de energia fotovoltaica.

Orientador: Kleber Hashimoto

ATIBAIA

2023

G 311

Geração de energia fotovoltaica: estudo de caso da instalação do Centro Universitário UNIFAAT / Edson Chaves Albino Filho... [et.al.] -- 2023.
106 f.; 30 cm.

Orientação: Prof. Dr. Kleber Hashimoto

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) – Centro Universitário UNIFAAT, como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica do Centro Universitário UNIFAAT, Atibaia, 2023.

1. Geração distribuída 2. Energia fotovoltaica 3. Transição Energética
I. Albino Filho, Edson Chaves II. Oliveira, Felipe Gabriel de III. Silva, Rafael Torres da IV. Silva, Reinaldo Eloy da V. Alves, Vinicius Mota VI. Hashimoto, Kleber VII. Título

CDD 621.31244

EDSON CHAVES ALBINO FILHO
FELIPE GABRIEL DE OLIVEIRA
RAFAEL TORRES DA SILVA
REINALDO ELOY DA SILVA
VINÍCIUS MOTA ALVES

GERAÇÃO DE ENERGIA FOTOVOLTAICA:
ESTUDO DE CASO DA INSTALAÇÃO DO CENTRO UNIVERSITÁRIO UNIFAAT

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao centro universitário UNIFAAT como parte das exigências do Curso de Engenharia Elétrica em formas alternativas de energia fotovoltaica.

Aprovado em 11 de dezembro de 2023:

Kleber Hashimoto, Prof. Dr. (UU)
(Orientador)

Matheus Cascardo, Prof. Dr. (UU)

Hércules Brasil Vernalha, Prof. Dr. (UU)

ATIBAIA

2023

“A tarefa não é tanto ver aquilo que ninguém viu, mas pensar o que ninguém ainda pensou sobre aquilo que todo mundo vê”

(Arthur Schopenhauer)

RESUMO

Este trabalho apresenta um resumo da tecnologia de geração fotovoltaica e de suas aplicações, assim como o modelo de exploração da tecnologia no Brasil, no contexto do planejamento da inserção das fontes renováveis na matriz energética, atendendo aos desafios do desenvolvimento sustentável.

A evidenciação, por parte do prossumidor, foi realizada por meio da análise do projeto de implementação de um sistema fotovoltaico conectado às instalações do principal Campus do Centro Universitário UNIFAAT em Atibaia – SP. A produção de energia esperada foi comparada com os registros de medição obtidos em campo. As diferenças foram comentadas e uma avaliação da atratividade econômica foi desenvolvida.

O trabalho concluiu que a tecnologia de geração fotovoltaica está em evolução, que afetará a atratividade e inserção dessa forma de geração. Adicionalmente, estudou-se os contornos regulatórios e técnicos de uma instalação, evidenciando um grau de complexidade elevado, o que requer cuidado e prudência na avaliação de um novo investimento.

Palavras Chaves: Geração Distribuída, Energia Fotovoltaica, Transição Energética.

ABSTRACT

This work presents a summary of photovoltaic generation technology and its applications, as well as the technology exploration model in Brazil, in the context of planning the insertion of renewable sources in the energy matrix, meeting the challenges of sustainable development.

The disclosure, by the prosumer, was carried out through the analysis of the project to implement a photovoltaic system connected to the facilities of the main Campus of the UNIFAAT University Center in Atibaia – SP. The expected energy production was compared with measurement records obtained in the field. The differences were commented on and an assessment of economic attractiveness was developed.

The work concluded that photovoltaic generation technology is evolving, which will affect the attractiveness and insertion of this form of generation. Additionally, the regulatory and technical contours of an installation were studied, highlighting a high degree of complexity, which requires care and prudence when evaluating a new investment.

Keywords: Distributed Generation, Photovoltaic Energy, Energy Transition.

LISTA DE SIGLAS

ABNT Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANEEL Agência Nacional de Energia Elétrica
CA Corrente Alternada
CC Corrente Contínua
CRESESB Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio Brito
DNI Irradiação Normal Direta
EPE Empresa de Pesquisa Energética
EPIA European Photovoltaic Industry Association
ESF Energia Solar Fotovoltaica
FV Fotovoltaico
GHI Irradiação Global Horizontal
GSF Geração Solar Fotovoltaica
IEEE Institute of Electrical and Electronics Engineers
INPE Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
MME Ministério de Minas e Energia
MPPT Maximum Power Point Tracking
NASA National Aeronautics and Space Administration
NREL National Renewable Energy Laboratory
P&D Pesquisa e Desenvolvimento
PCH Pequena Central Hidrelétrica
PRODIST Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema
PROINFA Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica
SIN Sistema Interligado Nacional
STC Standard Test Conditions
SWERA Solar and Wind Energy Resource Assessment
WBGU German Advisory Council on Global Change
IEA International Energy Agency

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Geração de eletricidade no Brasil em 2022.....	55
Tabela 2 - Modalidades de Produção de Energia Fotovoltaica.	72
Tabela 3 - Especificação MMGD.....	77
Tabela 4 - Especificação de proteções MMGD.....	78
Tabela 5 - Geração de energia fotovoltaica na UNIFAAT.....	93

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Orçamento energético da terra.....	17
Figura 2 - Histograma da irradiância na Terra.	19
Figura 3 - Os primórdios da conversão fotovoltaica.	20
Figura 4 - Células a silício em satélites.	20
Figura 5 - Camadas do Tipo N e Tipo P.....	23
Figura 6 - Módulo solar monocristalino.....	24
Figura 7 - Módulo solar policristalino.....	26
Figura 8 - Silício Amorfo Panasonic.....	28
Figura 9 - Painél solar de filme fino.....	29
Figura 10 - Módulo de células solares orgânicas com seis células solares interligadas desenvolvida.....	31
Figura 11 - Painéis Solares de Concentração (CSP).....	33
Figura 12 - Funcionamento de placas bifaciais.....	35
Figura 13 - Painel solar transparente.....	37
Figura 14 - Célula de perovskita-silício de tamanho comercial.....	39
Figura 15 - Desenho esquemático de um sistema concentrador fotovoltaico e térmico.....	41
Figura 16 - Structure of the PVT collector.....	43
Figura 17 - Painéis solares térmicos fotovoltaicos (PV/T).....	45
Figura 18 - Objetivos do Desenvolvimento Sustentável da ONU – Agenda 2030.....	49
Figura 19 - Dependência primária com energia limpa.....	50
Figura 20 - Evolução da demanda de energia elétrica mundial.....	51
Figura 21 - Evolução da parcela de geração eólica e solar no mundo.....	53
Figura 22 - O crescimento das energias renováveis reduz a geração de combustíveis fósseis de 2023 a 2025.....	53
Figura 23 - Parcela de energia renovável no Brasil e no mundo.....	54
Figura 24 - Matriz Elétrica brasileira.....	55
Figura 25 - Micro e Minigeração distribuída 2022.....	56
Figura 26 - Crescimento anual geração fotovoltaica.....	56
Figura 27 - Evolução da geração fotovoltaica no Brasil.....	57
Figura 28 - Evolução da geração fotovoltaica no Brasil.....	57
Figura 29 - Atlas solar.....	58
Figura 30 - Compensação de Energia.....	73

Figura 31 - Autoconsumo Local.....	75
Figura 32 - Autoconsumo Remoto.	75
Figura 33 - Consórcio de Energia Elétrica.	76
Figura 34 - Curva de Pato.....	80
Figura 35 - Imagem da Localidade da Instalação.....	83
Figura 36 - Cabine Primária Centro Universitário Unifaat.	84
Figura 37 - Fatura de energia do Centro Unifaat.....	84
Figura 38 - Instalação das placas fotovoltaicas.	88
Figura 39 - Inversores da instalação do prédio JK.	89
Figura 40 - Painel de ligação dos inversores.	90
Figura 41 - Estrutura de instalação dos inversores.....	90
Figura 42 - Infraestrutura subterrânea.	91
Figura 43 - Potencial solar de Atibaia.	92
Figura 44 - Geração de energia estimada na UNIFAAT (2023).	94
Figura 45 - Geração de energia diária na UNIFAAT (2023).	95
Figura 46 - Curva de geração diária em outubro/2023.....	95

Sumário

RESUMO.....	4
LISTA DE SIGLAS.....	6
LISTA DE TABELAS.....	7
LISTA DE FIGURAS.....	8
<i>Capítulo 1: Introdução</i>	14
1.1 Contexto.....	14
1.2 Motivação e Objetivo.....	14
1.3 Estrutura do Trabalho	15
<i>Capítulo 2: Tecnologia de Conversão Fotovoltaica</i>	16
2.1 Radiação Luminosa.....	16
2.2 Tecnologias de Conversão Fotovoltaica.....	19
2.2.1 História da Energia Fotovoltaica	19
2.2.1.1 Expansão em Aplicações Terrestres (1970)	20
2.2.1.2 Incentivos Governamentais (1980 e 1990)	21
2.2.1.3 Avanços Tecnológicos (2000 em diante).....	21
2.2.2 Células Solares de Silício.....	22
2.2.3 Tipos de Painéis Solares	23
2.2.3.1 Painéis Solares de Silício Monocristalino	23
2.2.3.2 Vantagens de Painéis Solares de Silício Monocristalino	25
2.2.3.3 Desvantagens de Painéis Solares de Silício Monocristalino.....	25
2.2.4 Painéis Solares de Silício Policristalino.....	26
2.2.4.1 Vantagens de Painéis Solares de Silício Policristalino	26
2.2.5 Painéis Solares de Silício Amorfo	28
2.2.5.1 Vantagens de Painéis Solares de Silício Amorfo	28
2.2.5.2 Desvantagens de Painéis Solares de Silício Amorfo	29
2.2.6 Painéis Solares de Filme Fino	29

2.2.7	Painéis Solares Orgânicos.....	31
2.2.7.1	Vantagens de Painéis Solares Orgânicos.....	32
2.2.7.2	Desvantagens de Painéis Solares Orgânicos	33
2.2.8	Painéis Solares de Concentração (CSP)	33
2.2.8.1	Vantagens de Painéis Solares de Concentração (CSP)	34
2.2.8.2	Desvantagens de Painéis Solares de Concentração (CSP).....	34
2.2.9	Painéis Solares Bifaciais.....	35
2.2.9.1	Vantagens de Painéis Solares Bifaciais.....	36
2.2.9.2	Desvantagens de Painéis Solares Bifaciais	36
2.2.10	Painéis Solares Transparentes.....	37
2.2.10.1	Vantagens de Painéis de Solares Transparentes.....	38
2.2.10.2	Desvantagens de Painéis de Solares Transparentes	38
2.2.11	Painéis Solares de Perovskita	39
2.2.11.1	Vantagens de Painéis Solares de Perovskita	40
2.2.11.2	Desvantagens de Painéis Solares de Perovskita.....	40
2.2.12	Painéis Solares de Concentração Fotovoltaica (CPV)	41
2.2.12.1	Vantagens de Painéis Solares de Concentração Fotovoltaica (CPV).....	42
2.2.12.2	Desvantagens de Painéis Solares de Concentração Fotovoltaica (CPV)	42
2.2.13	Painéis Fotovoltaicos com Sistema de Aquecimento Solar (PVT)	43
2.2.13.1	Vantagens de Painéis Fotovoltaicos com Sistema de Aquecimento Solar (PVT)	44
2.2.13.2	Desvantagens de Painéis Fotovoltaicos com Sistema de Aquecimento Solar (PVT).....	44
2.2.14	Painéis Solares Térmicos Fotovoltaicos (PV/T)	45
2.2.14.1	Vantagens de Painéis Solares Térmicos Fotovoltaicos (PV/T)	45
2.2.14.2	Desvantagens de Painéis Solares Térmicos Fotovoltaicos (PV/T)	46
2.2.15	Evolução das Tecnologias.....	47
Capítulo 3: Contribuição da Energia Fotovoltaica na Transição Energética		48
3.1.	Transição Energética	49
3.2	Evolução da Matriz Energética	51

3.3	Potencial de Geração Fotovoltaica.....	58
3.4	Política Pública e Regulamentação	59
3.5	Aspectos Positivos e Negativos	61
3.5.1	Aspectos Positivos	61
3.5.2	Aspectos Negativos	65
Capítulo 4: Modelo de Geração Distribuída.....		69
4.1	Modalidades de Geração Fotovoltaica.....	69
4.1.1	Produtor Independente de Energia	69
4.1.2	Gerador Distribuído.....	70
4.1.3	Micro e Minigerador Distribuído.....	71
4.2	Atributos da Micro e Minigeração Distribuída.....	72
4.2.1	Fontes de Energia.....	72
4.2.2	Sistema de Compensação de Energia	73
4.2.3	Grid-tied e Off-grid.....	74
4.2.4	Modalidades de Micro e Minigeração Distribuída.....	74
4.2.5	Net Metering.....	76
4.2.6	Conexão.....	77
4.3	Desafios para a Operação	78
4.3.1	Inversão do Fluxo	78
4.3.2	“Curva do Pato”	79
4.3.3	Regulação do Nível de Tensão.....	80
4.3.4	Microrredes.....	81
4.3.5	Recursos Energéticos Distribuídos	81
Capítulo 5: Estudo de Caso		82
5.1	Contexto.....	82
5.2	Caracterização da Unidade Consumidora	82
5.3	Principais Parâmetros de Dimensionamento Elétrico.....	85
5.4	Sistema de Geração Fotovoltaica Implantado	87

5.5 Benefício Aferido.....	91
5.6 Atratividade Econômica	96
Capítulo 6: Comentários Finais	98
Referências Bibliográficas	99
.....	99

Capítulo 1: Introdução

1.1 Contexto

Como será demonstrado ao longo deste trabalho, a energia fotovoltaica tem desempenhado um papel significativo na transformação do mercado de energia em várias partes do mundo, com maior intensidade nos países de maior poder aquisitivo.

Na esteira desse processo, é comum nos depararmos, na literatura especializada, termos como crescimento exponencial, transição energética, crescimento sustentável, geração distribuída, prossumidor ou empoderamento do consumidor, energia limpa ou renovável, subsídios, recursos energéticos distribuídos, despachabilidade das fontes, intermitência da geração, aumento (ou diminuição?) das perdas elétricas e das tarifas de energia elétrica.

Como se pode inferir, ainda sem explorar os assuntos acima em profundidade, a abrangência da geração fotovoltaica vai muito além da técnica de conversão de energia e dos produtos disponíveis hoje para o mercado consumidor. Os vetores sociais, econômicos e ambientais, indicados no material pesquisado, são abrangentes, profundos e necessários para compreensão do movimento do mercado fotovoltaico.

1.2 Motivação e Objetivo

A evolução exponencial da energia fotovoltaica nos últimos dez anos suscitou o desejo de se conhecer mais profundamente os principais aspectos que levaram a esse comportamento. A modalidade de geração de energia elétrica alcançou um nível de disseminação tão elevado que já se encontra disponível para aquisição diretamente pelos consumidores de pequeno porte. A geração de energia elétrica não é mais um tema do governo ou das grandes empresas especializadas, mas acessível a todas as pessoas.

Pelos motivos apresentados anteriormente, aliado à crescente necessidade de se disseminar o conhecimento tecnológico à sociedade e de se explorar essa fascinante forma de conversão de energia – que foi objeto de duas aulas do último ano do curso de engenharia elétrica na UNIFAAT – os autores deste trabalho desenvolveram este registro acadêmico, já contando com

uma recente instalação de geração fotovoltaica no campus da universidade, que permitiu observar, de perto, os contornos práticos da sua implementação.

Cabe registrar a dificuldade em se encontrar bibliografia especializada que pudesse, ao mesmo tempo, ser abrangente e profunda, motivo pelo qual se espera que este trabalho possa contribuir com essa lacuna da literatura técnica pública.

1.3 Estrutura do Trabalho

Objetivando alcançar o objetivo proposto, o planejamento e registro deste trabalho culminou na seguinte estrutura organizacional, resultado do esforço para facilitar a compreensão do objeto de estudo:

- **Capítulo 1:** texto introdutório que apresenta o contexto do tema pesquisado, justificando a sua escolha e caracterizando a abrangência do trabalho proposto e o seu objetivo;
- **Capítulo 2:** descrição do processo físico de conversão da energia fotovoltaica, tecnologias comerciais atuais, evolução da eficiência e dos preços, novas tecnologias em desenvolvimento;
- **Capítulo 3:** resumo do contexto do mercado global e brasileiro; iniciativas voltadas à sustentabilidade; evolução da matriz energética; planejamento e políticas públicas; aspectos positivos e negativos;
- **Capítulo 4:** regulamentação brasileira; modelos de negócios; geração distribuída; dilema da alocação dos custos; e desafios para a operação do sistema;
- **Capítulo 5:** descrição do projeto implementado no campus da UNIFAAT; avaliação da energia produzida com relação à esperada; avaliação de atratividade do investimento;
- **Capítulo 6:** contém um resumo do trabalho realizado, além dos comentários advindos da aplicação prática; sugestões de aspectos que merecem aprofundamento em trabalhos futuros.

Capítulo 2: Tecnologia de Conversão Fotovoltaica

Este capítulo descreve, resumidamente, o efeito físico que possibilita a conversão da energia luminosa para energia elétrica, denominada conversão fotovoltaica, a descrição das tecnologias atualmente disponíveis e a evolução tecnológica.

Inicialmente, será caracterizado fisicamente o “insumo” do processo, qual seja, a radiação luminosa proveniente do sol.

Em seguida, foi resgatado os primeiros registros da descoberta do efeito fotovoltaico, passando para uma breve descrição do processo físico de conversão da energia luminosa para energia elétrica, com indicação das tecnologias disponíveis e suas características positivas e negativas.

No momento seguinte, são apresentadas as tecnologias em desenvolvimento que ainda não contam com aplicação comercial em larga escala.

Finalmente, este capítulo apresenta a evolução da eficiência dos painéis solares para cada tecnologia e dos custos unitários.

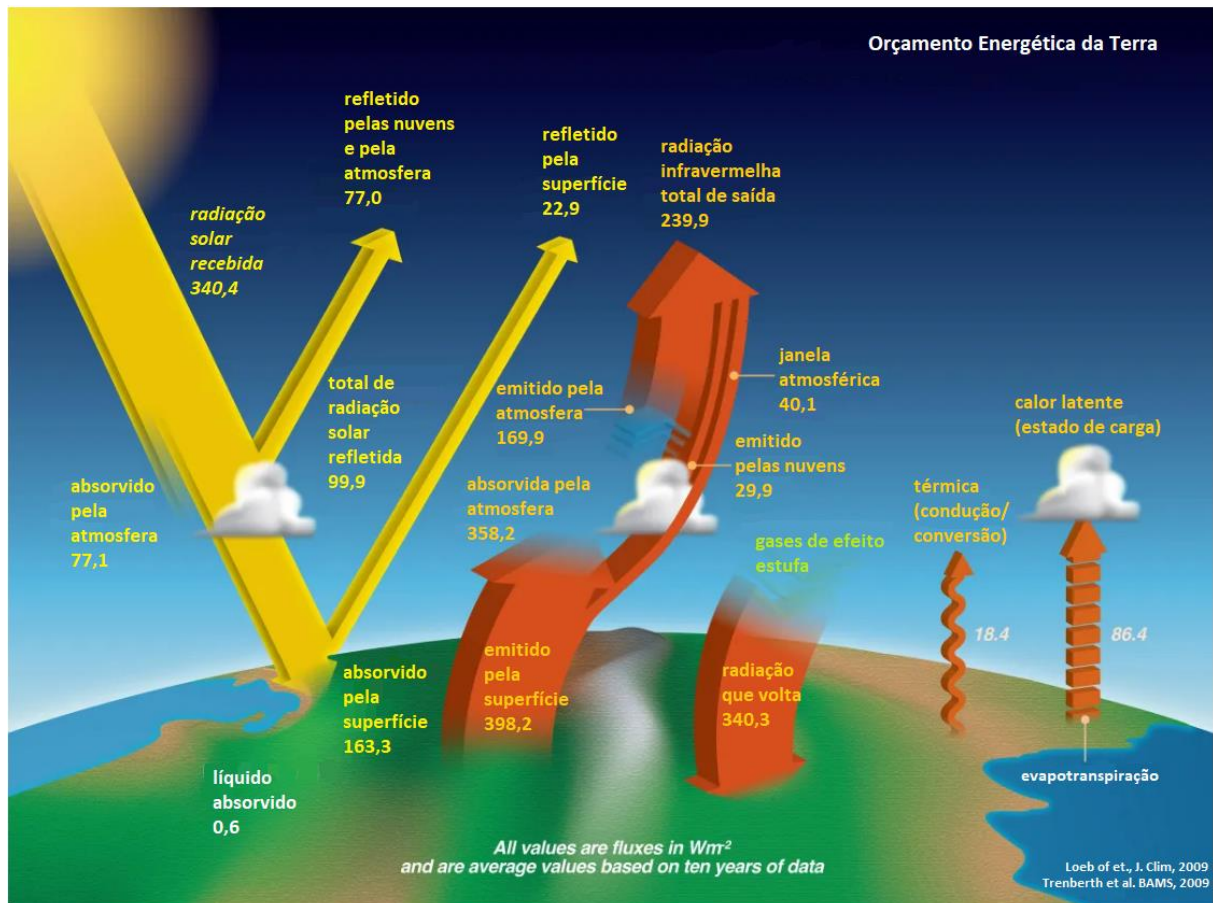
2.1 Radiação Luminosa

A longo prazo, pode-se afirmar que grande parte da energia do planeta terra advém da luz do Sol. A energia do reino vegetal e animal se origina, da luz solar. Os hidrocarbonetos (carvão mineral, gás natural e petróleo) também são fontes largamente utilizadas na economia moderna que se formaram no passado a partir da energia luminosa do sol. A energia dos ventos e da água também dependem fundamentalmente da luz do Sol. Algumas exceções, porém, podem ser citadas, tais como a energia geotérmica, que ainda é pouco utilizada.

Neste contexto, compreende-se salutar se resgatar o que se denomina “orçamento energético da Terra”, que é o balanço da energia radiante que a Terra recebe do Sol e a parcela que é devolvida de volta para o espaço, dentre outras parcelas que, ao fim, levam à parcela que chega à superfície da Terra. O orçamento energético é um balanço fundamental para o equilíbrio da vida terrestre, uma vez que dela depende a estabilidade da temperatura no planeta.

Cerca de 30% da energia solar que chega à Terra é refletida de volta para o espaço por várias influências, como nuvens, atmosfera, aerossóis e superfícies terrestres, como neve e gelo. A Terra também emite energia térmica radiante de volta para o espaço, principalmente na forma de radiação infravermelha, e essa emissão depende da temperatura da superfície.

Figura 1 - Orçamento energético da terra.



Fonte: NASA (valores médios de 10 anos em Wm²).

É importante estudar o orçamento energético da Terra porque dele depende o equilíbrio térmico do planeta. Fenômenos naturais, como vulcões, mas também atividades humanas – tais como a emissão de gases de efeito estufa – podem afetar esse equilíbrio.

O projeto CERES (Nuvens e o Sistema de Energia Radiante da Terra)¹ desempenha um papel crucial na medição da energia solar refletida de volta para o espaço e na energia térmica emitida pela Terra. Os dados coletados pelo CERES são essenciais para entender como nuvens e aerossóis afetam o orçamento energético, melhorar previsões climáticas e fornecer informações

¹ (CERES) é um instrumento em órbita da Terra desde 1997, feito pela NASA. O CERES é parte do Sistema de Observação da Terra (EOS) criado com o objetivo de medir tanto a reflexão solar quanto a emissão de radiação da Terra no topo da Atmosfera para a superfície terrestre.

vitais sobre radiação solar e energia para diversas aplicações, incluindo energia fotovoltaica, heliotérmica e energia solar térmica.

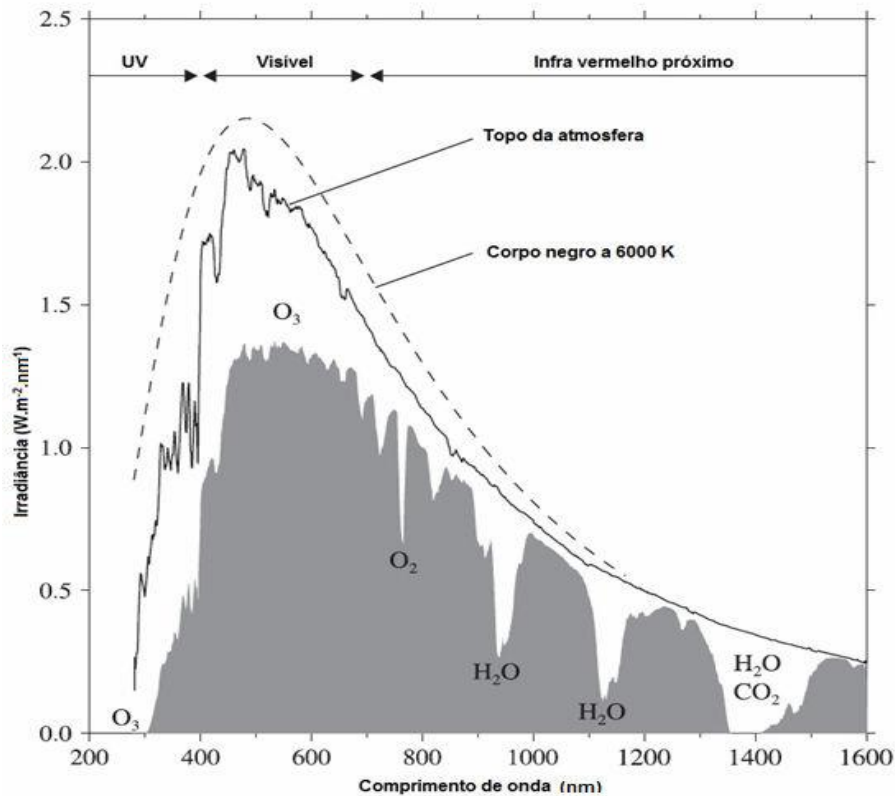
Além disso, o orçamento energético influencia as circulações atmosféricas e oceânicas, com regiões tropicais absorvendo mais energia do que emitem e altas latitudes fazendo o oposto. Mudanças nessas distribuições podem impactar significativamente os padrões climáticos e as correntes oceânicas.

Para melhor compreensão do fenômeno, e como isso pode afetar o potencial de geração fotovoltaica, cabe resgatar o perfil da irradiância luminosa que, de maneira gráfica, apresenta a potência radiante com relação ao comprimento da onda. Na figura 2 abaixo, são ilustrados três histogramas: i) corpo negro, referência teórica; ii) topo da atmosfera, ou seja, recebida pelo Sol e iii) na superfície da Terra.

Como se pode observar, a energia total radiante diminui à medida que o fluxo radiante percorre a atmosfera. Interessante notar que a parcela de energia perdida no caminho é diferente com relação ao comprimento da onda. Por exemplo, a perda de intensidade radiante luminosa na faixa visível é afetada pela quantidade de ozônio (O_3).

Portanto, após o percurso da luz solar, em todo o seu espectro de comprimento de onda, e não somente aquela que é visível, o total da energia que chega à Terra, na superfície do solo, em boas condições meteorológicas (sem nuvens e perto da linha do Equador), resulta, num total de energia radiante da ordem de **1.000 W/m²**. Essa é a quantidade de energia disponível para conversão da energia fotovoltaica.

Figura 2 - Histograma da irradiância na Terra.



Fonte: ResearchGate.

2.2 Tecnologias de Conversão Fotovoltaica

2.2.1 História da Energia Fotovoltaica

A história da energia fotovoltaica remonta ao século XIX e é marcada por várias descobertas e avanços importantes.

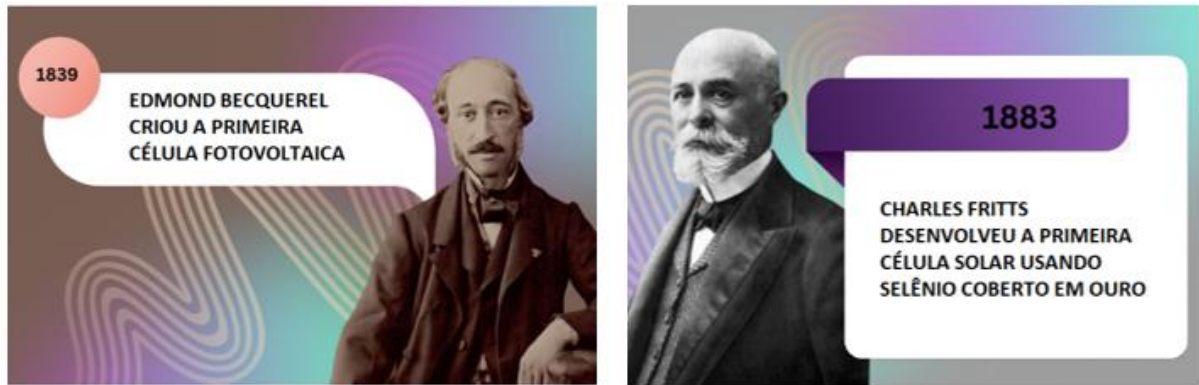
O físico francês Alexandre-Edmond Becquerel², em 1839, descobriu o efeito fotovoltaico quando observou que certos materiais geravam uma corrente elétrica quando expostos à luz solar.

Em seguida, cabe destaque que, em 1883, o cientista americano Charles Fritts³ construiu a primeira célula fotovoltaica prática usando selênio e ouro. No entanto, essa célula tinha uma eficiência muito baixa.

² Alexandre-Edmond Becquerel foi um físico francês. Estudou o espectro solar, magnetismo, eletricidade e a óptica. É conhecido pelos seus trabalhos sobre a luminescência e fosforescência. Descobriu o efeito fotovoltaico, que é a base de funcionamento da célula solar.

³ Charles Fritts foi o inventor americano creditado com a criação da primeira célula de selênio funcional em 1883. De acordo com a CleanTechnica, o primeiro painel solar de telhado do mundo, usando células de selênio da Fritts, foi instalado em 1884 em um telhado da cidade de Nova York.

Figura 3 - Os primórdios da conversão fotovoltaica.



Fonte: © 2023 E8.org.

A utilização do silício como material semicondutor nas células solares, como conhecemos hoje, trouxe melhorias significativas na eficiência e na capacidade de produção em larga escala. As primeiras aplicações foram registradas nas iniciativas de exploração espacial nas décadas de 1950 e 1960. As células solares começaram a ser usadas em satélites e espaçonaves, como o satélite Vanguard 1 em 1958, mostrando a confiabilidade e a utilidade da tecnologia no espaço.

Figura 4 - Células a silício em satélites.



Fonte: Kansas Cosmosphere and Space Center.

2.2.1.1 Expansão em Aplicações Terrestres (1970)

Com a diminuição dos custos e o aprimoramento da eficiência, a energia fotovoltaica passou a ser aplicada em contextos terrestres, abrangendo desde sistemas de energia remota até pequenas instalações residenciais. O impulso significativo para a utilização em solo foi catalisado pela crise mundial de energia em 1973/1974. A partir do final da década de 70, o emprego da tecnologia em ambientes terrestres superou sua aplicação no espaço, uma disparidade que

continuou a se ampliar. Esse crescimento contínuo tem sido acompanhado por inovações que não apenas aumentam a eficiência na conversão de energia das células fotovoltaicas, mas também resultam em uma substancial redução de seus custos (PEA –2420 PRODUÇÃO DE ENERGIA).

2.2.1.2 Incentivos Governamentais (1980 e 1990)

Diversos países implementaram medidas políticas e benefícios fiscais com o propósito de estimular a adoção da energia solar, visando impulsionar o crescimento da indústria fotovoltaica. No caso do Japão, em 1980, foi promulgada a Lei de Energia Alternativa, que se estabeleceu como o principal pilar do projeto voltado para a energia solar. Esse marco legal destinou aproximadamente USD 6 bilhões ao longo das décadas de 1980 e 1990 para o desenvolvimento da tecnologia fotovoltaica. Tal iniciativa desencadeou um vigoroso estímulo às empresas, encorajando-as a direcionar investimentos para a melhoria contínua dessa tecnologia (Maia, 2018).

A Alemanha, por sua vez, implementou sua primeira política de incentivo às energias renováveis em 1990, ao adotar a Electricity Feed-in Law, que instituiu um sistema de preços para a remuneração da geração distribuída proveniente de fontes renováveis. Apesar de ter impulsionado significativamente a capacidade de geração eólica, a geração de energia solar não apresentou resultados equivalentes, devido aos elevados custos dos equipamentos. Somente em 1991, por meio do programa "Iniciativa 1.000 Telhados Solares", a fonte solar adquiriu relevância (Pereira, 2019; Maia, 2018; JARDIM, 2007).

O mercado europeu foi notadamente impelido pelas políticas climáticas da União Europeia, as quais visam reduzir as emissões de gases de efeito estufa em 40% até 2030, em comparação com os níveis de 1990, e alcançar uma participação mínima de 27% de energias renováveis na matriz energética até 2030 (Maia, 2018).

2.2.1.3 Avanços Tecnológicos (2000 em diante)

A incessante pesquisa e desenvolvimento de novos materiais e técnicas têm aprimorado significativamente a eficiência das células solares, simultaneamente reduzindo seus custos. Em 2000, o Japão inaugurou o Projeto de Introdução e Promoção da Nova Energia em Nível Regional, seguido pelo Programa de Apoio para Deter o Aquecimento Global em 2001 (Pereira, 2019). Na Alemanha, a partir do ano 2000, a substituição da legislação de 1990 pela Renewable

Energy Sources Act⁴ estabeleceu novas tarifas, tornando a instalação de painéis solares uma opção atrativa. Sob essa nova política, os indivíduos que instalavam painéis fotovoltaicos em suas residências tinham a garantia de vender a energia gerada ao sistema a um preço superior à média de mercado (Maia, 2018).

No início dos anos 2000, a energia solar era praticamente insignificante, contudo, em 2016, ela representava 1,3% da produção global de energia, desafiando fontes energéticas que têm presença consolidada há séculos no mercado (Maia, 2018).

2.2.1.4 Expansão da Energia Solar (Década de 2010)

A energia fotovoltaica emergiu como uma fonte cada vez mais prevalente em escala global, sendo implementada em larga escala em usinas solares e integrada às redes elétricas. Esta forma de energia, que inicialmente era uma curiosidade científica, evoluiu para se tornar uma fonte prática e escalável ao longo do tempo.

O progresso notável nesse setor foi liderado, sobretudo, por países como Alemanha e Itália, que abrigavam 80% das instalações fotovoltaicas europeias entre 2004 e 2010 (Maia, 2018). A rápida expansão da energia fotovoltaica foi viabilizada por políticas governamentais favoráveis, aliadas à acentuada e contínua redução nos custos dos equipamentos instalados, impulsionada pela competição chinesa (Maia, 2018).

Em 2010, na Índia, o governo lançou a Missão Solar Nacional de Jawaharlal Nehru (JNNSM) com o intuito de ampliar a capacidade solar conectada à rede do país para 20 GW até 2022 (Pereira, 2019). No Brasil, a capacidade de energia solar fotovoltaica experimentou um crescimento exponencial desde a regulamentação da geração distribuída em 2012, por meio da Resolução Normativa REN 482 da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL)⁵.

2.2.2 Células Solares de Silício

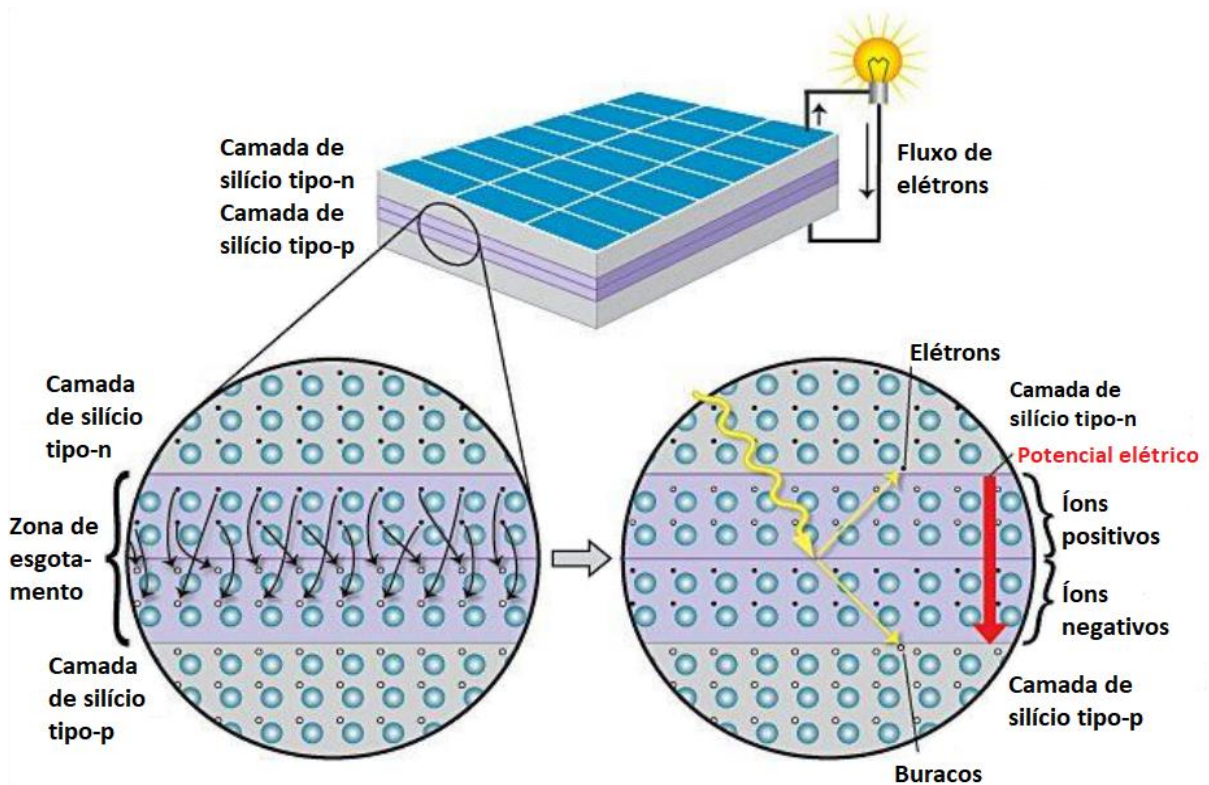
As células solares são construídas utilizando dois tipos de semicondutores, o silício tipo P e o silício tipo N. O silício tipo P perde elétrons devido à adição de átomos, enquanto o silício tipo N ganha elétrons devido à introdução de átomos adicionais. Quando essas camadas são combinadas, uma zona de depleção é criada perto da junção, onde os elétrons fluem dos buracos

⁴ A Lei de Fontes de Energia Renovável ou EEG é uma série de leis alemãs que originalmente previa um esquema de tarifa de alimentação para incentivar a geração de eletricidade renovável.

⁵ Estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, o sistema de compensação de energia elétrica, e dá outras providências.

na camada tipo P para preencher os buracos na camada tipo N (MEIRELLES, 2002). Esse fluxo de elétrons gera uma corrente elétrica, produzindo energia elétrica a partir da luz solar.

Figura 5 - Camadas do Tipo N e Tipo P.



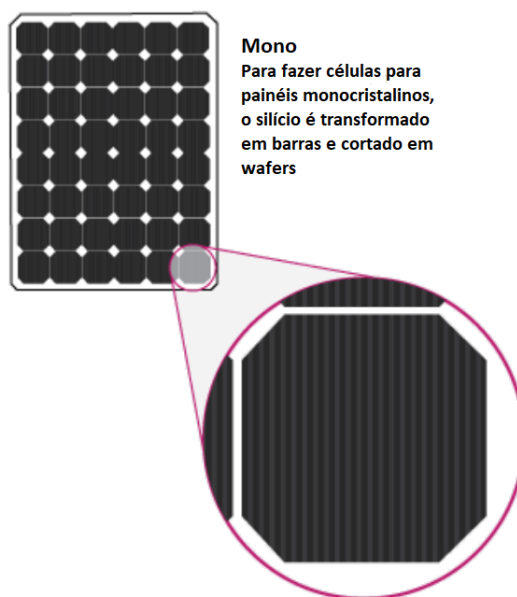
Fonte: (Copyright © 2016 American Chemical Society 2015.04.02.)

2.2.3 Tipos de Painéis Solares

Existem vários tipos de painéis solares no mundo, cada um com suas características e aplicações específicas. Os principais tipos incluem:

2.2.3.1 Painéis Solares de Silício Monocristalino

Figura 6 - Módulo solar monocristalino.



Fonte: Solar Choice Energy Brokering.

O silício monocristalino, ao longo da história, tem se destacado como a escolha preeminente e predominantemente comercializada para a conversão direta da energia solar em eletricidade. O processo de fabricação dessa célula solar é considerado fundamental e robusto, como afirmado pelo Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito CRESESB (2006). A singularidade dessa tecnologia se manifesta na sua capacidade superior de geração de energia, ocupando um espaço físico notavelmente compacto. Essa característica torna os painéis solares de silício monocristalino particularmente adequados para instalações em locais com restrições espaciais, como pequenas coberturas de edifícios.

Além da eficiência aprimorada, os painéis solares de silício monocristalino são elogiados por sua notável durabilidade e longa vida útil. No entanto, é imperativo destacar que tais vantagens vêm acompanhadas de custos mais elevados em comparação com outras tecnologias solares. Isso se deve ao processo de fabricação complexo e à exigência do uso de silício de alta pureza, conforme indicado pelo CRESESB (2006). Adicionalmente, esses dispositivos podem sofrer degradação de desempenho quando expostos a temperaturas elevadas, sendo também mais suscetíveis a danos físicos.

É interessante notar que a origem desta tecnologia remonta a 1918, quando o cientista polonês Jan Czochralski⁶ desenvolveu o Processo Czochralski. Essa técnica pavimentou o caminho para

⁶ Czochralski, também técnica Czochralski ou processo Czochralski, é um método de crescimento de cristais usado para obter monocristais de semicondutores (por exemplo, silício, germânio e arsenieto de gálio), metais (por exemplo, paládio, platina, prata, ouro), sais e pedras preciosas sintéticas.

a construção da primeira célula de silício monocristalino em 1941. No processo, o silício é fundido com uma pequena quantidade de dopante, geralmente boro, do tipo p, conforme indicado pelo (CRESESB 2006).

2.2.3.2 Vantagens de Painéis Solares de Silício Monocristalino

Os painéis solares de silício monocristalino ostentam uma reconhecida excelência na conversão eficiente da luz solar em eletricidade. Essa notável eficiência se manifesta na capacidade desses painéis de gerar uma quantidade superior de energia em um espaço mais compacto, em comparação com outras variantes de painéis solares (Abdala 2019).

A elevada eficiência dos painéis monocristalinos os posiciona como opções ideais para aplicações em áreas limitadas, como pequenos telhados. Vale ressaltar, ainda, que esses painéis são caracterizados por uma vida útil substancialmente longa, frequentemente respaldada por garantias de desempenho que se estendem por até 25 anos ou mais (RADZIEMSKA, AND PIOTR OSTROWSKI 2010).

Além disso, é crucial salientar que os painéis monocristalinos apresentam um desempenho significativamente superior em condições de iluminação difusa ou durante períodos de insolação reduzida, consolidando-os como uma escolha prudente em diversas circunstâncias.

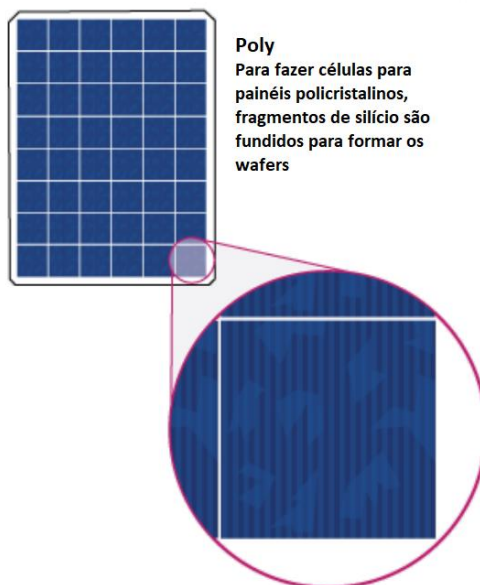
2.2.3.3 Desvantagens de Painéis Solares de Silício Monocristalino

Os painéis solares confeccionados a partir de silício monocristalino frequentemente ostentam um custo mais elevado em relação a outras tecnologias solares, devido à sua fabricação intrincada e à necessidade imperativa de empregar silício de elevada pureza.

Além disso, é importante notar que painéis monocristalinos podem manifestar um desempenho menos eficaz em condições de elevadas temperaturas, acarretando uma diminuição na produção de energia. Adicionalmente, vale salientar que esses painéis solares, cuja composição é baseada no silício monocristalino, são mais suscetíveis a danos físicos quando comparados a outras variantes, tornando-os mais vulneráveis a prejuízos decorrentes de impactos ou forças externas. Por fim, é relevante observar que o processo de produção de silício monocristalino pode envolver métodos químicos e energeticamente intensivos, com potenciais repercussões ambientais substanciais, a menos que sejam adotadas práticas sustentáveis de produção que minimizem seu impacto no meio ambiente.

2.2.4 Painéis Solares de Silício Policristalino

Figura 7 - Módulo solar policristalino



Fonte: Solar Choice Energy Brokering.

Os painéis solares de silício policristalino surgem como uma opção economicamente viável e robusta para a produção de energia solar. Esses dispositivos são confeccionados a partir de fragmentos e resíduos provenientes do processo de corte do silício monocristalino, conforme destacado por Oliveira (2021). Embora sua eficiência seja ligeiramente inferior à dos painéis monocristalinos, sua principal vantagem reside na acessibilidade financeira inicial, como ressaltado por Abdala (2019).

Os módulos de silício policristalino apresentam mais imperfeições devido à sua formação, que ocorre através da fusão e solidificação de fragmentos de silício, em contraste com o silício monocristalino, que é formado por um único cristal, conforme descrito por Oliveira (2021). No entanto, é relevante observar que, para atingir a mesma quantidade de energia gerada pelos painéis monocristalinos, os painéis de silício policristalino podem exigir uma área maior e exibir um desempenho ligeiramente inferior em condições de elevadas temperaturas.

2.2.4.1 Vantagens de Painéis Solares de Silício Policristalino

Os módulos fotovoltaicos compostos por células de silício policristalino se destacam por apresentar uma vantagem inicial de ordem financeira em relação aos módulos de silício monocristalino com a vantagem de um mais baixo custo de produção. Esta característica os posiciona como uma opção particularmente atrativa para um amplo espectro de proprietários

residenciais e empresariais que almejam incorporar a energia solar de maneira economicamente mais acessível.

Embora os módulos de silício policristalino não alcancem os mesmos patamares de eficiência que seus contrapartes monocristalinos, ostentam uma capacidade respeitável de converter a luz solar em eletricidade. Este desempenho se torna particularmente notável quando são implantados em regiões geograficamente favorecidas, onde a exposição solar é substancial.

Outro traço distintivo dos painéis solares de silício policristalino é sua durabilidade e longa vida útil, geralmente respaldada por garantias que se estendem ao longo de 25 anos ou mais (NARUTO 2017). Adicionalmente, exigem manutenção mínima ao longo de sua vida útil, conferindo-lhes o título de opção de baixa manutenção.

2.2.4.2 Desvantagens de Painéis Solares de Silício Policristalino

Os painéis solares de silício policristalino exibem menos eficiente quando comparados aos seus equivalentes de silício monocristalino. Essa disparidade resulta em uma capacidade reduzida de geração de energia em uma área de superfície específica, o que os torna menos eficazes quando se trata de otimizar espaços limitados.

Para igualar a produção energética dos painéis monocristalinos, pode ser necessário alocar um espaço físico maior para os painéis de silício policristalino. Esse requisito pode apresentar desafios, particularmente em locais com telhados menores ou restrições de espaço.

Outra desvantagem dos painéis de silício policristalino é a sua tendência a ter um desempenho levemente inferior em condições de alta temperatura, quando comparados aos painéis monocristalinos. Isso implica que a eficiência desses painéis pode diminuir em dias de calor intenso.

Além disso, alguns consumidores podem achar os painéis de silício policristalino menos atraentes sob uma perspectiva estética, devido à aparência das células policristalinas, que apresentam uma textura menos uniforme em comparação com as células monocristalinas.

2.2.5 Painéis Solares de Silício Amorfo

Figura 8 - Silício Amorfo Panasonic.



Fonte: Panasonic.

Os painéis solares compostos por silício amorfo, caracterizados pela presença de material amorfo em sua composição, evidenciam uma eficiência substancialmente inferior em comparação com suas contrapartes cristalinas. Esse material, que tem a capacidade de absorver radiação solar na faixa visível e permite a fabricação por meio da deposição em vários substratos, emerge como uma tecnologia resiliente para sistemas fotovoltaicos economicamente viáveis, conforme indicado pelo CRESESB (2006). Além de sua eficácia em condições de baixa luminosidade, tornando-os particularmente adequados para regiões de clima nublado, esses painéis destacam-se por sua maleabilidade, que possibilita a instalação em superfícies curvas e irregulares, bem como pela ausência de ordenamento na estrutura atômica.

Apesar da vantagem de custos materiais mais baixos em comparação com células solares anteriores, a eficiência dos painéis de silício amorfo é limitada, atingindo no máximo 10% comercialmente, como mencionado por PINHO, BARBOSA, PEREIRA, SOUZA, BLASQUES, GALHARDO E MACÊDO (2008). Embora se destaque a menor sensibilidade à sombra, essa eficiência geralmente inferior é acompanhada por uma degradação acelerada ao longo do tempo, além de requerer uma área maior para gerar a mesma quantidade de energia quando comparada aos painéis de silício cristalino.

2.2.5.1 Vantagens de Painéis Solares de Silício Amorfo

Os painéis de silício amorfo demonstram notável eficácia em condições de baixa luminosidade ou iluminação difusa, tornando-os uma escolha especialmente apropriada para regiões

caracterizadas por climas nublados ou para aplicações nos períodos de amanhecer e entardecer. Além disso, sua maleabilidade supera a dos painéis solares rígidos de silício cristalino, permitindo a instalação em superfícies de formato irregular ou curvilíneas.

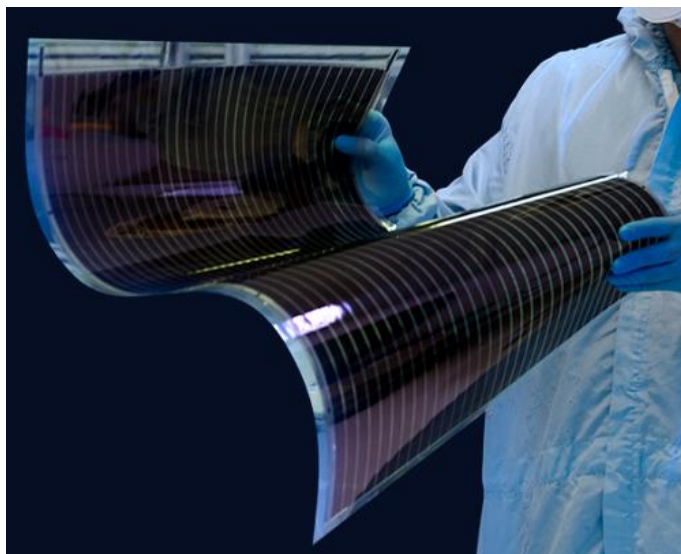
Vale destacar que os painéis de silício amorfo exibem uma notável tolerância à sombra parcial, superando outros tipos de painéis solares nesse aspecto. Em muitos casos, uma única área sombreada em um painel solar pode causar uma redução significativa na produção de energia. No entanto, os painéis de silício amorfo enfrentam esse desafio com uma resistência superior, mantendo uma produção mais constante de eletricidade mesmo quando sujeitos a sombras parciais.

2.2.5.2 Desvantagens de Painéis Solares de Silício Amorfo

Os painéis de silício amorfo, em geral, demonstram que possui uma menor eficiência quando comparados aos painéis de silício cristalino (Oliveira 2021). Esta inferioridade se traduz na geração de uma quantidade menor de energia por unidade de área. Além disso, é observado que tais painéis tendem a apresentar uma degradação mais acelerada ao longo do tempo em comparação aos seus homólogos de silício cristalino, o que resulta em uma expectativa de vida útil substancialmente mais curta. Em virtude dessa menor eficiência, os painéis de silício amorfo, para atingir a mesma produção energética que os painéis de silício cristalino, requerem uma área de dimensões consideravelmente superiores.

2.2.6 Painéis Solares de Filme Fino

Figura 9 - Painél solar de filme fino.



Fonte: sunew.

Os painéis solares de filme fino distinguem-se pelos materiais semicondutores empregados, tais como telureto de cádmio (CdTe) e disseleneto de cobre e índio (CIGS), em contraste com os convencionais de silício (TOLMASQUIM, 2016). Sua notável flexibilidade e leveza, aliadas a um desempenho satisfatório em condições de baixa luminosidade, são características marcantes. Adicionalmente, esses dispositivos destacam-se por sua eficácia em ambientes com elevadas temperaturas e pela menor suscetibilidade à sombra. Entretanto, é pertinente observar que, comparativamente aos painéis de silício cristalino, sua eficiência tende a ser inferior, demandando, conseqüentemente, uma área maior para produzir a mesma quantidade de energia. Ademais, a longevidade e durabilidade desses painéis podem variar, constituindo fatores importantes a serem considerados. Vale ressaltar que os materiais mencionados apresentam coeficientes de absorção de luz de 10 a 100 vezes superiores aos do silício (TOLMASQUIM, 2016).

2.2.6.1 Vantagens de Painéis Solares de Filme Fino

Os painéis solares de película fina destacam-se por sua notável flexibilidade em comparação com os painéis de silício cristalino. Esta característica inerente confere-lhes a capacidade de se adaptar a diversas superfícies, incluindo telhados de formas mais complexas ou substratos maleáveis. Como resultado, esses dispositivos fotovoltaicos se revelam particularmente adequados para aplicações específicas, como a integração arquitetônica e a concepção de vestuário solar.

Adicionalmente, é digno de nota que esses painéis possuem uma menor densidade e peso quando comparados aos seus homólogos de silício cristalino. Esse atributo contribui para uma maior facilidade no manuseio, transporte e instalação desses sistemas solares.

Além disso, é importante salientar que os painéis solares de película fina demonstram uma superior performance em condições de baixa luminosidade, tais como em dias nublados ou parcialmente sombreados, em contraposição aos painéis de silício cristalino. Essa eficiência aprimorada em ambientes de luminosidade reduzida representa uma vantagem significativa.

Outra característica de destaque é que a fabricação de painéis de película fina geralmente requer uma quantidade menor de material semicondutor em comparação com os painéis de silício cristalino. Esse aspecto tem o potencial de mitigar o impacto ambiental e reduzir o consumo de recursos durante o processo de produção desses dispositivos, tornando-os uma alternativa mais sustentável.

2.2.6.2 Desvantagens de Painéis Solares de Filme Fino

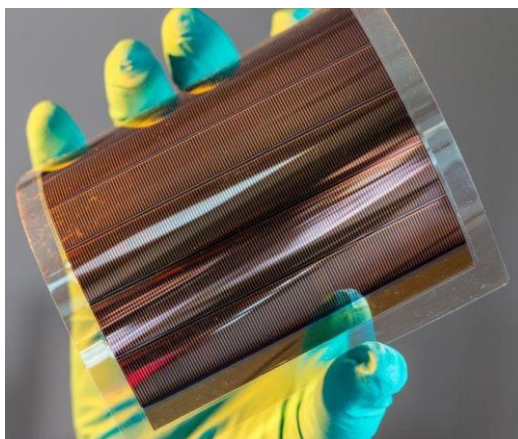
Os painéis solares de película fina frequentemente apresentam uma eficiência na conversão de energia solar em eletricidade inferior àquela observada nos painéis de silício cristalino. Este fenômeno implica que, de modo geral, tais painéis geram uma quantidade menor de eletricidade por unidade de superfície.

Além disso, é imperativo ressaltar que os painéis de película fina tendem a experimentar uma degradação mais acelerada ao longo do tempo quando comparados aos seus equivalentes de silício cristalino. Conseqüentemente, a produção de eletricidade por esses painéis tende a diminuir em um ritmo mais acelerado ao longo dos anos.

Devido à sua eficiência inferior, os painéis de película fina geralmente requerem uma área maior para gerar a mesma quantidade de eletricidade que os painéis de silício cristalino. No entanto, contrariando expectativas, os módulos de filme fino utilizados em grandes instalações fotovoltaicas, para fins comerciais, costumam incorporar duas camadas de vidro para proteção, em vez de uma, o que resulta em uma maior massa em comparação com os módulos de silício (TOLMASQUIM, 2016).

2.2.7 Painéis Solares Orgânicos

Figura 10 - Módulo de células solares orgânicas com seis células solares interligadas desenvolvida.



Fonte: Fraunhofer.

Os painéis solares orgânicos constituem uma notável inovação no âmbito da geração de energia sustentável. As células orgânicas fotovoltaicas (OPV) utilizam moléculas pequenas ou polímeros orgânicos para a absorção da luz solar. Estes materiais, frequentemente abundantes, podem ser aplicados em filmes finos através de técnicas economicamente viáveis

(TOLMASQUIM, 2016). As células orgânicas, por sua vez, destacam-se por apresentar custos reduzidos tanto em termos de matéria-prima quanto de produção. São caracterizadas por sua leveza, flexibilidade e semitransparência, sendo compostas por materiais orgânicos como polímeros e fulerenos de carbono (Oliveira, 2021). Importante frisar, entretanto, que esta tecnologia ainda se encontra em estágios embrionários de desenvolvimento.

Aplicações de pequena escala, como carregadores de dispositivos móveis, lanternas LED e dispositivos alimentados em baixa tensão por meio de conversores DC-DC, despertam um significativo interesse na pesquisa acadêmica devido à versatilidade proporcionada pelos materiais orgânicos. Este interesse está intrinsecamente ligado às perspectivas de uma maior disseminação no uso do recurso solar (MACEDO, RESENDE e MARINHO, 2019).

2.2.7.1 Vantagens de Painéis Solares Orgânicos

Os painéis solares orgânicos destacam-se pela sua notável leveza e flexibilidade, atributos que lhes conferem a capacidade de serem instalados em superfícies não planas e pouco convencionais, como tecidos ou janelas laterais em edifícios de escritórios de vários pavimentos com plantas profundas (GUIMARÃES 2021). Além disso, os materiais utilizados na fabricação desses painéis costumam ser mais economicamente acessíveis em comparação com os materiais tradicionais empregados nos painéis de silício cristalino, resultando potencialmente em custos de produção reduzidos.

É relevante notar que muitos dos materiais orgânicos empregados nesses painéis são renováveis e apresentam menor impacto ambiental quando comparados aos materiais inorgânicos. Isso acarreta diversos benefícios, tais como a geração de energia limpa, a redução da carga térmica no ambiente, a diminuição da pegada de carbono, a capacidade de personalização em termos de tamanho, forma e cor, facilidade no transporte e instalação, aumento do desempenho em condições de elevada temperatura externa, e uma performance superior em baixas condições de luminosidade. Vale ressaltar que a cada metro quadrado de painel orgânico fotovoltaico (OPV) evita a emissão de aproximadamente 120 kg de CO₂ por ano (GUIMARÃES 2021).

Outra vantagem notável dos painéis solares orgânicos reside no seu desempenho relativamente superior em condições de baixa luminosidade, tornando-os particularmente adequados para regiões onde a incidência solar é limitada.

2.2.7.2 Desvantagens de Painéis Solares Orgânicos

Os painéis solares orgânicos, em geral, demonstram uma eficiência de conversão de energia inferior àquela observada nos painéis de silício cristalino, o que implica na geração de uma quantidade mais modesta de eletricidade para uma determinada superfície.

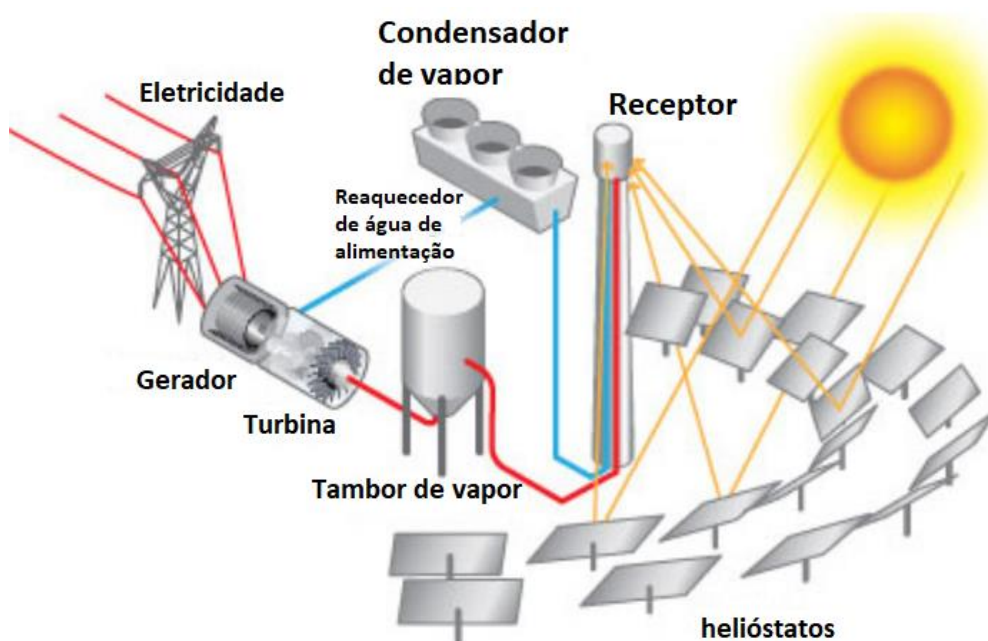
Além disso, a maioria dos painéis solares orgânicos apresenta uma expectativa de vida mais limitada em comparação às suas contrapartes de silício, acarretando encargos mais frequentes de manutenção e substituição.

Adicionalmente, os painéis solares orgânicos podem manifestar maior susceptibilidade à umidade e à exposição aos raios ultravioleta, fatores que exercem influência negativa sobre sua durabilidade.

Outro aspecto a ser considerado é a sensibilidade desses painéis às variações de temperatura, o que pode impactar adversamente sua eficiência ao longo do período de operação.

2.2.8 Painéis Solares de Concentração (CSP)

Figura 11 - Painéis Solares de Concentração (CSP).



Fonte: Departamento de Energia dos EUA - Eficiência Energética e Energia Renovável.

Os Painéis Solares de Concentração (CSP) adotam uma abordagem singular em relação aos sistemas convencionais que produzem energia elétrica por meio de um ciclo térmico, onde a radiação solar é concentrada (Silva e Melo, 2018). Ao invés de realizar a conversão de forma

imediate, os CSPs utilizam espelhos altamente eficientes ou lentes especiais para direcionar e focalizar a intensa radiação solar em um ponto central, conforme descrito por Maranhão (2016). Esse processo resulta na significativa elevação da temperatura de um fluido térmico, o qual é então empregado para acionar uma turbina (Eustáquio 2011). Este acionamento, por sua vez, desencadeia de maneira indireta, porém altamente eficaz, a geração de eletricidade.

2.2.8.1 Vantagens de Painéis Solares de Concentração (CSP)

Os Sistemas de Concentração Solar (CSP) se destacam pela sua conversão da energia solar em eletricidade, uma vez que têm a capacidade de focalizar a luz solar em um único ponto, resultando em temperaturas mais elevadas quando comparados aos convencionais painéis solares fotovoltaicos.

Adicionalmente, muitos sistemas CSP possuem a capacidade de armazenar calor em substâncias como sais fundidos, o que lhes permite gerar eletricidade tanto durante a noite quanto em dias nublados, aprimorando substancialmente a confiabilidade da produção de energia. Esta característica distingue os CSP dos painéis solares fotovoltaicos, que dependem da incidência direta da luz solar e são mais vulneráveis às condições meteorológicas desfavoráveis. Os CSP, desde que o calor seja armazenado adequadamente, têm a capacidade de operar de forma contínua, tornando-os uma opção mais resiliente.

Além de sua eficiência e confiabilidade, os CSP representam uma fonte de energia ambientalmente amigável que contribui para a redução das emissões de gases de efeito estufa, desempenhando um papel relevante na mitigação das mudanças climáticas.

2.2.8.2 Desvantagens de Painéis Solares de Concentração (CSP)

Os sistemas de Concentrated Solar Power (CSP), dada a intrincada complexidade de seus componentes, como espelhos, sistemas de rastreamento solar e unidades de armazenamento térmico, implicam em um custo inicial substancial para sua implementação, conforme observado por Eustáquio (2011). Adicionalmente, é relevante salientar que certas modalidades de CSP demandam volumes consideráveis de água para fins de resfriamento, uma exigência que pode ser problemática, especialmente em regiões áridas ou durante períodos de escassez hídrica.

A eficiência de conversão dessa tecnologia é notavelmente baixa, situando-se em torno de 15%, e encontra-se limitada pelas temperaturas de operação atualmente alcançadas, aproximadamente 400 °C, conforme destacado por Eustáquio (2011).

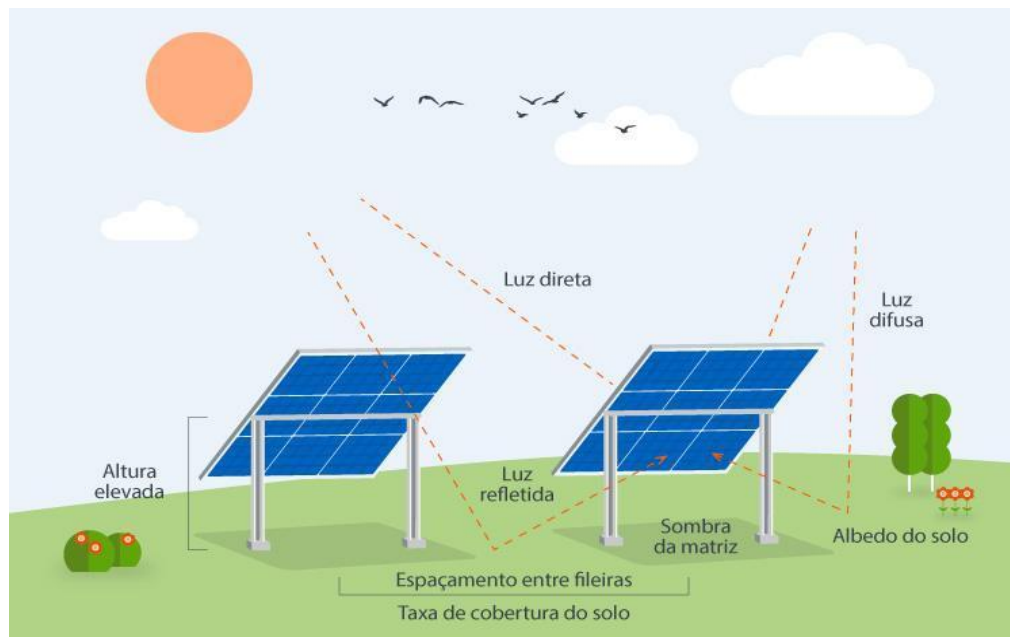
A instalação de extensas fazendas de CSP, apesar de sua contribuição para a geração de energia renovável, pode acarretar impactos ambientais significativos em nível local. Isso abrange desde a perturbação de ecossistemas até a modificação da vegetação nativa e a reconfiguração do uso da terra nas áreas circundantes.

É crucial ressaltar que a eficiência dos sistemas CSP está intrinsecamente ligada à intensidade da irradiação solar, o que restringe sua viabilidade geográfica a regiões privilegiadas em termos de exposição solar.

Por fim, é imperativo mencionar que a operação contínua dos sistemas CSP frequentemente demanda manutenção periódica devido à exposição constante a condições ambientais severas e ao desgaste dos componentes mecânicos.

2.2.9 Painéis Solares Bifaciais

Figura 12 - Funcionamento de placas bifaciais.



Fonte1: Iberdrola.

Os Painéis Solares Bifaciais representam dispositivos fotovoltaicos de notável engenhosidade, possuindo a capacidade distintiva de capturar a luz solar incidente de ambos os lados. Essa característica singular otimiza sua eficiência energética ao não apenas aproveitar a radiação solar direta, mas também ao capturar a luz refletida pelo solo e outras superfícies circundantes (AQUINO 2021). Esse engenhoso recurso se traduz em uma ampliação significativa da eficiência na produção de energia solar, destacando-os como uma escolha proeminente para aplicações que visam a geração de eletricidade limpa e sustentável.

O conceito subjacente à utilização de ambas as faces de um módulo fotovoltaico para converter a radiação solar em energia elétrica emergiu no final do século XX e é reconhecido como fotovoltaica bifacial. Conforme observado por Ganilha (2017), as células solares bifaciais, além da radiação incidente na parte frontal, conseguem aproveitar a radiação difusa, refletida e direta que alcança a parte posterior ativa da célula. Esse enfoque abrangente na captação de luz contribui para uma eficiência ainda mais robusta, consolidando a posição dos painéis solares bifaciais como uma inovação crucial no cenário da energia renovável.

2.2.9.1 Vantagens de Painéis Solares Bifaciais

Os painéis solares bifaciais têm a notável capacidade de capturar a luz solar refletida pelo solo, edificações e outras superfícies, resultando em um aumento significativo na eficiência global da geração de energia (AQUINO 2021).

Particularmente em regiões caracterizadas por superfícies reflexivas, como neve ou corpos d'água, os painéis bifaciais podem proporcionar uma produção energética substancialmente superior em comparação aos painéis solares tradicionais.

Uma das vantagens notáveis desses dispositivos é a sua versatilidade de instalação, possibilitando sua colocação em estruturas elevadas, o que se mostra particularmente benéfico em localidades com limitações espaciais.

Além disso, em linha com os painéis solares convencionais, os painéis bifaciais são reconhecidos por sua durabilidade notável e uma vida útil excepcionalmente longa.

2.2.9.2 Desvantagens de Painéis Solares Bifaciais

Os painéis solares bifaciais frequentemente acarretam um custo superior em comparação aos painéis solares convencionais, o que resulta em um investimento inicial mais substancial.

A fim de otimizar a eficiência dos painéis bifaciais, é imperativo que haja a presença de superfícies refletivas, como solo de coloração clara, corpos d'água ou até mesmo neve. Em regiões desprovidas dessas condições, a vantagem em termos de eficiência é consideravelmente atenuada.

A manutenção dos painéis bifaciais pode se mostrar mais complexa devido à exposição de ambos os lados desses dispositivos. É imprescindível realizar uma limpeza regular, a fim de eliminar quaisquer acúmulos de sujeira e poeira, de modo a assegurar o desempenho ideal.

Além disso, os painéis bifaciais tendem a possuir dimensões e peso superiores em relação aos painéis solares tradicionais, o que, por sua vez, pode influenciar as exigências relacionadas à estrutura de suporte e aos requisitos de instalação.

2.2.10 Painéis Solares Transparentes

Esses painéis são projetados para serem translúcidos, permitindo a passagem de luz enquanto geram eletricidade. Eles têm aplicações em janelas de edifícios e fachadas solares.

Figura 13 - Painel solar transparente.



Fonte: © luchschenF/Shutterstock.

Os painéis solares transparentes representam uma inovação sustentável que capta e converte a energia luminosa por meio de superfícies de vidro, independentemente do ângulo de incidência. Conforme destacado pelo Professor Peter A. Franken, titular da Cátedra de Engenharia Elétrica na Universidade de Michigan, essa tecnologia transforma as janelas de um edifício em uma verdadeira usina de energia. Esses dispositivos foram meticulosamente projetados para apresentar uma notável translucidez, permitindo simultaneamente a entrada de luz natural e a eficiente geração de eletricidade.

A aplicação destes sofisticados dispositivos fotovoltaicos ganha destaque em contextos arquitetônicos, particularmente em janelas e fachadas solares de edifícios. Nesses cenários, a fusão entre funcionalidade e estética não apenas contribui para a eficiência energética, mas

também incorpora uma dimensão contemporânea ao design, alinhando-se à busca por soluções que unam utilidade e beleza na vanguarda da arquitetura sustentável.

2.2.10.1 Vantagens de Painéis de Solares Transparentes

Os painéis solares transparentes representam uma inovação notável ao possibilitarem sua integração direta em janelas e fachadas de edifícios, preservando a estética arquitetônica e permitindo a permeabilidade da luz natural.

Esta sofisticada solução propicia a geração de energia limpa no próprio local de consumo, reduzindo significativamente a dependência de fontes de energia convencionais e, assim, contribuindo de maneira notável para a promoção da sustentabilidade ambiental.

A energia gerada, por sua vez, pode ser habilmente utilizada para alimentar sistemas de iluminação e climatização, resultando em uma redução substancial nos custos associados ao consumo de eletricidade.

Vale ressaltar que essa inovação pode ser aplicada não somente em edifícios comerciais e residenciais, mas também encontrando aplicabilidade em veículos, como os carros elétricos, demonstrando seu potencial abrangente em diferentes esferas da vida moderna.

2.2.10.2 Desvantagens de Painéis de Solares Transparentes

Os painéis solares transparentes, por sua natureza de preservar a transparência, frequentemente apresentam uma eficiência inferior quando comparados aos painéis solares convencionais.

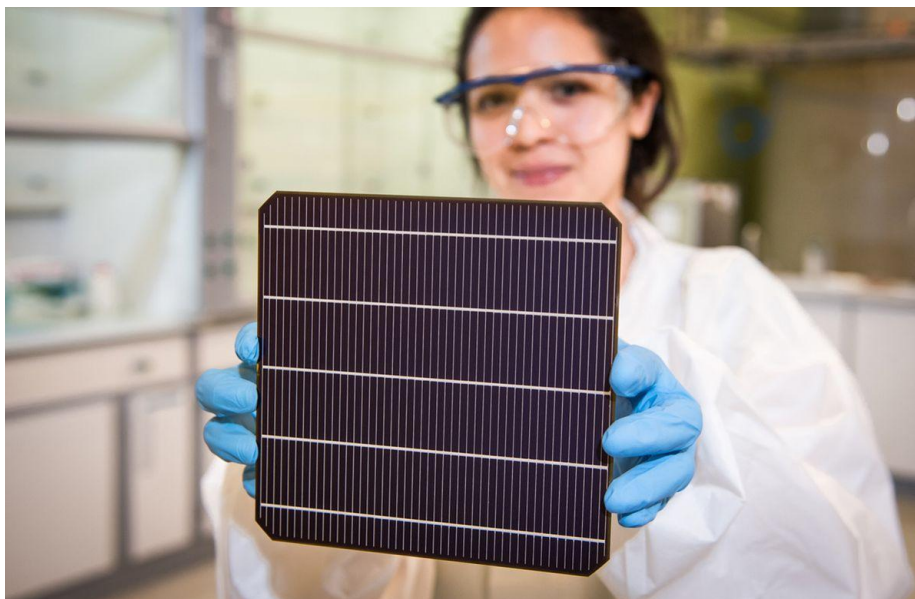
A tecnologia de células solares transparentes ainda ostenta custos substanciais em comparação com seus equivalentes tradicionais na indústria solar.

A área disponível para a instalação de painéis solares transparentes, muitas vezes, encontra-se restrita pela superfície envidraçada dos edifícios, o que, por sua vez, pode restringir a quantidade de energia que pode ser gerada.

Devido à exposição a poeira e sujeira, as janelas solares transparentes podem demandar manutenção mais frequente e limpezas regulares para assegurar a eficácia na geração de energia.

2.2.11 Painéis Solares de Perovskita

Figura 14 - Célula de perovskita-silício de tamanho comercial.



Fonte: Oxford PV. FOTO DE: OXFORD PV.

Vasconcelos (2017) Para explorar os Painéis Solares de Perovskita, uma notável inovação na geração de energia solar. Destacados como uma das principais tecnologias emergentes de 2016 pelo Fórum Econômico Mundial, esses painéis, fabricados a partir do material sintético cristalino denominado perovskita, têm despertado entusiasmo devido à sua excepcional capacidade de converter fótons em elétrons, resultando em uma eficiente geração de eletricidade.

No cenário científico, o entusiasmo em torno da perovskita atingiu seu auge quando, em julho de 2017, o Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia de Ulsan (Unist), na Coreia do Sul, anunciou a bem-sucedida produção em escala laboratorial de células solares de perovskita com uma notável eficiência energética de 22,1%, estabelecendo um recorde. É relevante observar que este índice supera o desempenho dos painéis de silício, que detêm 90% do mercado, com taxas de conversão oscilando entre 15% e 20%, dependendo da pureza do silício utilizado na construção dos módulos.

Em âmbito global, fabricantes de painéis solares e diversos grupos de pesquisa, inclusive no Brasil, estão dedicando esforços ao aprimoramento desta tecnologia promissora. Contudo, é imperativo superar desafios significativos, como a questão da baixa durabilidade, para que esta inovação alcance plenamente o mercado consumidor.

Na vanguarda deste avanço, a Oxford Photovoltaics, uma spin-off da renomada Universidade de Oxford, alcançou êxito na produção de células de perovskita com uma eficiência notável de

20%. A empresa britânica explora ativamente a possibilidade de integrar essas células aos tradicionais painéis de silício, visando otimizar a conversão de energia solar. O físico Henry Snaith, fundador da Oxford Photovoltaics, foi um dos pioneiros a reconhecer o potencial deste material como um eficaz conversor de luz solar em eletricidade. Com projeções ambiciosas, a empresa espera lançar os primeiros modelos comerciais destas células inovadoras até o final de 2018, conforme revelado por Frank Averdung (Oxford), presidente da companhia, à agência de notícias Bloomberg em março deste ano.

2.2.11.1 Vantagens de Painéis Solares de Perovskita

Os painéis solares de perovskita ostentam a notável capacidade de transformar uma porção significativa da radiação solar em energia elétrica, frequentemente superando a eficiência dos painéis fotovoltaicos de silício.

Os materiais à base de perovskita podem ser empregados na confecção de painéis solares flexíveis, conferindo-lhes uma idoneidade inigualável para aplicações em superfícies curvas ou móveis, tais como vestimentas solares e dispositivos portáteis.

A produção de painéis solares de perovskita pode ser notavelmente mais econômica quando comparada aos painéis de silício, devido à facilidade de fabricação e ao menor consumo de energia durante o processo produtivo.

É digno de nota que os materiais perovskita podem ser sintonizados de maneira a absorver diferentes regiões do espectro da luz visível, o que, por conseguinte, propicia a criação de painéis solares coloridos e esteticamente atraentes.

2.2.11.2 Desvantagens de Painéis Solares de Perovskita

Os painéis solares baseados em perovskita demonstram uma menor durabilidade em comparação aos seus equivalentes de silício devido à sua sensibilidade a fatores como umidade e degradação química. Tal fragilidade inerente pode acarretar uma redução na expectativa de vida útil dos painéis e, conseqüentemente, demandar manutenções periódicas.

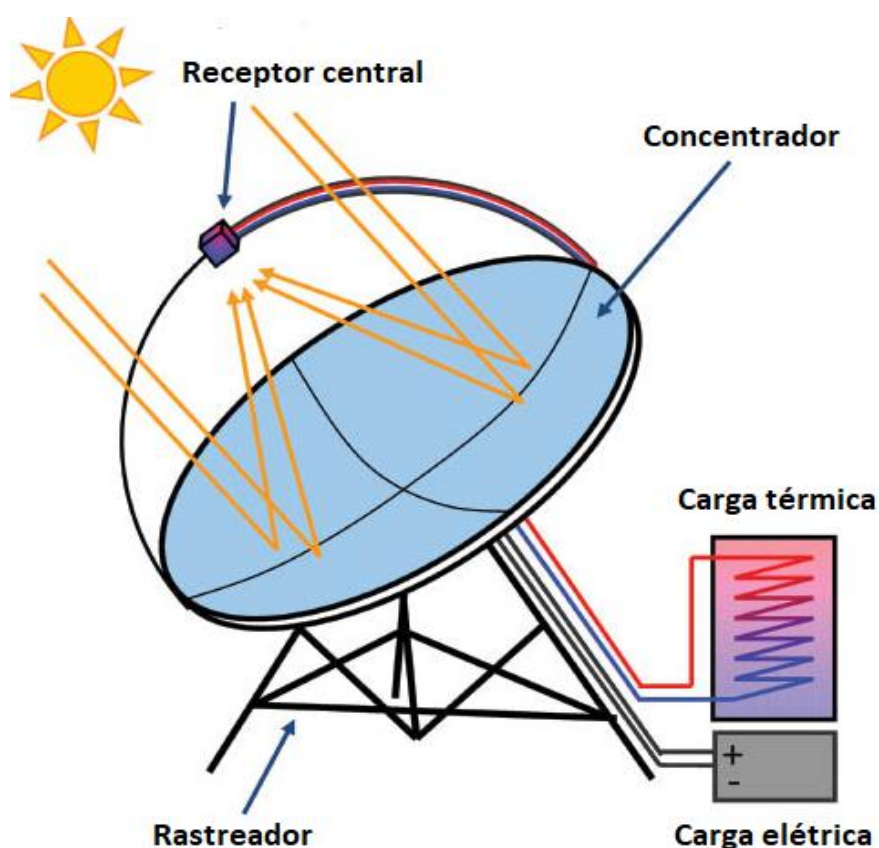
Uma preocupação significativa relacionada à aplicação a longo prazo dos materiais de perovskita é a sua tendência a degradar-se de forma mais acelerada quando expostos continuamente à luz solar. Isso resulta na diminuição da confiabilidade desses painéis em comparação aos mais estabelecidos painéis de silício.

Além disso, é importante notar que certas formulações de materiais de perovskita podem incluir componentes potencialmente tóxicos, como o chumbo, suscitando questões ambientais e de saúde, tanto no processo de produção quanto na fase de reciclagem e descarte.

A tecnologia dos painéis solares de perovskita encontra-se em constante aprimoramento, embora seja importante reconhecer que diversos obstáculos técnicos ainda precisam ser superados antes que possam ser amplamente adotados no mercado.

2.2.12 Painéis Solares de Concentração Fotovoltaica (CPV)

Figura 15 - Desenho esquemático de um sistema concentrador fotovoltaico e térmico.



Fonte: De Gruyter.

Os Painéis Solares de Concentração Fotovoltaica (CPV) representam dispositivos de elevada complexidade, valendo-se da sofisticação óptica proporcionada por lentes ou espelhos refinados, como descrito por TOLMASQUIM (2016). Seu propósito é dirigir e concentrar precisamente a luz solar sobre diminutas células fotovoltaicas de elevada eficiência. Essa abordagem é respaldada por estudos, tais como os de ABINEE (2012) e SIMIONI (2017).

A determinação do tipo de painel solar a ser adotado emerge de uma análise metódica que considera as demandas específicas do projeto, as disponibilidades orçamentárias e as condições ambientais locais, destacando-se a intensidade e consistência da radiação solar. No âmbito desta tecnologia solar, ressalta-se sua natureza dinâmica, sujeita a aprimoramentos contínuos, com pesquisas incessantes voltadas à otimização da eficiência energética e à redução dos custos associados a tais sistemas.

2.2.12.1 Vantagens de Painéis Solares de Concentração Fotovoltaica (CPV)

Os sistemas de Concentração de Energia Fotovoltaica (CPV) são projetados para otimizar a captação de luz solar, fazendo uso de lentes ou espelhos que concentram a radiação solar diretamente nas células fotovoltaicas. Essa abordagem resulta em uma notável amplificação da eficiência na conversão da energia solar em eletricidade quando comparada aos convencionais painéis solares.

Além disso, os CPV demonstram um desempenho mais robusto em ambientes caracterizados por temperaturas elevadas. Isso se deve ao fato de que as altas temperaturas podem, frequentemente, prejudicar a eficiência dos painéis solares tradicionais.

Outro aspecto a considerar é a potencial resistência à degradação ao longo do tempo observada nos sistemas CPV, em comparação com a degradação que comumente afeta a eficácia dos painéis solares convencionais, resultante da exposição contínua à radiação solar.

2.2.12.2 Desvantagens de Painéis Solares de Concentração Fotovoltaica (CPV)

Os sistemas de Concentração Fotovoltaica (CPV) apresentam um custo inicial mais elevado em comparação com os painéis solares tradicionais, devido à necessidade de incorporar componentes ópticos, como lentes ou espelhos, bem como sistemas de rastreamento solar. Esta complexidade inerente aos CPV também se traduz em uma maior exigência de manutenção e potenciais despesas com reparos, uma vez que requerem rastreamento solar preciso e a integridade das partes ópticas, o que, por sua vez, contribui para os custos.

Além disso, os sistemas CPV são notavelmente sensíveis à sombra, de modo que mesmo uma mínima área do painel que esteja sombreada pode ter um impacto significativo no desempenho geral. Portanto, garantir a exposição ininterrupta à luz solar é essencial para obter o melhor rendimento desses sistemas.

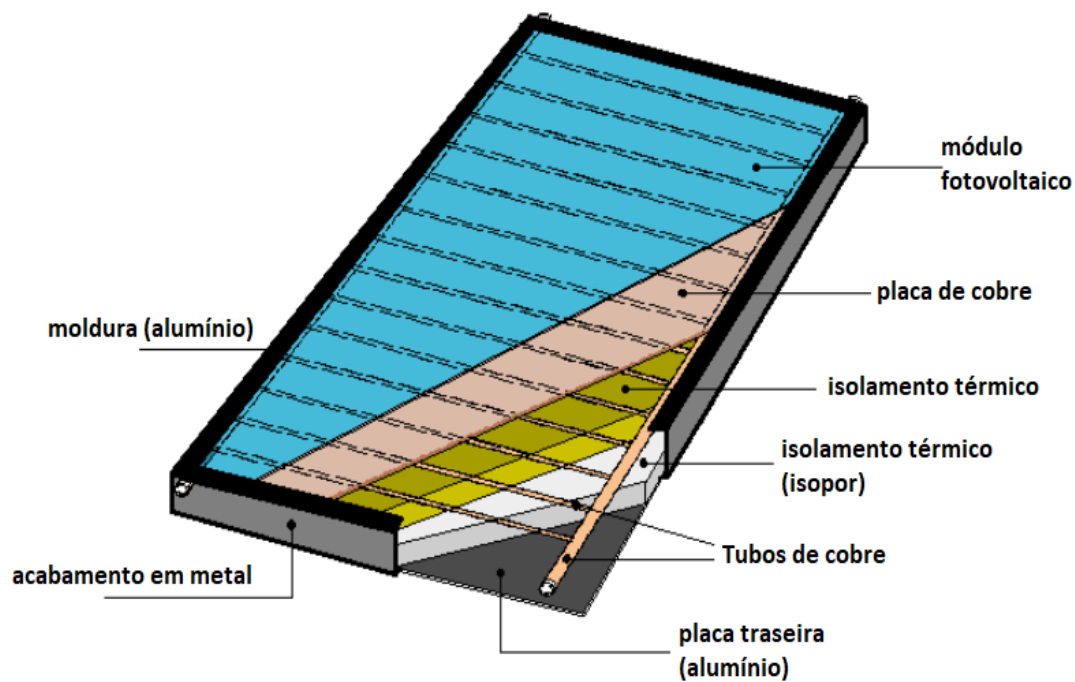
Os sistemas CPV funcionam de maneira mais eficaz em locais com uma incidência solar substancial, visto que seu desempenho é diretamente proporcional à disponibilidade de luz

solar. Em áreas com menor exposição à luz solar, a viabilidade dos CPV pode ser comprometida, tornando-os uma opção menos adequada.

Adicionalmente, a produção dos componentes ópticos e a complexidade intrínseca dos sistemas CPV podem gerar um impacto ambiental superior quando comparados aos painéis solares convencionais. Isso se deve ao processo de fabricação mais intrincado e à potencial necessidade de utilizar materiais específicos na produção dos componentes ópticos, que podem ter implicações ambientais mais significativas.

2.2.13 Painéis Fotovoltaicos com Sistema de Aquecimento Solar (PVT)

Figura 16 - Structure of the PVT collector.



Fonte: Ramos et al (2019).

Os Painéis Fotovoltaicos com Sistema de Aquecimento Solar, conhecidos como PVT, são dispositivos que integram duas tecnologias distintas: a geração de eletricidade por meio de células fotovoltaicas e a coleta de energia térmica proveniente da luz solar. Esse sistema híbrido oferece uma abordagem eficiente para aproveitar a energia solar de maneira mais abrangente.

Os painéis fotovoltaicos tradicionais convertem a luz solar diretamente em eletricidade, enquanto os sistemas de aquecimento solar capturam o calor do sol para aquecer água ou fluidos térmicos. No entanto, os PVT combinam essas funcionalidades em um único dispositivo, permitindo a produção simultânea de eletricidade e calor.

Os benefícios dos PVT incluem uma maior eficiência global, pois aproveitam a energia solar de forma mais completa, especialmente em regiões com climas variados. Além disso, a produção conjunta de eletricidade e calor otimiza o uso da área disponível, tornando os PVT uma opção atrativa para espaços limitados.

Esses sistemas são utilizados em aplicações residenciais, comerciais e industriais, contribuindo para a redução da dependência de fontes de energia não renováveis e para a diminuição das emissões de gases de efeito estufa. No entanto, é importante considerar fatores como o custo inicial, manutenção e eficiência ao avaliar a viabilidade dos PVT em determinado contexto.

2.2.13.1 Vantagens de Painéis Fotovoltaicos com Sistema de Aquecimento Solar (PVT)

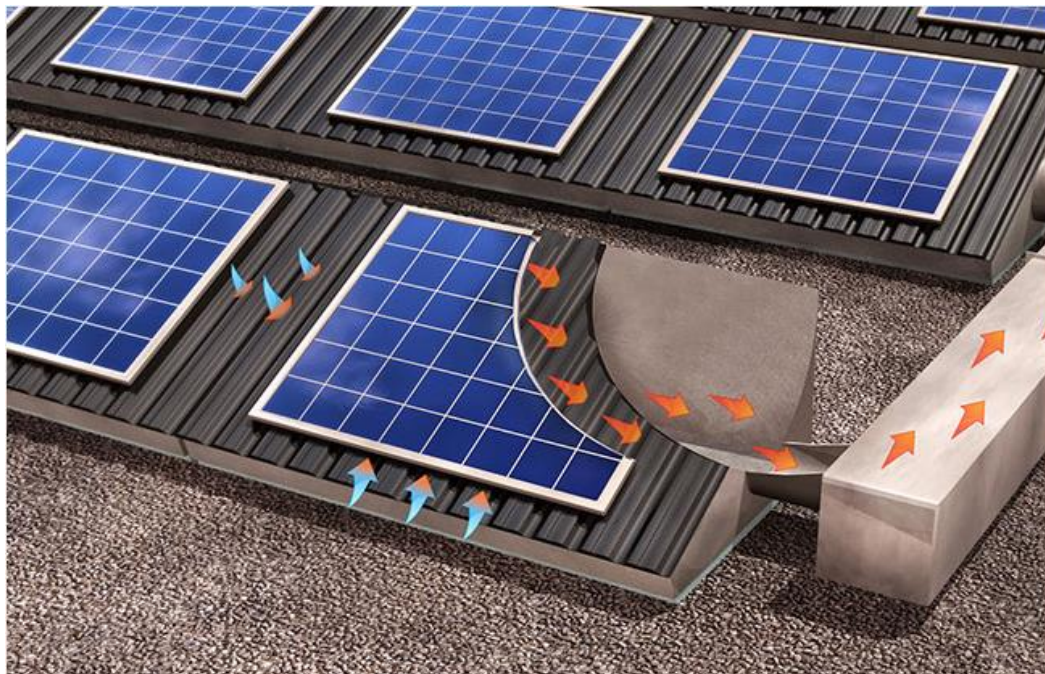
Os Painéis Fotovoltaicos com Sistema de Aquecimento Solar (PVT) oferecem uma abordagem integrada para a geração de eletricidade e aquecimento. Suas vantagens incluem eficiência energética aprimorada, utilização otimizada de espaço, redução nos custos de energia, menor emissão de gases de efeito estufa, autonomia energética, versatilidade de aplicações, aproveitamento de recursos renováveis e a disponibilidade de incentivos e subsídios. Essa tecnologia representa uma solução sustentável e econômica para diversas necessidades energéticas, promovendo a independência e a eficiência no uso de recursos renováveis.

2.2.13.2 Desvantagens de Painéis Fotovoltaicos com Sistema de Aquecimento Solar (PVT)

Os Painéis Fotovoltaicos com Sistema de Aquecimento Solar (PVT) apresentam vantagens, mas também têm desvantagens a serem consideradas. Apesar da eficiência energética aprimorada e da redução nos custos de energia, o custo inicial elevado pode ser uma barreira. A complexidade de manutenção e a eficiência variável devido a fatores como orientação e sombreamento também são desafios. Além disso, o peso adicional, as limitações de tamanho e design, e a dependência das condições climáticas podem impactar a viabilidade. A evolução tecnológica contínua e a dependência de desenvolvimentos futuros são fatores a serem considerados. Em última análise, a escolha de adotar os PVT dependerá das necessidades específicas, do ambiente local e das considerações financeiras do usuário.

2.2.14 Painéis Solares Térmicos Fotovoltaicos (PV/T)

Figura 17 - Painéis solares térmicos fotovoltaicos (PV/T).



Fonte: Kotowski (2010).

Os painéis solares térmicos fotovoltaicos, ou PV/T, são dispositivos que combinam duas tecnologias: a geração de eletricidade por meio de células fotovoltaicas e a coleta de calor para aquecimento.

Na face superior do painel, temos as células fotovoltaicas, que convertem a luz solar em eletricidade. Essa eletricidade pode ser usada para alimentar aparelhos elétricos ou ser enviada para a rede elétrica.

Na face posterior do painel, existe um sistema de absorção de calor. Esse sistema captura a energia térmica do sol e a utiliza para aquecer água ou outros fluidos. Assim, além da eletricidade gerada pelas células fotovoltaicas, você também obtém calor que pode ser utilizado para aquecer água para uso doméstico, por exemplo.

A combinação dessas duas tecnologias em um único painel permite aproveitar melhor a energia solar disponível, tornando os PV/T uma opção eficiente para maximizar a utilização da energia solar em diferentes formas (FUDHOLI et al., 2014).

2.2.14.1 Vantagens de Painéis Solares Térmicos Fotovoltaicos (PV/T)

Os painéis fotovoltaicos térmicos, conhecidos como painéis PV/T, destacam-se por sua capacidade aprimorada de aproveitar a energia solar em comparação com os tradicionais painéis

solares fotovoltaicos. Isso se deve à sua habilidade de capturar simultaneamente a energia solar na forma de eletricidade e calor.

Além disso, esses sistemas apresentam a vantagem de ocupar um espaço reduzido quando comparados à instalação separada de painéis solares térmicos e fotovoltaicos. Essa característica é particularmente valiosa em situações em que o espaço disponível é limitado.

Os painéis PV/T desempenham um papel versátil ao fornecer eletricidade e água quente, tornando-os uma escolha ideal para aplicações residenciais e comerciais. Isso se deve à capacidade desses sistemas de atender a diversas demandas de energia de maneira eficiente.

A combinação do fornecimento de eletricidade e calor resulta em uma redução significativa dos custos gerais de energia, uma vez que a energia térmica gerada pode ser aproveitada tanto para aquecimento de água quanto para climatização de ambientes.

Além de seus benefícios práticos, os sistemas PV/T também se destacam por seu impacto ambiental reduzido em comparação com fontes de energia convencionais. Isso contribui de forma significativa para a redução das emissões de gases de efeito estufa, fortalecendo assim sua posição como uma alternativa sustentável e ecologicamente responsável.

2.2.14.2 Desvantagens de Painéis Solares Térmicos Fotovoltaicos (PV/T)

Os sistemas de Tecnologia Fotovoltaico-Térmica (PV/T) são notoriamente mais dispendiosos em termos de instalação quando contrastados com a opção de empregar painéis solares fotovoltaicos ou térmicos de forma independente, em virtude da intrincada complexidade inerente a essa tecnologia.

Como é característico de qualquer sistema de geração de energia, os painéis PV/T demandam manutenção periódica, que abarca tarefas como a limpeza minuciosa e a substituição de componentes que apresentam desgaste, acarretando um aumento nos custos a longo prazo.

A eficiência dos painéis PV/T pode variar de maneira substancial, dependendo das condições climáticas vigentes e da localização geográfica, fatores estes que exercem influência sobre a produção de energia.

A instalação de sistemas PV/T configura-se como uma empreitada mais complexa, demandando conhecimento técnico especializado, o que, por conseguinte, implica em custos de instalação consideravelmente elevados.

Tal como ocorre com os painéis solares convencionais, os painéis PV/T também sofrem degradação ao longo do tempo, resultando na gradual redução de sua eficiência ao longo dos anos.

2.2.15 Evolução das Tecnologias

Atualmente, assistimos a uma acelerada evolução das tecnologias no setor de energia, abrangendo avanços em fontes renováveis, como solar e eólica, inovações em armazenamento de energia e redes inteligentes. A transição para veículos elétricos e a ênfase na eficiência energética são tendências proeminentes. Essa transformação reflete um compromisso crescente com práticas sustentáveis e a busca por soluções mais limpas e eficientes no cenário energético contemporâneo.

No contexto da transformação energética, a implementação de uma política nacional de Ciência, Tecnologia e Inovação (CT&I) torna-se crucial. Isso é fundamental para criar uma nova perspectiva de inserção nos mercados globais e gerar maior desenvolvimento econômico para o país.

Um estudo realizado pelo Escritório de Tecnologias de Energia Solar do Departamento de Energia dos EUA (DOE) e pelo Laboratório Nacional de Energia Renovável (NREL) projeta que, nas próximas décadas, a energia solar pode atender a 40% ou mais da demanda de eletricidade nos EUA. Isso aceleraria significativamente a descarbonização de edifícios, transportes e indústrias até 2050.

O estudo explora três cenários futuros, sendo dois deles baseados na premissa de que a rede elétrica dos EUA se tornará 95% descarbonizada até 2035 e 100% até 2050. O cenário mais eficaz na redução de emissões de carbono pressupõe que 30% das cargas energéticas de edifícios, 14% das cargas de transportes e 8% das cargas industriais serão eletrificadas e integradas à rede até 2050. Neste cenário, a participação da energia solar na oferta de eletricidade nos EUA aumentaria de 3% em 2020 para 40% em 2035 e 45% em 2050.

Capítulo 3: Contribuição da Energia Fotovoltaica na Transição Energética

O mercado de eletricidade tem procurado alcançar uma renovação do modelo baseado em fontes de energia provenientes de combustíveis fósseis para uma matriz mais limpa e pautada em energia sustentável, porém, com alto potencial para atendimento da progressiva demanda energética originada pelo crescimento da atividade econômica.

Analisando pela perspectiva de médio prazo, a viabilidade de crescimento da geração centralizada, como hidrelétricas e termelétricas, se mostra cada vez mais inviável devido ao impacto ambiental gerado em seu processo de construção e operação, não aceitos mais pela sociedade.

Uma solução atrativa para complementar a matriz energética atual se encontra na aplicação de sistemas de mini e microgeração distribuída, que visam atender os consumidores alocados próximos às instalações, contribuindo com o desenvolvimento econômico e de menor impacto ambiental para o planeta.

Algumas fontes energéticas usadas têm agravado a quantidade de emissão de poluentes que colaboram com o aquecimento global. De acordo com a NASA, o ano de 2020 foi 1,02 °C mais quente que os anos de 1951 a 1980, apontando um panorama perigoso para os próximos anos de existência da vida na Terra.

A América Latina pode contribuir de maneira positiva para um horizonte de mudanças expressivas no mercado global de energias sustentáveis. Segundo o professor universitário e pesquisador Thauan Santos:

“América Latina possui uma riqueza e diversidade de recursos energéticos; tem sua matriz energética menos dependente de combustíveis fósseis”

Essa afirmação retrata o cenário privilegiado da matriz energética disponível para colaborar com a redução de fontes poluentes e com elevada produção de gases do efeito estufa.

Antes de prosseguir com o objeto deste estudo, é necessário contextualizar as iniciativas globais de preservação do meio ambiente, que contextualizam e valorizam a tecnologia de geração fotovoltaica.

3.1. Transição Energética

A poluição produzida como resultado das ações do ser humano vem causando alterações climáticas em todo o globo, como o derretimento de geleiras, aumento do nível do mar, queimadas de grande escala, criação de desertos e danos permanentes e inimagináveis para a existência de vida na terra. A exata relação de causa x efeito ainda não conta com unanimidade nos meios acadêmicos, contudo, é intuitivo conceber que toda atividade humana tem repercussões no meio ambiente, em maior ou menor grau.

Buscando atingir uma mudança de cenário, diversos países se uniram na Conferência das Partes - COP21, em Paris, no ano de 2015. O objetivo principal deste encontro era atingir o objetivo de limitar o aquecimento global em 2°C até 2100.

Uma das alternativas escolhidas para concretizar tal missão foi a instauração da denominada **Transição Energética**, que é a migração para uma matriz energética mais limpa.

Oferecer energia confiável, barata e limpa para todos é um compromisso fomentado pela ONU a partir dos objetivos de desenvolvimento sustentável que visam garantir um futuro de acessibilidade a recursos vitais a todos e quaisquer indivíduos até o ano de 2030. Sendo eles 17 objetivos, o que retrata o compromisso de atendimento de recurso energético é o item 7: Energia Acessível e Limpa.

Figura 18 - Objetivos do Desenvolvimento Sustentável da ONU – Agenda 2030.



Fonte: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>.

Ao definir os conceitos de energia renovável e não renovável, é fundamental destacar que renovável não é o mesmo conceito de energia limpa.

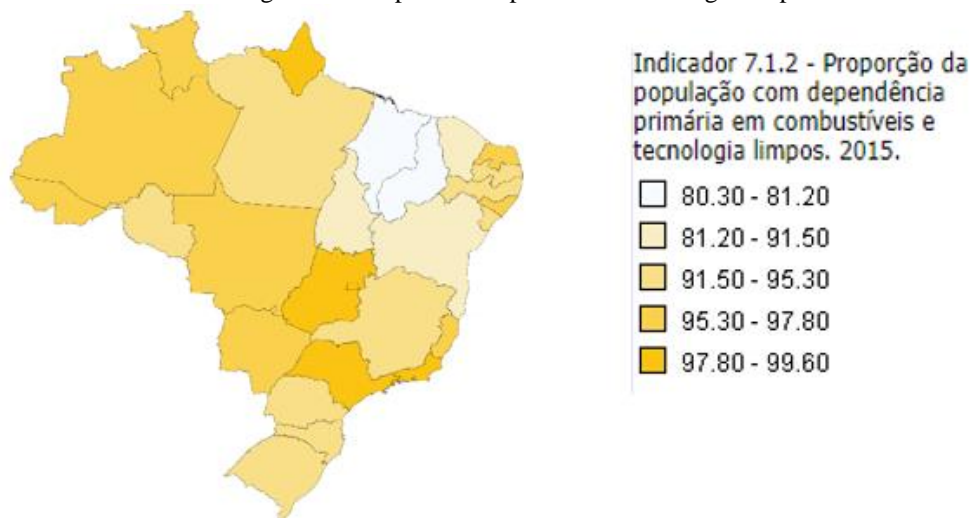
Para compreender melhor a diferença entre uma **fonte renovável** e uma **fonte limpa**, a Iberdrola, que é um dos líderes do setor energético global, e tem em como objetivo oferecer um modelo de negócio sustentável e ecológico, descreveu as diferenças entre ambas as fontes da seguinte maneira:

“Energia limpa e energia renovável são dois conceitos que costumam estar interligados, mas não têm o mesmo significado, sendo preciso apontar suas diferenças. A principal delas está na poluição. As energias renováveis, por surpreendente que possa parecer, podem causar poluição. Por exemplo, o biogás ou o biodiesel são fontes de energia renováveis por, entre outras coisas, terem suas origens naturais e inesgotáveis. Porém, diferentemente da maioria das energias renováveis, poluem com sua combustão, emitindo gases de efeito estufa. As energias limpas não poluem e, portanto, podemos afirmar que a maioria de fontes de energias renováveis também é limpa e vice-versa.”

Optar por energia limpa traz benefícios que irão garantir um futuro de melhor qualidade de vida e grandes oportunidades de desenvolvimento tecnológico na área de geração, abrindo o horizonte para novas fontes de energia que irão compor a matriz energética global, evitando futuros desabastecimentos por conta do crescente consumo no planeta.

No Brasil o acesso a fontes de energia e combustíveis limpos é uma realidade acessível, tendo como base a matriz energética brasileira que conta com fontes renováveis que atendem grande parte do território nacional como é apresentado na ilustração abaixo:

Figura 19 - Dependência primária com energia limpa.



Fonte: IBGE.

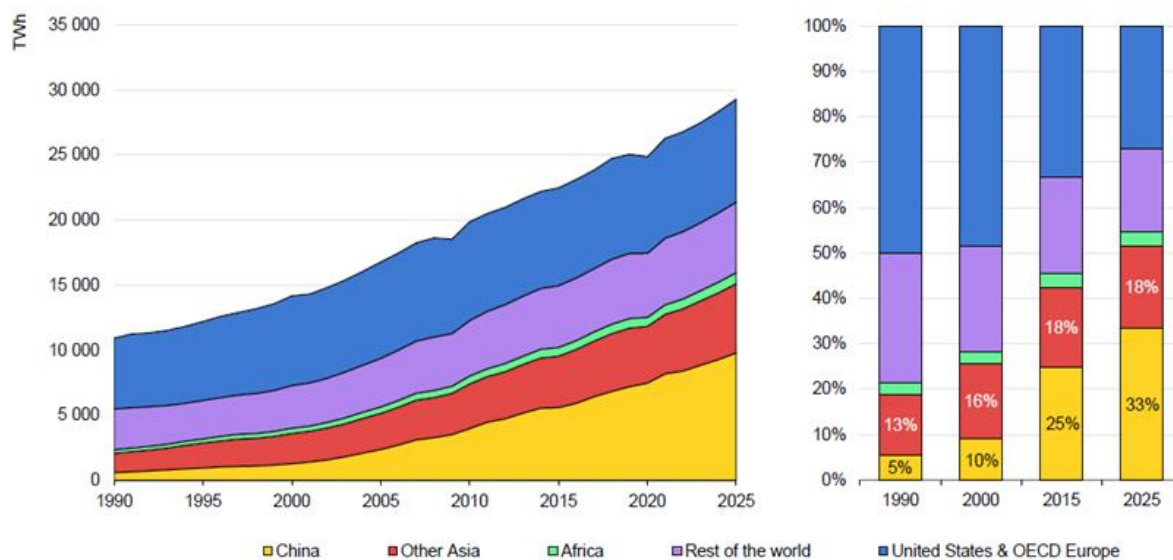
Considerando os dados apresentados, é possível chegar à conclusão de que ainda existem regiões com defasagem de acesso a fontes renováveis e limpas. Para superar os desafios de atendimento dessas regiões, optar pela solução fotovoltaica se mostra uma excelente alternativa.

Objetivando compreender a contribuição da tecnologia fotovoltaica à necessidade de energia, mas também à sua contribuição contra os ofensores do meio ambiente, é necessário caracterizar analiticamente o contexto desta fonte energética no mundo e no Brasil, por meio da evolução da matriz energética, objeto da seção seguinte.

3.2 Evolução da Matriz Energética

De acordo com o levantamento feito pela Agência Internacional de Energia - AIE (*International Energy Agency – IEA*), baseado no último relatório *Electricity Market Report 2023*, foi prevista uma expansão da demanda de energia elétrica no mundo para os próximos anos em linha com a taxa histórica recente.

Figura 20 - Evolução da demanda de energia elétrica mundial.



Fonte: International Energy Agency - IEA.

Avaliando os números apresentados no ano de 1990, em comparação a estimativa de 2025, houve o aumento de aproximadamente 20 mil TWh de demanda. Vale ressaltar onde esses valores são empregados, por exemplo, em 1990 a maior parte da energia era consumida nos Estados Unidos e Europa, sendo as maiores potências do mercado elétrico na época. Porém, no período de 2000 a 2015, o mercado Asiático apresentou avanços extraordinários no setor, representando futuramente metade da demanda total do mundo, no qual somente a China simboliza um terço desse montante.

De acordo com a AIE, no período de pandemia da COVID-19, a economia chinesa aplicou a política “zero-covid”, uma alternativa rigorosa para diminuir os números de contágio da doença que resultou no refreamento do consumo de energia, que representava um índice de 6,7% de crescimento no período anterior a pandemia, entre os anos de 2015-2019, para o valor de 3% no ano de 2022. Após a flexibilização das restrições pandêmicas, a revisão apresentada para o ano de 2023 foi de 5,2% com projeção de declínio em 2024 para 4,5%.

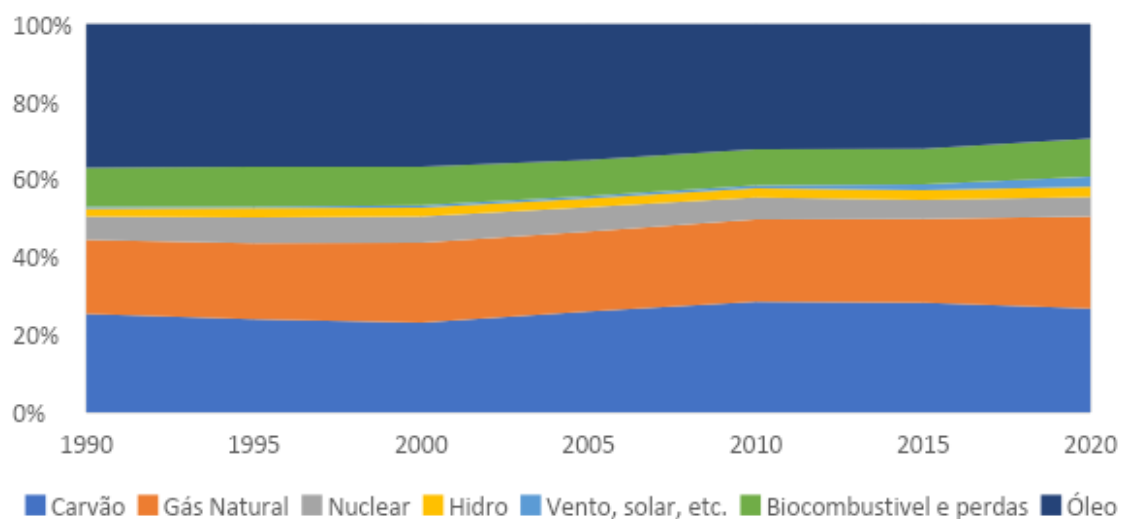
Cabe observar que a AIE publicou, em 2022, seu relatório anual denominado *World Energy Outlook* que apresenta os principais dados e tendências do mercado de energia no mundo. Cabe destacar o seguinte trecho, quando se observa uma parcela de somente 20% da eletricidade sobre o total dos energéticos utilizados no planeta:

“A eletricidade representa cerca de 20% do consumo final total de energia no mundo, mas sua participação dos serviços de energia é maior devido à sua eficiência. É fundamental para muitos aspectos da vida diária e torna-se mais importante à medida que a eletricidade se espalha para novos usos finais, como veículos elétricos e bombas de calor. O setor elétrico foi responsável por 59% de todo o carvão usado globalmente em 2021, juntamente com 34% do gás natural, 4% do petróleo, 52% de todas as renováveis e quase 100% da energia nuclear. Também foi responsável por mais de um terço de todas as emissões de CO2 relacionadas à energia em 2021.” (grifo nosso)

Porém, um novo fator importante que é apresentado pela AIE é a atual situação da Europa. Devido à guerra entre Rússia e Ucrânia, o crescimento econômico tem decaído e a inflação está subindo por conta dos efeitos prejudiciais causados pelo conflito. O aumento dos preços de combustíveis, inclusive devido à restrição imposta pela Comunidade Europeia ao gás natural da Rússia, tem prejudicado o custo da geração de energia, ocasionando crise no abastecimento em diversos países do continente europeu, dessa forma, abrindo portas para a entrada de tecnologias como a fotovoltaica e eólica, que tem potencial para abastecer energeticamente as regiões afetadas pela escassez de recurso.

Em resposta a esse contexto geopolítico, a Comunidade Europeia passou a intensificar grandemente a migração dos processos dependentes do gás natural para energia elétrica. Esse processo recente se denomina “eletrificação” da matriz energética. De acordo com as empresas de energia elétrica europeias, reunidas em junho/2023 na Itália, por ocasião da Conferência Internacional de Distribuição de Energia Elétrica – CIRED, se prevê que o mercado de eletricidade dobre de tamanho nos próximos 5 ou 6 anos e talvez triplique nos próximos 10 a 12 anos. Este movimento tem provocado profundas alterações no planejamento da matriz energética da Europa, que inclui a geração fotovoltaica.

Figura 21 - Evolução da parcela de geração eólica e solar no mundo.



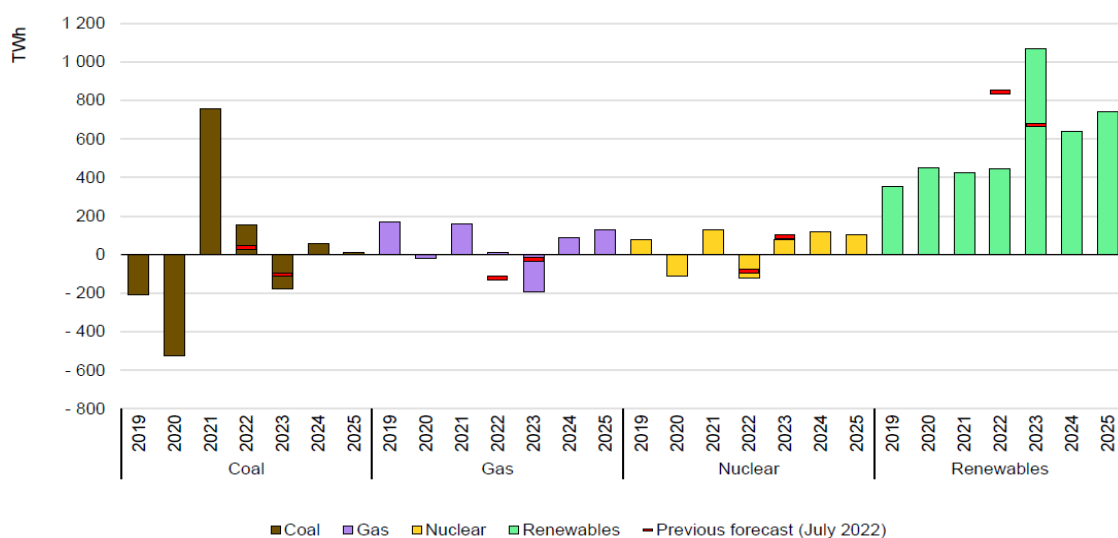
Fonte: AIE.

Para que possamos ter a devida compreensão da dimensão dos energéticos utilizados no planeta, é fundamental observarmos que a parcela das fontes de hidrocarbonetos (petróleo, carvão e gás natural) no mundo ainda são majoritários, como se pode observar na Figura acima.

Mesmo com o panorama negativo, a AIE aponta que em 2022 o crescimento da capacidade instalada de renováveis no mundo obteve um aumento de 11% em relação a 2021. A combinação das energias solar e eólica, apresentam o desenvolvimento de 18% para o mesmo período.

O gráfico a seguir contempla a projeção da redução da geração de combustíveis fósseis frente a crescente escolha pelas energias renováveis:

Figura 22 - O crescimento das energias renováveis reduz a geração de combustíveis fósseis de 2023 a 2025.



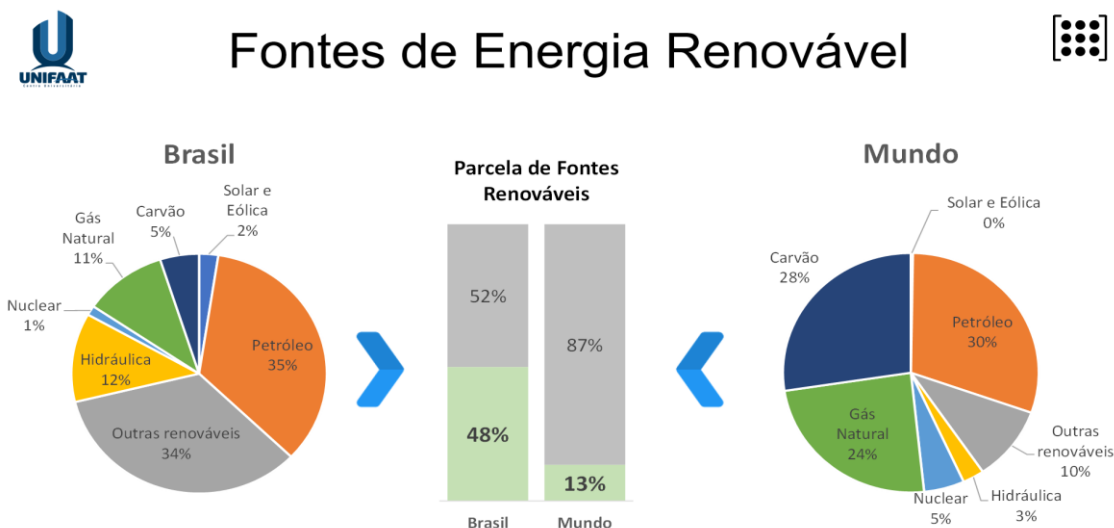
Fonte: AIE

Segundo a AIE, o investimento em tecnologia para aumento da capacidade instalada de geração fotovoltaica no mundo cresceu 20% em 2022, representando cerca de 320 bilhões de dólares em investimentos. Toda essa movimentação de capital representa aproximadamente 45% de todo o recurso usado em tecnologia para geração de eletricidade no mundo em 2022, aponta a agência.

Mesmo com todo o avanço alcançado nos últimos anos, o índice de aceitação para fontes renováveis no mundo, ainda apresenta uma evolução baixa quanto ao que se é planejado para o futuro.

Já no Brasil, o cenário muda. Segundo os dados da AIE, publicados pela EPE e reproduzidos na Figura abaixo, a parcela referente às energias consideradas renováveis no país (48%) é substancialmente maior que a média mundial (13%).

Figura 23 - Parcela de energia renovável no Brasil e no mundo.

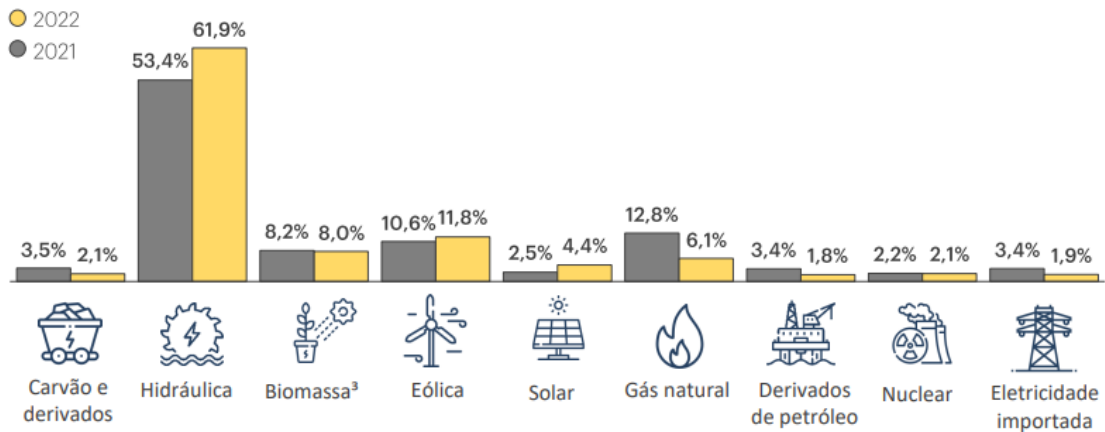


Fonte: IEA (dados 2020)

Fonte: Notas de Aula Geração, Transmissão e Geração UNIFAAT 2023.

Conforme os dados apresentados, parece correto afirmar que o Brasil tem contribuído positivamente com a transição energética, que contribui para a diminuição dos impactos ambientais. Isso parece se confirmar ao se observar a diversidade de fontes renováveis existentes na matriz brasileira, dispondo de abundância de recurso hídrico, solar, eólico e biomassa da cana.

Figura 24 - Matriz Elétrica brasileira.



Fonte 2: EPE.

A maior parcela de geração elétrica atualmente no Brasil, segundo a EPE, é a hidráulica, sendo 61,9% de toda a geração realizada no país. Ao se analisar detalhadamente, é notável o aumento da procura pela geração fotovoltaica no ano de 2022.

Tabela 1 - Geração de eletricidade no Brasil em 2022.

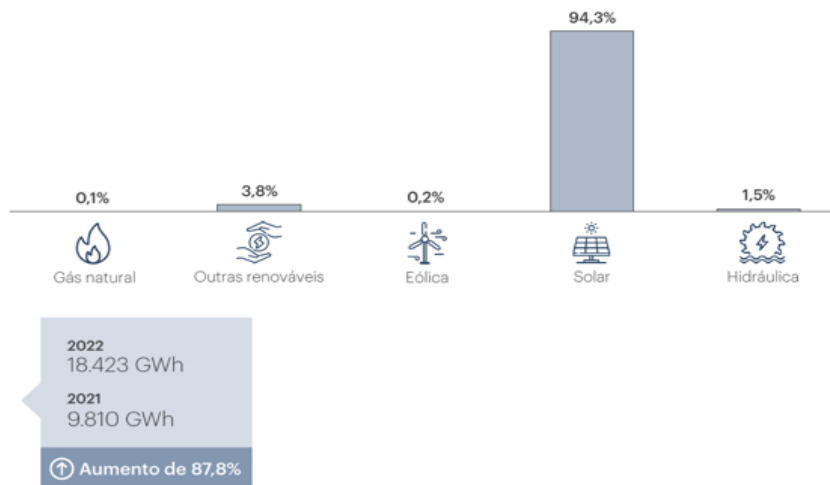
Fonte	2021	2022	Δ 22/21
Hidrelétrica	362.818	427.114	17,7%
Gás Natural	86.957	42.110	-51,6%
Eólica	72.286	81.632	12,9%
Biomassa ²	52.416	52.223	-0,4%
Nuclear	14.705	14.559	-1,0%
Carvão Vapor	17.585	7.988	-54,6%
Derivados do Petróleo ³	17.327	7.056	-59,3%
Solar Fotovoltaica	16.752	30.126	79,8%
Outras ⁴	15.263	14.364	-5,9%
Geração Total	656.109	677.173	3,2%

Fonte: EPE.

A EPE ressalta que a geração fotovoltaica registrou um crescimento em 2022 frente ao ano de 2021 de 87,8%, e ainda comenta a importância da tecnologia no cenário atual:

“A energia solar fotovoltaica representou 94,3% da MMGD em 2022, sendo novamente a principal fonte responsável pelo aumento registrado no micro e minigeração distribuída.”

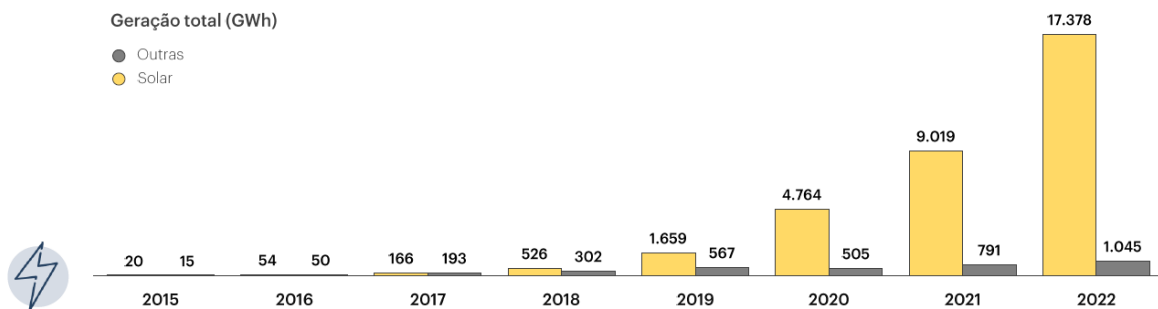
Figura 25 - Micro e Minigeração distribuída 2022.



Fonte: EPE.

Outro comentário realizado pela EPE, traz a projeção do desenvolvimento da fotovoltaica no Brasil, detalhando ano após ano a consolidação da tecnologia, afirmando que ela levou um longo prazo para atingir os números que representa hoje.

Figura 26 - Crescimento anual geração fotovoltaica.

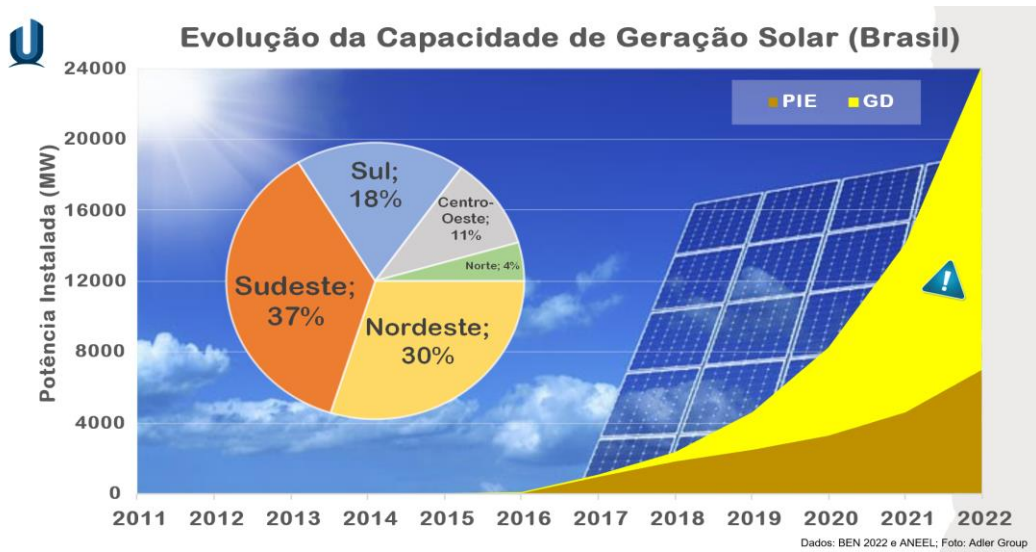


Fonte: EPE.

No final do relatório, a EPE comenta que mesmo com o crescimento das fontes hidráulica e térmica no ano de 2022, a maior parcela de capacidade instalada geração de pequeno porte no Brasil é proveniente da tecnologia fotovoltaica.

Considerando os registros anteriores, é patente que a energia proveniente da geração fotovoltaica no Brasil tem registrado uma evolução profunda, consistente e, principalmente, agressivamente crescente (exponencial), que pode, enfim, ser corroborada pelos números publicados no BEN 2022.

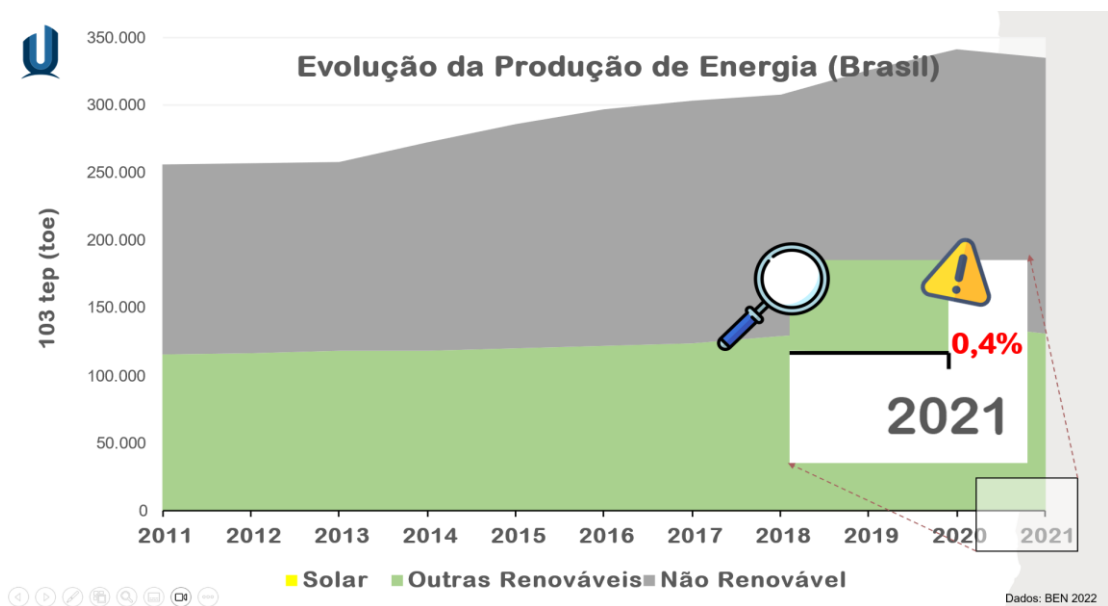
Figura 27 - Evolução da geração fotovoltaica no Brasil.



Fonte: Notas de Aula Geração, Transmissão e Geração UNIFAAT 2023.

Porém, ao contrário como eventualmente alguns poderiam esperar, o crescimento, de fato vertiginoso, ainda está longe de ser relevante, se considerarmos a matriz energética completa do Brasil. Segundo os dados do BEN 2022, o total de energia fotovoltaica do país em 2021 representava **0,4%** da produção total de energia. Tal fato demonstra que ainda há muito que percorrer para que esta fonte de energia passe a ser, de fato, impactante do ponto de vista ambiental.

Figura 28 - Evolução da geração fotovoltaica no Brasil.



Fonte: Notas de Aula Geração, Transmissão e Geração UNIFAAT 2023.

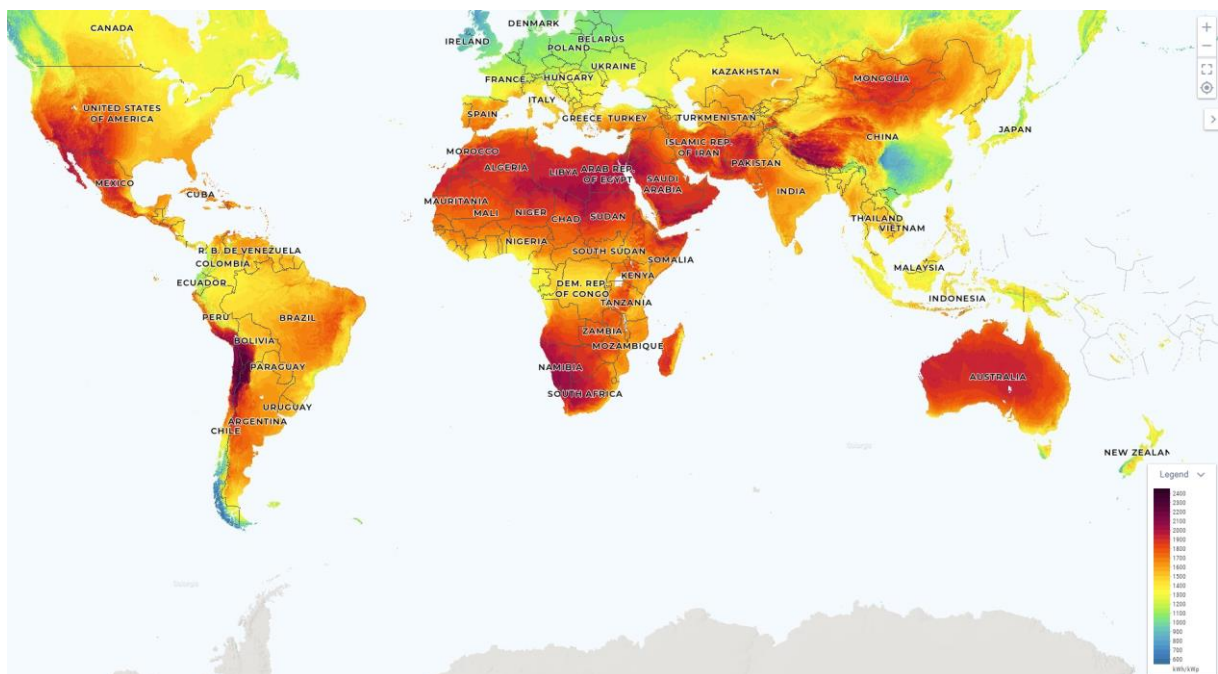
3.3 Potencial de Geração Fotovoltaica

Como comentado nas seções iniciais deste trabalho, praticamente toda a energia disponível no planeta advém, direta ou indiretamente, da energia do Sol. Neste sentido, é de se esperar que o potencial para geração de energia elétrica deva ser imenso, dada a extensão da Terra, ainda que minorada pela área ocupada pelos oceanos e pelo período diurno, quando o local é submetido à radiação solar direta.

A figura seguinte ilustra, na forma de um mapa de calor, os locais que apresentam um maior ou menor potencial de geração fotovoltaica. Cabe comentar que o potencial é influenciado, dentre outros, pela longitude do ponto geométrico da Terra (quanto mais perto do Equador, maior a incidência solar média anual), mas também pela maior ou menor presença de nuvens.

Por exemplo, apesar da região amazônica estar próxima da linha do Equador, que poderia se candidatar com um dos melhores locais para geração fotovoltaica, é na prática, uma região ruim devido à grande incidência de nuvens que cobrem a luz solar. Como se pode observar, a maior ou menor presença de nuvens (muito intensas nas matas equatoriais e tropicais) parecem prevalecer sobre a longitude.

Figura 29 - Atlas solar.



Fonte: Global Solar Atlas.

Portanto, como regra geral, por inspeção do mapa solarimétrico, é possível concluir que as áreas desertificadas do mundo apresentam os melhores potenciais de geração fotovoltaica, a saber:

deserto do Sahara, continente australiano, oriente médio, deserto da Namíbia, deserto do Atacama e deserto de Gobi. Infelizmente, apesar do ótimo potencial dessas áreas, são exatamente pelas condições difíceis da sobrevivência humana, que a demanda de energia nessas regiões é muito baixa. O ideal seria que os melhores pontos fossem localizados ou próximos das regiões de maior consumo. Essas áreas, com potencial intermediário, estão na região sudoeste dos EUA, península ibérica, algumas áreas da Austrália, Índia e Brasil.

Finalmente, cabe registrar que a eficiência da geração, conforme visto anteriormente, também varia com relação à temperatura. Adicionalmente, como a atmosfera filtra uma parcela da energia irradiante, quanto maior a altitude do local, mais a quantidade de energia solar disponível. Tais parâmetros contribuem para que locais como o deserto do Atacama seja um dos melhores locais para geração fotovoltaica no mundo, contudo, longe do mercado consumidor.

3.4 Política Pública e Regulamentação

A energia fotovoltaica emergiu como uma alternativa fundamental para atender às crescentes demandas de energia de forma sustentável e reduzir a dependência de fontes de energia não renovável. O potencial da energia solar para mitigar as mudanças climáticas e fornecer uma fonte de energia limpa e acessível tem incentivado governos em todo o mundo a desenvolver políticas públicas específicas para promover essa tecnologia.

Mesmo que se apresentando como uma alternativa tecnológica atualmente competitiva, com preços próximos das demais fontes de energia elétrica, a teoria econômica da intervenção indica a necessidade de criação de incentivos para que a tecnologia seja inserida com maior velocidade no mercado.

Os incentivos fazem sentido econômico a partir do momento que se admite que as condições do mercado sejam insuficientes para quebrar a barreira do desenvolvimento tecnológico. Evidentemente, há também uma certa percepção dos formadores da política pública se aquela tecnologia tem o potencial de ser viável no futuro.

Conclui-se que os mecanismos de incentivos econômicos para novas tecnologias devem ocorrer no período de pesquisa e inserção do mercado, até o momento que passe a ser competitiva.

Uma das formas mais comuns de promover o avanço de uma tecnologia no mercado é a adoção pelos governos de incentivos financeiros, como subsídios, créditos fiscais (no Brasil, redução

do IPI para importação e diminuição do ICMS) e financiamentos de baixo custo. Tais medidas reduzem o investimento inicial necessário e estimula a adoção da tecnologia.

No caso particular a geração solar de pequeno porte, muitos países – inclusive o Brasil – implementaram tarifas de alimentação, também conhecidas como *Net Metering*, que permitem que os proprietários de sistemas solares contabilizem o excesso de eletricidade que produzem de volta à rede elétrica e recebam créditos em suas contas de energia. Isso torna a produção de eletricidade solar mais atraente, pois os proprietários podem reduzir suas contas de energia ou até mesmo obter lucro com a geração solar.

Muitos governos estabelecem metas ambiciosas para a participação de fontes renováveis, como a energia solar, em sua matriz energética. Essas metas incentivam o investimento em infraestrutura solar e a pesquisa e desenvolvimento de tecnologias solares mais eficientes.

Alguns países estabelecem padrões de energia limpa que exigem que uma certa porcentagem da eletricidade gerada provenha de fontes renováveis. Isso cria um mercado seguro para a energia solar e impulsiona a demanda por essa tecnologia.

Investimentos em pesquisa, desenvolvimento e infraestrutura são fundamentais para o avanço da energia solar. Isso inclui aprimorar a eficiência dos painéis solares, desenvolver tecnologias de armazenamento de energia e estabelecer regulamentos que facilitem a conexão de sistemas solares à rede.

As políticas públicas frequentemente incluem programas de conscientização e educação para informar o público sobre os benefícios da energia solar e como adotá-la. Isso estimula a demanda e capacita os consumidores a tomarem decisões informadas.

Regulamentações sólidas garantem que os sistemas solares atendam a padrões de qualidade e segurança. Isso protege os consumidores e fortalece a confiança na tecnologia solar.

As políticas públicas desempenham um papel crucial na aceleração da transição para uma matriz energética mais sustentável, com a energia solar desempenhando um papel significativo nesse processo. Ao oferecer incentivos, estabelecer metas ambiciosas e promover o desenvolvimento tecnológico, os governos podem catalisar o crescimento da energia solar e contribuir para a redução das emissões de carbono e a criação de um futuro mais limpo e sustentável.

3.5 Aspectos Positivos e Negativos

A pesquisa bibliográfica indicou muitos textos que enfatizam os aspectos positivos da geração fotovoltaica, em geral, atrelados à produção limpa de energia. Em alguns textos e formadores de opinião, há um certo inconformismo pela adoção de outras fontes de energia, considerando as vantagens inquestionáveis da energia solar.

No entanto, a pesquisa também indicou alguns pontos negativos, ainda que registrados em uma escala muito menor.

Dada a relevância do tema, neste item estão relacionados os aspectos positivos e negativos da geração fotovoltaica, ainda que seja possível que vários posicionamentos possam ser questionados e não contam com a unanimidade da comunidade científica e de mercado. Assim, a caracterização a seguir descrita não tem o objetivo de ser conclusiva, algumas podem ser consideradas questionáveis. Mesmo assim, em alguns momentos, foram registradas algumas opiniões dos autores.

3.5.1 Aspectos Positivos

Os aspectos positivos citados na literatura especializada são identificados e comentados a seguir.

1. **Redução de custos de energia:** do ponto de vista do consumidor, a geração fotovoltaica constitui uma opção para redução do custo da energia elétrica; no caso do segmento residencial, a economia aumenta o poder de compra e estimula o consumo em outras áreas da economia, criando um círculo virtuoso da economia;
2. **Criação de empregos:** a indústria de energia solar tem experimentado um crescimento significativo, criando empregos nas diversas etapas da cadeia, tais como projeto, instalação, manutenção, fabricação dos equipamentos; isso não apenas gera oportunidades de emprego, mas também contribui para o crescimento econômico como um todo;
3. **Estímulo à indústria local:** muitos países incentivam a produção de energia solar por meio de políticas de apoio, como incentivos fiscais, subsídios e tarifas; esses incentivos intensificam a produção local de equipamentos e impulsionam a economia regional, uma vez que o dinheiro gasto em sistemas solares permanece no país;

4. **Redução da carga sobre a rede elétrica:** a energia solar residencial pode, em alguns casos, aliviar a pressão sobre as redes elétricas tradicionais, especialmente durante os picos de demanda; caso ocorra, pode reduzir a necessidade de investimentos em infraestrutura, economizando recursos e minorando impactos tarifários; esse aspecto é muito discutido entre os especialistas, não sendo identificada unanimidade de opinião; entende-se que a geração fotovoltaica pode atenuar a necessidade da rede elétrica, caso o pico de consumo coincida com a radiação solar, que não é comum, dado que, no Brasil, ainda prepondera a carga do chuveiro elétrica no início da noite; adicionalmente, é importante lembrar que, apesar de, em alguns casos, a incidência solar possa ser coincidente com a ponta do sistema, a produção de energia não é certa devido à possibilidade de dias nublados; nesses casos, a rede precisa ter a capacidade de transmissão e distribuição sem contar com a geração fotovoltaica;
5. **Valorização imobiliária:** os imóveis equipados com sistemas de energia solar tendem a se valorizar no mercado imobiliário, uma vez que os compradores valorizam a economia de energia e os benefícios ambientais; isso pode ser um incentivo financeiro para os proprietários, além de estimular o setor imobiliário;
6. **Redução das emissões de carbono:** as instalações de energia solar residencial tem um potencial para reduzir as emissões de gases de efeito estufa, uma vez que a conversão de energia não produz gases nocivos ao meio ambiente, o que pode levar a economias significativas no futuro em termos de custos relacionados às mudanças climáticas, como desastres naturais e problemas de saúde; porém, é fundamental lembrar que, nos casos onde as placas solares sejam fabricadas em países com predominância de geração não renovável, o custo ambiental para produção das placas solares diminuem o efeito global esperado na qualidade de energia limpa;
7. **Impulsionamento do setor de inovação:** a demanda por tecnologias mais eficientes e acessíveis na área de energia solar tem incentivado a pesquisa e o desenvolvimento de novas soluções, criando oportunidades de negócios e inovação tecnológica; a dinamização do mercado é positiva, mesmo que possa repercutir indiretamente em outros segmentos;
8. **Sustentabilidade Ambiental:** a energia solar é uma das fontes de energia mais limpas disponíveis, pois não emite poluentes atmosféricos ou gases de efeito estufa; diretamente se observa um impacto positivo em nossa qualidade do ar e ajuda a

combater as mudanças climáticas; um exemplo notável é a cidade de Adelaide, na Austrália, que possui uma proporção significativa de casas com painéis solares, contribuindo para a redução das emissões de carbono na região; porém, cabe atentar que a matéria prima mais comum das placas atuais é o silício, cuja extração e tratamento constituem atividades com alto potencial negativo ao meio ambiente, a depender de como é o processo adotado;

9. **Redução da Dependência de Combustíveis Fósseis:** a disseminação de painéis solares permite aos proprietários reduzirem sua dependência de combustíveis fósseis, como carvão, gás natural e petróleo; isso não apenas contribui para a segurança energética, mas também reduz a volatilidade dos preços dos combustíveis; por exemplo, no Japão, após o desastre nuclear de Fukushima em 2011, houve um aumento significativo na adoção de energia solar para diversificar a matriz energética e reduzir a dependência da energia nuclear;
10. **Incentivos e Subsídios Fiscais:** muitos governos oferecem incentivos e subsídios fiscais para promover a instalação de sistemas de energia solar; do ponto de vista do consumidor, os incentivos representam redução de custos; por exemplo, na Alemanha, o *feed-in tariff* (tarifa de alimentação) foi um incentivo-chave que impulsionou a adoção massiva de energia solar;
11. **Durabilidade e Baixa Manutenção:** os painéis solares são projetados para serem duráveis e requerem pouca manutenção; não contém peças móveis e nem engrenagem mecânicas; em muitos casos, os fornecedores contam com garantias de 25 anos ou mais; isso significa que os proprietários podem contar com um sistema confiável de longo prazo; por exemplo, a cidade de Dubai, nos Emirados Árabes Unidos, tem um ambiente extremamente quente e árido, mas muitos sistemas de energia solar instalados na região continuam a funcionar eficazmente; um contraponto é que a intensificação dos eventos climáticos alterem o perfil estatísticos de ocorrências e possam aumentar em demasiado a despesa de seguro;
12. **Acesso a Energia em Áreas Remotas:** a energia solar é uma solução prática para fornecer eletricidade em áreas remotas ou *off-grid*, onde a expansão das redes elétricas tradicionais é difícil ou cara; exemplo disso é o uso de energia solar em aldeias remotas da Índia, onde sistemas solares independentes fornecem eletricidade confiável para as

comunidades; evidentemente, a operação e manutenção desses sistemas irá demandar uma mão-de-obra mais especializada e local;

13. **Energia Autossuficiente durante Apagões:** a instalação de um sistema de energia solar com armazenamento de bateria pode garantir uma fonte de energia confiável durante apagões ou interrupções na rede elétrica; isso é particularmente valioso em áreas propensas a desastres naturais; um exemplo notável é a Ilha de Porto Rico, que foi devastada pelo furacão Maria em 2017; após o desastre, muitos residentes adotaram sistemas solares com baterias para obter independência energética; neste caso, é necessário prudência e comparar a solução frente às demais possibilidades tecnológicas, vis-a-vis o seu custo atrelado;
14. **Redução das Perdas de Transmissão:** a geração de eletricidade solar na carga tem o potencial de reduzir a necessidade de transporte de eletricidade a longas distâncias, minimizando as perdas de energia que ocorrem nas redes de transmissão; o benefício ocorre nas situações que a geração solar venha a coincidir com o momento de maior consumo, o que ainda não é comum no Brasil; um exemplo positivo foi registrado no Japão, que enfrenta desafios geográficos significativos, tornando a produção de eletricidade local uma opção atraente;
15. **Contribuição para a Resiliência da Rede:** a geração distribuída de energia solar pode fortalecer a resiliência da rede elétrica em caso de eventos extremos, distribuindo a produção de eletricidade em várias fontes; essa opção reduz a vulnerabilidade da rede a interrupções e torna a infraestrutura mais robusta; nos Estados Unidos, em particular na Califórnia, têm adotado essa abordagem para fortalecer a rede elétrica; por óbvio, essa vantagem requer boa capacidade operacional e de gestão da rede;
16. **Benefícios para o Meio Ambiente e a Saúde:** além da redução das emissões de carbono, a energia solar ajuda a preservar ecossistemas e a melhorar a saúde pública, reduzindo a poluição do ar resultante da queima de combustíveis fósseis; um exemplo notável é a China, que enfrenta desafios significativos relacionados à qualidade do ar; o governo chinês tem incentivado a adoção de energia solar para combater a poluição do ar e reduzir os impactos na saúde; contudo, o mesmo país que sofre com uma matriz com alta participação de carvão mineral, é um dos países que mais produzem placas solares a partir da energia não renovável, prejudicando o potencial limpo da fotovoltaica;

17. **Flexibilidade e Escalabilidade:** os sistemas de energia solar são flexíveis e escaláveis, o que significa que podem ser personalizados para atender às necessidades específicas de cada instalação; proprietários podem optar por instalar sistemas de pequena, média ou grande escala, dependendo de seu consumo de energia; isso permite a adaptação aos requisitos individuais de diferentes residências;
18. **Redução do Desperdício de Recursos Hídricos:** a geração de eletricidade a partir do sol requer muito menos água em comparação com fontes de energia tradicionais, como usinas de energia a carvão ou nucleares; isso é particularmente importante em regiões com escassez de água; um exemplo notável é o Estado da Califórnia, nos EUA, que sofre de secas frequentes e adotou a energia solar como parte de seus esforços para preservar recursos hídricos;
19. **Estabilidade de Preços a Longo Prazo:** a energia solar pode oferecer previsibilidade de custos a longo prazo, uma vez que a luz solar é gratuita e abundante; no caso de autossuficiência, os proprietários podem se blindar contra aumentos imprevisíveis nos preços da eletricidade; por exemplo, a Alemanha implementou políticas de apoio à energia solar para controlar os custos da eletricidade;
20. **Impacto Social Positivo:** a energia solar também pode ter um impacto social positivo ao proporcionar eletricidade a comunidades que não tinham acesso anteriormente, principalmente em áreas rurais de países em desenvolvimento; isso melhora a qualidade de vida e as oportunidades econômicas para as pessoas que anteriormente não tinham eletricidade confiável;
21. **Contribuição para Metas de Energia Limpa e Sustentabilidade Global:** a energia solar é um componente essencial na luta global contra as mudanças climáticas; a adoção generalizada de energia solar contribui para o cumprimento de metas de energia limpa e sustentabilidade em níveis nacionais e internacionais, como o Acordo de Paris, desde que não agridam o meio ambiente na extração das matérias primas e utilizem energia renovável para a fabricação dos equipamentos;

3.5.2 Aspectos Negativos

Os aspectos negativos citados na literatura especializada são identificados e comentados a seguir.

1. **Investimento Inicial Elevado:** do ponto de vista do investidor, a instalação de um sistema solar pode ter um custo inicial significativo, incluindo painéis, inversores e a mão de obra; mesmo que haja economia a longo prazo, o investimento inicial pode ser um obstáculo; exemplo: um sistema solar residencial nos EUA pode custar dezenas de milhares de dólares;
2. **Intermitência Solar:** a geração de eletricidade solar depende da luz solar, o que significa que a produção é intermitente; à noite ou em dias nublados, a produção de eletricidade é reduzida; exemplo: a Alemanha, líder em energia solar, enfrenta limitações devido à sua localização geográfica com muitos dias nublados;
3. **Armazenamento de Energia:** para superar a intermitência, sistemas de armazenamento de bateria são frequentemente necessários, o que aumenta os custos; exemplo: o custo das baterias de íon-lítio pode representar uma parcela significativa do investimento total;
4. **Espaço Requerido:** a instalação de painéis solares requer espaço adequado; residências com espaços limitados podem não ter espaço suficiente para um sistema solar que atenda à sua carga; exemplo: apartamentos e casas com telhados pequenos.
5. **Impacto Visual:** alguns consideram que os painéis solares afetam a estética de edifícios ou paisagens.; isso pode ser uma preocupação em áreas com regulamentações estritas de projeto; exemplo: a resistência de algumas comunidades à instalação de painéis solares visíveis nos telhados;
6. **Reciclagem de Painéis:** a reciclagem de painéis solares é um desafio em termos de logística e custos; exemplo: a necessidade de desenvolver métodos eficazes de reciclagem para evitar a acumulação de resíduos; não foram encontrados registros sobre reciclagem em larga escala;
7. **Localização Geográfica:** a produtividade dos painéis solares varia dependendo da localização geográfica; regiões com menos exposição solar ou maior temperatura têm menor produção de eletricidade; exemplo: comparando o desempenho de painéis solares em regiões tropicais com regiões mais ao norte;
8. **Dependência de Subsídios:** em alguns casos, a instalação de sistemas solares depende de subsídios e incentivos fiscais para ser financeiramente viável; exemplo: o setor solar dos EUA historicamente dependeu de subsídios federais;

9. **Vida Útil dos Componentes:** os componentes de sistemas solares têm uma vida útil limitada e precisam de substituição eventual; manutenção é difícil no Brasil; exemplo: inversores solares tipicamente têm uma vida útil de 10 a 15 anos, que, às vezes, já estão soldadas às placas solares;
10. **Impactos Ambientais da Fabricação:** a produção de painéis solares envolve a emissão de gases de efeito estufa e impactos ambientais, principalmente em fábricas de painéis solares em países em desenvolvimento; exemplo: os desafios ambientais associados à produção de painéis solares na China;
11. **Toxicidade dos Materiais:** alguns materiais usados em painéis solares, como o cádmio em painéis de película fina, podem ser tóxicos e requerem manuseio e eliminação adequados; exemplo: a preocupação com a toxicidade do cádmio em painéis solares de película fina;
12. **Complexidade Técnica:** a instalação e manutenção de sistemas solares podem ser tecnicamente complexas, exigindo conhecimento especializado; exemplo: a necessidade de técnicos treinados para instalação e manutenção;
13. **Desafios de Integração na Rede:** a integração de sistemas solares na rede elétrica existente pode ser desafiadora devido a questões como a estabilidade da tensão; exemplo: desafios de integração de sistemas solares em redes de países em desenvolvimento.
14. **Impacto na Biodiversidade:** a construção de grandes usinas solares em áreas naturais pode ter impactos negativos na biodiversidade local; exemplo: o impacto de grandes fazendas solares no deserto de Mojave, na Califórnia;
15. **Requer Manutenção Regular:** os sistemas solares requerem manutenção periódica, incluindo limpeza e monitoramento; exemplo: a necessidade de limpar regularmente os painéis solares para manter a eficiência;
16. **Disponibilidade de Tecnologia Avançada:** a implementação de tecnologias avançadas, como células solares de terceira geração, pode ser limitada devido à disponibilidade e custos; exemplo: desafios de adoção de tecnologias inovadoras em áreas com recursos limitados;

17. **Sensibilidade das placas:** os painéis de silício são estruturas relativamente delicadas, suscetíveis à quebras que levariam à sua inutilização; tal fato passa a ser crítico quando consideramos uma vida útil elevada; exemplo: chuva de granizo;
18. **Furtos:** em países que contam com uma alta complexidade social, como é o caso do Brasil, os equipamentos que podem custar dezenas de milhares de reais, dispostos em área desprotegida e aberta, passam a ser objeto de furtos.

Capítulo 4: Modelo de Geração Distribuída

Este capítulo resume o modelo de negócio atualmente vigente no Brasil, que foi fundamentado na legislação e regulação setorial. O modelo vigente é resultado da visão que o formador de política pública e o regulador setorial desenvolveram para tratar a tecnologia de geração fotovoltaica.

Os contornos das regras de negócios no país afetam diretamente a atratividade e, conseqüentemente, a evolução e penetração desta tecnologia no mercado brasileiro.

4.1 Modalidades de Geração Fotovoltaica

4.1.1 Produtor Independente de Energia

O artigo 11 da **Lei nº 9.074**, de 7 de julho de 1995, que estabelece as normas para outorga e prorrogações das concessões e permissões do serviço público, caracterizou juridicamente a pessoa física ou jurídica na condição de geração de energia elétrica como “produtor independente de energia elétrica”:

Art. 11. Considera-se produtor independente de energia elétrica a pessoa jurídica ou empresas reunidas em consórcio que recebam concessão ou autorização do poder concedente, para produzir energia elétrica destinada ao comércio de toda ou parte da energia produzida, por sua conta e risco.

Parágrafo único. O Produtor Independente de energia elétrica estará sujeito às regras de comercialização regulada ou livre, atendido ao disposto nesta Lei, na legislação em vigor e no contrato de concessão ou no ato de autorização, sendo-lhe assegurado o direito de acesso à rede das concessionárias e permissionárias do serviço público de distribuição e das concessionárias do serviço público de transmissão. (Redação dada pela Lei nº 11.943, de 2009)

De modo genérico, sem especificar fonte de energia ou potência, o gerador de energia é caracterizado como “produtor independente de energia” ou PIE.

Costuma-se dizer no setor elétrico, que o gerador fotovoltaico, caso caracterizado como PIE, é uma instalação que explora a produção de energia elétrica na modalidade “centralizada”. Em geral, os geradores fotovoltaicos de maior potência são PIE.

Mais adiante, em seu art. 12, a lei estabelece que a energia produzida é vendida para um concessionário público, consumidor livre, consumidores integrantes de complexo industrial ou

comercial para os quais o PIE também forneça vapor de processo oriundo de cogeração, conjunto de consumidores em condições ajustadas com o concessionário de distribuição ou consumidor que não tenha sido atendido em até 180 dias da solicitação pela distribuidora local. O direito de explorar o serviço ocorre mediante concessão, alcançada por meio de um processo competitivo de leilão, dentre outras regras, de menor preço ofertado pela energia gerada.

4.1.2 Gerador Distribuído

Já a **Lei nº 9.427**, de 26 de dezembro de 1996, que institui a Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL e disciplina o regime de concessões de serviços públicos de energia elétrica, em seu art. 26, § 5º, explicita que os aproveitamentos com base em fonte solar, dentre outros, cuja potência injetada nos sistemas de transmissão ou distribuição seja menor que 50.000 kW, poderão comercializar energia com consumidor livre.

Portanto, o empreendedor que tenha viabilizado a produção de energia fotovoltaica por meio de um leilão, explorado por meio de um contrato de concessão, cuja energia é vendida para uma distribuidora, consumidor livre ou outros agentes permitidos no regulamento, não são caracterizados como “geração distribuída”.

Por outro lado, o art. 14 do **Decreto 5.163**, de 30 de julho de 2004, pela primeira vez explicitou a definição de “geração distribuída”:

Art. 14. Para os fins deste Decreto, considera-se geração distribuída a produção de energia elétrica proveniente de empreendimentos de agentes concessionários, permissionários ou autorizados, incluindo aqueles tratados pelo art. 8º da Lei nº 9.074, de 1995, conectados diretamente no sistema elétrico de distribuição do comprador, exceto aquela proveniente de empreendimento:

I - hidrelétrico com capacidade instalada superior a 30 MW; e

II - termelétrico, inclusive de cogeração, com eficiência energética inferior a setenta e cinco por cento, conforme regulação da ANEEL, a ser estabelecida até dezembro de 2004.

Cabe observar que a modalidade aqui denominada de “geração distribuída”, ainda que na tecnologia fotovoltaica, difere do PIE por estar conectado no sistema de distribuição do comprador.

Mais adiante, em seu art. 15, o Decreto diferencia geração distribuída de PIE pelo fato de ser constituída por meio de uma chamada pública da distribuidora e não de um leilão promovido pelo Governo Federal. Ou seja, o PIE é resultado da necessidade de expansão da geração de energia nacional e a geração distribuída é uma opção de compra que a distribuidora dispõe para

complementar seus contratos de compra para atender ao seu mercado consumidor, limitado a 10% de sua carga.

4.1.3 Micro e Minigerador Distribuído

Na contramão do processo regulamentar “ordinário”, a ANEEL publicou a **Resolução Normativa nº 482**, de 17 de abril de 2012, incorporada posteriormente à Resolução Normativa 1.000, de 7 de dezembro de 2021, estabelecendo, como norma infralegal, os termos “microgeração distribuída” e “minigeração distribuída”:

Art. 2º Para efeitos desta Resolução, ficam adotadas as seguintes definições:

I - microgeração distribuída: central geradora de energia elétrica, com potência instalada

menor ou igual a 100 kW e que utilize fontes com base em energia hidráulica, solar, eólica, biomassa ou cogeração qualificada, conforme regulamentação da ANEEL, conectada na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras;

II - minigeração distribuída: central geradora de energia elétrica, com potência instalada

superior a 100 kW e menor ou igual a 1 MW para fontes com base em energia hidráulica, solar, eólica, biomassa ou cogeração qualificada, conforme regulamentação da ANEEL, conectada na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras;

III - minigeração distribuída: central geradora de energia elétrica, com potência instalada superior a 75 kW e menor ou igual a 3 MW para fontes hídricas ou menor ou igual a 5 MW para cogeração qualificada, conforme regulamentação da ANEEL, ou para as demais fontes renováveis de energia elétrica, conectada na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras; (Redação dada pela REN ANEEL 687, de 24.11.2015.)

Apesar das definições supra não se caracterizarem formalmente como “geração distribuída”, o regulamento administrativo, em outros momentos, se refere “microgeração distribuída” e “minigeração distribuída” como “geração distribuída”, causando uma certa confusão com a caracterização definida por meio do Decreto 5.163/2004.

Aqui, a ANEEL definiu que o microgerador e minigerador são instalações de produção de energia elétrica conectadas diretamente nas instalações consumidoras. Já o PIE se conecta ao sistema de transmissão (às vezes no sistema de distribuição) e o gerador distribuído no sistema de distribuição.

Posteriormente, quase 10 anos depois, foi sancionada a **Lei 14.300**, de 6 de janeiro de 2022, que instituiu o marco legal da microgeração e minigeração distribuída, que reexplicita a definição feita pela ANEEL:

Art. 1º Para fins e efeitos desta Lei, são adotadas as seguintes definições:

XI - microgeração distribuída: central geradora de energia elétrica, com potência instalada, em corrente alternada, menor ou igual a 75 kW (setenta e cinco quilowatts) e que utilize cogeração qualificada, conforme regulamentação da Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel), ou fontes renováveis de energia elétrica, conectada na rede de distribuição de energia elétrica por meio de instalações de unidades consumidoras;

XIII - minigeração distribuída: central geradora de energia elétrica renovável ou de cogeração qualificada que não se classifica como microgeração distribuída e que possua potência instalada, em corrente alternada, maior que 75 kW (setenta e cinco quilowatts), menor ou igual a 5 MW (cinco megawatts) para as fontes despacháveis e menor ou igual a 3 MW (três megawatts) para as fontes não despacháveis, conforme regulamentação da Aneel, conectada na rede de distribuição de energia elétrica por meio de instalações de unidades consumidoras;

Como resumo desta pesquisa, a Tabela abaixo apresenta os principais condicionantes das três modalidades de geração fotovoltaica possíveis no Brasil, de acordo com a legislação e regulamentação setorial vigente.

Tabela 2 - Modalidades de Produção de Energia Fotovoltaica.

	Produtor Independente	Gerador Distribuído	Microgerador e Minigerador Distribuído
Fundamento Legal e Regulatório	Lei 9.074/1995	Decreto 5.163/2004	Lei 14.300/2022 e REN 1000/2021
Conexão	Transmissão e Distribuição	Distribuição	Unidade Consumidora
Limitações	n/a	Até 10% da carga da distribuidora	Até 75 kW para microgerador e até 5 MW para minigerador

Fonte: ANEEL

Este trabalho avalia a terceira modalidade, ou seja, de microgeração e minigeração distribuída, mesmo que, eventualmente, alguns aspectos possam ser extrapolados para as demais modalidades.

4.2 Atributos da Micro e Minigeração Distribuída

Este item apresenta algumas características do modelo de microgeração e minigeração distribuída, estabelecidas na Lei 14.300/2022 e/ou na REN 1000/2021.

4.2.1 Fontes de Energia

Em primeiro lugar, esta modalidade privilegia as formas de geração a partir de fontes renováveis, dentre elas, da energia solar, objeto deste estudo, mas também estendido à energia eólica, hidráulica, biomassa e cogeração qualificada.

4.2.2 Sistema de Compensação de Energia

O tratamento da energia produzida, diferentemente das demais modalidades que comercializam ou vendem a energia gerada, o microgerador ou minigerador, na condição de titular de uma unidade consumidora, não comercializam e nem vendem, mas usam parte da energia para seu consumo próprio e o eventual excedente é compensado nos meses nos quais o consumo seja maior que a geração ou repassa para outras unidades consumidoras sob sua titularidade ou outras titularidades. O mecanismo de tratamento do excedente produzido é denominado de “Sistema de Compensação de Energia”, conforme definido na REN 1.000/2021:

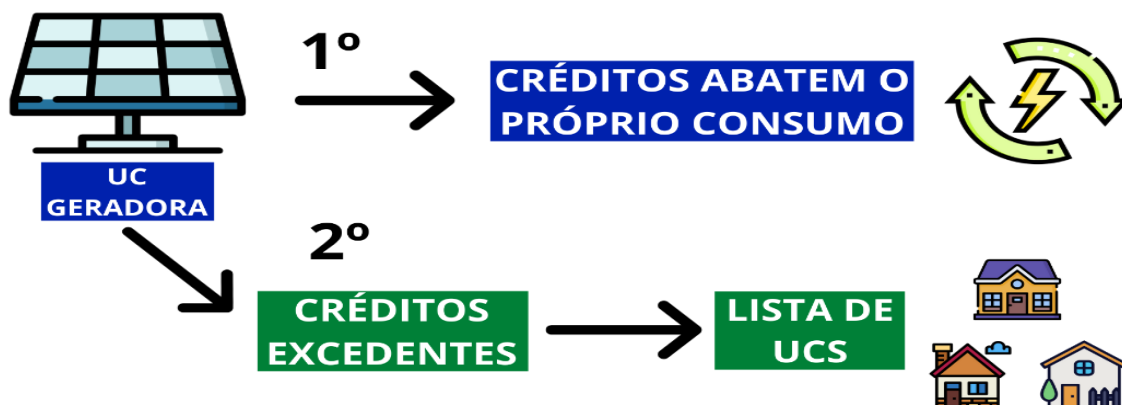
Art. 2º Para os fins e efeitos desta Resolução, são adotadas as seguintes definições:

XLV-A - Sistema de Compensação de Energia Elétrica - SCEE: sistema no qual a energia elétrica ativa é injetada por unidade consumidora com microgeração ou minigeração distribuída na rede da distribuidora local, cedida a título de empréstimo gratuito e posteriormente utilizada para compensar o consumo de energia elétrica ativa ou contabilizada como crédito de energia de unidades consumidoras participantes do sistema. (Incluído pela REN ANEEL 1.059, de 07.02.2023)

Segundo esse mecanismo, a energia excedente não é valorada pela tarifa da instalação produtora (ao contrário do PIE e do gerador distribuído), mas pela tarifa da unidade receptora do excedente (ou crédito), no momento que é utilizada para compensar o seu consumo.

A energia excedente, no âmbito energético, é o superávit de eletricidade gerada em relação ao consumo imediato. Em sistemas como os painéis solares fotovoltaicos, essa situação ocorre quando a produção elétrica excede o uso momentâneo. A gestão dessa energia excedente desempenha um papel crucial na promoção da eficiência energética e na integração de fontes renováveis nas redes elétricas.

Figura 30 - Compensação de Energia.



4.2.3 Grid-tied e Off-grid

A produção de energia na instalação pode ser: *grid-tied* (conectada à rede) e *off-grid* (desconectada da rede).

No primeiro caso, a eletricidade gerada pelo sistema pode ser fornecida à rede e o consumidor pode receber eletricidade da rede quando necessário. É a conexão necessária para aplicação do Sistema de Compensação de energia. Nesses casos, há uma dependência contínua da rede elétrica para suplementar ou complementar a geração de energia própria.

No segundo caso, a unidade é independente e nem se caracteriza como unidade consumidora e nem como micro ou minigerador. Não tem relação física e contratual com a distribuidora local. É totalmente autônoma, mas nem por conta desse fato, necessariamente autossuficiente. Evidentemente, não paga nada à distribuidora, contudo, na falha do seu sistema de geração, não conta com o fornecimento da concessionária.

Em resumo, sistemas *grid-tied* estão conectados à rede elétrica e permitem uma interação bidirecional de energia, enquanto sistemas *off-grid* operam independentemente, utilizando armazenamento local para atender às necessidades de energia quando a geração não é suficiente.

4.2.4 Modalidades de Micro e Minigeração Distribuída

Ainda no âmbito da microgeração e minigeração distribuída, o regulamento estabelece três modalidades de exploração, denominados “autoconsumo local”, “autoconsumo remoto” e “consórcio de unidades consumidoras”.

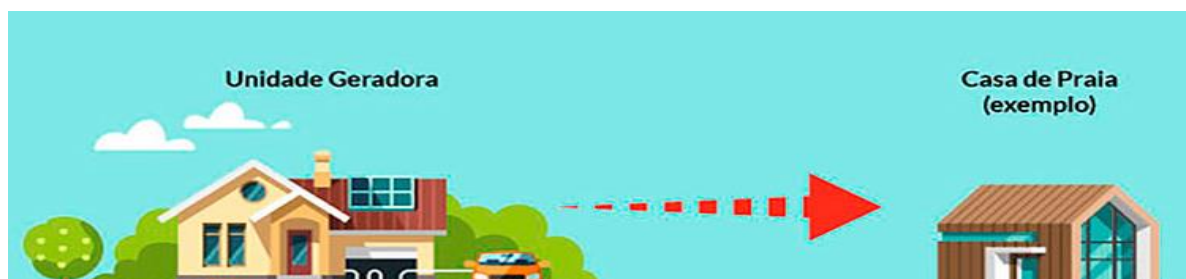
Figura 31 - Autoconsumo Local.



Fonte: Blue Sol.

O autoconsumo é uma modalidade no qual um consumidor, seja ele pessoa física ou jurídica, opta por instalar um sistema de geração de energia em sua propriedade ou empresa. Esse sistema pode operar tanto *on grid* ou *grid-tied* (conectado à distribuidora) quanto *off grid* (não conectado à distribuidora), significando que ele pode estar conectado à rede elétrica convencional ou funcionar de maneira independente. O principal diferencial dessa abordagem é a capacidade de gerar e utilizar energia no mesmo local, promovendo uma maior autonomia e possivelmente reduzindo a dependência da rede elétrica externa.

Figura 32 - Autoconsumo Remoto.



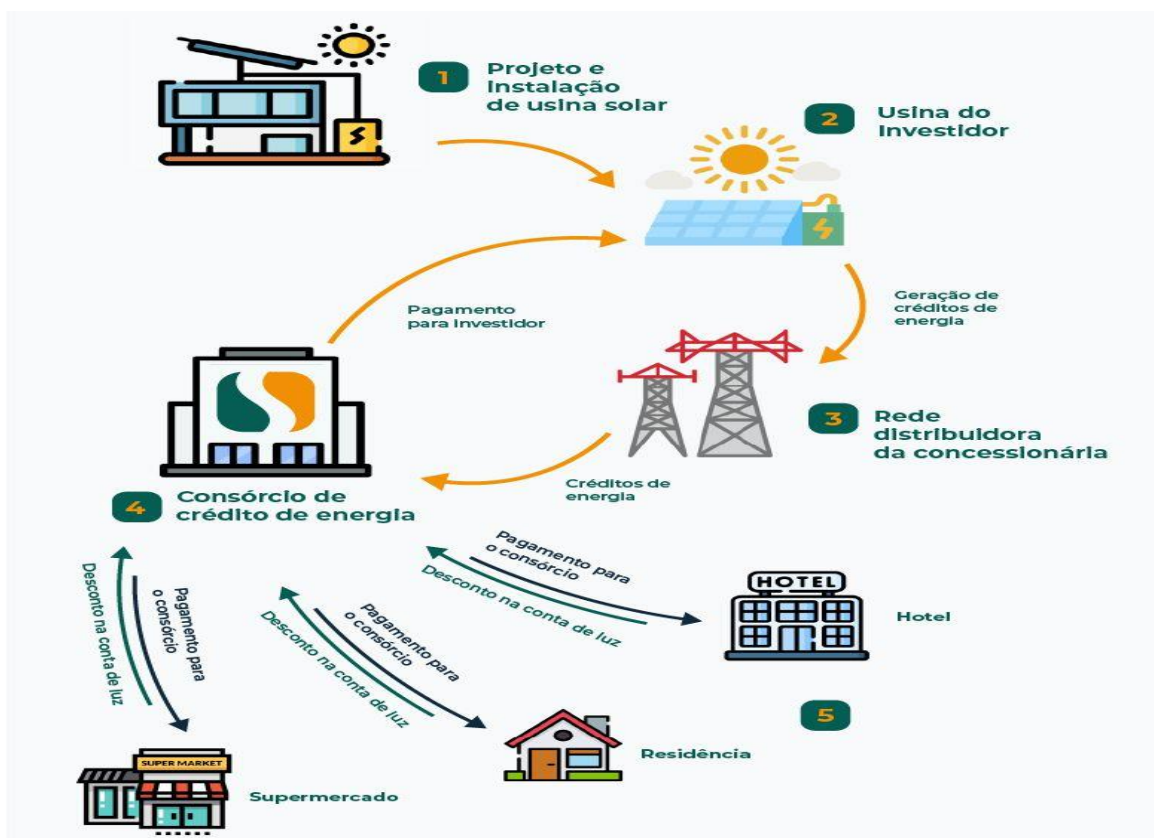
Fonte: Blue Sol.

Conforme estabelecido no inciso III do art. 1º da Lei 14.300/2022, representa uma modalidade em que consumidores, que podem ser tanto pessoas físicas quanto jurídicas, unem-se em um consórcio para gerenciar questões relacionadas ao consumo e à obtenção de energia elétrica. Essa forma de cooperação entre consumidores visa possibilitar benefícios conjuntos, como

maior poder de negociação, compartilhamento de recursos e, potencialmente, a adoção de práticas mais sustentáveis.

Ainda, de acordo com o inciso III do art. 1º da Lei 14.300/2022, representa uma modalidade em que consumidores, que podem ser tanto pessoas físicas quanto jurídicas, unem-se em um consórcio para gerenciar questões relacionadas ao consumo e à obtenção de energia elétrica. Essa forma de cooperação entre consumidores visa possibilitar benefícios conjuntos, como maior poder de negociação, compartilhamento de recursos e, potencialmente, a adoção de práticas mais sustentáveis.

Figura 33 - Consórcio de Energia Elétrica.



Fonte: Consórcio Santa Fé.

4.2.5 Net Metering

O *net metering*, ou medição líquida, é um arranjo que permite aos proprietários de sistemas de geração de energia, como painéis solares, medir a diferença entre a eletricidade que consomem e a que geram. Quando a produção excede o consumo, o excedente é enviado para a rede, gerando créditos. Se o consumo for maior, a eletricidade é retirada da rede. Isso incentiva a geração de energia sustentável e permite aos consumidores reduzirem custos, compensando o

excesso gerado nos períodos de alta produção. Contudo, o distribuidor e consumidor perdem a informação do consumo e geração mensal efetivos, dado que o medidor registra somente o fluxo de energia instantâneo líquido.

4.2.6 Conexão

A ANEEL regulamentou o procedimento para acesso do micro e minigerador distribuído por meio da Seção 3.1 do Módulo 3 dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica - PRODIST.

A solicitação de conexão deve usar formulário padronizado pela ANEEL, sem solicitar documentos adicionais. No caso de microgeração, a distribuidora deve apresentar Relacionamento Operacional e para Minigeração, celebrar Acordo Operativo.

Alguns parâmetros técnicos são regulamentados, tais como os elementos de acoplamento, seccionamento, interrupção, proteção e medição, reproduzidos na tabela abaixo.

Tabela 3 - Especificação MMGD.

Elemento	Potência Instalada da Microgeração ou Minigeração Distribuída		
	Menor ou igual a 75 kW	Maior que 75 kW e menor ou igual a 500 kW	Maior que 500 kW e menor ou igual a 5 MW
Elemento de acoplamento	Nenhum	Transformador de interface com isolamento galvânica ⁽¹⁾	Transformador de interface com isolamento galvânica ⁽¹⁾
Elemento de seccionamento	Disjuntor termomagnético ⁽²⁾	Chave seccionadora acessível ⁽²⁾	Chave seccionadora acessível ⁽²⁾
Elemento de interrupção	Dispositivo de interrupção automática ^{(3) (4)}	Dispositivo de interrupção automática ^{(3) (4)}	Dispositivo de interrupção automática ^{(3) (4)}
Elemento de proteção	Conjunto de funções de proteção que produza uma saída capaz de operar na lógica de atuação do elemento de interrupção	Conjunto de funções de proteção que produza uma saída capaz de operar na lógica de atuação do elemento de interrupção	Conjunto de funções de proteção que produza uma saída capaz de operar na lógica de atuação do elemento de interrupção
Elemento de medição	Medidor de energia ativa bidirecional ⁽⁵⁾	Medidor de energia de 4 quadrantes ⁽⁵⁾	Medidor de energia de 4 quadrantes ⁽⁵⁾

Fonte: ANEEL

Mesmo que atenda aos requisitos normativos de instalações elétricas, a ANEEL estabelece os seguintes requisitos de proteção mínimos:

Tabela 4 - Especificação de proteções MMGD.

Função de proteção	Código ANSI equivalente	Potência Instalada da Microgeração ou Minigeração Distribuída		
		Menor ou igual a 75 kW	Maior que 75 kW e menor ou igual a 500 kW	Maior que 500 kW e menor ou igual a 5 MW
Função de proteção de subtensão	27	Sim	Sim	Sim
Função de proteção de sobretensão	59	Sim	Sim	Sim
Função de proteção de subfrequência	81U	Sim	Sim	Sim
Função de proteção de sobrefrequência	81º	Sim	Sim	Sim
Função de proteção contra desequilíbrio de corrente entre fases	46	Sim	Sim	Sim
Função de proteção contra reversão e desequilíbrio de tensão	47	Sim	Sim	Sim
Função de proteção contra curto-circuito	50 / 50N	Sim ⁽¹⁾	Sim	Sim
Função de proteção seletiva contra curto-circuito	51 / 51N	Sim ⁽¹⁾	Sim	Sim
Função de proteção contra perda de rede (proteção anti-ilhamento)	-	Relé de detecção de ilhamento ^{(2) (3)}	Relé de detecção de ilhamento ^{(2) (3)}	Relé de detecção de ilhamento ^{(2) (3)}
Função de verificação de sincronismo	25	Sim	Sim	Sim
Função de espera de tempo de reconexão	62	Sim ⁽⁴⁾	Sim ⁽⁴⁾	Sim ⁽⁴⁾

Fonte: ANEEL

Os inversores precisam contar com certificados e relatório de ensaio para conversores eletrônicos, conforme normas técnicas brasileiras ou internacionais.

Valores de referência para indicadores de tensão, fator de potência, distorção harmônica, etc., foram estabelecidos no Módulo 8 do PRODIST.

É possível a operação em modo ilha, com desconexão física da rede de distribuição. A distribuidora pode propor proteções adicionais ou dispensar alguma proteção, justificando tecnicamente.

4.3 Desafios para a Operação

4.3.1 Inversão do Fluxo

A inversão de fluxo na rede de distribuição de energia elétrica ocorre quando a eletricidade flui em direção oposta à tradicional na rede. Normalmente, a eletricidade é direcionada da subestação de distribuição para os consumidores, seguindo um caminho unidirecional. No

entanto, em certas situações, a energia flui da direção do consumidor de volta para a subestação, o que é conhecido como inversão de fluxo.

Quando uma nova conexão ou um aumento na potência gerada por sistemas de microgeração ou minigeração distribuída implica a inversão do fluxo de energia no ponto de conexão com a rede da distribuidora ou no disjuntor do alimentador, a distribuidora deve realizar estudos para identificar soluções viáveis que eliminem essa inversão. Isso pode incluir opções como:

- Reconfiguração dos circuitos e redistribuição da carga;
- Utilização de um circuito elétrico alternativo para a conexão da geração distribuída;
- Conexão em um nível de tensão superior ao especificado no regulamento;
- Redução permanente da potência injetada;
- Redução da potência injetada em dias e horários predefinidos ou de forma dinâmica.

Se um projeto ou conjunto de projetos, de propriedade do mesmo titular, estiverem em conformidade com os limites de potência estabelecidos pela Lei nº 14.300/2022 para Micro e Minigeração Distribuída, a conexão à rede de média tensão é permitida, desde que haja capacidade na rede para acomodá-la. No entanto, devem ser observadas as alternativas definidas no art. 82 da REN 1.000/2021 quando a inversão de fluxo é identificada no ponto de conexão com a rede de distribuição.

Embora, em alguns casos, o fluxo inverso de potência seja bem-vindo, ele pode afetar a estabilidade da rede elétrica, especialmente se houver muitos sistemas fotovoltaicos conectados. As concessionárias de energia precisam gerenciar essa energia intermitente de maneira eficaz para manter a confiabilidade da rede.

Adicionalmente, à medida que a energia solar fotovoltaica se torna mais popular, as concessionárias de energia estão ajustando o planejamento da rede para acomodar o fluxo inverso de potência. Isso pode incluir a atualização da infraestrutura e a implementação de políticas para garantir que a energia seja distribuída eficientemente.

4.3.2 “Curva do Pato”

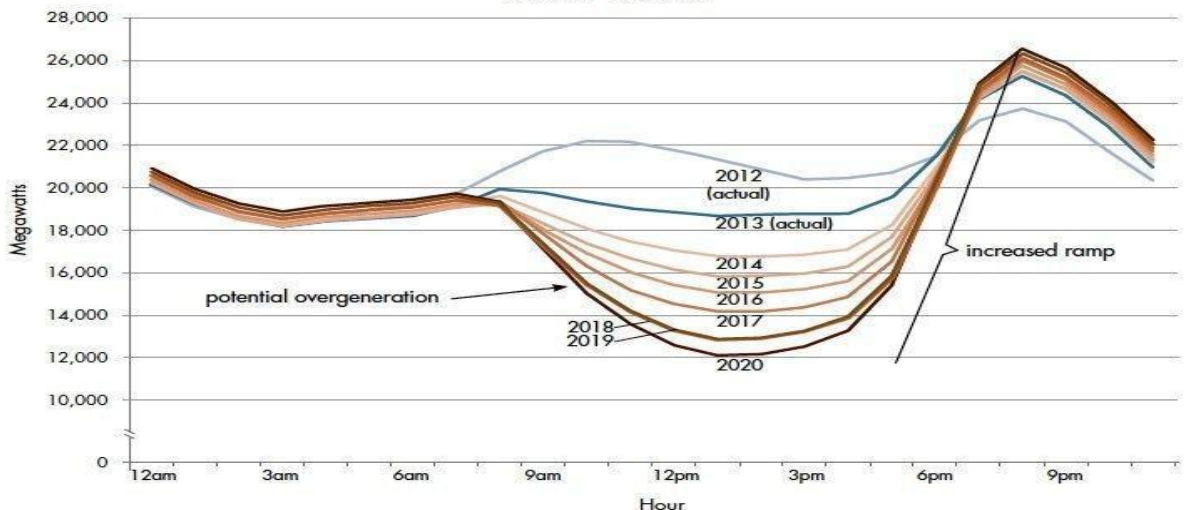
A dificuldade na operação do sistema elétrico ganhou força quando o Operador do Sistema da Califórnia divulgou o que ficou conhecido como a "curva do pato". Essa analogia refere-se à forma que um gráfico da oferta e demanda de eletricidade pode assumir quando há uma presença significativa de fontes intermitentes, como a energia solar e eólica, na matriz

energética. A curva do pato é uma representação visual das flutuações na geração de energia ao longo do dia.

A ideia por trás da curva do pato é que durante o dia, quando a produção de energia solar é alta, a demanda de eletricidade pode ser atendida principalmente por essa fonte renovável, resultando em uma curva que se assemelha ao pescoço de um pato. No entanto, à medida que o sol se põe e a produção solar diminui, a demanda ainda está presente, e outras fontes de energia precisam compensar essa diferença rapidamente, criando a "barriga" do pato no gráfico.

Essa representação visual destaca o desafio de equilibrar a oferta e a demanda quando se lida com fontes de energia intermitentes. Soluções para mitigar os efeitos da curva do pato incluem o armazenamento de energia, o desenvolvimento de tecnologias de previsão mais precisas e a diversificação da matriz energética. Estratégias como o armazenamento em baterias podem ser empregadas para armazenar o excesso de energia durante os períodos de alta produção e liberá-lo quando a demanda for maior do que a geração imediata. A gestão eficaz desses desafios é essencial para promover a transição para sistemas de energia mais sustentáveis e resilientes.

Figura 34 - Curva de Pato.
Net load - March 31



Fonte: California ISO

4.3.3 Regulação do Nível de Tensão

Trata-se do conjunto de práticas e dispositivos utilizados para controlar e manter a tensão elétrica dentro de níveis aceitáveis em sistemas de distribuição de energia. Essa regulação visa garantir a entrega consistente de eletricidade aos consumidores, ajustando automaticamente a tensão para compensar variações na carga e minimizar perdas de energia. Isso é crucial para

assegurar um fornecimento confiável e eficiente de eletricidade ao longo das linhas de distribuição.

4.3.4 Microrredes

São sistemas de distribuição de energia que operam localmente, muitas vezes fora da rede elétrica principal, e são gerenciados de maneira descentralizada. Essas micro redes são compostas por fontes de energia distribuídas, como painéis solares e geradores locais, e utilizam tecnologias de armazenamento de energia. A gestão descentralizada refere-se ao controle autônomo e local das operações da microrrede, permitindo uma resposta flexível às demandas locais e a integração eficiente de fontes renováveis, resultando em maior autonomia e resiliência do sistema.

4.3.5 Recursos Energéticos Distribuídos

Os Recursos Energéticos Distribuídos (*DER*, na sigla em inglês) referem-se a sistemas de geração de energia descentralizados. No contexto de veículos elétricos (VEs) e baterias, DER envolve a integração desses dispositivos na rede elétrica. Veículos elétricos, quando conectados à rede, podem atuar como fontes ou consumidores de energia, dependendo da direção do fluxo. Baterias, por sua vez, podem armazenar energia para uso posterior ou serem descarregadas quando necessário. Essa integração oferece flexibilidade, permitindo a otimização do fornecimento de energia e contribuindo para uma rede mais eficiente, resiliente e sustentável.

Trata-se, portanto, de um conjunto de tecnologias distribuídas, por um lado, de difícil coordenação, por outro, que pode prover soluções para o equilíbrio da carga com relação à geração.

Capítulo 5: Estudo de Caso

5.1 Contexto

O Centro Universitário UNIFAAT, localizado no município de Atibaia, estado de São Paulo, estabeleceu como missão a “promoção de educação superior de qualidade na sua região de influência, mantendo-se como instituição saudável e dinâmica, voltada ao desenvolvimento da empregabilidade e à ampliação da consciência crítica e ambiental do cidadão”.

Neste contexto, conduziu recentemente um projeto de aumento de sua independência energética e contribuição ao meio ambiente local, por meio da instalação de módulos de geração fotovoltaica em seu principal campus. Este projeto se iniciou com um estudo que visava avaliar as oportunidades de implantação de energia solar como parte de sua estratégia de redução de emissões de carbono e custos operacionais. A análise identificou a viabilidade e os benefícios da integração de sistemas fotovoltaicos, demonstrando o compromisso da Universidade em adotar fontes de energia limpa e renovável para atender às suas necessidades energéticas e promover a sustentabilidade ambiental em suas instalações.

Este capítulo descreve o projeto que foi implementado no campus de Atibaia da UNIFAAT, comparando-se o desempenho previsto (teórico) com o realizado (prático). Com base nos resultados já obtidos, será avaliada a atratividade econômica do empreendimento.

5.2 Caracterização da Unidade Consumidora

O projeto foi elaborado para o campus principal da UNIFAAT, localizado no município de Atibaia, estado de São Paulo.

A distribuidora acessada é a Elektro Redes S.A., concessionária atualmente controlada pela Neoenergia, que atende cerca de 2,9 milhões de unidades consumidoras e 6 milhões de habitantes. A Elektro atende 228 municípios no estado de São Paulo e Mato Grosso do Sul.

Figura 35 - Imagem da Localidade da Instalação.



Fonte: Google Maps

A instalação da UNIFAAT é atendida em média tensão, tensão primária nominal de 13,8 kV, trifásico, medição indireta, transformador de capacidade de 500 kVA, ramal de entrada em cobre e seção de 25 mm², proteção AT de 400 V. O circuito interno é trifásico, de 220 V, proteção de 630 A.

Figura 36 - Cabine Primária Centro Universitário Unifaat.



Fonte: Unifaat.

A instalação está cadastrada no segmento comercial, modalidade tarifária verde, subgrupo A4. A demanda contratada de ponta é de 250 kW, conforme a figura 37 abaixo. Para o ciclo tarifário 2023/2024, o período de ponta da Elektro se inicia às 17h30 e terminar às 20h29 (REH 3.253/2023⁷). O campus conta com atividades majoritariamente à noite.

Figura 37 - Fatura de energia do Centro Unifaat.

Nota Fiscal/Conta de Energia Elétrica		Controle N°	Conta do Mês	Vencimento	Valor da Conta (R\$)
192318217		FAT-01-20237959803352.24	Outubro/2023	11/10/2023	R\$43.879,06
Tensão Contratada (kV)	Limites Adequados de Tensão (kV)	Registrador	Demanda Contratada (kW)	Perdas Transformação	
13.8	12.834 a 14.49	RM0507518	250	0,00%	

Neoennergia Elektro		Rua Ary Antenor de Souza, 321 - 13053-024 Campinas - SP - CNPJ 02.328.280/0001-97 Insc. Est. 244.868.522.118 Av. Baldomero Leituga, 2032 - 79610-270 - Três Lagoas - MS CNPJ 02.328.280/0002-78 - Insc. Est. 28.304.126-9 www.neoennergiaelektro.com.br		Seu Código 7458053	
INSTITUICAO EDUCACIONAL ATIBAIIENSE LIMITADA EST MUNICIPAL JUCA SANCHES, 1230 - - JD BROGOTA ATIBAIA - SP - CEP 12954-070 CNPJ - 44705705000180 IE: Classificação: COMERCIAL,SERVICOS,OUTRAS ATIVIDADES / HORÁRIA VERDE / TRIFASICO		Leitura Anterior: 31/08/2023 Leitura Atual: 30/09/2023 Dias do Período: 30	Data de Emissão: 01/10/2023 Data de Apresentação: 04/10/2023 Próxima Leitura: 01/11/2023 Próximo Vencimento: 09/11/2023		

Fonte: Unifaat

⁷ <https://www2.aneel.gov.br/cedoc/reh20233253ti.pdf>

5.3 Principais Parâmetros de Dimensionamento Elétrico

O sistema de geração solar foi elaborado e instalado pela Franqui-ar Solar e atendeu aos termos regulamentados por meio da Resolução Normativa REN 1000/2021, da Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, além das normas técnicas aplicáveis e recomendações da concessionária acessada.

O sistema de geração distribuída, em resumo, conta com as seguintes características:

- Potência nominal instalada: 185 kWp
- Potência nominal por inversor: 50 kW
- Número de inversores: 4 unidades
- Potência total dos inversores: 185 kW
- Número de módulos instalados: 428 unidades
- Potência nominal por módulo: 550 Wp
- Potência total dos módulos: 235,4 kWp
- Área total de instalação: 1.106 m²
- Localização: latitude: -23.093369; longitude: -46.541952

Como pode-se perceber a instalação utilizou uma potência de módulos fotovoltaicos (235,4 kWp) maior que a potência nominal que a do inversor (185kW), há essa diferença, pois, foi utilizado o efeito oversizing e clipping, para que o sistema tenha uma maior geração ao longo do dia, incluindo as manhãs e finais de tarde e quando a potência do módulo fotovoltaico ultrapassar a potência do inversor, o inversor não irá fornecer em sua saída mais do que sua potência nominal.

A instalação de produção ocupa uma área de 1.106 m², instalada sobre o telhado de um dos blocos da instalação e, por esse motivo, foi dispensada da apresentação da licença ambiental simples, de acordo com a Resolução SMA nº74/2017.

Os parâmetros elétricos mais relevantes que foram estabelecidos pela empresa parceira, são descritos a seguir, a saber corrente/demanda máxima, relés de proteção, disjuntor de interligação, dimensionamento do transformador de potencial (TP) e de corrente (TC).

- a) Corrente máxima prevista (demanda máxima prevista)

A estimativa da corrente máxima prevista (e, conseqüentemente, da demanda máxima prevista), foi baseada na potência aparente máxima (kVA) e na tensão nominal (kV) de um sistema trifásico de demanda contratada de 250kW:

$$I_{m\acute{a}x} = \frac{kVA_{demanda\ m\acute{a}x}}{kV_{nominal} * \sqrt{3} * 0,92} \Rightarrow I_{m\acute{a}x} = \frac{250}{13,8 * \sqrt{3} * 0,92} \Rightarrow$$

$$I_{m\acute{a}x} = 11A$$

Portanto, a corrente máxima prevista (demanda máxima prevista) é de aproximadamente 11 A.

b) Corrente nominal do transformador

Para avaliar as condições de atendimento na condição de maior demanda, é necessário estimar a corrente nominal do transformador (I nominal trafo) a partir de sua potência nominal em kVA (quilovolt-ampere) e sua tensão nominal em kV (quilovolts).

$$I_{nominal\ trafo} = \frac{kVA_{nominal}}{kV_{nominal} * \sqrt{3}} \Rightarrow I_{nominal\ trafo} = \frac{500}{13,8 * \sqrt{3}} \Rightarrow$$

$$I_{nominal\ trafo} = 21A$$

Portanto, a corrente nominal do transformador é de aproximadamente 21 A com base nos valores de kVA nominal e kV nominal fornecidos no seu cálculo.

c) Relés de proteção

Os relés de proteção utilizados são do fabricante PEXTRON, modelo UPR6000X, que conta com as seguintes funções de proteção: 50/51, 50/51N, 51NS não, 59, 59N, 32, 27-0 e 47.

Para minigeração fotovoltaica que se conecta à unidade consumidora através de inversores, conforme o Anexo II da norma DIS-NOR-033, não deverão ser ajustadas outras funções, tendo em vista a evitar desligamentos desnecessários na cabine.

O inversor, segundo Manual XPTO Bel Energy, já possui algumas funções como 81 (o) e (u), 27, 24 etc. Adicionalmente, caso for necessário prover outras funções, é possível obtê-los por meio de ajustes pelo lado da baixa tensão, junto aos equipamentos sensíveis. O relé utiliza a RTC e a RTP para definição dos ajustes secundários. Foi utilizado um relé microprocessado (numérico) multifunção (PEXTRONUPR6000/UPR6001).

d) Disjuntor de Interligação MT (geral)

O disjuntor de interligação MT (média tensão) é um dispositivo elétrico usado para proteger as instalações elétricas e os equipamentos quando ocorrem eventos anormais, como curto-circuito ou sobrecarga.

O disjuntor utilizado atende ao item 7.27.1 da Norma DIS-NOR-036, conta com corrente nominal de 630 A (400 A mínima), capacidade de interrupção sob curto-circuito de 16 kA (mínima) e bobina de abertura e fechamento manual e automática.

e) Dimensionamento dos transformadores de proteção (TC e TP)

O dimensionamento dos transformadores de proteção, também conhecidos como Transformadores de Corrente (TC) e Transformadores de Potencial (TP), é uma parte crítica do projeto de sistemas de proteção elétrica em instalações. Esses transformadores são usados para medir correntes e tensões do sistema, fornecendo informações precisas para dispositivos de proteção e controle.

Os TP's utilizados atendem à norma técnica da distribuidora local, com relação de transformação de 120 (13,8 kV x 115 V) e classe de exatidão de 0,3P75, grupo de ligação 3.

Para minigeração, consoante norma DIS-NOR-033, devem ser utilizadas três (3) unidades de TP em ligação estrela aterrada – estrela aterrada (Yaterr-Yaterr), de forma a permitir medição a leitura das tensões por fase (fase-terra).

5.4 Sistema de Geração Fotovoltaica Implantado

Os autores acompanharam o serviço de instalação do sistema de produção de energia solar, que ocorreu no período de Março/2023 até Abril/2023.

Nesta seção, foram registrados os principais aspectos que caracterizam a instalação, comentando o procedimento de instalação acompanhado “in loco”.

A implementação do sistema de placas fotovoltaicas teve início após uma meticulosa demarcação das fileiras e pontos de referência, seguindo o alinhamento e espaçamento especificados. Foi utilizado uma linha de pedreiro para garantir precisão nessa etapa crucial.

Após a conclusão da montagem dos minis trilhos, seguiu-se com a distribuição dos cabos para a montagem dos arranjos. A instalação das tubulações foi realizada, seguida pela clipagem de aterramento e conectores MC4, assegurando a segurança elétrica do sistema.

Com todas as etapas anteriores concluídas, passou-se à fase de elevação dos painéis solares, como se pode observar nas figuras 38, 39, 40, 41 e 42. Uma equipe composta por sete profissionais e um elevador de painéis, permitiu ser realizada a instalação dos módulos de forma eficiente. O ritmo de trabalho variava diariamente, instalando entre 55 a 90 painéis, dependendo das condições climáticas e intervalos de descanso para a equipe.

Figura 38 - Instalação das placas fotovoltaicas.



Fonte: Franq- Ar

Após a montagem completa de todos os componentes, foram realizadas as medidas e testes minuciosos em todos os sistemas. Qualquer suspeita de erro o grupo passava a analisar em conjunto com o engenheiro e com os líderes responsáveis pelo projeto.

Figura 39 - Inversores da instalação do prédio JK.



Fonte: Franq-ar

Ainda na fase de testes, enquanto todo o sistema não estava montado e a ligação não tinha sido efetivada junto à concessionária local, foi implementado um procedimento de monitoramento semanal por meio de uma planta de operação. Este sistema fornece informações valiosas sobre possíveis erros, curtos-circuitos, módulos desativados e quedas na produção de energia. O engenheiro possui acesso remoto à plataforma matriz, onde detalha a geração projetada versus a geração real. É importante mencionar que, em certas épocas do ano, a geração de energia é afetada devido à posição do sol, causando perdas naturais devido às mudanças climáticas e à inclinação solar. Essas variações são consideradas normais em uma instalação solar.

Figura 40 - Painel de ligação dos inversores.



Fonte: Franq-ar

Figura 41 - Estrutura de instalação dos inversores.



Fonte: Franq-ar

Figura 42 - Infraestrutura subterrânea.



Fonte: Franq-ar

5.5 Benefício Aferido

O estudo da atratividade econômica do empreendimento depende das condições iniciais da instalação, tais como tarifa aplicada, instalações e benfeitorias existentes e condições solarimétricas da localidade. As condições em campo, em conjunto, irão propiciar a produção de energia elétrica a partir da luz solar e, conseqüentemente, resultar no benefício esperado, que é a redução da conta de energia elétrica

Por outro lado, também é necessário confrontar o benefício apurado com os custos incorridos para o seu planejamento, projeto, instalação e compra dos materiais e equipamentos. Dado que o fornecedor não permitiu a publicação dos custos incorridos, os autores analisarão a atratividade de forma comparativa do custo total que seria atrativo em comparação com os itens clássicos de comparação econômica (taxa de juros, letras do tesouro etc.).

Para realizar o cálculo de geração estimada deve-se, partiu-se do Número de Horas em Sol Pleno (NPS) do local de instalação, a partir dos dados disponíveis no sítio eletrônico da CRESESB⁸. Os dados apresentados, a partir das coordenadas geográficas, segundo informado

⁸ <http://www.cresesb.cepel.br/>

na página eletrônica, correspondem aos valores de irradiação solar convertidos do plano horizontal para planos inclinados em três opções:

- ângulo igual à latitude, que corresponde à medida de inclinação da instalação mais fácil e comum (utilizada na UNIFAAT);
- ângulo que fornece o maior valor médio diário anual de irradiação solar, que é resultado da otimização do ângulo de instalação a fim de produzir a maior quantidade de energia ao longo de um ano;
- ângulo que fornece o maior valor mínimo diário anual de irradiação solar, que levaria a uma produção de energia mais constante, ainda que menor que o total de energia gerada do caso anterior.

Os valores indicados são reproduzidos na figura 43 abaixo, lembrando que, para o caso da UNIFAAT, deve-se utilizar a irradiação solar média diária mensal no ângulo igual à latitude.

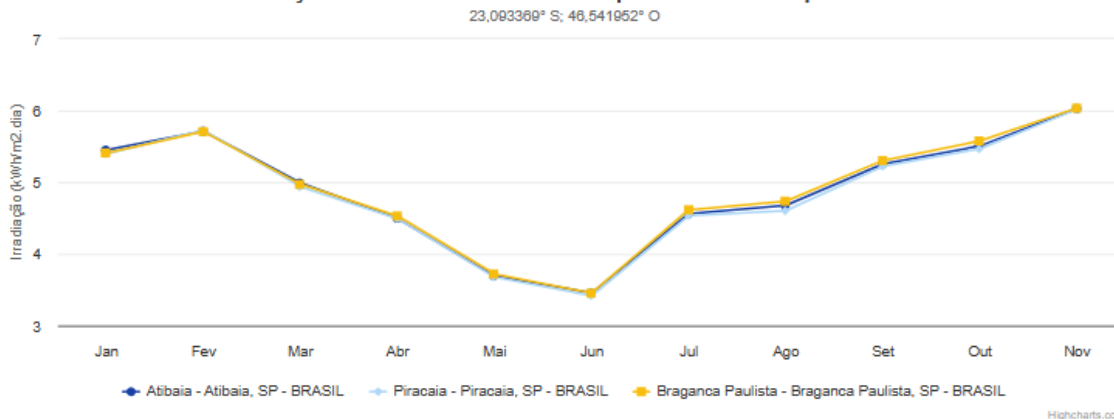
Figura 43 - Potencial solar de Atibaia.

Localidades próximas

Latitude: 23,093369° S
Longitude: 46,541952° O

#	Estação	Município	UF	País	Irradiação solar diária média [kWh/m ² .dia]																
					Latitude [°]	Longitude [°]	Distância [km]	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Média	Delta
<input checked="" type="checkbox"/>	Atibaia	Atibaia	SP	BRASIL	23,101° S	46,549° O	1,1	5,45	5,71	4,99	4,50	3,89	3,46	3,57	4,56	4,68	5,25	5,51	6,03	4,78	2,57
<input checked="" type="checkbox"/>	Piracaia	Piracaia	SP	BRASIL	23,101° S	46,449° O	9,6	5,40	5,73	4,94	4,49	3,88	3,42	3,53	4,53	4,60	5,22	5,47	6,02	4,75	2,60
<input checked="" type="checkbox"/>	Braganca Paulista	Braganca Paulista	SP	BRASIL	23° S	46,549° O	10,4	5,41	5,71	4,97	4,53	3,72	3,45	3,62	4,62	4,74	5,30	5,58	6,03	4,81	2,58

Irradiação Solar no Plano Horizontal para Localidades próximas



Cálculo no Plano Inclinado

Estação: Atibaia
Município: Atibaia, SP - BRASIL
Latitude: 23,101° S
Longitude: 46,549° O
Distância do ponto de ref. (23,093369° S; 46,541952° O): 1,1 km

#	Ângulo	Inclinação	Irradiação solar diária média mensal [kWh/m ² .dia]													
			Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Média	Delta
<input checked="" type="checkbox"/>	Plano Horizontal	0° N	5,45	5,71	4,99	4,50	3,89	3,46	3,57	4,56	4,68	5,25	5,51	6,03	4,78	2,57
<input checked="" type="checkbox"/>	Ângulo igual a latitude	23° N	4,94	5,45	5,13	5,11	4,57	4,51	4,55	5,44	4,99	5,13	5,05	5,38	5,02	,95
<input checked="" type="checkbox"/>	Maior média anual	21° N	5,01	5,50	5,15	5,08	4,52	4,44	4,48	5,39	4,98	5,17	5,11	5,44	5,02	1,06
<input checked="" type="checkbox"/>	Maior mínimo mensal	30° N	4,69	5,25	5,08	5,18	4,73	4,72	4,73	5,57	4,97	4,98	4,81	5,05	4,98	,88

Fonte: <http://www.cresesb.cepel.br/index.php#data>

A partir dos dados acima e da capacidade de geração nominal da instalação (185 kWp), foi calculado os seguintes valores de geração de energia mensal e anual esperada: NSP x dias do mês x potência instalada.

Os valores reais obtidos por medição foram levantados e confrontados com os valores teóricos esperados, indicados na tabela 5 e figura 44.

Para os valores medidos (prático), foi desconsiderado o mês de março, dado que o sistema estava em produção parcial e com muita instabilidade de produção. Para os meses de abril/2023 até outubro/2023 foram considerados plenamente os valores registrados. Já para o mês de novembro/2023, considerando que havia registros disponíveis até o dia 19, o valor medido foi *pro rata* do período (registrado x 30/19 dias).

Tabela 5 - Geração de energia fotovoltaica na UNIFAAT.

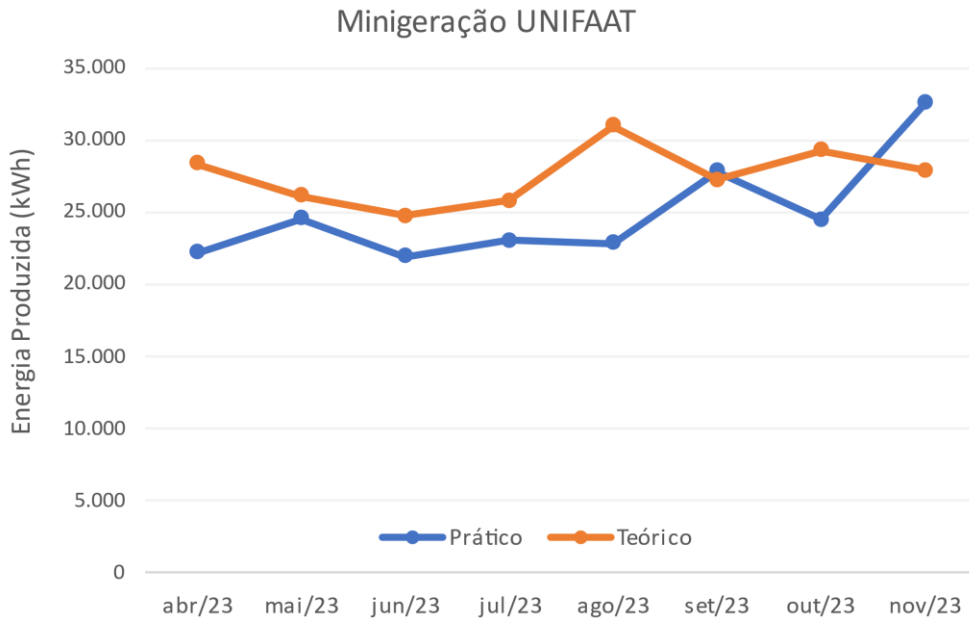
Mês	NSP	Teórico (kWh)	Prático	Diferença
Jan/2023	4,89	28.044	0	n/a
Fev/2023	5,46	28.283	0	n/a
Mar/2023	5,08	29.134	8.639	n/a
Abr/2023	5,11	28.361	22.181	-22%
Mai/2023	4,55	26.094	24.507	-6%
Jun/2023	4,45	24.698	21.897	-11%
Jul/2023	4,49	25.750	23.028	-11%
Ago/2023	5,40	30.969	22.809	-26%
Set/2023	4,91	27.251	27.804	+2%
Out/2023	5,10	29.249	24.468	-16%
Nov/2023	5,02	27.861	32.544	+17%
Dez/2023	5,35	30.682	n/d	n/a
Total	4,98	336.275	166.693	-11%

Fonte: Unifaat

No período de observação de 1º de abril de 2023 a 19 de novembro de 2023, conforme valores indicados acima, resultou numa geração de energia 11% menor que o valor teórico esperado. Suspeita-se que a diferença tenha sido afetada pela ausência de alguns registros no sistema de coleta de dados. Foram observadas algumas janelas de dados não resgatados. Evidentemente, a diferença também pode ser atribuída à maior quantidade de nuvens no céu do que a média observada quando do levantamento das curvas na região de Atibaia. Finalmente, cabe observar

que os valores teóricos foram obtidos por interpolação de medições geográficas, o que deve levar a algum erro na estimativa.

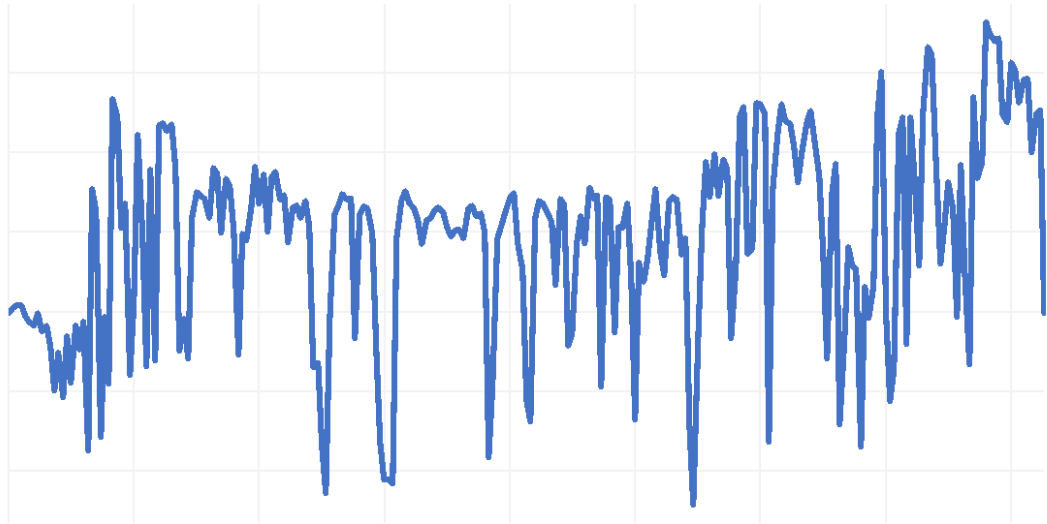
Figura 44 - Geração de energia estimada na UNIFAAT (2023).



Fonte: Unifaat.

De todo modo, é interessante observar a evolução da produção diária tal como ilustrada na figura 45. Os valores medidos parecem indicar grande variação diária, com valores indo desde 115 kWh até cerca de 1330 kWh, e valor médio de 787 kWh e desvio padrão de 248 kWh. O menor valor equivale a 15% do valor médio e o maior valor equivale a 170% da média do período.

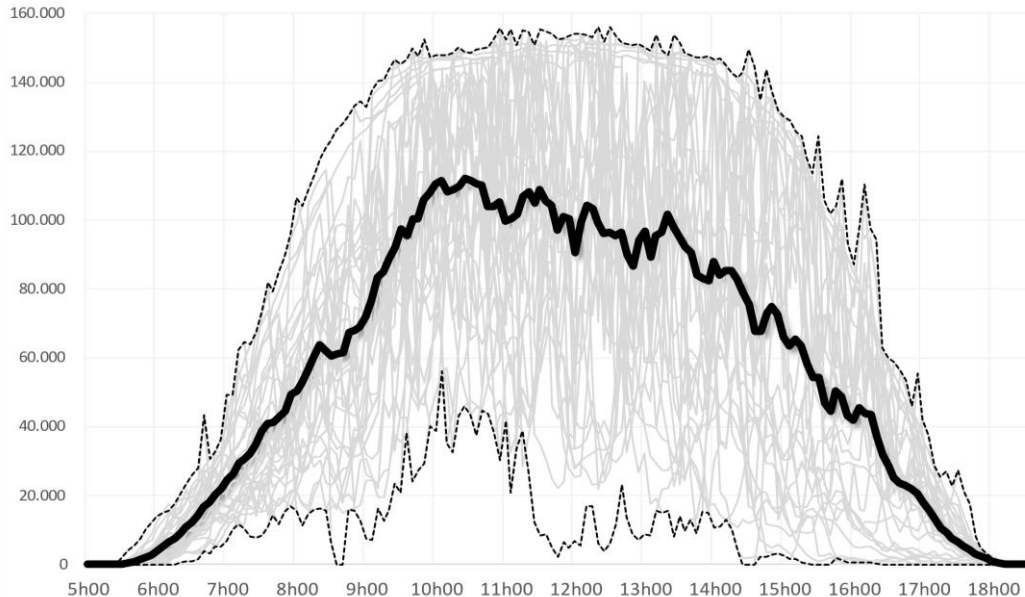
Figura 45 - Geração de energia diária na UNIFAAT (2023).



Fonte: Unifaat

Já a partir dos registros de medição em intervalos de 5 minutos, tomando como referência o mês de outubro/2023, as variações da produção de energia ficam ainda mais voláteis.

Figura 46 - Curva de geração diária em outubro/2023.



Fonte: Unifaat

Novamente, cabe registrar que a grande variação temporal da produção de energia pode ser consequência da variação das condições climáticas, mas também da falha no resgate das informações pelo sistema. De todo modo, a curva obtida mantém o aspecto encontrado na literatura técnica, demonstrando que a grande variação da geração fotovoltaica distribuída

prejudica a operação dos sistemas de distribuição e o planejamento do despacho das demais fontes de geração de energia elétrica.

Por fim, objetivando estimar o benefício financeiro do empreendimento, foi tomado como referência do estudo o período de abril/2023 a novembro/2023 (este último, conforme comentado anteriormente, estimado para os dias remanescentes sem medição), quando o valor médio da produção de energia elétrica alcançou uma média de R\$ 24.905 kWh por mês.

Como a tarifa de energia da unidade consumidora (subgrupo tarifário A4, modalidade verde) para o período fora de ponta é de 408,30 R\$/MWh, sem impostos, a redução média da conta de energia foi de R\$ 10.170 por mês. Estimando um valor adicional de 25% de PIS, COFINS e ICMS, a economia sobe para aproximadamente R\$ 12.700 por mês, em média.

5.6 Atratividade Econômica

Considerando que não foi possível obter o custo total do investimento, o grupo realizou uma pesquisa e estimou que um empreendimento deste porte custaria entre R\$ 800 mil e R\$ 1.000 mil. Para fins de simulação, foi considerado o valor médio de R\$ 900 mil da faixa de custos pesquisada.

Desconsiderando uma taxa de juros e inflação, o tempo de retorno simples seria de 5,9 anos, que é um período um pouco maior que os prestadores de serviços costuma informar.

O investimento em energia solar pode ser comparado a ativos do mercado financeiro, o que envolve um capital que retorna ao longo de anos, no caso de solar, pelo menos 25 anos ou mais. Portanto, é possível comparar o Retorno do Investimento a outros.

Se comparar com o CDI, onde 100% = Taxa de 12,83% ao ano, temos que o valor de retorno anual é de R\$115,470,00 com Retorno do Investimento (Payback) em aproximadamente 7,8 anos.

Uma pesquisa realizada pela internet, indicou taxas de juros para microgeração distribuída entre 0,75% e 1,54% ao mês⁹. Dado que se trata de um empreendimento de maior porte (minigeração e não microgeração distribuída), foi considerada o menor valor da faixa, que equivaleria a um

⁹ <https://www.portalsolar.com.br/linhas-de-credito-para-energia-solar>

custo financeiro de 9% a.a. Nestes termos, o Valor Presente Líquido – VPL se anularia com um investimento inicial de aproximadamente R\$ 1.630 mil, bem maior que os R\$ 900 mil estimados

Portanto, as simulações demonstram boa atratividade do investimento, o que poderia ser muito mais atrativo se a universidade conseguisse saldar o excedente gerado em instalações em baixa tensão, cuja tarifa chega a cerca de 940 R\$/MWh, com impostos. Nestas condições, o tempo de retorno simples cairia para cerca de 3,2 anos somente. Para alcançar esse benefício, seria necessário formar um consórcio de consumidores em baixa tensão, contudo, a um custo adicional de prêmio aos consorciados, o que aumentaria um pouco o custo da operação.

Capítulo 6: Comentários Finais

Este trabalho foi motivado pela necessidade de se conhecer e registrar o motivo do recente crescimento de instalações de geração fotovoltaica distribuída no Brasil e no mundo. Por esse motivo, partiu-se para a pesquisa da tecnologia de conversão de energia solar em energia elétrica, indicando o fenômeno físico, estado da arte, tendências de evolução da eficiência e dos preços.

Em seguida, foi estudado o contexto energético e ambiental que interferem mutuamente sobre a decisão de investimento por parte dos presumidores, que busca alternativas para gestão de suas despesas em energia. As iniciativas do desenvolvimento sustentável da ONU e preocupação com a parcela renovável da matriz energética, além da interferência do poder público no planejamento e no estabelecimento de políticas públicas de incentivo.

Outra pesquisa relevante foi o levantamento dos aspectos positivos e negativos da tecnologia. Nesse quesito, cabe comentar que os aspectos negativos surpreenderam os autores deste trabalho, devido à pouca divulgação e acesso ao público geral. Destaca-se, por exemplo, o alto nível de emissões de carbono atualmente necessários para a fabricação das placas fotovoltaicas e o desafio do planejador e operador do sistema elétrico.

De posse do conhecimento da tecnologia e do contexto de desenvolvimento sustentável, passou-se a analisar o marco legal e regulatório brasileiro. Primeiramente, para surpresa dos autores, há uma evidente confusão na definição do termo “geração distribuída”, se aquela que é injetada na rede da distribuidora ou daquela que é injetada diretamente na instalação consumidora, esta última, objeto deste trabalho. Também foi constatado que há um elevado grau de complexidade para compreensão dos contornos para exploração dessa fonte energética.

Finalmente, foi feito um estudo de caso da instalação de um sistema de minigeração distribuída desenvolvida nas instalações da UNIFAAT. Além do estudo do projeto e acompanhamento da instalação, o grupo acompanhou o resultado da energia produzida com relação à esperada. Foi interessante observar que o dimensionamento proposto pela prestadora de serviços optou por limitar a potência nos momentos de maior radiação solar, seja por conta das perdas no sistema, mas também para resultar num melhor benefício econômico.

Referências Bibliográficas

1. 2020 Tied for Warmest Year on Record. Disponível em: <<https://earthobservatory.nasa.gov/images/147794/2020-tied-for-warmest-year-on-record>>. Acesso: 21 de novembro de 2023.
2. A transição energética na Europa e na América Latina: em que ponto estamos? Disponível em: <<https://www.enelgreenpower.com/pt/learning-hub/debates/transicao-energetica-europa-america-latina>>. Acesso: 21 de novembro de 2023.
3. Abdala, Paulo. Energia Solar E Eólica. 2019, educapes.capes.gov.br/handle/capes/432485. Acesso 11 novembro 2023.
4. ANEEL. RESOLUÇÃO NORMATIVA ANEEL Nº 1.000, DE 7 DE DEZEMBRO DE 2021(*). Disponível em: <https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren20211000.html>. Acesso em: 24 nov. 2023.
5. ANEXO III DA RESOLUÇÃO NORMATIVA ANEEL No 956, DE 7 DE DEZEMBRO DE 2021 PROCEDIMENTOS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA NO SISTEMA ELÉTRICO NACIONAL - PRODIST MÓDULO 3 - CONEXÃO AO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA Seção 3.0 Introdução Conteúdo. [s.l: s.n.]. Disponível em: <https://www2.aneel.gov.br/cedoc/aren2021956_prodist_modulo_3_v8.pdf>. Acesso em: 24 nov. 2023.
6. APOIO, R. Atlas Brasileiro de Energia Solar Atlas Brasileiro de Energia Solar. [s.l: s.n.]. Disponível em: <http://mtc-m21b.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m21b/2017/08.15.18.20/doc/Atlas_Brasileiro_Energia_Solar_2a_Edicao_rev-01-compactado.pdf?languagebutton=en>. Acesso: 21 de novembro de 2023.
7. AQUINO, JÉSSICA. CÉLULAS SOLARES BIFACIAIS EM LÂMINAS FINAS de SILÍCIO TIPO N: OTIMIZAÇÃO de PROCESSOS de FABRICAÇÃO. 2021, tede2.pucrs.br/tede2/bitstream/tede/10075/2/Tese_J%C3%A9ssica%20de%20Aquino.pdf. Acesso 12 novembro 2023.
8. Barbosa, A. (2019). GERENCIAMENTO CENTRALIZADO DE MICRORREDES DE ENERGIA ELÉTRICA COM OPERAÇÃO EM MODO ILHADO. Unioeste.Br. https://tede.unioeste.br/bitstream/tede/4926/5/Andre_da_Silva_Barbosa_2019.pdf. Acesso em: 24 nov. 2023.
9. CERES – clouds and the earth’s radiant energy system. (n.d.). Nasa.gov. December 16, 2023, from <https://ceres.larc.nasa.gov/>

10. CRESESB. ENERGIA SOLAR PRINCÍPIOS E APLICAÇÕES. 2006, www.cresesb.cepel.br/download/tutorial/tutorial_solar_2006.pdf. Acesso 11 novembro 2023.
11. Chemical treatment of crystalline silicon solar cells as a method of recovering pure silicon from photovoltaic modules. Disponível em: https://scholar.google.com/citations?view_op=view_citation&hl=pl&user=BW6yquUAAAAJ&citation_for_view=BW6yquUAAAAJ:roLk4NBRz8UC. Acesso: 21 de novembro de 2023.
12. CRUZ, D. T. Micro e minigeração eólica e solar no Brasil: propostas para desenvolvimento do setor. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3143/tde-04082015-153708/pt-br.php>. Acesso: 21 de novembro de 2023.
13. Confira o Resultado da COP-21. Disponível em: <http://www.centroclima.coppe.ufrj.br/index.php/br/destaque/noticias/2-o-resultado-da-cop-21>. Acesso: 21 de novembro de 2023.
14. DRUMM, F. C. et al. POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA PROVENIENTE DA QUEIMA DE COMBUSTÍVEIS DERIVADOS DO PETRÓLEO EM VEÍCULOS AUTOMOTORES. Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental, v. 18, n. 1, 7 abr. 2014.
15. Eustáquio, João. Simulação E Análise Do Comportamento Do Compo de Helióstato de Uma Central de Concentração Solar Termoelétrica de Receptor Central. 2011. repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/63344/1/000149684.pdf. Acesso 12 novembro 2023.
16. EPE. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-172/Energia%20Renov%C3%A1vel%20-%20Online%2016maio2016.pdf>. Acesso: 21 de novembro de 2023.
17. Electricity Market Report 2023. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/255e9cba-da84-4681-8c1f-458ca1a3d9ca/ElectricityMarketReport2023.pdf>. Acesso: 21 de novembro de 2023.
18. Energy Statistics Data Browser – Data Tools. Disponível em: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/energy-statistics-data-browser?country=WORLD&fuel=Energy%20supply&indicator=TESbySource> Acesso: 21 de novembro de 2023.
19. EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Relatório Síntese 2023 (EPE - Empresa de Pesquisa Energética, Ed.)epe.gov.br. [s.l.] EPE - Empresa de Pesquisa Energética, 2023. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-748/topico-681/BEN_S%C3%ADntese_2023_PT.pdf. Acesso: 21 de novembro de 2023.

20. Energy Efficiency. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://iea.blob.core.windows.net/assets/7741739e-8e7f-4afa-a77f-49dadd51cb52/EnergyEfficiency2022.pdf>>. Acesso: 21 de novembro de 2023.
21. Fadigas, Profa Eliane. Energia Solar Fotovoltaica: Fundamentos, Conversão E Viabilidade Técnico-Econômica. edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/56337/mod_resource/content/2/Apostila_solar.pdf. Acesso 15 novembro 2023.
22. FUDHOLI, A. et al. Performance analysis of photovoltaic thermal (PVT) water collectors. *Energy Conversion and Management*, v. 78, p. 641–651, fev. 2014.
23. Folheie a ed. 260. Disponível em: <<https://revistapesquisa.fapesp.br/folheie-a-ed-260/>>. Acesso: 21 de novembro de 2023.
24. FELBER, L. REGULAÇÃO DE TENSÃO EM SUBESTAÇÕES DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA. [s.l: s.n.]. Disponível em: <https://repositorio.unifei.edu.br/jspui/bitstream/123456789/1522/1/dissertacao_0036434.pdf>.
25. Guimarães, Ana. ESTUDO COMPARATIVO ENTRE PAINÉIS SOLARES ORGÂNICOS FOTOVOLTAICOS (OPV) E PAINÉIS SOLARES de SILÍCIO UTILIZANDO OS SOFTWARES PVSYST® E SETFOS®. 2021, repositorio.ifgoiano.edu.br/bitstream/prefix/1906/1/tcc_Ana%20Clara%20Cruvinel%20Guimar%C3%A3es.pdf. Acesso 11 novembro 2023.
26. Ganiha, Sofia. Potencial Da Instalação Fotovoltaica Bifacial E Sua Integração Com Soluções de Armazenamento. 2017, repositorio.ul.pt/bitstream/10451/31820/1/ulfc124295_tm_Sofia_Ganiha.pdf. Acesso 12 novembro 2023.
27. Geração Distribuída. Disponível em: <<https://www.neoenergia.com/web/sp/seu-negocio/geracao-distribuida>>. Acesso em: 24 nov. 2023.
28. Genelhu, R. N. (2019). PLACAS FOTOVOLTAICAS ORGÂNICAS PARA MELHORIA DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA. Ufop.Br. https://www.monografias.ufop.br/bitstream/35400000/2177/1/MONOGRAFIA_UsografenoPlacas.pdf>Acesso: 21 de novembro de 2023.
29. IEA. World Energy Outlook 2022. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://iea.blob.core.windows.net/assets/830fe099-5530-48f2-a7c1-11f35d510983/WorldEnergyOutlook2022.pdf>>. Acesso: 21 de novembro de 2023.
30. IEA. Solar. Disponível em: <<https://www.iea.org/energy-system/renewables/solar-pv>>. Acesso: 21 de novembro de 2023.
31. Jardim, C. (2007). A INSERÇÃO DA GERAÇÃO SOLAR FOTOVOLTAICA EM ALIMENTADORES URBANOS ENFOCANDO A REDUÇÃO DO PICO DE DEMANDA DIURNO. Ufsc.Br. https://fotovoltaica.ufsc.br/Teses/Tese_Carolina_da_Silva_Jardim.pdf

32. MCE. Especialista em Energia: Curva de Pato. Disponível em: <https://www.mcecleanenergy.org/pt/mce-news/energy-expert-duck-curve-2/>. Acesso em: 24 nov. 2023.
33. Macedo, Marlos, et al. Utilização de Células Solares Poliméricas Na Geração de Energia Elétrica. 2019, www.monografias.ufop.br/bitstream/35400000/2177/1/MONOGRAFIA_UsoGrafenoPlacas.pdf. Acesso 11 novembro 2023.
34. Michigan, University. “Solar Cells with 30-Year Lifetimes for Power-Generating Windows.” <https://News.umich.edu/Solar-Cells-With-30-Year-Lifetimes-For-Power-Generating-Windows/>, 2021. Acesso 12 novembro 2023.
35. Maranhão, Diego. PROJETO E CONSTRUÇÃO de UM CONCENTRADOR SOLAR TIPO FRESNEL LINEAR. 2016, bdm.unb.br/bitstream/10483/16593/1/2016_DiegoCarvalhoMaranhao_tcc.pdf. Acesso 12 novembro 2023.
36. Maia, Rian. ENERGIA SOLAR: O DESENVOLVIMENTO de UM NOVO MERCADO. 2018, repositorio.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10024980.pdf. Acesso 14 novembro 2023.
37. MONLEVADE, J. Trabalho de Conclusão de Curso ENERGIA SOLAR: ESTUDO DA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA ATRAVÉS DOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS ON-GRID E OFF-GRID Marliana de Oliveira Lage Alves. [s.l.: s.n.]. Disponível em: https://www.monografias.ufop.br/bitstream/35400000/2019/6/MONOGRAFIA_EnergiaSolarEstudo.pdf.
38. MÓDULOS FOTOVOLTAICOS DE PRIMEIRA GERAÇÃO FORTALEZA 2021. [s.l.: s.n.]. Disponível em: https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/65187/1/2021_tcc_evolveira.pdf. Acesso: 21 de novembro de 2023.
39. Meirelles, B. (2002). FABRICAÇÃO DE CÉLULAS SOLARES. Unicamp.Br. December 16, 2023, from https://www.ifi.unicamp.br/~lunazzi/F530_F590_F690_F809_F895/F809/F809_sem1_2002/991446-relatoriofianal.pdf
40. NASA. (2017, April 10). What is earth’s energy budget? Five questions with a guy who knows. NASA. <https://www.nasa.gov/centers-and-facilities/langley/what-is-earths-energy-budget-five-questions-with-a-guy-who-knows/>
41. O que são as energias limpas? Disponível em: <https://www.iberdrola.com/sustentabilidade/energias-limpas>. Acesso: 21 de novembro de 2023.

42. O que quer dizer transição energética? Disponível em: <<https://www.enelgreenpower.com/pt/learning-hub/transicao-energetica>>. Acesso: 21 de novembro de 2023.
43. OLIVEIRA, ELAÍNE. PROCESSOS de RECICLAGEM de MÓDULOS FOTOVOLTAICOS de PRIMEIRA GERAÇÃO. 2021, repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/65187/1/2021_tcc_evolveira.pdf. Acesso 12 novembro 2023.
44. ODS 7 - Energia Acessível e Limpa - Ipea - Objetivos do Desenvolvimento Sustentável. Disponível em: <<https://www.ipea.gov.br/ods/ods7.html>>. Acesso: 21 de novembro de 2023.
45. PEREIRA, REULER. POLÍTICAS PÚBLICAS PARA EXPANSÃO DA ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA: UM ESTUDO DOS PRINCIPAIS PROGRAMAS de INCENTIVO DA TECNOLOGIA NO BRASIL. 2019, repositorio.ifg.edu.br/bitstream/prefix/268/4/tcc_reuler%20pereira.pdf. Acesso 14 novembro 2023.
46. Propostas para Inserção da Energia Solar Fotovoltaica na Matriz Elétrica Brasileira. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<http://www.abinee.org.br/informac/arquivos/profotov.pdf>>. Acesso 8 de novembro de 2023.
47. Pinho, João, et al. Sistemas Híbridos Soluções Energéticas Para a Amazônia. 2008, www.mme.gov.br/luzparatodos/downloads/Solucoes_Energeticas_para_a_Amazonia_Hibrido.pdf. Acesso 11 Nov. 2023.
48. Propostas para Inserção da Energia Solar Fotovoltaica na Matriz Elétrica Brasileira. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<http://www.abinee.org.br/informac/arquivos/profotov.pdf>>. Acesso: 21 de novembro de 2023.
49. PIBID -UNICAMP, P.; ID, B.; CALIAN, B. UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS ENERGIA NUCLEAR. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://gpquae.iqm.unicamp.br/textos/T5.pdf>>. Acesso: 21 de novembro de 2023.
50. PLANALTO. LEI Nº 9.074, DE 7 DE JULHO DE 1995.. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/19074cons.htm#:~:text=LEI%20N%C2%BA%209.074%2C%20DE%207%20DE%20JULHO%20DE%201995.&text=Estabelec%20normas%20para%20outorga%20e,p%C3%BAblicos%20e%20d%C3%A1%20o%20utras%20provid%C3%A2ncias. Acesso em: 24 nov. 2023.
51. PLANALTO. DECRETO Nº 5.163 DE 30 DE JULHO DE 2004. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2004-2006/2004/decreto/d5163.HTM. Acesso em: 24 nov. 2023.
52. PLANALTO. LEI Nº 14.300, DE 6 DE JANEIRO DE 2022. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2022/lei/114300.htm. Acesso em: 24 nov. 2023.

53. RATTNER, H. O esgotamento dos recursos naturais: catástrofe interdependência? *Revista de Administração de Empresas*, v. 17, n. 2, p. 15–21, abr. 1977.
54. Radziemska, Ewa, and Piotr Ostrowski. Tratamento Químico de Células Solares de Silício Cristalino Como Método de Recuperação de Silício Puro de Módulos Fotovoltaicos. 2010, scholar.google.com/citations?view_op=view_citation&hl=pl&user=BW6yquUAAAAJ&citation_for_view=BW6yquUAAAAJ:roLk4NBRz8UC. Acesso 12 novembro 2023.
55. RADEFELD, B. et al. Instituto de Física Gleb Wataghin FABRICAÇÃO DE CÉLULAS SOLARES Relatório Final de Atividades F809-Instrumentação para Ensino. [s.l: s.n.]. Disponível em: <https://www.ifi.unicamp.br/~lunazzi/F530_F590_F690_F809_F895/F809/F809_sem1_2002/991446-relatoriofinal.pdf>. Acesso: 21 de novembro de 2023.
56. ROCHA, K. Planejamento de Microredes em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://repositorio.ufjf.br/jspui/bitstream/ufjf/8079/1/kamilaperesrocha.pdf>>. Acesso em: 24 nov. 2023.
57. Recursos Energéticos Distribuídos Documento de Apoio ao PNE 2050 Estudos de Longo Prazo. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-227/topico-457/GT%20PNE%20-%20RED%20-%20Relat%C3%B3rio%20Final.pdf>>. Acesso em: 24 nov. 2023.
58. Simioni, Tássio. O IMPACTO DA TEMPERATURA PARA O APROVEITAMENTO DO POTENCIAL SOLAR FOTOVOLTAICO DO BRASIL. 2017, www.ppe.ufrj.br/images/publica%C3%A7%C3%B5es/mestrado/T%C3%A1ssio_Simioni.pdf. Acesso 8 de novembro de 2023.
59. Silva, Catarina, and Melo Campos. Estudo Da Eficiência Dos Painéis Solares Com Concentradores E Arrefecimento Térmico Em Função Do Fluido Utilizado No Arrefecimento Das Células Solares. 2018, fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/1970719973967964/Tese_final_79654.pdf. Acesso 12 novembro 2023.
60. Solar Energy Technologies Office. “Solar Futures Study.” Energy.gov, 8 Sept. 2021, www.energy.gov/eere/solar/solar-futures-study. Acesso 15 novembro 2023.
61. SIMIONI, T. O IMPACTO DA TEMPERATURA PARA O APROVEITAMENTO DO POTENCIAL SOLAR FOTOVOLTAICO DO BRASIL. [s.l: s.n.]. Disponível em: <https://www.ppe.ufrj.br/images/publica%C3%A7%C3%B5es/mestrado/T%C3%A1ssio_Simioni.pdf>. Acesso: 21 de novembro de 2023.
62. Solar cells with 30-year lifetimes for power-generating windows. Disponível em: <<https://ece.engin.umich.edu/stories/solar-cells-with-30-year-lifetimes-for-power-generating-windows>>. Acesso: 21 de novembro de 2023.

63. SOFIA, C. et al. Estudo da eficiência dos painéis solares com concentradores e arrefecimento térmico em função do fluido utilizado no arrefecimento das células solares Novembro 2018. [s.l: s.n.]. Disponível em: <http://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/1970719973967964/Tese_final_79654.pdf>. Acesso: 21 de novembro de 2023.
64. TAVARES, J. et al. [s.l: s.n.]. Disponível em: <https://www.mme.gov.br/luzparatodos/downloads/Solucoes_Energeticas_para_a_Amazonia_Hibrido.pdf>. Acesso: 21 de novembro de 2023.
65. Tolmasquim, Mauricio. Energia Renovavel. 2016, www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-172/Energia%20Renov%C3%A1vel%20-%20Online%2016maio2016.pdf. Acesso 11 novembro 2023.
66. Tabela 6591: Indicador 7.1.2 - Proporção da população com dependência primária em combustíveis e tecnologia limpos. Disponível em: <<https://sidra.ibge.gov.br/tabela/6591>>. Acesso: 21 de novembro de 2023.
67. UNITED NATIONS. Sustainable Development Goals. Disponível em: <<https://www.un.org/sustainabledevelopment/sustainable-development-goals/>>. Acesso: 21 de novembro de 2023.
68. UNICAMP. Microredes. Disponível em: <https://www.campus-sustentavel.unicamp.br/microrredes/#:~:text=Uma%20microrrede%20pode%20ser%20definida,o%20fornecimento%20de%20energia%20local...>Acesso em: 24 nov. 2023.
69. Vasconcelos, Y. (Ed.). (2017). Luz mais eficiente. https://revistapesquisa.fapesp.br/wp-content/uploads/2017/10/064-068_perovskita_260.pdf> Acesso 8 novembro. 2023.
70. Zahedi, A. Solar Photovoltaic (PV) Energy; Latest Developments in the Building Integrated and Hybrid PV Systems. 2006, www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960148105001990. Acesso 12 novembro 2023.
71. Z kolektora słonecznego... Ciepło i prąd jednocześnie. [s.l: s.n.]. Disponível em: <https://www.cire.pl/pliki/2/hybrid_kolektor_sloneczn.pdf>. Acesso: 21 de novembro de 2023.