

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA
CÂMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

João Alberto Damiani Filho

Geração Fotovoltaica no Setor Elétrico Brasileiro: Situação Atual e Tendências

**Ilha Solteira
2023**

João Alberto Damiani Filho

Geração Fotovoltaica no Setor Elétrico Brasileiro: Situação Atual e Tendências

Trabalho de Graduação de Curso
apresentado à Faculdade de Engenharia de
Ilha Solteira – Unesp como parte dos
requisitos para obtenção do título de
engenheiro eletricista.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Antônio Alves

Ilha Solteira
2023

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

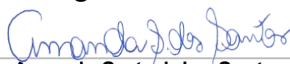
D158g Damiani Filho, João Alberto.
Geração fotovoltaica no setor elétrico brasileiro: situação atual e tendências
/ João Alberto Damiani Filho. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2024
83 f. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Elétrica) -
Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2024

Orientador: Carlos Antônio Alves

Inclui bibliografia

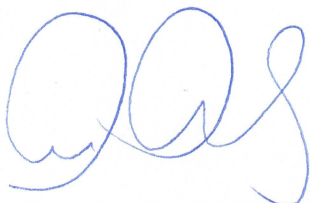
1. Aplicações da energia solar. 2. Energia alternativa. 3. Energia solar. 4.
Projeções futuras. 5. Tecnologia.


Amanda Sertori dos Santos

Bibliotecária - CRB/8-9061
Seção Técnica de Referência, Atendimento ao
Usuário e Documentação
Diretoria Técnica de Biblioteca e Documentação

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE GRADUAÇÃO

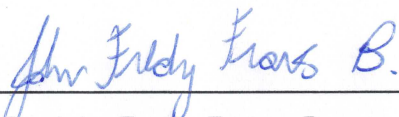
Aos nove dias do mês de janeiro do ano de dois mil e vinte e quatro, o discente **João Alberto Damiani Filho**, matriculado sob o RA 161050247, tendo como banca examinadora o seu orientador, o *Prof. Dr. Carlos Antonio Alves*, o *Prof. Dr. John Fredy Franco Baquero* e o *Prof. Dr. Rodrigo Cardim*, apresentou o Trabalho de Graduação intitulado "**Geração Fotovoltaica no Setor Elétrico Brasileiro: Situação Atual e Tendências**", obtendo a nota **7,5** (Sete e meio) e conceito **APROVADO**.



Prof. Dr. Carlos Antonio Alves
- Orientador-



João Alberto Damiani Filho
- Discente -



Prof. Dr. John Fredy Franco Baquero
- Membro da Banca -



Prof. Dr. Rodrigo Cardim
- Membro da Banca -

RESUMO

O crescimento da demanda energética é um assunto de grande importância para o futuro, e com a necessidade de se ter uma sociedade mais sustentável, a energia solar fotovoltaica surge como uma das principais alternativas para a expansão da matriz energética brasileira. O objetivo deste trabalho é avaliar como será a expansão da utilização nos próximos anos, através de análises de como utilizar essa aplicação da forma mais sustentável e viável economicamente, também foi necessário observar como os impactos causados por futuras eventuais mudanças na legislação podem alterar a demanda para implementação dessa tecnologia. Como rota metodológica, esse trabalho usou de uma revisão bibliográfica por meio de estudo e projeções realizados por órgãos governamentais caracterizando-se como um estudo descritivo e teórico. Com o estudo conclui-se que mesmo com alguns empecilhos à implementação de novas unidades de geradores fotovoltaicos é benéfico para a sociedade, pois ela pode substituir fontes mais poluentes como os combustíveis fósseis, além disso a micro e minigeração distribuída reduz os custos de transmissão e perdas, pois a energia gerada é consumida no local.

Palavras-chave: Aplicações da energia solar, Energia alternativa, Energia solar, Projeções futuras, Tecnologia.

ABSTRACT

The growth in energy demand is a subject of great importance for the future, and given the need to have a more sustainable society, photovoltaic solar energy emerges as one of the main alternatives for expanding the Brazilian energy matrix. The objective of this work is to evaluate how the expansion of use will be in the coming years, through analyzes of how to use this application in the most sustainable and economically viable way, it was also necessary to observe the impacts caused by changes that future changes in legislation may change the demand for implementing this technology. As a methodological route, this work used a bibliographical review through studies and projections carried out by government agencies, characterizing it as a descriptive and theoretical study. The study concludes that even with some specifications, the implementation of new photovoltaic generator units is beneficial for local generation, as it complements other types of generations and can have the specific purpose of being used for local generation.

Keywords: Alternative energy. Future projections Applications of solar energy, Solar Energy.. Technology.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	- Evolução da demanda de energia por fonte até 2031.....	16
Figura 2	- Exemplo de usina fotovoltaica.....	19
Figura 3	- Russell Onl e a primeira célula a base de silício.....	21
Figura 4	- Evolução dos preços dos módulos solares x Produção de células fotovoltaicas.....	22
Figura 5	- Efeito Fotovoltaico.....	24
Figura 6	- Silício monocristalino.....	25
Figura 7	- Silício Policristalino.....	26
Figura 8	- Principais fatores que determinam a eficiência de uma célula fotovoltaica.....	28
Figura 9	- Curva I-V de uma célula fotovoltaica.....	29
Figura 10	- Influência da irradiância solar na curva característica I-V.....	30
Figura 11	- Associação em série de células fotovoltaicas.....	31
Figura 12	- Associação em série de células fotovoltaicas.....	32
Figura 13	- Curva característica I-V e curva de potência P-V para um módulo com potência nominal de 100Wp.....	33
Figura 14	- Participação das tecnologias de módulos fotovoltaicos.....	34
Figura 15	- Evolução do número de células dos módulos fotovoltaicos.....	35
Figura 16	- Evolução do número de células dos módulos fotovoltaicos.....	36
Figura 17	- Operação do diodo de desvio.....	37
Figura 18	- Tipos de inversores quanto ao princípio de operação.....	39

Figura 19	- Inversor de dois estágios.....	39
Figura 20	- Evolução das faixas de potência dos inversores.....	40
Figura 21	- Participação dos tipos de estrutura.....	41
Figura 22	- Evolução do fator de capacidade.....	42
Figura 23	- Investimento de cada parcela dos projetos entre 2016 e 2022.....	43
Figura 24	- Prazos para implantação de empreendimentos fotovoltaicos.....	44
Figura 25	- Ranking dos 10 países que gerarão mais energia solar fotovoltaica....	45
Figura 26	- Perfil de geração fotovoltaica em um dia de verão dados em MW X Horas.....	46
Figura 27	- Geração média horária.....	47
Figura 28	- Percentual de geração diária média em MW do SIN.....	47
Figura 29	- Premissas de projeção de carga.....	50
Figura 30	- Evolução da capacidade instalada e contratada no SIN dada em MW...	51
Figura 31	- Investimento anuais em MMGD em bilhões de reais.....	51
Figura 32	- Total de investimento em MMGD entre 2010 e 2020.....	52
Figura 33	- Investimento anuais em geração centralizada em bilhões de reais.....	53
Figura 34	- Total de investimento em geração centralizada entre 2010 e 2020.....	53
Figura 35	- Evolução esperada da geração centralizada de energia solar.....	54
Figura 36	- Comparação da expansão da capacidade instalada Solar PVxUHE.....	55
Figura 37	- Mapa da Radiação Global Horizontal.....	56
Figura 38	- Mapa da Radiação Global Horizontal por estado.....	57
Figura 39	- Sazonalidade da irradiação por estado.....	58
Figura 40	- Evolução da geração fotovoltaica no brasil até 2027.....	59

Figura 41	- Evolução da matriz energética brasileira 2022.....	60
Figura 42	- Evolução da matriz energética brasileira 2027.....	60
Figura 43	- Evolução da geração fotovoltaica até 2027 (MW).....	61
Figura 44	- Esquema geral solar e fotovoltaico flutuante.....	63
Figura 45	- Vantagens e desvantagens de projeto usina fotovoltaica flutuante.....	63
Figura 46	- Dejetos de pássaros em módulos flutuantes.....	65
Figura 47	- Capacidade instalada FVF no mundo e instalação anuais.....	67
Figura 48	- Usina fotovoltaica flutuante no reservatório da UHE Sobradinho.....	68
Figura 49	- Mapa com as estações de estudo.....	70
Figura 50	- Localidades de estudo.....	71
Figura 51	- Médias horárias dos recursos eólicos e solar para os locais estudados.	72
Figura 52	- Médias anuais para a localidade 5.....	73
Figura 53	- Energia fotovoltaica injetada x estrutura de suporte.....	73
Figura 54	- Esquemático do micro e mineração.....	74
Figura 55	- Expansão da oferta de geração de energia elétrica em 2020 (GW).....	75
Figura 56	- Projeção da capacidade instalada de MMGD (GW).....	76
Figura 57	- Projeção da participação por fonte em 2031.....	76
Figura 58	- Pedidos de conexão de micro e minigeração.....	77
Figura 59	- Funcionamento das baterias em uma residência com MMGD.....	78

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	- Parâmetros elétricos de algumas tecnologias em células FV	30
Tabela 2	- Unidades consumidoras com geração distribuída.....	54
Tabela 3	- Potencial de geração de energia de FVF em reservatórios.....	66
Tabela 4	- Comparação dos custos de investimento FVF x FV em solo.....	69

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

a - Si	Silício amorfo
AEGE	Acompanhamento de empreendimentos geradores de energia
AMA	Acompanhamento de Medições Anemométricas
CAPEX	Capital investido no projeto
CA	Corrente alternada
CC	Corrente contínua
Cdte	Telureto de cádmio
CIGS	Disseleneto de cobre, índio e gálio
CIS	Disseleneto de cobre e índio
CNPE	Conselho nacional de política energética
CPV	Célula fotovoltaica para concentração
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
FF	Fator de Forma
FV	Sistema solar fotovoltaico
FVF	Sistema solar fotovoltaico flutuante
GD	Geração distribuída
GHI	Irradiação global horizontal
m - Si	Silício monocristalino
MMGD	Micro e minigeração distribuída
ONS	Operador nacional do sistema elétrico
OPV	Células orgânicas ou polímeras
p - Si	Silício policristalino
PWN	<i>Pulse Width Modulation</i>
SFCR	Sistema fotovoltaico conectado à rede
SIN	Sistema Interligado Nacional

SPPM	Seguidores de potência máxima
UHE	Usina Hidrelétrica

LISTA DE SÍMBOLOS

I_{mp}	Valor de corrente na qual a potência é máxima
I_{sc}	Corrente de curto-circuito
J_{sc}	Densidade de corrente de curto-circuito
P_{mp}	Potência máxima
V_{mp}	Valor de tensão na qual a potência é máxima
V_{oc}	Tensão de circuito aberto

SUMÁRIO

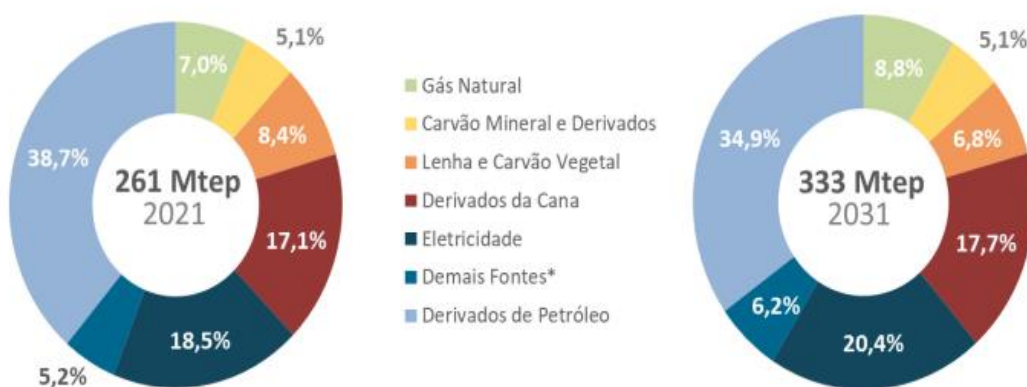
1	INTRODUÇÃO.....	16
1.1	OBJETIVOS DO TRABALHO.....	18
1.2	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	18
2	GERAÇÃO DE ENERGIA FOTOVOLTAICA	19
2.1	EVOLUÇÃO DA ENERGIA FOTOVOLTAICA.....	20
2.2	EFEITO FOTOVOLTAICO.....	23
2.3	SISTEMA FOTOVOLTAICO.....	26
2.3.1	Células Fotovoltaicas.....	27
2.3.2	Módulos fotovoltaicos.....	31
2.3.3	Painéis fotovoltaicos.....	36
2.3.4	Inversores.....	38
2.3.5	Estruturas de suporte dos módulos.....	41
2.3.6	Fator de capacidade.....	41
2.3.7	Custo de investimento e prazo de implementação.....	42
3	ESTUDO DA PROJEÇÃO DA GERAÇÃO FOTOVOLTAICA NO BRASIL.....	45
3.1	PANORAMA DA GERAÇÃO NO BRASIL.....	45
3.2	LEI 14.300 MARCO DA MINI E MICROGERAÇÃO NO BRASIL.....	48
3.3	PROJEÇÃO DA GERAÇÃO DE ENERGIA NO BRASIL.....	49
3.4	PROJEÇÃO DA GERAÇÃO DE ENERGIA FOTOVOLTAICA PARA OS PRÓXIMOS ANOS.....	55
3.5	TIPOS DE PROJETOS DE USINAS FOTOVOLTAICAS.....	62

3.5.1	Usina fotovoltaica flutuante.....	62
3.5.2	Usinas Híbridas Solar - Eólica.....	69
3.5.3	Micro e Minigeração Distribuídas e baterias.....	74
4	CONCLUSÃO.....	80
	REFERÊNCIAS.....	81

1 INTRODUÇÃO

O Brasil é um país em desenvolvimento e com um considerável crescimento demográfico, sendo assim, tais características possuem a tendência de um aumento significativo do consumo de energia elétrica. Segundo o “Plano Decenal de Energia 2031”, realizado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2022), o consumo de energia no Brasil cresce cerca de 3,5% por ano. Dentre as fontes energéticas, uma das que mais irá crescer será a demanda por energia elétrica, como pode ser visto na Figura 1.

Figura 1 – Evolução da demanda de energia por fonte até 2031



Fonte: EPE (2022).

É previsto que o parque gerador brasileiro apresenta redução gradativa da participação da energia hidrelétrica na matriz de geração no longo prazo, pois a disponibilidade dos recursos hídricos está ficando cada vez mais escassa e o potencial natural disponível está em uso e as unidades geradoras que podem ser exploradas tem um grande impacto ambiental. Além disso, a matriz energética baseada em recurso hídrico tem dependência de pluviosidade para manter a geração (EPE, 2022).

Devido a tais fatores apontados nesse estudo, se faz necessário a expansão de outras fontes renováveis na matriz de geração de energia. Com minimização de impacto ao meio ambiente e robustez do sistema, menos dependente de fatores não controláveis e que venham a permitir um crescimento econômico e qualidade de vida à população.

Uma das principais fontes que surge para se melhorar essa situação é a geração fotovoltaica, que usa um recurso que existe de forma abundante, infinita e que está presente em todos os lugares.

Uma opção importante para enfrentar esse problema são usinas de Geração Distribuída (GD) que são modalidades de geração de energia elétrica no local ou próximo ao ponto de consumo. Ela se difere da geração centralizada, que é composta por usinas de grande porte, que são conectadas ao Sistema Interligado Nacional (SIN) mas que devido à sua natureza podem estar localizadas distante de centros consumidores.

Além das usinas de geração distribuídas serem de fácil montagem e estruturação, os são projetos mais baratos reduzindo os custos de geração. Ademais, aproveitam espaços já usados diminuindo os impactos no meio ambiente.

Outra opção que surge como uma fonte de geração alternativa para o futuro são as gerações híbridas. A combinação de mais de uma fonte pode minimizar as limitações que as unidades geradoras possuem individualmente.

A fonte que apresenta o maior incremento de capacidade instalada é a energia solar fotovoltaica devido a diversos fatores como a redução no preço da instalação, maturidade tecnológica, disponibilidade de locais adequados de instalação entre outros (EPE, 2020).

O Brasil é privilegiado quando o assunto é índice de incidência da radiação solar, por esse motivo é possível desenvolver projetos em diversos locais pelo país. Outro ponto de destaque é a evolução da tecnologia empregada na montagem das unidades de geração fotovoltaica. As células de silício são alteradas, podendo ser mudanças intrínsecas do material, redução de sua espessura ou mudança no modelo dos seus contatos, além disso, são feitas pesquisas para novos materiais que podem substituir os tradicionais módulos de silício (EPE, 2020).

Os módulos também sofrem diversas melhorias, como por exemplo seu aumento de tamanho, incremento do número de células e novas configurações de posicionamento. Algumas dessas mudanças gerais podem aumentar a geração em até 50% (EPE, 2020).

Mesmo que não seja possível prever o ritmo e a forma em que as tecnologias irão evoluir, o setor espera que se mantenha a trajetória na redução do custo das peças e do aproveitamento da radiação solar (EPE, 2020).

1.1 OBJETIVOS DO TRABALHO

Este trabalho consiste em analisar como e onde a energia elétrica gerada pelo efeito fotovoltaico irá impactar na matriz energética brasileira, quais são as configurações que trazem o menor impacto ambiental e uma utilização melhor dos recursos.

Será realizada uma conceituação básica dos aspectos gerais ao estudo da utilização sobre os efeitos físicos, materiais utilizados para confecção dos módulos de geração fotovoltaica.

Fazendo um levantamento dos tipos de usinas que tem como princípio aproveitar espaços já utilizados, buscando a diminuição dos impactos ao meio ambiente e um maior aproveitamento dos ambientes.

1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O capítulo 2 abordada a energia gerada através do efeito fotovoltaico, observando sua evolução histórica, redução de custos e o aumento de sua eficiência ao longo do tempo, além de explicar o efeito fotovoltaico e quais materiais que são usados na fabricação e como ocorre o funcionamento de uma unidade geradora e quais são seus componentes.

No capítulo 3 é analisado a evolução da demanda de energia no Brasil nos próximos anos, onde se observa como as mudanças na legislação podem impactar na montagem de novas unidades de geração. Também nesse capítulo é estimada como será a evolução da geração fotovoltaica, abordando quais serão os tipos de projetos de geração fotovoltaica em que se utilizam espaços subutilizados.

2 GERAÇÃO DE ENERGIA FOTOVOLTAICA

A geração fotovoltaica é uma energia renovável e limpa, que usa a radiação emitida pelo Sol (fótons) para gerar eletricidade, sendo denominado como efeito fotoelétrico e que utiliza determinados materiais capazes de absorver fótons e liberar elétrons, produzindo corrente elétrica (IBERDROLA, 2023).

Para se obter a energia usa-se um dispositivo semicondutor denominada célula solar ou célula fotovoltaica, que são feitas de silício ou de algum outro material semicondutor de camada fina, esses materiais alteram a eficiência da placa assim como seu preço (IBERDROLA, 2023).

Existem dois tipos de geração fotovoltaicas, o gerador de autoconsumo em que parte da energia gerada é consumida pelo próprio produtor e o excedente é enviado à rede. Quando a geração não for suficiente para cobrir a demanda o produtor extrai a energia da rede, esse tipo de usina é muito encontrado em residências. O outro é denominado como usina fotovoltaica, onde toda a energia gerada pelos painéis é enviada à rede elétrica, como apresentado na Figura 2. Um exemplo são os grandes geradores comerciais e as fazendas elétricas, que estão sendo feitas por iniciativa privada (IBERDROLA, 2023).

Figura 2 – Exemplo de Usina Fotovoltaica



Fonte: PORTALSOLAR (2023).

Com uma demanda crescente por energia e com algumas fontes geradoras desaparecendo a geração fotovoltaica se torna cada vez mais importante para o cenário futuro, isso se dá porque ela não causa impactos ambientais e sua fonte de energia é infinita e gratuita.

2.1 EVOLUÇÃO DA ENERGIA FOTOVOLTAICA

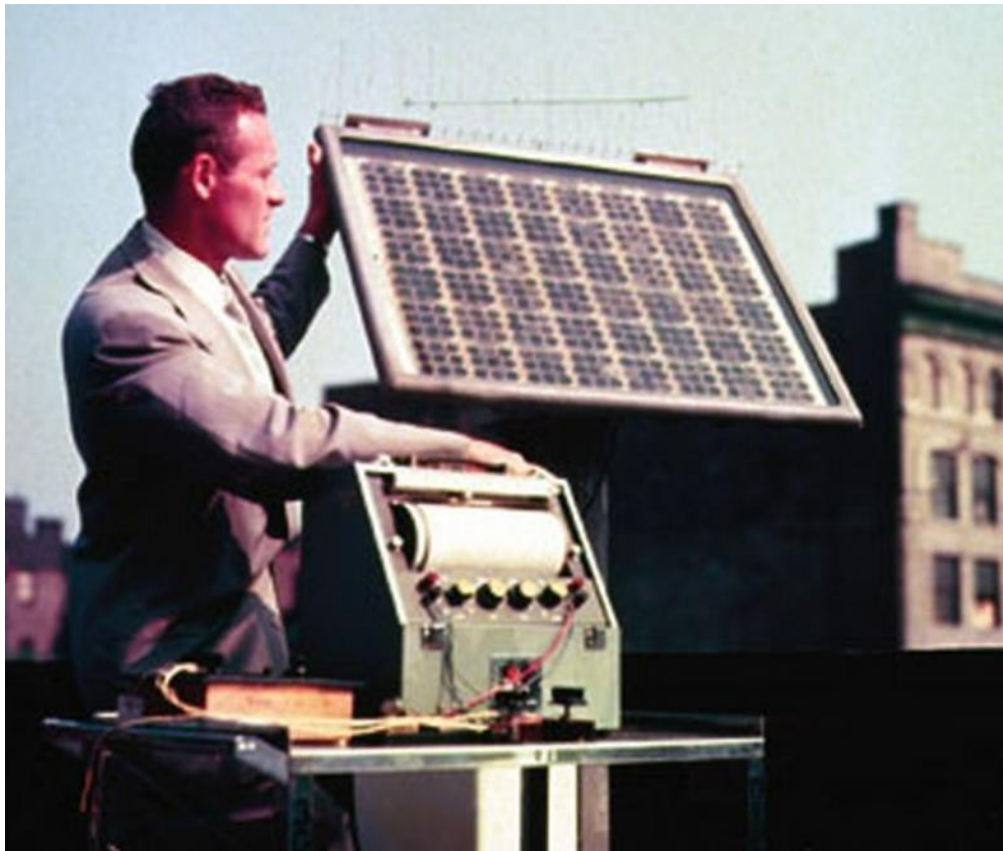
O efeito fotovoltaico foi descoberto no ano de 1839 pelo francês Alexandre Edmond Becquerel, o experimento consistia em dois eletrodos imersos em uma solução ácida que quando era exposta a iluminação ocorria geração de eletricidade, e depois de diversas análises Alexandre concluiu que a era devida à luz que incidia na célula.

Usando células fotovoltaicas, ele desenvolveu o actinômetro, instrumento capaz de medir a intensidade luminosa de feixes de luz, também foi determinado que a luz azul era a que produzia as correntes elétricas mais intensas (UNICENTRO, 2023).

O primeiro aparelho de geração de energia elétrica a partir de células fotovoltaicas foi criado no ano de 1876 pelos cientistas Richard Evans Day e William Grylls Adams. Esse aparelho era composto por um filme de ouro com selênio depositado em um substrato de ferro. Esse dispositivo tinha uma taxa de conversão muito baixa, em torno de 0,5% (HEPEL ENERGIA SOLAR, 2023).

Porém o início da energia solar como conhece-se hoje só se deu início em 1954, quando o engenheiro estadunidense Russell Ohl, mostrado na Figura 3, criou a primeira célula solar a base de silício, neste mesmo ano o químico Calvin Fuller desenvolveu a dopagem de silício, essa foi a primeira vez que uma célula solar conseguiu alimentar um aparelho elétrico por várias horas e essa célula tinha uma eficiência de 4% (HEPEL ENERGIA SOLAR, 2023).

Figura 3 – Russell Ohl e a primeira célula a base de silício



Fonte: HEPEL ENERGIA SOLAR (2023).

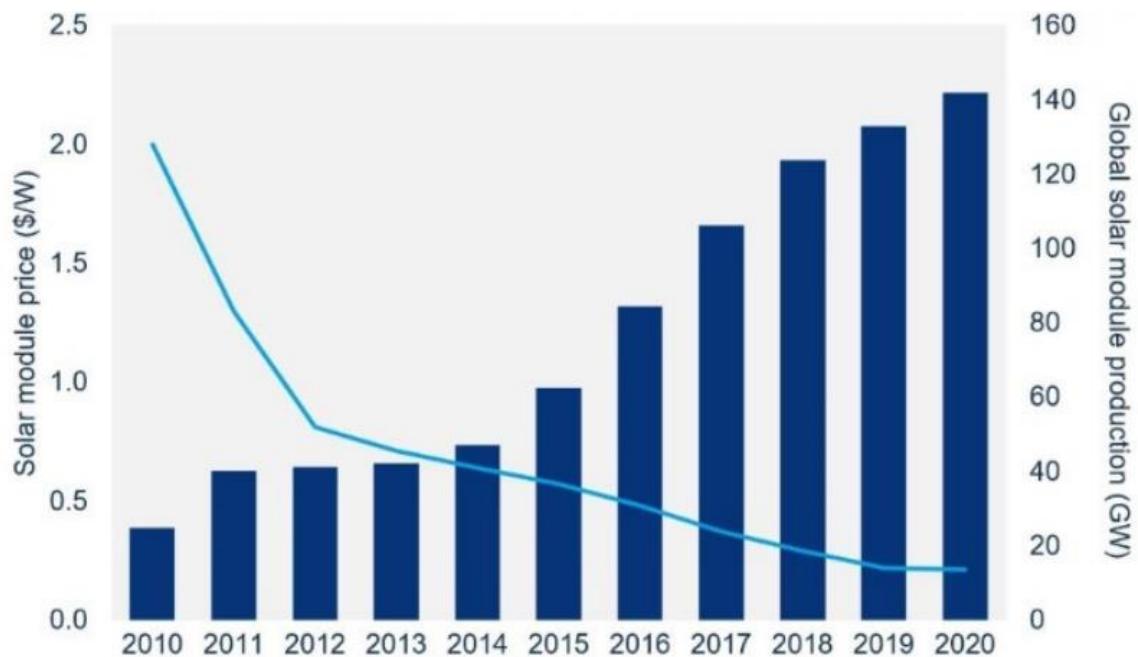
Inicialmente o desenvolvimento da energia fotovoltaica era feito para o uso das empresas de telecomunicação que precisavam de fonte de geração para seus equipamentos que eram instalados em locais distantes. Outra indústria que contribuiu para o avanço dessa tecnologia foi a aeroespacial devido à corrida espacial, pois consideravam que a energia fotovoltaica o melhor método de fornecimento de energia para os equipamentos que estavam no espaço (PINHO; GALDINO, 2014).

Devido à crise do petróleo de 1973, aumentou-se a busca pela energia solar fotovoltaica como alternativa para alimentação dos equipamentos terrestres. Porém, o custo para a implementação ainda era muito elevado, além disso, as células ainda não possuíam uma boa eficiência energética (PINHO; GALDINO, 2014).

Em 1998 a produção de energia aumentou, atingindo a produção de 150 mWp por célula, a nova célula tinha o silício como material principal de sua produção, além disso começou um forte interesse da China em produzir as células fotovoltaica (PINHO; GALDINO, 2014).

Apesar de sua disponibilidade em ambiente natural a energia solar ainda é subaproveitada, porém essa realidade vem sendo mudada conforme cresce a demanda por mais eletricidade, e as células fotovoltaicas ficam mais eficientes e baratas. A Figura 4 mostra a evolução da produção de energia pelas células fotovoltaicas e o custo das células.

Figura 4 – Evolução dos preços dos módulos solares x Produção de células fotovoltaicas



Fonte: Fundação Joaquim Nabuco (2023).

É notável como a potência instalada está aumentando de maneira acelerada saindo de menos de 0,5 GW em 2010 para mais de 140 GW em 2020, um dos motivos que pode explicar esse aumento acelerado é a redução dos preços tornando mais acessível a instalação de novas unidades.

No mundo a produção de células fotovoltaicas tem crescido de forma mais expressiva na Ásia principalmente na china, isso ocorre devido a existência de diversas políticas favoráveis à implementação e a diminuição dos custos, no resto do mundo a custo das células fotovoltaicas ainda é um dos fatores que impede o crescimento da utilização dessa tecnologia em grande escala.

2.2 EFEITO FOTOVOLTAICO

O efeito fotovoltaico se dá pela transformação da radiação solar fotovoltaica (fótons) em eletricidade por uma diferença de potencial em uma célula formada por um sanduíche de materiais semicondutores. Quando conectada a dois eletrodos com a diferença de tensão elétrica sobre eles e se tiver um meio físico para a condução dos elétrons haverá corrente elétrica

O efeito fotovoltaico é o nome que se dá ao processo que transforma a energia solar diretamente em energia elétrica. Esse processo é feito por materiais semicondutores caracterizados pela existência de bandas de energia, uma caracterizada pela presença de elétrons e a outra caracterizada pela ausência de elétrons. Atualmente o semicondutor mais utilizado é o silício. Os átomos desse material possuem quatro elétrons na camada de valência que fazem ligação com os que estão ao seu redor. Quando são adicionados átomos de cinco elétrons sem ligação, os elétrons que ficam sem par não possuem uma forte ligação com seu átomo de origem e por conta dessa característica, com pouca energia térmica este elétron se move para a banda vazia. Tem-se como exemplo de átomos de cinco elétrons o fósforo ou dopante n (CRESESB, 2005).

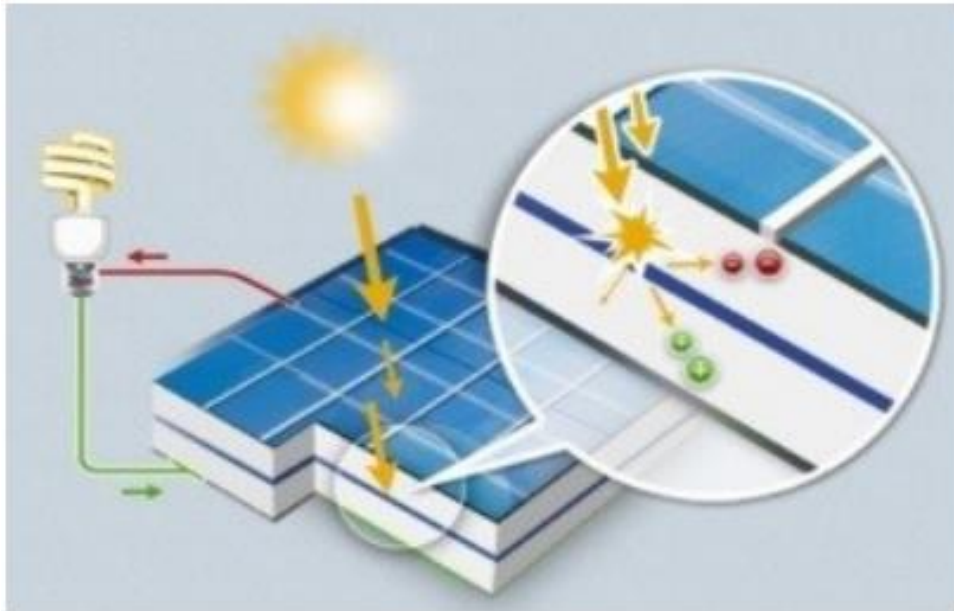
A introdução de átomos de três elétrons caracteriza uma falta de elétron que é nomeado de lacuna. Quando se tem a situação de valência, um elétron que esteja ao redor pode se mover para ocupar essa posição deslocando a coluna. Vale ressaltar que esse processo ocorre com pouca energia térmica, um elemento que possui três elétrons é usado para esse fim é o boro e é denominado como aceitador de elétrons ou dopante p (CRESESB, 2005).

Quando o silício puro é dopado com o fósforo e o boro ocorre a junção pn, nessa junção os elétrons que se encontram livres no lado n e se movem para o lado p onde existem lacunas. Devido a esse processo o lado p se caracteriza como eletricamente negativo e o lado n se caracteriza como eletricamente positivo e quando o campo produzido por tal efeito consegue barrar os elétrons livres ele fica em equilíbrio (CRESESB, 2005).

Se a junção pn for exposta aos fótons presentes na luz solar, acontecerá a geração de pares elétron-lacuna, se isso ocorrer onde se possui um campo elétrico diferente de zero, as cargas são aceleradas gerando uma corrente através da junção. Isso cria uma diferença de potencial nas extremidades do silício, que quando

conectadas a um fio gera a circulação de elétrons, como mostrado na Figura 5 (CRESESB, 2005).

Figura 5 – Efeito fotovoltaico



Fonte: Sala da elétrica (2023).

Uma célula fotovoltaica é composta de materiais semicondutores e de contatos metálicos. O semicondutor é um material caracterizado por ter características entre um condutor e um isolante.

O silício é um elemento químico que tem características de semicondutor, sendo um dos elementos mais abundantes do planeta e 25% da massa da crosta terrestre é composta por esse material, sendo encontrado em rochas e minérios como por exemplo o quartzo, feldspato, mica. O silício possui 4 elétrons em sua camada de valência que quando combinados acabam formando cristais que quando estão em temperatura ambiente e se comportam como isolante. Por isso, para aumentar a condutividade do silício é necessário fazer a junção de outros átomos (fósforo e o boro) e, como explicado anteriormente, é por essa junção entre esses átomos que a energia é absorvida.

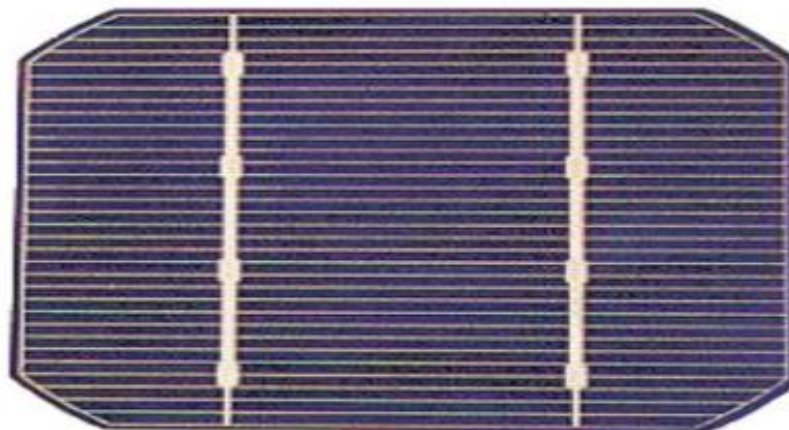
O silício puro é um mau condutor elétrico em temperatura ambiente, isso ocorre porque ele não possui elétrons livres, por isso é feita a dopagem adicionando o fósforo e com essa adição se tem um material com elétrons livres (silício tipo N). Caso se

dope o silício com o boro se obtém um material com cargas positivas livres (silício tipo p).

Um painel fotovoltaico é composto por células com uma camada fina do material tipo N (material dopado com fósforo) e uma maior do tipo P (material dopado com boro), essa junção gera um campo elétrico devido a interação do silício tipo N com os vazios do silício do tipo P (LUQUE; HEGEDUS, 2011)

O silício monocristalino é composto por blocos de silício ultrapuro, que devem ser submetidos a altas temperaturas e a um processo de formação de cristal, seu lingote deve ser composto por uma estrutura cristalina única e deve ter uma organização molecular homogênea, essa organização lhe dá um aspecto brilhante e uniforme. Para ser utilizado nas células fotovoltaicas o lingote deve ser serrado e receber impurezas em ambas as faces, formando as camadas P e N explicadas anteriormente. Após a dopagem a célula semiacabada deve receber a película metálica em uma das suas faces e uma grade em outra face e por fim uma camada de material antirreflexo na face que vai receber a incidência de luz solar. Na Figura 6 tem-se um exemplar de um módulo feito com base em silício monocristalino com as características comentadas anteriormente (LUQUE; HEGEDUS, 2011).

Figura 6 – Silício monocristalino



Fonte: CEPEL, CRESESB (2020).

O silício policristalino tem um custo de fabricação em média 20% mais barato que o monocristalino, além de possuir uma vida útil superior aos 30 anos. Como apresentado na Figura 7, ele possui um formato de bolacha retangular ou quadrada

que possibilita uma melhor utilização da área do módulo em comparação com as monocristalinas (HEPEL, 2023).

Figura 7 – Silício policristalino



Fonte: CEPEL, CRESESB (2020).

2.3 SISTEMA FOTOVOLTAICO

Um sistema fotovoltaico pode ser dividido em três grupos principais:

- **Grupo gerador:** Esse grupo é composto pelos módulos fotovoltaicos, que tem como finalidade converter energia solar em energia elétrica e contempla suas ligações e estruturas.
- **Grupo de condicionamento de potência:** Esse grupo é composto pelos conversores de corrente, seguidores de potência máxima (SPPM), inversores, controladores de carga (somente em casos em que tem armazenamento), dispositivos de proteção, supervisão e controle.
- **Grupo de armazenamento:** Composto pelas baterias e demais formas de armazenamento de energia.

Vale ressaltar que uma central geradora fotovoltaica conectada à rede, que são as que causam impacto no potencial instalado, não possui armazenamento de energia porque a energia gerada entra diretamente no sistema interligado nacional e as micro e minigeração estudadas também estão interligadas à rede.

2.3.1 Células Fotovoltaicas

As células fotovoltaicas são a principal parte do processo de transformação direta de energia solar em energia elétrica. Como explicado anteriormente elas têm como material base semicondutores e a fabricação dessas células podem ser divididas em três gerações.

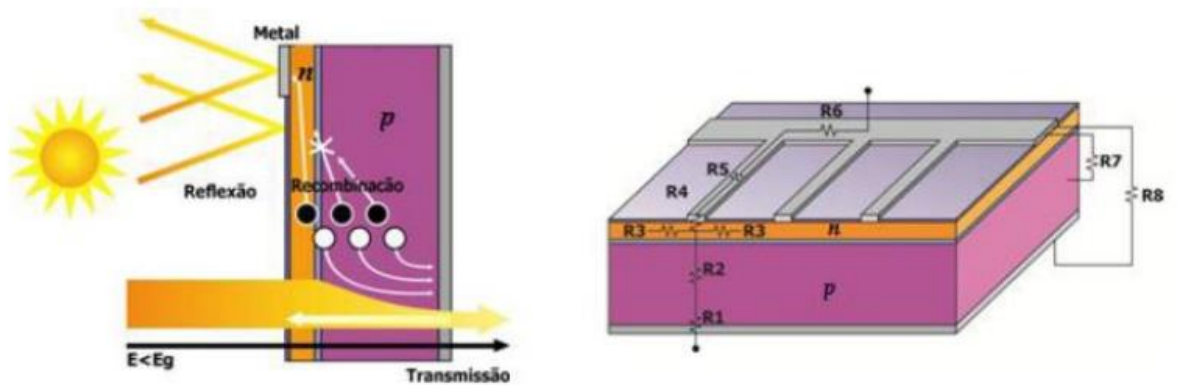
A primeira geração utiliza o silício monocristalino (m- Si) (Figura 6) e silício policristalino (p - Si) (Figura 7), como essa tecnologia está a muito tempo disponível no mercado possui um histórico confiável e uma boa eficiência, por isso é a tecnologia usada na maioria das instalações atuais (PINHO E GALDINO, 2014).

O segundo tipo de geração é feita através dos filmes finos, compostos por silício amorfo (a - Si), disseleneto de cobre e índio (CIS) ou disseleneto de cobre, índio e gálio (CIGS) e telureto de cádmio. Esse tipo de geração possui uma menor participação no mercado pois possuem uma menor eficiência quando comparado a primeira. Esse tipo de geração também tem um baixo tempo de vida útil, além de se ter uma indisponibilidade dos materiais de fabricação e no caso a cádmio é tóxico que traz uma maior complexidade (PINHO E GALDINO, 2014).

O terceiro tipo de geração é caracterizada por sua multijunção de células voltaicas e célula fotovoltaica para concentração (CPV) e células orgânicas ou polímeras (OPV). Esse tipo de geração possui um alto custo de implementação, entretanto possui uma maior eficiência que os anteriores (PINHO E GALDINO, 2014).

O que caracteriza o efeito fotovoltaico é a separação de portadores de carga, esse efeito acontece quando qualquer semicondutor for exposto à radiação. Por isso pode-se dizer que as células fotovoltaicas são diodos otimizados para o aproveitamento fotovoltaico, a Figura 8 mostra os fatores que influenciam na eficiência de uma célula fotovoltaica (PINHO E GALDINO, 2014).

Figura 8 – Principais fatores que determinam a eficiência de uma célula fotovoltaica



Fonte: PINHO E GALDINO (2014).

Observando a Figura 8 tem-se duas representações. A imagem à esquerda representa as perdas por reflexão e transmissão, recombinação de portadores de carga minoritária e a sombra produzida pela malha metálica frontal. A da direita representa perdas pela resistência em série nas junções metal-semicondutor nos contatos frontal e traseiro ($R1$ e $R4$), perdas nas trilhas metálicas ($R5$ e $R6$) e nas junções n ($R3$) e p ($R2$), perdas por resistência em paralelo entre o contato metálico frontal P ($R7$) e entre os contatos metálicos frontal e traseiro ($R8$) (PINHO E GALDINO, 2014).

As características elétricas mais importantes a saber de uma célula são:

- Tensão de circuito aberto (V_{oc}): é a tensão nos terminais de uma célula quando não há corrente elétrica circulando por ela. Representa a máxima tensão elétrica que uma célula pode produzir, e pode ser medida diretamente com um voltímetro nos terminais em aberto; (PINHO E GALDINO, 2014).
- Corrente de curto-circuito (I_{sc}): é a máxima corrente que uma célula pode produzir, e é medida quando a tensão em seus terminais é zero. Pode ser medida com um amperímetro, curto-circuitando os terminais da célula; (PINHO E GALDINO, 2014).
- Densidade de corrente de curto-circuito (J_{sc}): é a relação da corrente de curto-circuito por unidade de área; (PINHO E GALDINO, 2014).
- Eficiência: define o nível de eficiência da conversão de energia luminosa em elétrica. Ou seja, é representada pela razão entre a potência solar incidente e a potência elétrica gerada; (PINHO E GALDINO, 2014).

- Fator de Forma (FF): é definido pela razão entre a máxima potência da célula e o produto da corrente de curto-circuito pela tensão de circuito aberto, conforme Equação 1 (PINHO E GALDINO, 2014).

$$FF = \frac{V_{mp} \cdot I_{mp}}{I_{sc} \cdot V_{oc}} = \frac{P_{mp}}{I_{sc} \cdot V_{oc}} \quad (1)$$

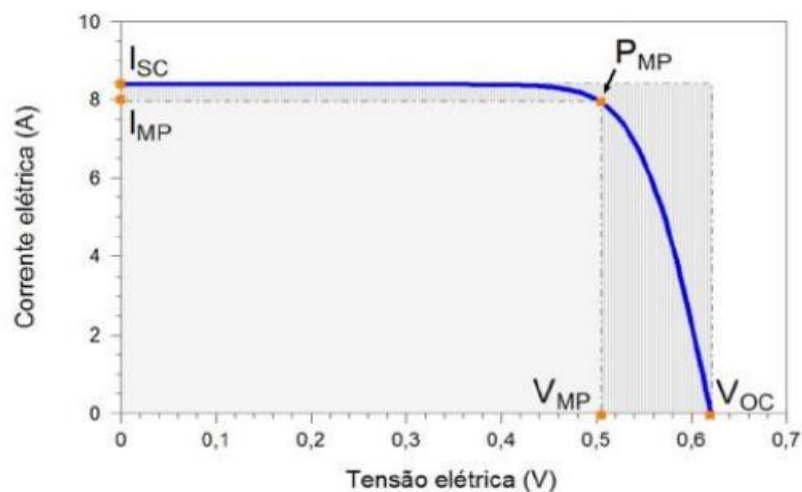
V_{mp} = Valor de tensão na qual a potência é máxima (V);

I_{mp} = Valor de corrente na qual a potência é máxima (A);

P_{mp} = Potência máxima (W).

Essa definição é melhor entendida analisando a curva de carga de uma célula fotovoltaica que está disposta na Figura 9. Desta forma observa-se que quanto menores as perdas (devido às resistências série e paralelo), mais próxima da forma retangular será a curva I-V (PINHO E GALDINO, 2014).

Figura 9 – Curva I-V de uma célula fotovoltaica



Fonte: PINHO E GALDINO (2014).

Observando as tecnologias oferecidas pelo mercado tem-se que a maioria oferece uma eficiência compreendida entre 10 e 25% com células de filme fino de arsenato de gálio atingindo 28,8%. Esses parâmetros dependem da tecnologia de fabricação e a Tabela 1 mostra alguns valores por comparação (PINHO E GALDINO, 2014).

Tabela 1: Parâmetros elétricos de algumas tecnologias em células FV

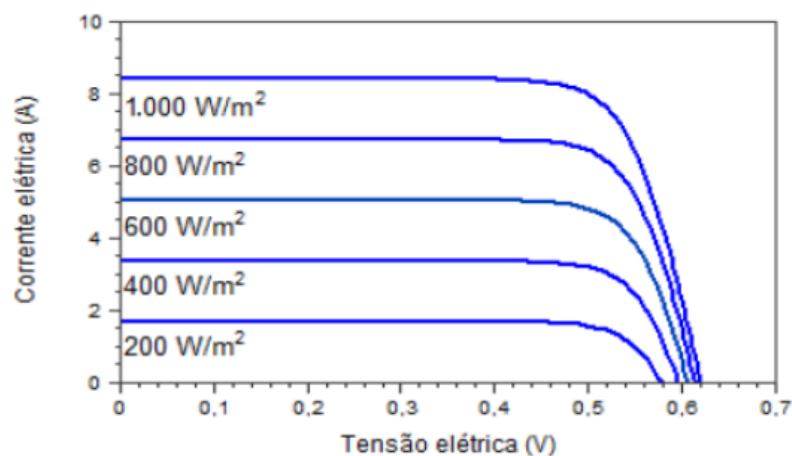
Célula	Composição	Voc (V)	Jsc (mA/cm²)	FF (%)	η (%)
c-Si	Silício Cristalino	0,5 – 0,7	38 – 42,7	80,9 – 82,8	20 – 25
CdTe	Telureto de Cádmio	0,857	26,95	77	18,3
a-Si	Silício Amorfo	0,886	16,75	67,8	10,1
DSSC	Sintetizada por Corante	0,744	22,47	71,2	11,9
InGaP//InGaAs/GaAs	Multijunção	3,014	14,57	86	37,7

Fonte: PINHO E GALDINO (2014).

A eficiência de uma célula não deve ser tomada como único fator determinante de qualidade, um projeto deve levar em conta outras características da célula, dentre eles a durabilidade, seu custo, entre outros (PINHO E GALDINO, 2014).

Além dos fatores internos já avaliados, deve-se também considerar os fatores externos da célula, sendo os principais a irradiância solar e a temperatura, sendo que analisar fatores externos é de extrema importância pois no Brasil é um país com um vasto território. Portanto, uma usina fotovoltaica instalada no Nordeste deve ter parâmetros distintos de uma instalada no Sudeste, onde se deve levar em conta a irradiância e a temperatura em cada região. Na Figura 10 é mostrado como a irradiância solar afeta a curva I-V em uma temperatura de 25°C. (PINHO E GALDINO, 2014).

Figura 10 – Influência da irradiância solar na curva característica I-V



Fonte: PINHO E GALDINO (2014).

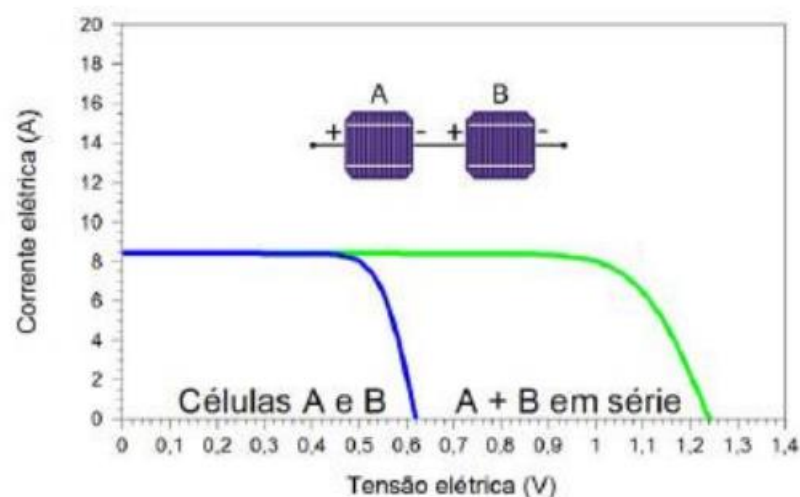
Na figura é mostrado que quanto maior a irradiância maior será a corrente elétrica gerada, tem-se também que a melhor área de operação se encontra com uma tensão menor que 0,6 volts.

2.3.2 Módulos Fotovoltaicos

Ao analisar-se os dados dispostos na Tabela 1 nota-se que os valores de corrente e tensão de uma célula individual são limitados para grandes aplicações. Por isso as células devem ser ligadas em arranjos série-paralelo para se ter melhores parâmetros e obter os níveis desejados de tensão e corrente, esses arranjos são os chamados módulos fotovoltaicos.

Na ligação em série, o conector positivo de uma célula deve ser conectado no terminal negativo da célula subsequente e assim sucessivamente. O resultado desse arranjo é a soma das tensões individuais de cada célula, mas a corrente se mantém, como explicado de maneira simplificada na Figura 11.

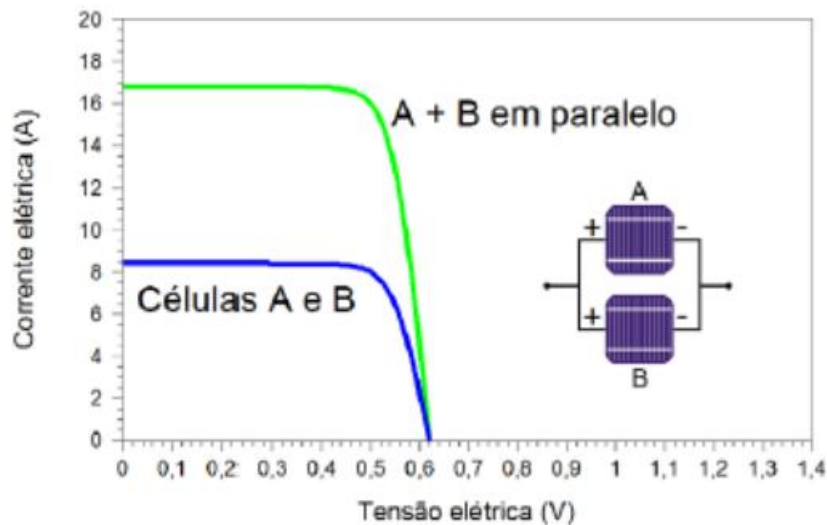
Figura 11 – Associação em série de células fotovoltaicas



Fonte: PINHO E GALDINO (2014).

A ligação em paralelo nos terminais positivos é ligada em um único ponto elétrico e os terminais negativos são ligados em outro ponto. Essa ligação tem como objetivo atingir um alto nível de corrente, a tensão permanece a mesma, como mostrado na Figura 12.

Figura 12 – Associação em paralelo de células fotovoltaicas

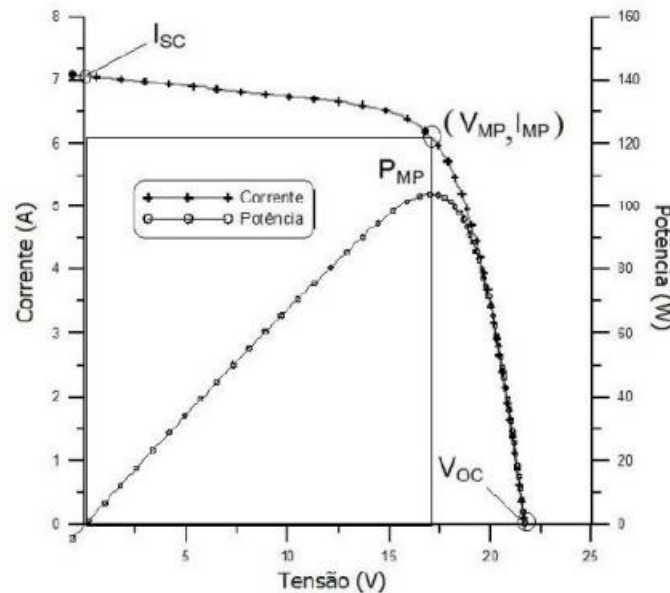


Fonte: PINHO E GALDINO (2014).

O nível de tensão e corrente do painel depende da quantidade de células em arranjos série e paralelo. É importante ressaltar que células de mesma tecnologia exposta a mesma irradiância solar irão gerar correntes iguais e células de tecnologia diferente irão gerar correntes diferentes. Quando for feito um arranjo com células de diferentes tecnologias, o conjunto será limitado pela performance da célula de menor capacidade. Essa característica na prática pode levar ao superaquecimento, sendo que esse efeito é conhecido como *mismatch*.

Do ponto de vista elétrico, um módulo fotovoltaico possui características semelhantes aos das células tais como V_{oc} (tensão de circuito aberto) e I_{sc} (correntes de curto-circuito). Também pode ser traçada a curva I-V através de ensaios elétricos que pode ser visualizada na Figura 13.

Figura 13 – Curva característica I-V e curva de potência P-V para um módulo com potência nominal de 100Wp



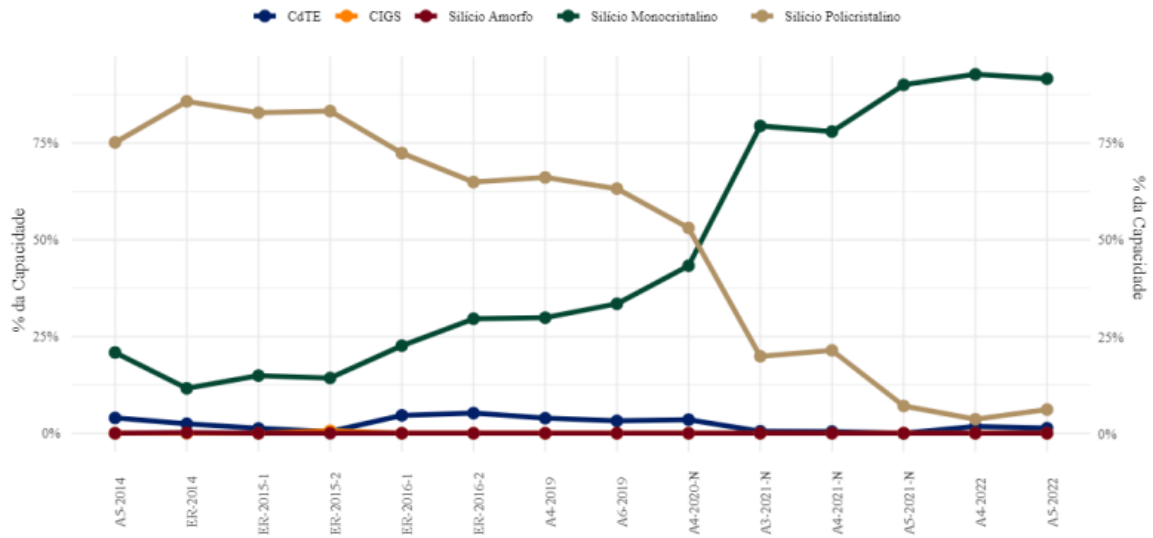
Fonte: PINHO E GALDINO (2014).

A eficiência é calculada da mesma maneira das células individuais, porém considerando os parâmetros do módulo, sendo que suas características elétricas seguem as das células, porém com nominais que dependem da quantidade de células no arranjo. Por consequência os parâmetros dos módulos sofrem alterações de acordo com a temperatura e irradiância solar.

Os módulos fotovoltaicos vêm sofrendo mudanças ao longo do tempo, para qualificar essas mudanças a ANEEL vem coletando os dados dos projetos de geração centralizada, onde no período de 2009 a 2022 foi registrado às evoluções observada nos projetos (EPE, 2023).

Até o ano de 2020 a maior parte dos projetos usava o Silício policristalino como semicondutor, mas a partir desse ano a maioria dos projetos passou a usar o silício monocristalino, sendo que em 2021 essa tecnologia representou mais de 90% dos novos projetos, a Figura 14 mostra a variação percentual da participação dos módulos (EPE, 2023).

Figura 14 – Participação das tecnologias de módulos fotovoltaicos

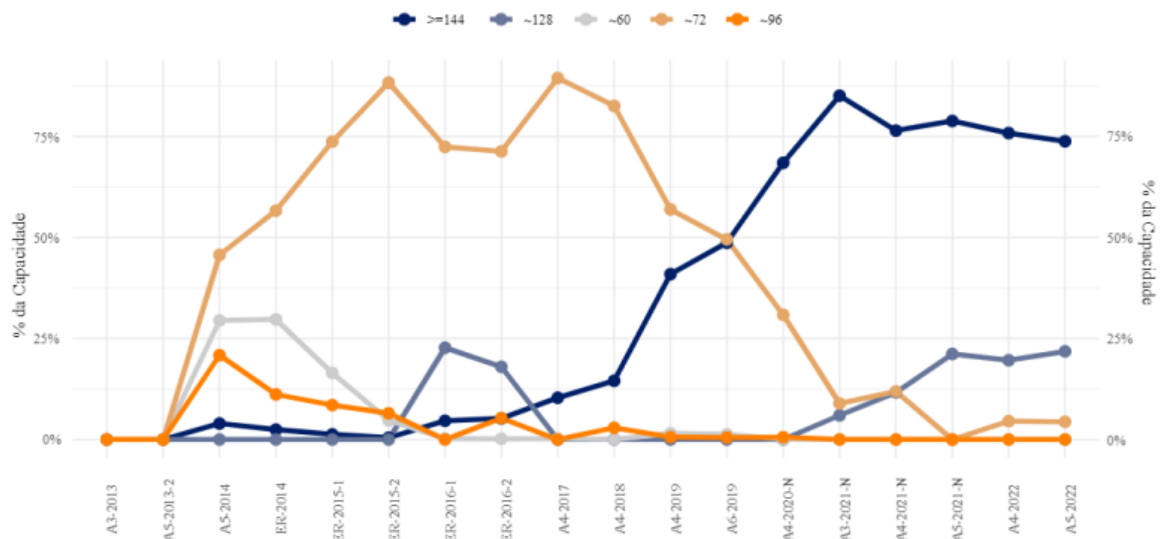


Fonte: EPE (2023)

A potência média por módulo está aumentando a cada ano, podendo ser explicado pelo aumento de eficiência e pela migração para módulos de maior área, sendo que os módulos passaram de 60 células com uma área de $1,66 \text{ m}^2$ para os de 72 células com cerca de 2 m^2 (EPE, 2023).

Observando a mudança da quantidade de células nos módulos, após a migração de módulos de 60 para 72 células, houve um crescimento expressivo no uso dos modelos de 144 células, mostrado na Figura 15. Os módulos de 144 células possuem dimensões e potências similares às de 72 células, mas utilizam células cortadas ao meio, sendo denominadas *half-cut cell* (EPE, 2023).

Figura 15 – Evolução do número de células dos módulos fotovoltaicos

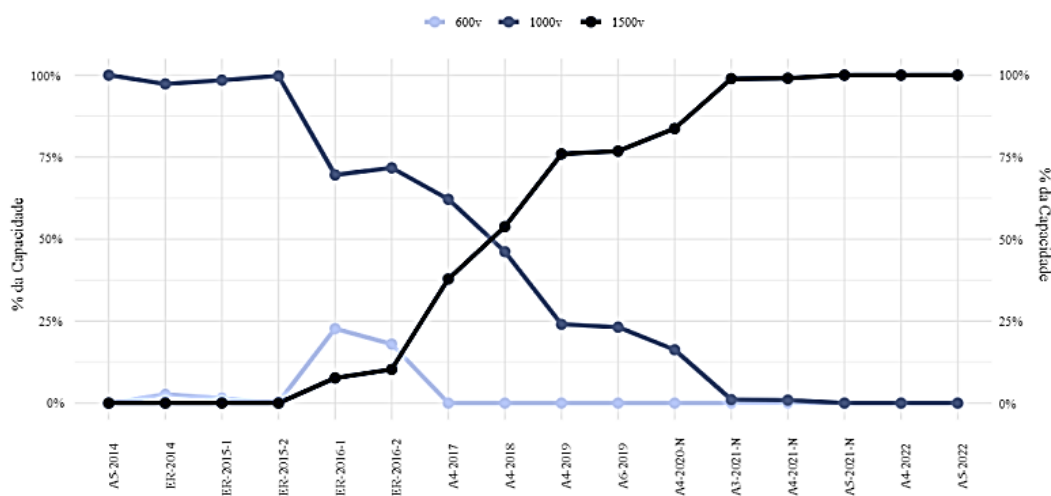


Fonte: EPE (2023)

Os módulos de 144 (*half-cut cell*) células apresentam correntes mais baixas que os módulos de 72 (célula inteira) reduzindo as perdas resistivas, outra vantagem é a maior tolerância a sombreamentos parciais, pois 1/6 da potência é afetada ao sombreamento da célula contra os 1/3 das células comuns (EPE, 2023).

A Figura 16 mostra a tensão máxima admissível dos módulos em leilões, nela é possível notar que houve um aumento na tensão passando de 1000 V para 1500 V, esse nível de tensão faz a potência CC atingir 100% do habilitado leilões. A tensão elevada permite o uso de séries fotovoltaicas mais longas, reduzindo as correntes no sistema e os custos de cabeamento (EPE, 2023).

Figura 16 – Evolução do número de células dos módulos fotovoltaicos



Fonte: EPE (2023)

2.3.3 Painéis fotovoltaicos

Os painéis fotovoltaicos são formados conectando os módulos fotovoltaicos em série ou em paralelo. Eles possuem uma potência mais elevada que irão delimitar os demais equipamentos do sistema, pois as características elétricas do painel devem ser compatíveis com os demais equipamentos.

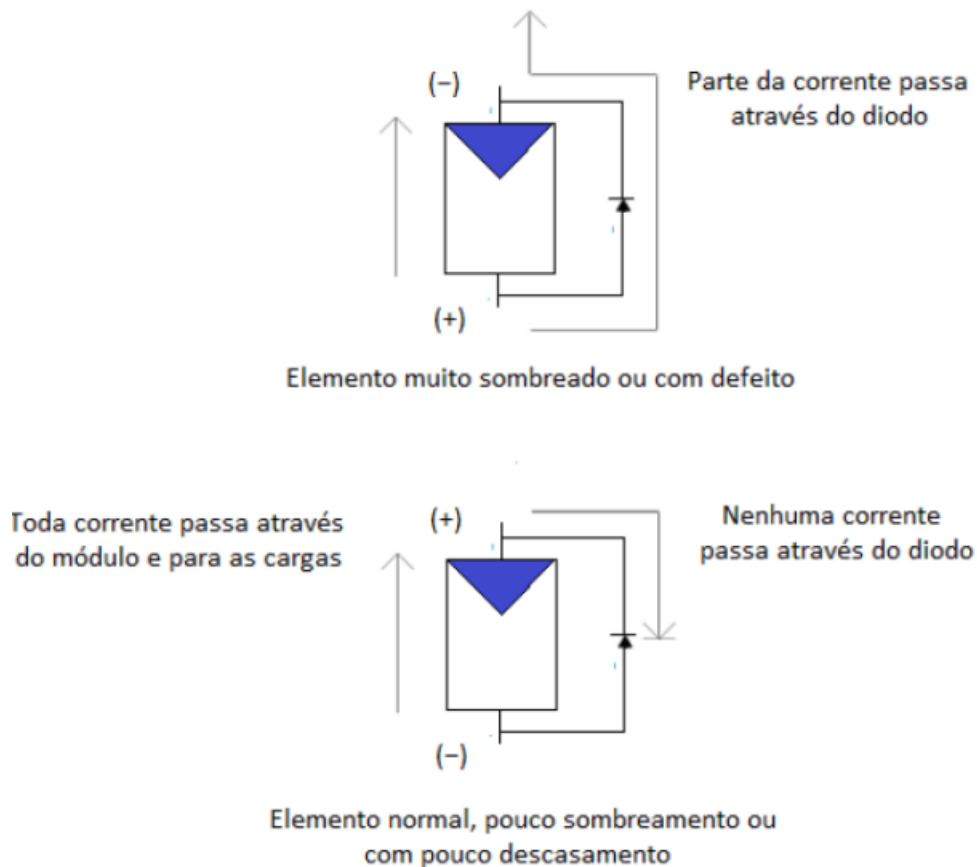
Como as células e os módulos, painéis ligados em série devem ser idênticos para não ocorrer um descasamento. Entretanto, como os painéis possuem um dimensionamento maior, é possível que ocorra um sombreamento.

O sombreamento é um fenômeno que ocorre quando algum objeto causa dificuldade para a luz solar chegar nas células, podendo ser causada pelo depósito de sujeira, objetos caídos sobre o módulo, entre outros. Sua consequência é a perda direta de potência no gerador fotovoltaico além de danos ao módulo sombreado. O dano é causado porque a potência gerada não consumida dissipada no módulo sombreado, produzindo calor e rompendo os polímeros e metais, efeito conhecido como ponto quente) (PINHO E GALDINO, 2014).

Uma alternativa para evitar o efeito ponto quente é instalar diodos de desvio conectados em antiparalelo com um conjunto de células em série (usualmente entre 15 e 30 células). Esses diodos servem como um caminho alternativo para a corrente que danifica as células. A Figura 17 mostra o esquemático dos diodos de desvio. Há

outros dispositivos que protegem os painéis dos efeitos elétricos resultantes de causas ambientais, um exemplo são os diodos de bloqueio que tem como finalidade impedir o fluxo de corrente de um arranjo série com maior tensão para um de menor tensão.

Figura 17 – Operação do diodo de desvio



Fonte: PINHO E GALDINO (2014).

Existem também outros dispositivos que possuem a função de proteger os painéis fotovoltaicos dos eventuais efeitos elétricos causados por efeitos dos ambientes, entre eles podemos citar os diodos de bloqueio, que possui a função de impedir o fluxo de corrente de um arranjo com maior tensão para um de menor tensão.

2.3.4 Inversores

Os inversores são elementos feitos de dispositivos semicondutores de potência que convertem um sinal elétrico (tensão) contínuo em alternado ou vice-versa. Em um sistema de geração fotovoltaica, a geração de energia dos painéis fotovoltaicos é feita em corrente contínua e o inversor tem a função de transformá-la para corrente alternada com amplitude, frequência, nível de tensão e conteúdo harmônico compatível com o sistema que será ligado.

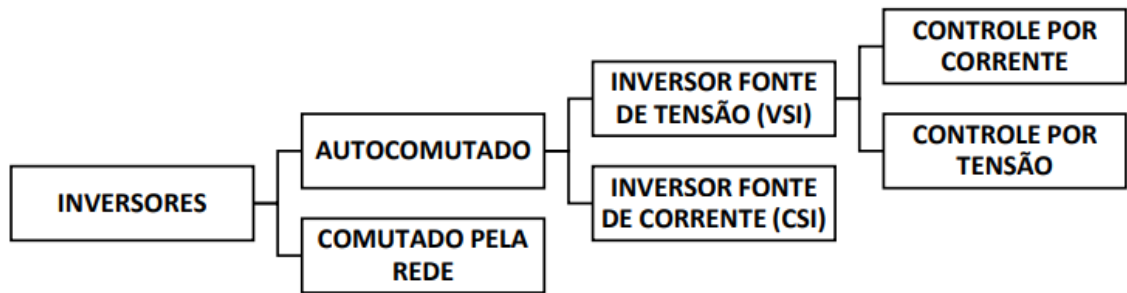
Os inversores aplicados em um sistema fotovoltaico conectado à rede (SFCR), devem possuir parâmetros elétricos adequados para atender as características da rede de transmissão em que estarão conectados.

Os inversores de modo geral são constituídos de chaves eletrônicas de potência que quando colocadas em estados de condução e bloqueio possibilitam a conversão.

Os primeiros inversores utilizavam como chaveamento os tiristores (SCR, TRIAC), denominados como inversores comutados pela rede, eles são robustos e simples, mas eles não têm um controle preciso da tensão e da corrente de saída (devido à alta quantidade de harmônicos). Por isso eles possuem um complexo sistema de filtragem sendo que hoje em dia o uso desse tipo de equipamento é restrito a unidades com potências elevadas acima de 100 KW (PINHO E GALDINO, 2014).

Existem também os autos comutados, nesse os estados de condução e bloqueio são controlados por um terminal de controle. Eles podem ser acionados em qualquer instante do ciclo de tempo e usam como base o controle de modulação por largura de pulso – PWM (*Pulse Width Modulation*). Esses inversores são mais utilizados em SFCR pois possuem uma maior estabilidade diante as perturbações da rede e tem uma facilidade no controle do fator de potência ou do tipo fonte tensão em que o sinal de controle pode ser de corrente ou de tensão. Os dois tipos de inversores estão resumidos na Figura 18.

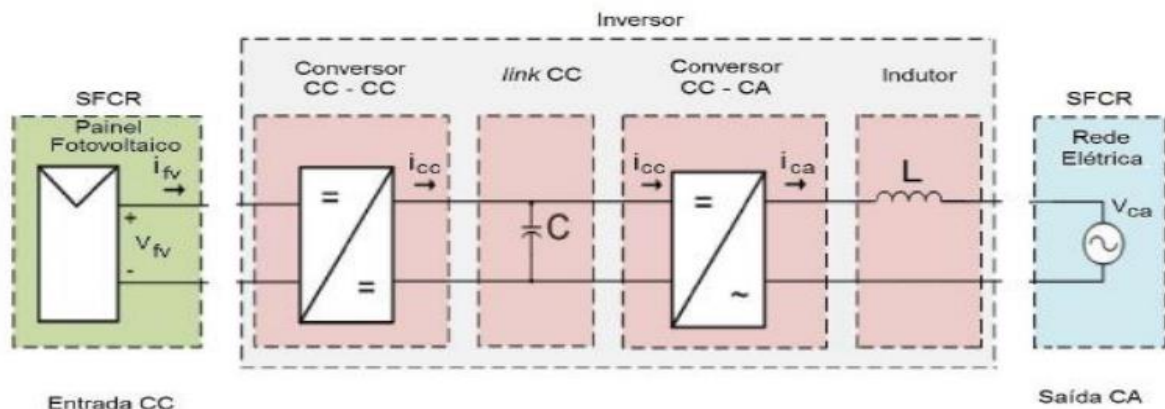
Figura 18 – Tipos de Inversores Quanto ao Princípio de Operação



Fonte: PINHO E GALDINO (2014).

A energia CC gerada através dos painéis é convertida em CA em dois estágios que podem ser visualizados na Figura 19.

Figura 19 – Inversor de dois estágios



Fonte: PINHO E GALDINO (2014).

O primeiro estágio (conversão CC-CC) tem como finalidade gerar um nível de tensão adequado no segundo estágio (Link CC – capacitor eletrolítico), o capacitor tem a função de armazenar energia e serve como um filtro do inversor. O terceiro estágio (Conversão CC- CA) tem por função converter o sinal elétrico em CA para que a energia gerada possa ser injetada na rede. O quarto e último estágio (Indutor) serve como filtro e acoplamento à rede elétrica.

O mais importante a ser observado é que para um inversor ser considerado com alta qualidade e alta produtividade para um sistema fotovoltaico ele deve apresentar:

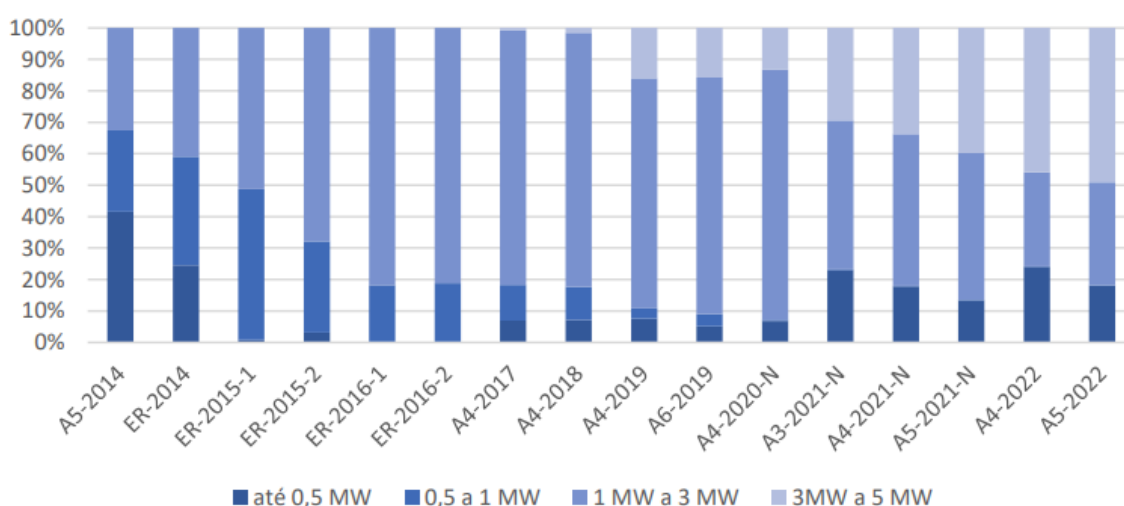
- Alta eficiência de conversão (carga nominal e em cargas parciais);
- Alta confiabilidade;
- Baixa manutenção;

- Operação com ampla faixa de tensão de entrada;
- Boa regulação de saída;
- Forma de onda senoidal com baixo conteúdo harmônico;
- Baixa emissão de ruído audível;
- Baixa emissão de interferência eletromagnética;
- Segurança para pessoas e para a instalação.

Os inversores usados na geração fotovoltaica estão em constante evolução, para qualificar essas mudanças a ANEEL vem coletando os dados dos projetos de geração centralizada submetidos ao cadastro para participar dos leilões, onde no período de 2009 a 2022 foi registrado suas mudanças.

Usando os dados coletados foi desenvolvida a Figura 20 que apresenta como as faixas de potência dos inversores mudaram ao longo do tempo. Entre os anos de 2016 e 2020 observa-se uma predominância de inversores de 1 MW a 3 MW, após 2020 os projetos começaram a utilizar equipamentos com uma potência maior trabalhando na faixa de 3 MW à 5 MW, houve também o crescimento dos inversores com potência inferior a 500 kW (EPE, 2023).

Figura 20 – Evolução das faixas de potência dos inversores



Fonte: EPE (2023).

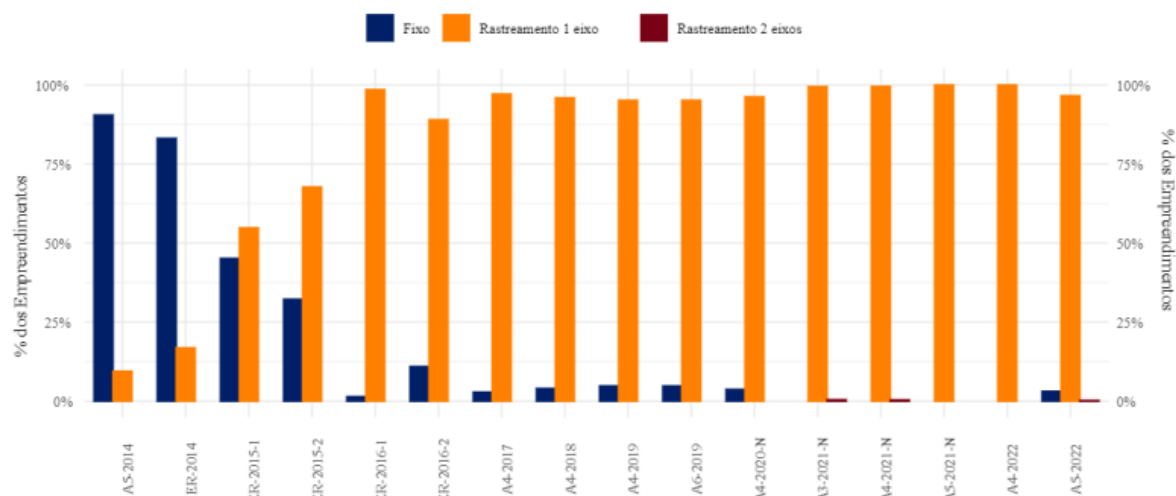
Mesmo que essa mudança tenha um custo de investimento maior pode trazer diversos benefícios, como uma redução no cabeamento CC, maior produção em terrenos acidentados e maior facilidade para trocar equipamentos defeituosos.

No dimensionamento é comum prever a instalação de uma potência CC maior que a potência CA, isso é adotado porque as condições de irradiação e temperatura definidas em teste dificilmente são encontradas em campo, portanto os módulos fotovoltaicos não atingem sua potência nominal na maior parte do tempo. O sobredimensionamento do arranjo CC possibilita a operação mais eficiente do inversor próximo às suas condições nominais.

2.3.5 Estruturas de suporte dos módulos

No Brasil o uso das estruturas de rastreamento de um eixo é predominante nas unidades de geração centralizada, essa tecnologia tem uma participação acima de 95% desde o ano de 2017 e atingindo 100% no ano de 2021, a Figura 21 ilustra o histórico das estruturas.

Figura 21 – Participação dos tipos de estrutura



Fonte: EPE (2023).

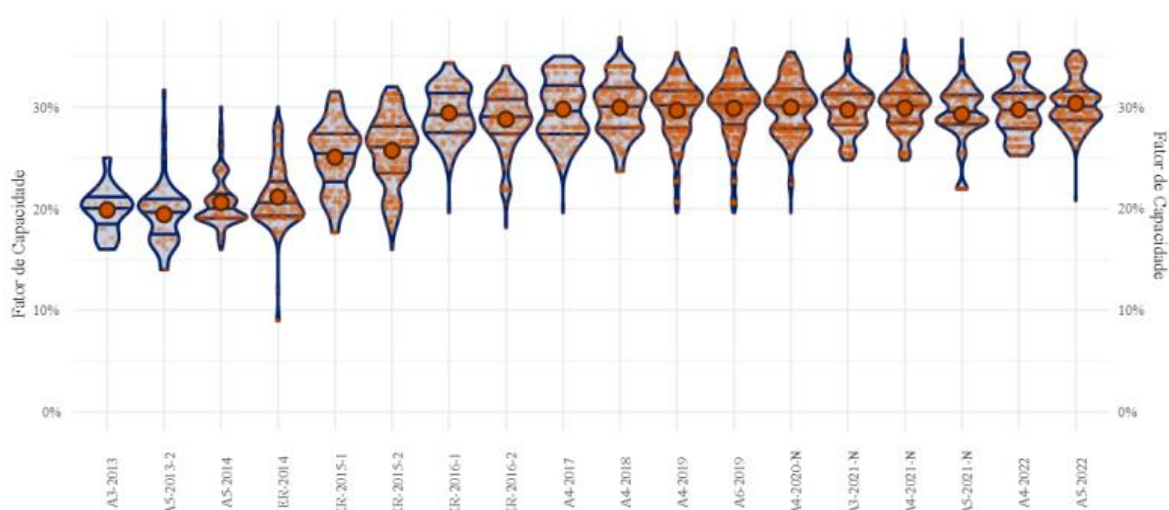
O uso de rastreamento de um eixo é mais usado porque contribui para atingir um fator de capacidade mais alto, com produções de energia mais constante ao longo do dia.

2.3.5 Fator de capacidade

O fator de capacidade é definido como a razão entre a produção de energia efetiva da planta e o que seria produzido se ela operasse em sua capacidade nominal (EPE, 2023).

A Figura 22 mostra a evolução do fator de capacidade ao longo da última década, onde teve-se um crescimento mais acelerado até 2017 e após isso ficando em níveis mais similares com uma média em torno de 30% (EPE, 2023).

Figura 22 – Evolução do fator de capacidade



Fonte: EPE (2023).

O fator de capacidade não depende apenas do recurso solar local, mas também das características de cada projeto, principalmente do tipo de estrutura e do dimensionamento do inversor. Ao utilizar um fator de dimensionamento do inversor menor um projeto em uma região de baixa irradiação poderia ter um fator de capacidade maior do que em regiões com recurso mais favorável (EPE, 2023).

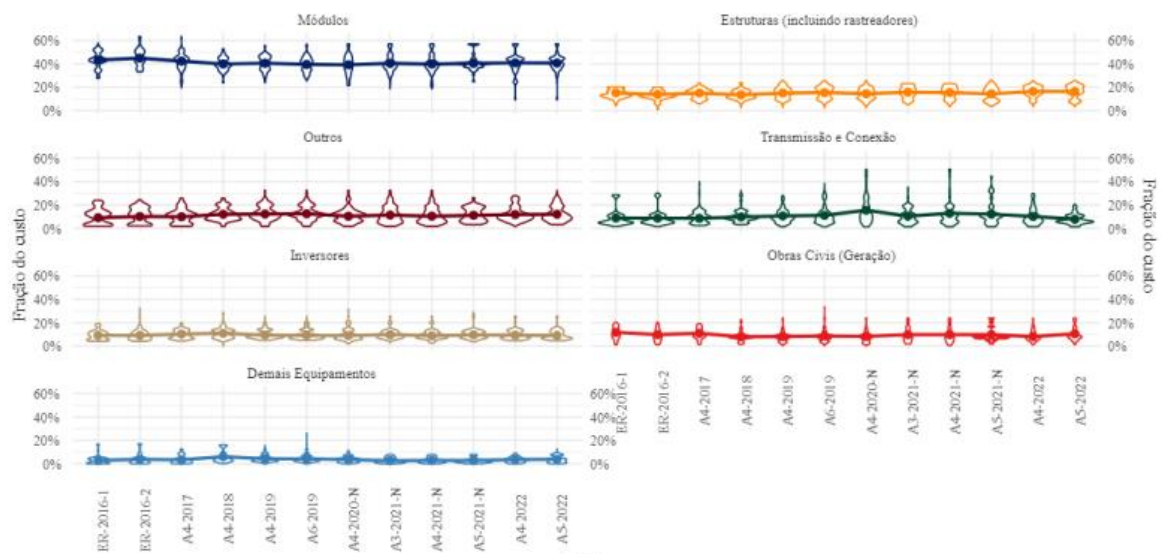
2.3.6 Custo de investimento e prazo de implementação

Uma instalação de um projeto fotovoltaico pode ser dividida entre módulos, estruturas, transmissão, conexão, inversores e obras civis. Entre os equipamentos a

maior parcela dos custos corresponde aos módulos fotovoltaicos que correspondem cerca de 40% do custo do projeto, as estruturas correspondem cerca de 15% dos gastos totais e os inversores correspondem a 9% dos gastos (EPE, 2023).

Gastos na transmissão e conexão que está na ordem de 11% dos gastos totais e obras civis que correspondem a 8,5% do total. A Figura 23 mostra de maneira ilustrativa esses dados, é válido explicar que os custos de logística, montagem, testes e seguro estão representados pelo gráfico de “outros” na figura (EPE, 2023).

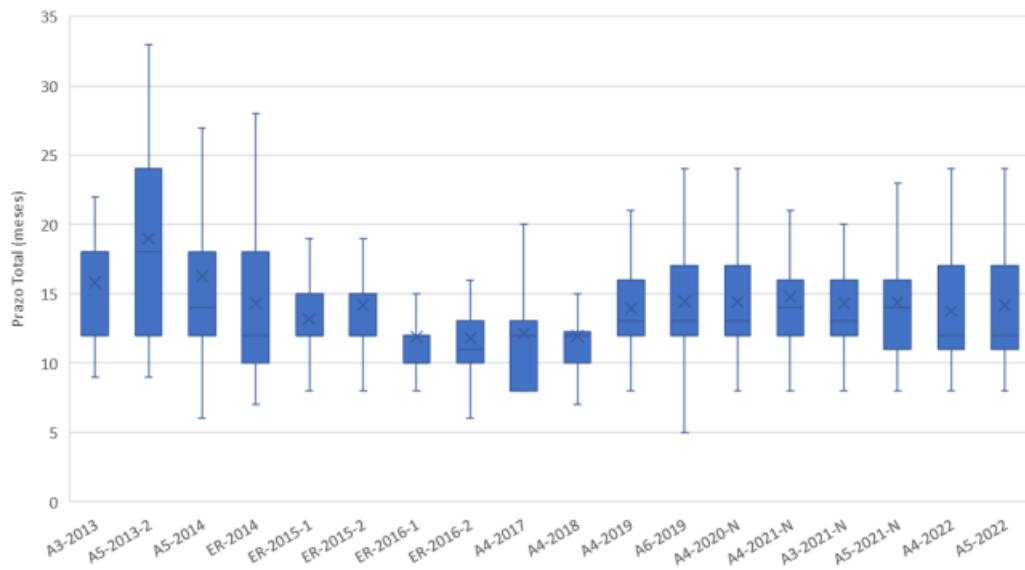
Figura 23 – Investimento de cada parcela dos projetos entre 2016 e 2022



Fonte: EPE (2023).

A Figura 24 mostra os prazos médios de implementação dos projetos fotovoltaicos, ela foi feita com base nas informações cadastradas no sistema AEGE pelos empreendedores.

Figura 24 – Prazos para implantação de empreendimentos fotovoltaicos



Fonte: EPE (2023).

Os prazos médios de implementação dos projetos se mantiveram entre 12 e 15 meses, durante o período de estudo nota-se alguns valores mais baixos chegando até a 5 meses, esses números podem ser atribuídos a projetos de complexos de ampliação.

3 ESTUDO DA PROJEÇÃO DA GERAÇÃO FOTOVOLTAICA NO BRASIL

3.1 PANORAMA DA GERAÇÃO NO BRASIL

A geração da energia solar no Brasil cresceu de maneira acelerada na última década. Esse crescimento se deu por diversos motivos, leis de incentivos fiscais feita pelo governo, diminuição do valor de implementação de novas unidades geradoras e um grande potencial gerador no Brasil.

No ano de 2022 em solo brasileiro foram instalados em torno de 1.890.095 sistemas fotovoltaicos ligados à rede. Essa quantidade significa uma potência instalada de 20.417 MW, sendo o oitavo país no ranking mundial da geração de energia solar, já no ano de 2023 o Brasil alcançou uma potência instalada de 24 GW. A Figura 25 mostra o ranking atualizado (Portalsolar, 2023).

Figura 25 – Ranking dos 10 Países que irão gerar mais energia solar fotovoltaica



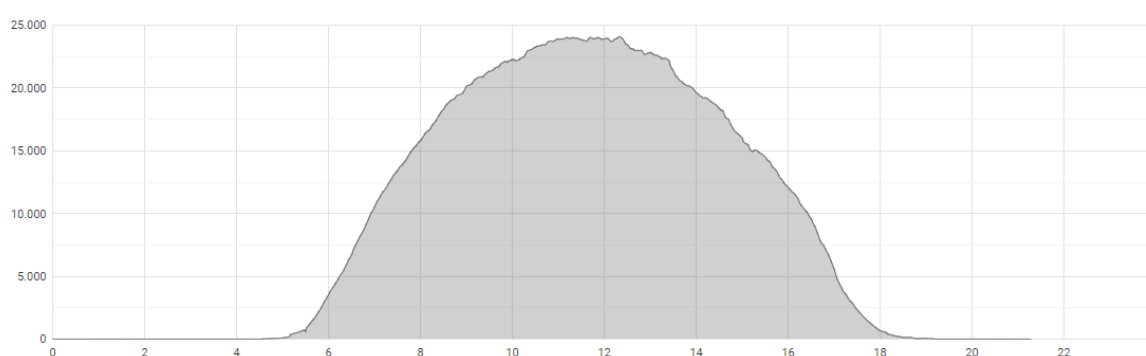
Fonte: Portal solar (2023).

Atualmente 50,6% da geração de energia solar fotovoltaica no Brasil é feita pelas instalações de micro e minigeração distribuída, isso corresponde a 1.490.534 imóveis que estão distribuídas ao longo do país, quando somadas essas unidades geradoras alcançam uma potência instalada de 10.328,5 MW (Portalsolar, 2023).

Quando se compara o perfil de geração de energia fotovoltaica com os outros tipos de gerações nota-se que ela tem um comportamento padronizado, tendo um pico característico que ocorre por volta do meio-dia, enquanto as outras gerações não

possuem uma padronização na produção, sendo que ela pode ser controlada como a hidroelétrica ou não controlada como na eólica. A ONS faz o acompanhamento diário da geração fotovoltaica, mostrado na Figura 26, que apresenta um perfil de geração no dia 28 de novembro de 2023. Nela observa-se que o pico de geração ocorre por volta do meio-dia.

Figura 26 – Perfil de geração fotovoltaica em um dia de verão dados em MW X Horas

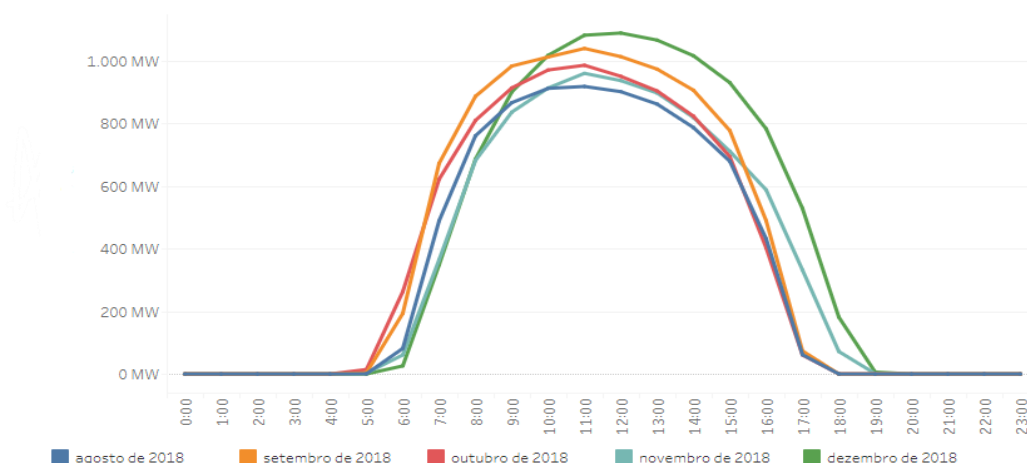


Fonte: ONS (2023).

No dia 28 de novembro de 2023 a geração fotovoltaica teve 24 GW de geração máxima. Para se ter um ponto de comparação, a geração eólica no mesmo dia gerou um pico de 13,5 GW. Entretanto sua geração é bem mais constante ao longo do dia, sendo que diferente da geração fotovoltaica, onde o ponto de mínimo tem geração nula, a eólica tem uma geração mínima de 9,5 GW, por isso a geração eólica contribui com o sistema ao longo do dia e da noite, mas é mais imprevisível e menos controlável (ONS, 2023).

A incidência de luz solar varia durante a época do ano e para entender esse impacto a ONS fez um levantamento dos dados de geração no período de agosto de 2018 a dezembro de 2018. Nele observa-se que a geração foi aumentando conforme se avança os meses e que seu pico de geração é sempre próximo das 12 horas, sendo que conforme se passa os meses o pico de geração se torna mais tardio, esse levantamento pode ser visualizado na Figura 27.

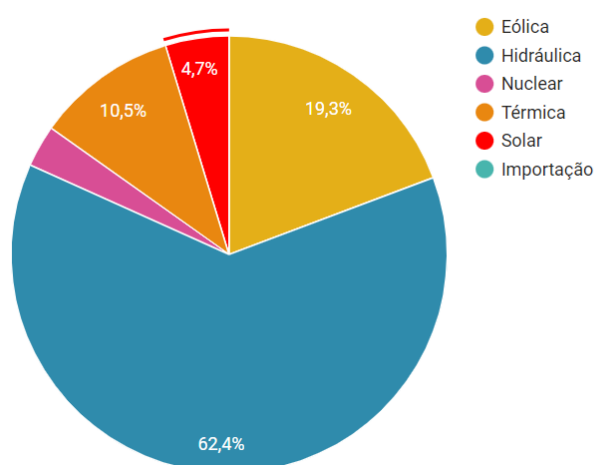
Figura 27 – Geração média horária



Fonte: ONS (2023).

Analisando a geração brasileira de maneira macro no dia 28 de novembro de 2023, tem-se que a geração fotovoltaica contribui com cerca de 4,7% da geração total. Quando comparada a outras fontes geradoras percebe-se que ela ainda está abaixo da geração térmica com 10,5%, da geração eólica com 19,3% e com a hidráulica com 62,4%. Observando os dados de geração atuais, nota-se que a mesmo sendo o oitavo país que mais gera energia fotovoltaica ela ainda não representa uma grande geração percentual na matriz, o que mostra que ela ainda tem muito espaço para evolução. Esses dados podem ser visualizados na Figura 28 (ONS, 2023).

Figura 28 – Percentual de geração diária média em MW do SIN



Fonte: ONS (2023).

Observando os desafios para o futuro, com os incentivos governamentais cada vez a geração fotovoltaica terá menos benefícios consumidores, diminuindo assim a criação de novas unidades geradoras. Entretanto, devido à constante queda no preço dessa tecnologia existe uma possibilidade de surgirem novas usinas geradoras.

3.2 LEI 14.300 MARCO LEGAL DA MINIGERAÇÃO E MICROGERAÇÃO NO BRASIL

O marco legal da geração distribuída foi instituído em 6 de janeiro de 2022 pela Lei 14.300. Essa legislação estabelece as regras do micro e minigeração, permitindo que consumidores produzam sua própria energia elétrica e distribuam essa energia ao sistema.

Esse novo marco substitui a resolução normativa ANEEL 482 de 2012 (REN 482), que definiu as regras básicas da categoria e após isso foi aperfeiçoada pela REN 687 no ano de 2015. A REN 482 também estabeleceu o sistema de compensação de energia elétrica, permitindo que o consumidor injete energia excedente na rede e receba crédito que pode ser usado para abater nos valores da conta de energia elétrica.

No final do ano de 2019, a ANEEL apresentou uma revisão da REN 482. Essa proposta previa o fim da paridade tarifária, sendo que a compensação ia ocorrer apenas de maneira parcial ao consumidor. Essa proposta foi vista de maneira extremamente negativa pelo setor energético, pois tal mudança pode inviabilizar investimentos e quebrar o segmento no Brasil.

Depois de tramitar por dois anos pelo congresso e sobre diversas alterações, a proposta foi aprovada no senado e na câmara dos deputados em dezembro de 2021 e sancionada pelo presidente da república em janeiro de 2022, convertendo a PL 5829/19 na Lei 14.300.

A Lei 14.300 traz mudanças para o mercado de geração distribuída no Brasil, tais alterações são referentes ao sistema de compensação de créditos. Foi criada uma regra tarifária, que leva em conta os custos e benefícios do segmento elétrico e será feita em duas etapas.

A primeira etapa consiste na publicação das diretrizes do cálculo, que levam em conta cinco aspectos sendo eles transmissão, distribuição, geração, perdas e sinal locacional e esse cálculo deve ser realizado pelo Conselho Nacional de Política

Energética (CNPE). A segunda é a realização da conta em si e deve ser feita pela ANEEL.

Esse novo marco prevê que sistemas já existentes ou que protocolaram a solicitação de acesso em até 12 meses após a publicação da lei permanecerão sob a regra de paridade tarifária até 31 de dezembro de 2045. Essa situação foi nomeada como direito adquirido.

Porém existem algumas hipóteses que podem fazer o consumidor perder o direito adquirido, um dos motivos é o encerramento contratual da unidade consumidora. Esse caso ocorre quando um imóvel com sistema fotovoltaico é vendido e caso o antigo proprietário peça o desligamento, o comprador terá que homologar uma nova unidade consumidora sendo que no processo o direito adquirido é perdido. Para se manter o direito adquirido é necessário continuar com a unidade consumidora ativa e após a venda transferir a titularidade para o novo proprietário.

Outro fator que faz o consumidor perder o direito adquirido é o aumento da potência instalada. Quando um consumidor resolve aumentar a potência da sua unidade geradora, a parcela ampliada não terá o direito adquirido e o último fator que pode fazer o consumidor perder o direito adquirido são as irregularidades no sistema de medição. Dentre essas irregularidades estão inclusas ligação elétrica irregular, aumentar a potência do sistema sem comunicar a concessionária, entre outros.

Existe também o fator de simultaneidade, apresentado pela Lei 14.300 estabelecendo que um percentual da energia gerada será usado para cobrir os custos junto a distribuidora. Entretanto, isso não se aplica à energia gerada e consumida instantaneamente.

3.3 PROJEÇÃO DE GERAÇÃO DE ENERGIA NO BRASIL

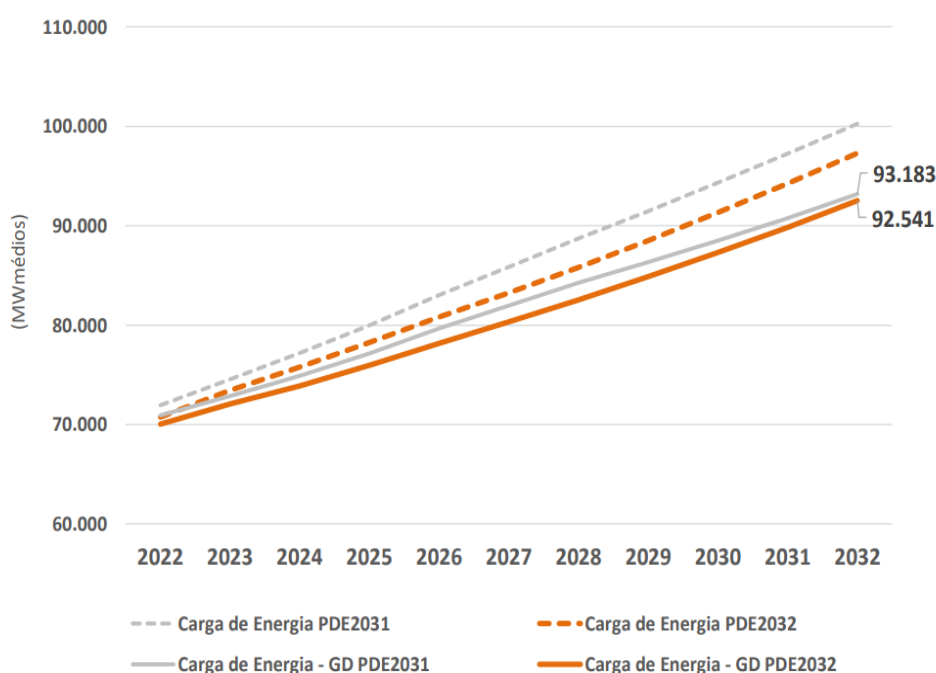
O Brasil é um país em desenvolvimento, por isso ele vai demandar cada vez mais energia ao decorrer do tempo. A ONS em parceria com a EPE realiza um plano decenal de expansão energética todos os anos. Nesse plano é feito previsões de quanto será o aumento do consumo e quais projetos podem compensar esse aumento.

O governo federal estima que o consumo interno anual apresenta uma média crescente da carga do SIN em torno de 2650 MW por ano, que gira em torno de 3,1% ao ano. Vale ressaltar que esse dado é considerado sem o abatimento do MMDG,

vale ressaltar que essa projeção é menor do que a indicada no ciclo anterior de análise (EPE, 2022).

Esse mesmo estudo realizado pela EPE indica uma projeção de MMGD. Isso mostra uma penetração de algo em torno de 37 GW de capacidade instalada durante todo o ciclo decenal (2022 a 2032). Esse dado também apresenta como a geração descentralizada e de menor investimento irá ganhar protagonismo na expansão energética para a próxima década, além das MMGD serem compostas por fontes renováveis ou vindas de uma cogeração qualificada. A Figura 29 apresenta as premissas de projeção de carga (EPE, 2022).

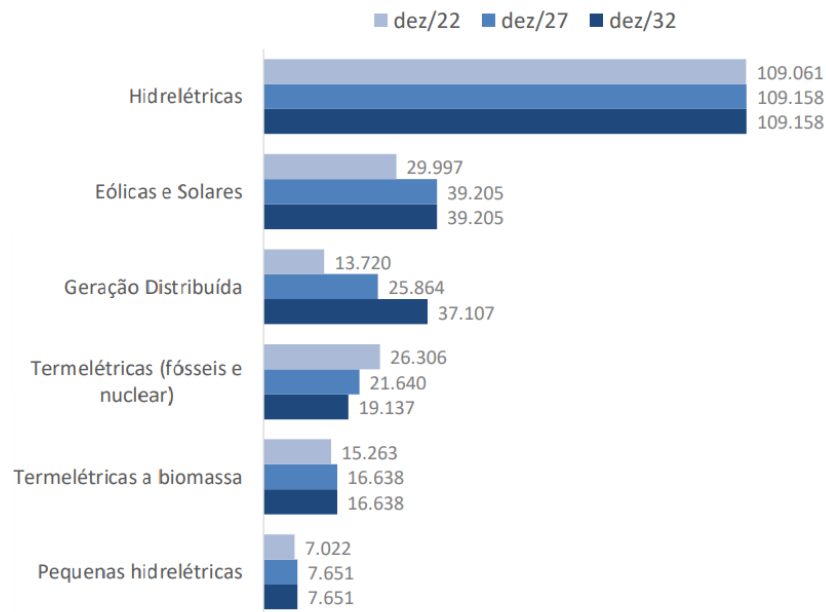
Figura 29 – Premissas de projeção de geração de energia



Fonte: EPE (2022).

Analisando quais segmentos da MMGD estão em maior crescimento, nota-se que o destaque principal é vindo da tecnologia solar fotovoltaica, sendo a principal responsável pelo aumento nesse segmento. Onde 97% do crescimento do setor será devido a novas unidades geradoras fotovoltaicas. A Figura 30 apresenta a evolução da energia fotovoltaica comparada às outras (EPE, 2022).

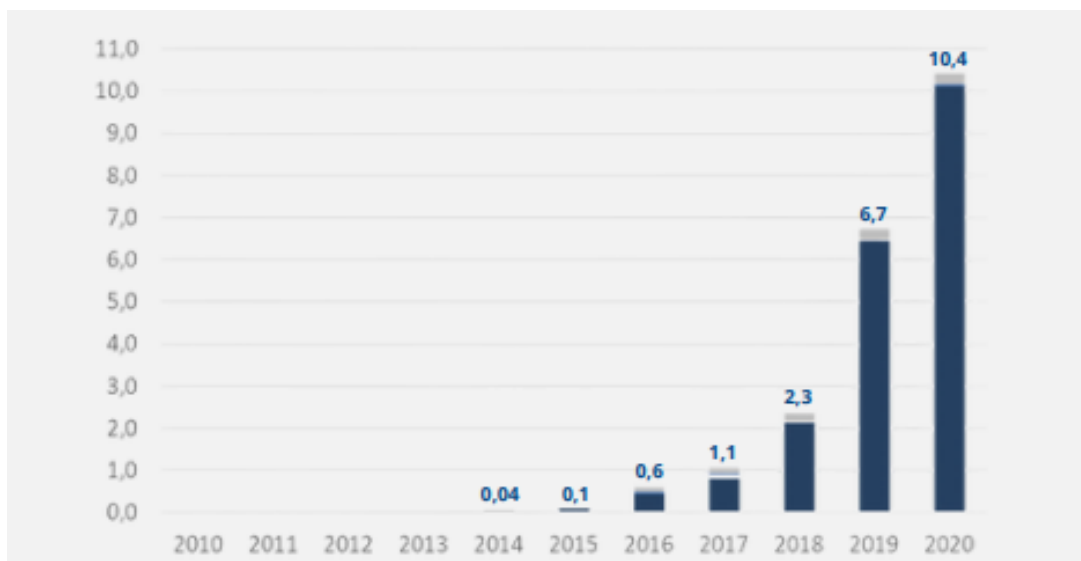
Figura 30 – Evolução da capacidade instalada e contratada no SIN dada em MW



Fonte: EPE (2022).

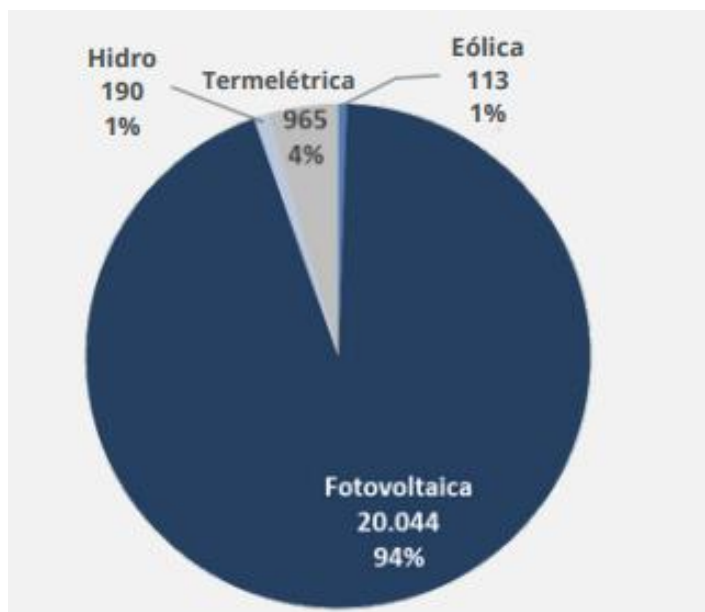
É importante analisar fatos passados e como foram realizados os investimentos nas MMD. Em 2020 o EPE disponibilizou um Ebook onde foi realizado um levantamento de quanto se investiu na mini e microgeração que podem ser observados na Figura 31. Além disso, ela também fez um levantamento em quais fontes foram feitos esses aportes conforme que está disponível na Figura 32.

Figura 31 – Investimentos anuais em MMD em bilhões de reais



Fonte: (EPE, 2020).

Figura 32 - Total de Investimento em MMGD entre 2010 e 2020



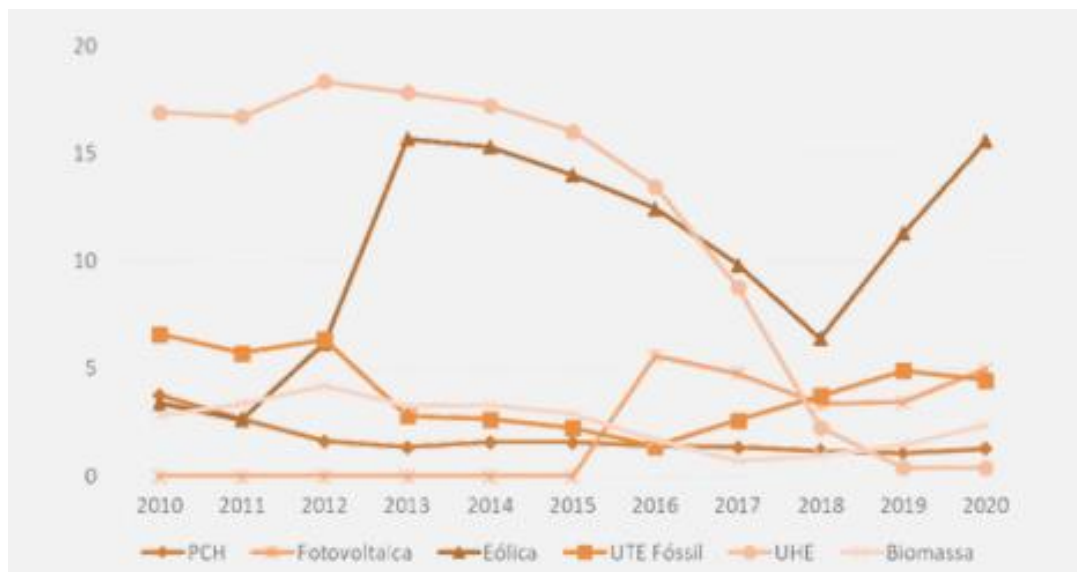
Fonte: (EPE, 2020).

Ao analisar esses dados pode-se notar como o investimento na implementação em novos pontos de MMGD vem aumentando de maneira acelerada ao longo da última década. Isso aconteceu devido ao crescimento da implementação da geração fotovoltaica no ambiente domiciliar. Na década de 2010 muitos resolveram investir nesse tipo de geração buscando uma diminuição na sua conta de energia (EPE, 2020).

Entretanto, segundo esse mesmo relatório, a geração fotovoltaica também cresceu de maneira relevante na geração centralizada. Ao longo da última década foram investidos mais de 350 bilhões de reais em geração centralizada, sendo que quase 90% foram em fontes renováveis (EPE, 2020).

Ao analisar os investimentos realizados na última década que está disposto na Figura 33, observa-se que no começo da década a parcela mais significativa dos investimentos foi realizada nas fontes hidrelétricas. A partir do ano de 2013 foram feitos diversos investimentos na geração eólica, assim se tornando o maior montante entre as partes a partir de 2018. A geração fotovoltaica centralizada se iniciou no ano de 2015 e no final da década de estudo se tornou a segunda maior parcela do montante (EPE, 2020).

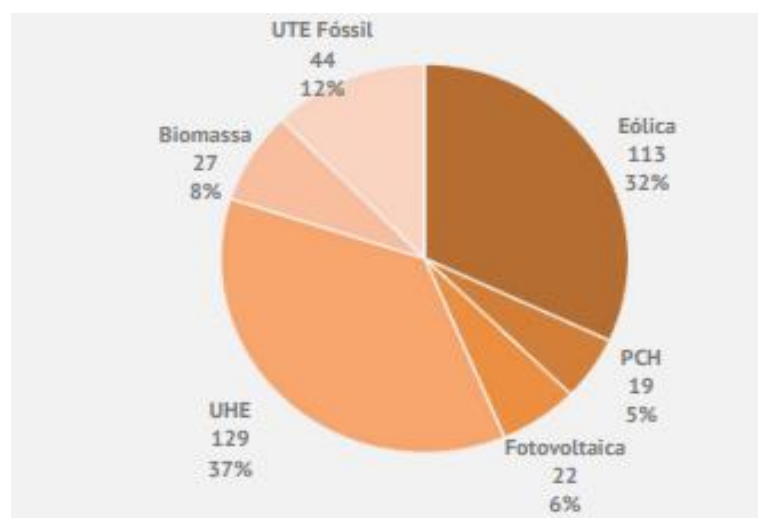
Figura 33 – Investimento anuais em geração centralizada em bilhões de reais



Fonte: EPE (2020).

Ao observar-se a Figura 28 e a Tabela 2, nota que ocorreu um baixo investimento percentual em energia fotovoltaica ao longo da década passada (6%). Entretanto isso se deve ao tardio início de seus investimentos que pode ser observado na Figura 34 e ao comparar-se as Figuras 32, 33, 34 e Tabela 2 pode-se concluir que ao longo da última década a grande parte dos projetos para novos geradores fotovoltaicos foram de caráter MMGD, sendo implementados em pontos comerciais ou residências habitacionais que visam uma geração para ser usada ao longo do dia.

Figura 34 - Total de investimento em geração centralizada entre 2010 e 2020



Fonte: EPE (2020).

Tabela 2 – Unidades consumidoras com geração distribuída

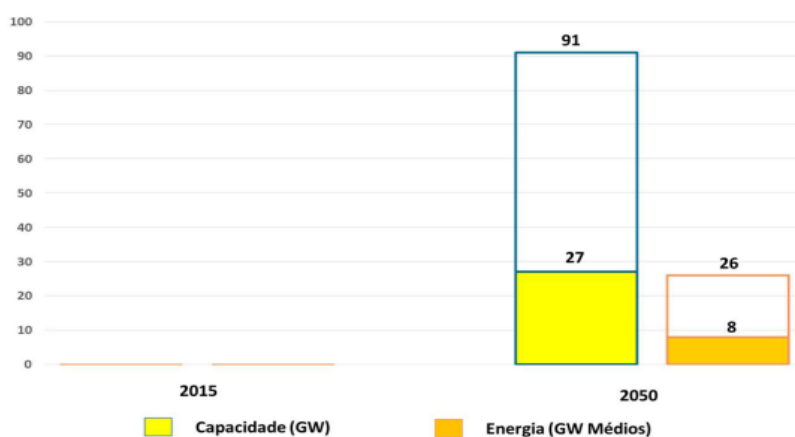
Tipo	Quantidade	Quantidade de UCs que recebem os créditos	Potência Instalada (kW)
CGH	77	19.764	68.731,17
EOL	98	170	17.300,95
UFV	2.168.090	3.138.557	24.181.779,07
UTE	548	12.647	175.949,74

Fonte: ANEEL (2020).

Como comentado anteriormente é esperado uma expansão significativa da fonte solar fotovoltaica, pois ao analisar sua projeção observa-se que a geração fotovoltaica vai se tornar cada vez mais competitiva nos próximos anos. Essa evolução se dá tanto na sua eficiência de geração quanto em uma redução do custo de implementação.

Visando se preparar para cenários futuros, foram realizados estudos para se estimar a evolução da geração fotovoltaica até o ano de 2050. Nesse estudo realizado pela empresa EPE, estima que apenas de geração centralizada a geração solar fotovoltaica pode atingir algo em torno de 27 a 90 GW em termos de capacidade instalada e entre 8 a 26 GW médios em termos de energia, como mostrado na Figura 35, entretanto é válido ressaltar que essas projeções foram feitas antes da aprovação da lei 14.300, por isso o impacto causado pela mudança não está sendo levado em conta na figura (EPE, 2020).

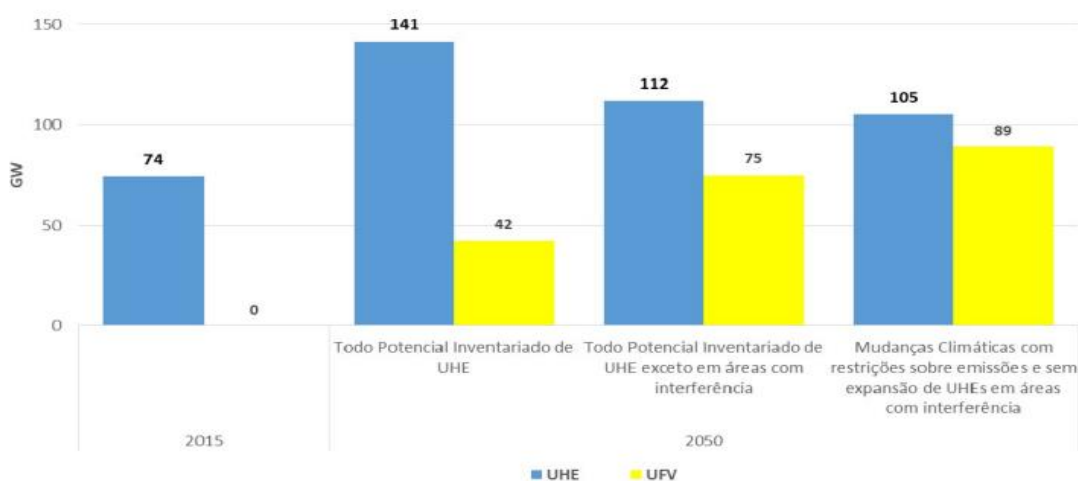
Figura 35 – Evolução esperada da geração centralizada de energia solar



Fonte: EPE (2020).

Quando se compara o crescimento da geração de energia a partir da fonte solar com a expansão das hidrelétricas fica claro que a geração fotovoltaica terá cada vez mais protagonismo nas próximas décadas. Essa comparação é importante porque atualmente as hidrelétricas são a principal fonte geradora da matriz brasileira (Figura 29) e como essa fonte possui restrições à expansão e como a energia fotovoltaica pode ajudar a preencher a lacuna criada por essa dificuldade de novas expansões. A Figura 36 mostra como a geração fotovoltaica irá ganhar destaque nas próximas décadas (EPE, 2020).

Figura 36 – Comparação da expansão da capacidade instalada Solar PVxUHE



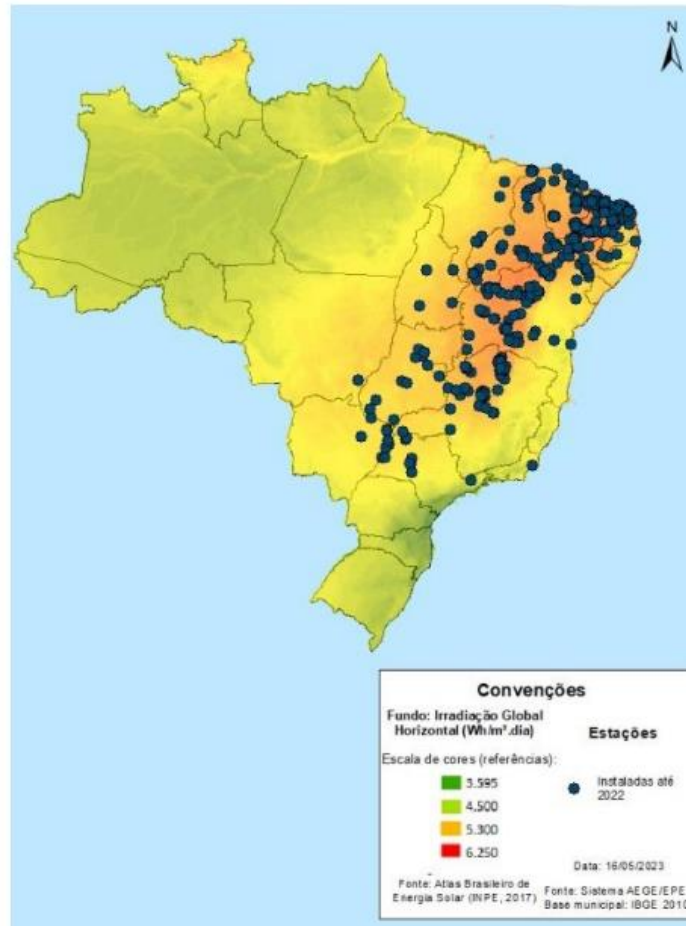
Fonte: (EPE, 2020).

3.4 PROJEÇÃO DA GERAÇÃO DE ENERGIA FOTOVOLTAICA PARA OS PRÓXIMOS ANOS

Desde 2016 para participar dos leilões de energia os projetos de geração fotovoltaica têm que atender as condições para o cadastramento e habilitação técnica, sendo que no cadastramento deve-se apresentar o histórico de medições contínuas de irradiação global por um período de 12 meses consecutivos (EPE, 2023)

Essa exigência tem como objetivo aumentar a confiabilidade dos dados solarimétricos utilizados, usando essas medições para reduzir as incertezas dos projetos. Tais projetos cadastrados somam 377 estações instaladas conforme apresentado na Figura 37 (EPE, 2023).

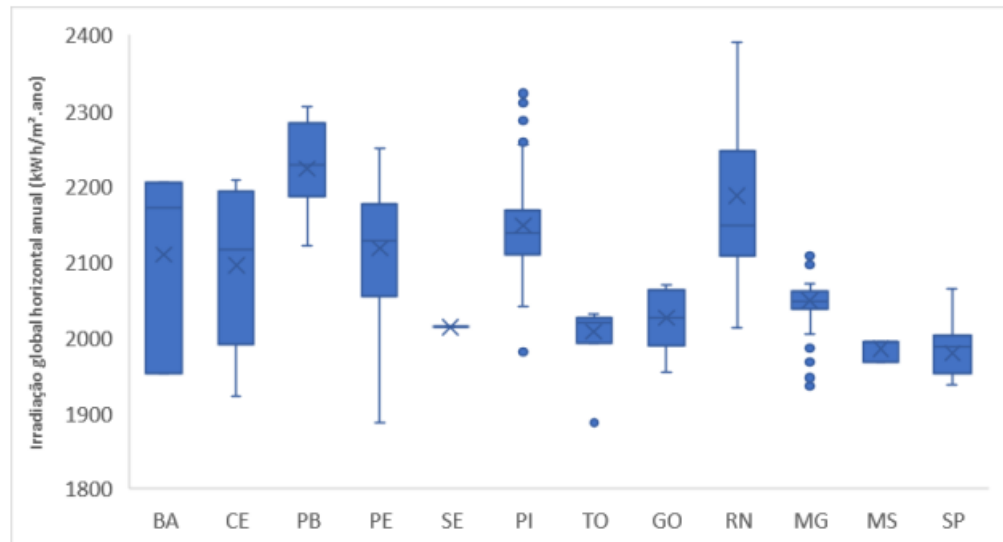
Figura 37 – Mapa da Radiação Global Horizontal



Fonte: EPE (2023)

Os valores de GHI considerados pelas certificadoras variam entre 1.780 kWh/m^2 e 2.390 kWh/m^2 , onde os maiores valores são encontrados no subsistema Nordeste. Fora desse subsistema vale destacar o estado de Minas Gerais, que apresenta valores mais altos que os demais. A Figura 38 mostra o histórico de irradiação dos leilões (EPE, 2023).

Figura 38 – Mapa da Radiação Global Horizontal por estado

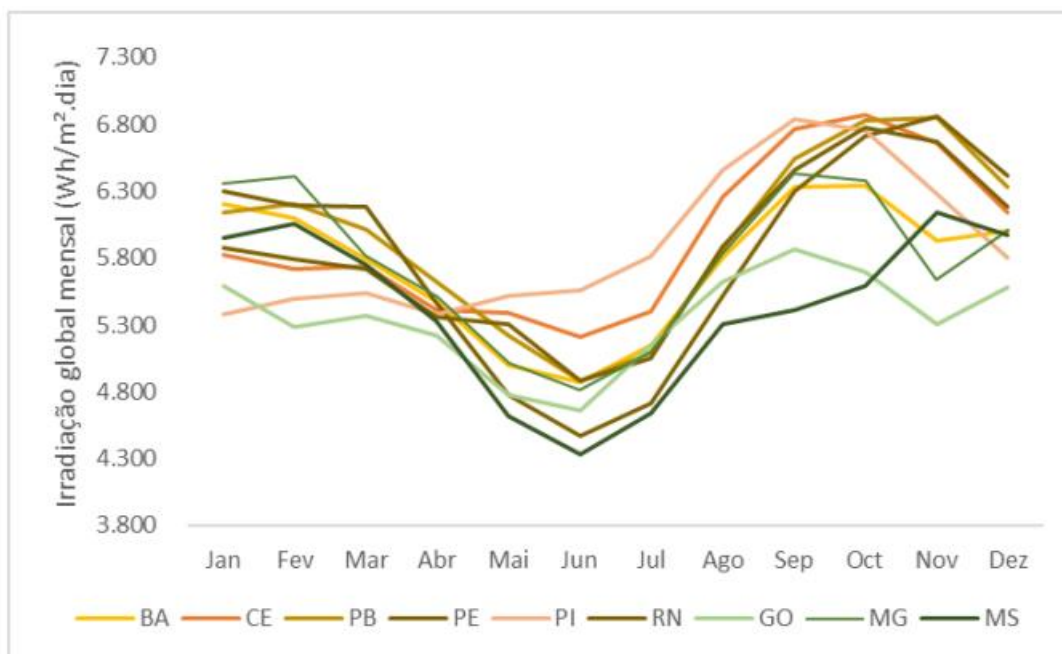


Fonte: EPE (2023).

Tomando como base a crescente demanda de energia prevista pelos próximos anos, será necessária uma expansão indicativa para o cenário de referência. Segundo as estimativas levantadas pelo plano decenal 2032 (EPE, 2022), deve ser necessário aproximadamente cerca de 43.000 MW para até 2031 (EPE, 2022).

Também é importante observar o comportamento sazonal da irradiação solar global, onde temos uma maior irradiação no período do verão e uma menor no período do inverno. Isso ocorre porque o ângulo de incidência é menos favorável próximo ao solstício de inverno e mais favorável nos meses próximos ao verão, também é importante considerar o efeito climático local. Em lugares chuvosos o pico ocorre entre os meses de setembro e novembro, a Figura 39 mostra o perfil dessa sazonalidade (EPE, 2023).

Figura 39 – Sazonalidade da irradiação por estado

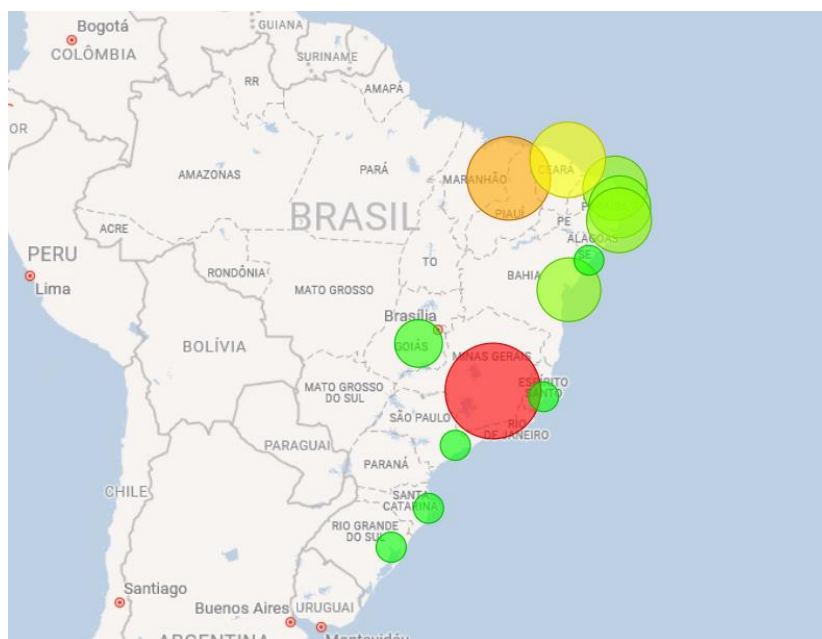


Fonte: EPE (2023).

Observando as projeções levantadas ao longo do plano decenal 2032 (EPE, 2022), a expansão será em sua maioria dada através de termelétricas, sendo esse tipo de geração correspondente a quase 60% do total de crescimento da capacidade instalada na próxima década. As fontes renováveis também terão muito protagonismo na próxima década, dentre elas se destacam a geração vinda de eólicas e as PCHs centralizadas (EPE, 2022).

Outra fonte que entra em destaque é a geração fotovoltaica, onde se prevê que terá um expressivo crescimento ao longo da próxima década. Esse crescimento será devido ao surgimento de novas geradoras centralizadas visando uma produção de alta potência mandado a energia produzida para a rede. Outro setor que contribui para esse crescimento acelerado é a mini e microgeração, pois cada vez se aumenta os produtores residências. No cenário previsto, a produção MMGD chega a 13% da capacidade instalada total até 2031. Esse aumento é observado na Figura 40 (EPE, 2022).

Figura 40 – Evolução da geração fotovoltaica no Brasil até 2027

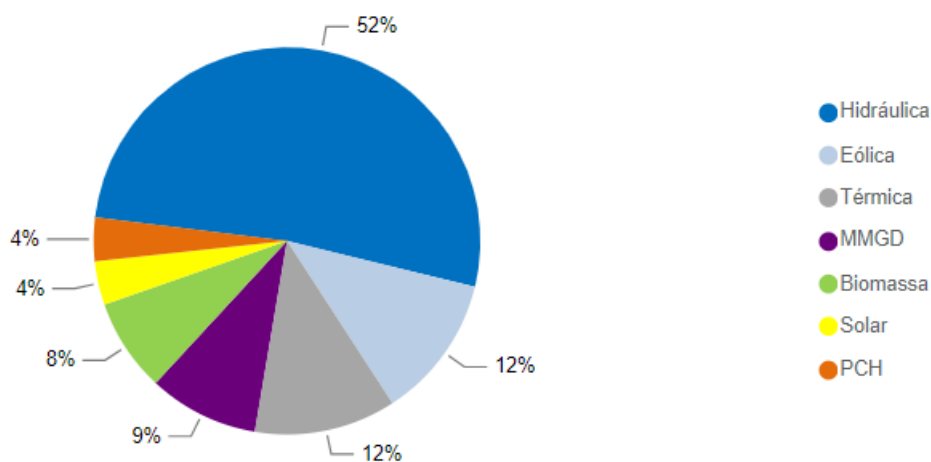


Fonte: ONS (2023).

Observando a Figura 40 nota-se que o crescimento da produção da geração fotovoltaica irá se dar principalmente nas regiões Nordeste e Sudeste, isso é explicado pela Figura 37, onde é mostrado que a região Nordeste possui o maior potencial de geração em território brasileiro, já o crescimento no Sudeste pode ser explicado pela alta densidade demográfica na região favorecendo a criação de novas unidades MMGD.

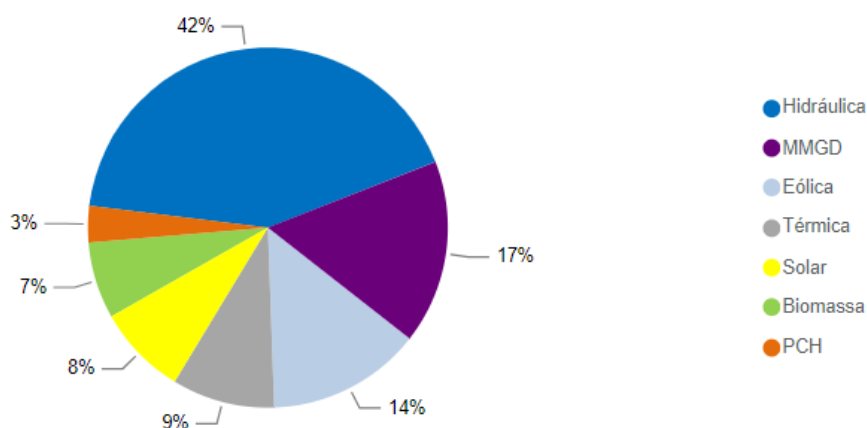
A ONS também faz estimativas através das ferramentas PEN disponibilizada em seu site, essa previsão é referente a evolução da matriz elétrica nos próximos 5 anos. As Figuras 41 e 42 mostram a comparação percentual entre os anos de 2022 (Figura 32) e do ano de 2027 (Figura 33).

Figura 41 – Evolução da matriz energética brasileira 2022



Fonte: ONS (2023).

Figura 42 – Evolução da matriz energética brasileira 2027



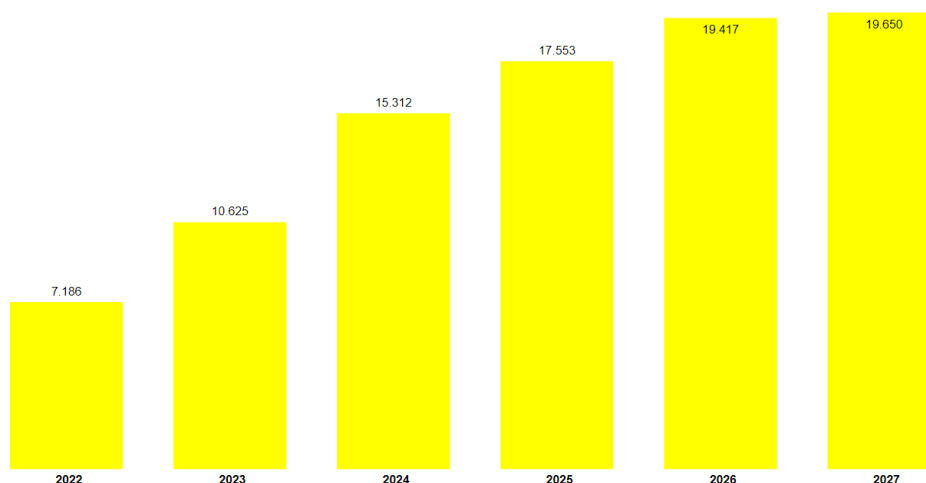
Fonte: ONS (2023).

Ao analisar dados fonte dos gráficos nota-se que em 2022 a matriz elétrica brasileira era composta por um total de 197 GW, onde 7,2 GW são oriundos da produção solar, já a eólica nesse período é responsável por 23,6 GW. Quando se analisa a matriz no ano de 2027 tem-se que ela é composta por um total de 242 GW, sendo que desses 19,6 GW são vindos da geração fotovoltaica e 33,6 GW vem da geração eólica. Com isso conclui-se que a ONS espera que a produção de energia oriunda da fonte solar quase triplique nos próximos 5 anos.

Com essas previsões feitas pela ONS e pela EPE, juntamente analisando a taxa de crescimento da geração de energia fotovoltaica na última década observada

na Figura 34, pode-se deduzir que a produção fotovoltaica será essencial para se obter energia necessária para o futuro crescimento da demanda brasileira. A Figura 43 mostra uma previsão realizada pela ONS do crescimento da produção de energia vindo da geração fotovoltaica.

Figura 43 – Evolução da geração fotovoltaica até 2027 (MW)



Fonte: ONS (2023).

Os projetos de grande escala terão um crescimento acelerado na próxima década segundo o plano decenal de expansão de energia – PDE 2029, o crescimento estimado da energia solar fotovoltaica centralizada durante esse período será cerca de 7 GW, o que resultará em superar os 10 GW de capacidade instalada ao final desse período (EPE, 2019).

Em relação às tecnologias de micro e mineração como descritas anteriormente, a energia de origem solar fotovoltaica tem como previsão ser o principal motivo de crescimento desse setor. Segundo o plano decenal de expansão de energia – PDE 2029, no final de 2029 esse tipo de tecnologia deve possuir algo em torno de 10 GW de capacidade instalada (EPE, 2019).

Segundo essa previsão realizada pela EPE no ano de 2019, no final de 2029 o sistema de energia brasileiro deve ter algo em torno de aproximadamente 20 GW de potencial instalado. Olhando no site da ONS tem-se que atualmente 9.8 GW de capacidade instalada, então segundo essa previsão a produção de energia deve mais que dobrar até 2029 (ONS, 2023). Isso mostra como esse tipo de produção será relevante a matriz energética brasileira nos próximos anos (EPE, 2019).

3.5 TIPOS DE PROJETOS DE USINAS FOTOVOLTAICAS

Devido aos avanços da tecnologia vem surgindo diversas formas de instalação de projetos de geração de energia fotovoltaica, essas tecnologias têm como objetivo melhorar o aproveitamento de espaço, assim se produzindo mais energia em menos espaço (EPE, 2020).

3.5.1 Usina fotovoltaica flutuante

Um tipo de instalação que vem se destacando recentemente, principalmente em países asiáticos que têm uma alta densidade demográfica, e a solar fotovoltaica flutuante, esse tipo de tecnologia consiste em fazer a instalação dos sistemas fotovoltaicos em espelhos de água (EPE, 2020).

A principal diferença entre um sistema solar fotovoltaico convencional instalado em terra e um sistema solar fotovoltaico flutuante (FVF) é a plataforma flutuante (estruturas de suporte para a fixação dos módulos fotovoltaicos, cabos e em alguns casos também inversores), além de possuir um sistema de ancoragem e ancoradouro (EPE, 2020).

Enquanto o sistema solar fotovoltaico deve possuir todas essas estruturas específicas, o sistema fotovoltaico convencional em solo é composto principalmente por módulos fotovoltaicos, inversores e estruturas de suporte dos módulos, as estruturas de suporte dos módulos ainda podem ser fixas ou com rastreamentos de 1 ou 2 eixos (EPE, 2020).

A Figura 44 mostra um esquemático simplificado de como é a estrutura de uma usina fotovoltaica flutuante, nela pode-se observar que ele é constituído pelos módulos fotovoltaicos que captam a irradiação solar. As plataformas flutuantes são as estruturas de suporte para a instalação e proporcionam estabilidade e flutuabilidade a esses, ancoragem e amarração é a parte de fixação da estrutura em um ponto fixo e por último tem-se os cabos elétricos que podem ser tanto subaquáticos ou ficarem por cima do corpo de água (EPE, 2020).

Figura 44 – Esquema geral solar e fotovoltaico flutuante

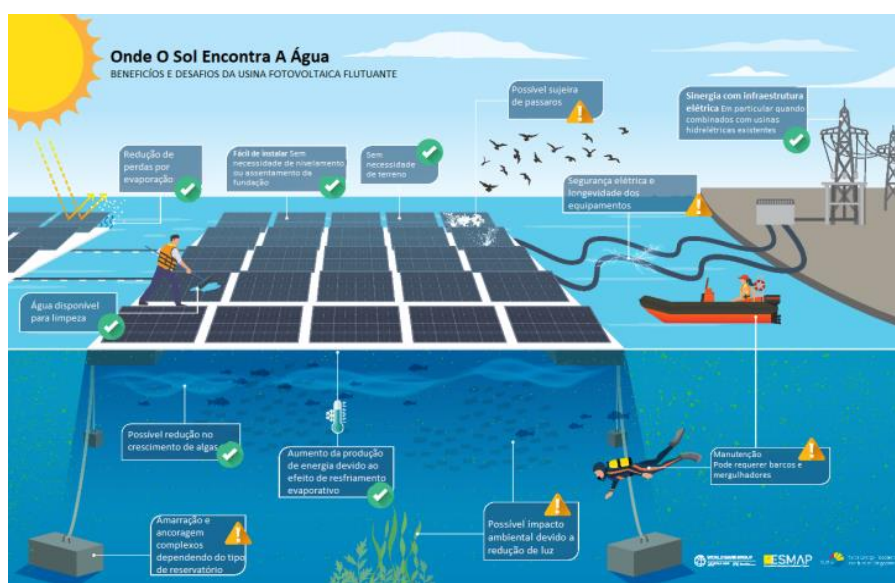


Fonte: EPE (2020).

Quando se observa as usinas fotovoltaicas flutuantes na prática, percebe-se diversas vantagens e algumas desvantagens em sua aplicação. Dentre as vantagens pode-se destacar um ganho de eficiência de produção, também se tem uma redução de perda por sombreamento e sujeira além disso também se tem uma redução da evaporação dos reservatórios.

Entre as desvantagens pode-se destacar um grande acúmulo de dejetos de pássaros além de um impacto na vida aquática local. A Figura 45 mostra de maneira didática as vantagens e desvantagens que esse tipo de projeto traz (EPE, 2020).

Figura 45 – Vantagens e desvantagens de projeto usina fotovoltaica flutuante



Fonte: World Bank Group; SERIES; ESMAP (2019).

A eficiência dos módulos fotovoltaicos está diretamente relacionada ao aumento da temperatura que quando se fala de tecnologias feitas com base do silício é da ordem de 0,4 a 0,5 %/°C. Devido a essa característica intrínseca do silício tem-se um aumento de eficiência nos projetos da usina fotovoltaica flutuante, isso se dá porque os módulos instalados sobre a água tendem a ter uma temperatura de operação mais baixa que as que estão no solo (EPE, 2020).

As temperaturas registradas ficam entre 5% e 20% inferiores nas instalações, sendo essa diferença dependendo muito da localização, do clima da região e da estrutura de flutuação utilizada (EPE, 2020).

Entretanto, esse benefício não está totalmente claro enquanto os fornecedores de estruturas flutuantes indicam um ganho de até 25% na produção de energia. Estudos experimentais indicam resultados diferentes, um estudo realizado na Coreia do Sul (CHOI, 2014) aponta ganhos em torno de 11% em relação às usinas convencionais, uma pesquisa realizada nos estados unidos (Sacramento, et al., 2015) aponta ganhos de eficiência entre 9,5% e 14,5%, mas como citado anteriormente esse aumento é muito dependente de onde a instalação da usina é realizado, podendo variar grandes quantidades (EPE, 2020).

Tendo em consideração que o resfriamento evaporativo é muito dependente de bulbo úmido local, que depende da temperatura ambiente de bulbo seco e da velocidade do vento. Levando isso em conta pode-se deduzir que regiões semiáridas com alta velocidade de vento tendem a ter um ganho superior a localidades com alta umidade e menos incidência de ventos (EPE, 2020).

As usinas fotovoltaicas flutuantes têm a tendência de acumular uma menor quantidade de poeira transportada pelo vento em seus painéis, isso se deve porque essas usinas estão instaladas longe do solo e sobre os espelhos de água, devido a isso elas precisam de menos cuidados que as instaladas em solo. Por outro lado, as usinas flutuantes são áreas que as aves usam como pouso, devido a isso ocorre um acúmulo de dejetos de pássaros, isso causa um aumento nos custos de limpeza e uma variação na produção.

Um exemplo desse problema é apresentado na Figura 46, os dejetos da avifauna contribuem para o aumento da disponibilidade de nutrientes na água, tendo destaques o nitrogênio e fósforo no lago, com o tempo e o acúmulo dessas substâncias podem afetar a qualidade da água e eventuais aplicações de produtos

químicos para a limpeza ou minimizar o acúmulo de sujeira, também trará efeitos negativos ao meio ambiente local.

Figura 46 – Dejetos de pássaros em módulos flutuantes



Fonte: EPE (2020).

Outro benefício esperado é a redução do sombreamento nos módulos fotovoltaicos, essa redução de sombreamento está relacionada a redução da temperatura de operação. Destaca-se que tal redução é devido à inclinação utilizada nas usinas flutuantes, que em sua maioria têm a tendência a serem inferiores à ótima.

Essa inclinação se deve para reduzir os efeitos do vento na estrutura, outro ponto de interesse é a variação do nível da água do reservatório ao longo do tempo, essa variação causa uma alteração na inclinação dos módulos o que pode causar mais sombreamento ou uma operação em ângulo desfavorável (EPE, 2020).

Segundo estudos realizados por Farfán e Breyer (2018), fazendo a cobertura de 25% da superfície de um reservatório de uma hidrelétrica com placas de uma usina fotovoltaica flutuante, poderia aumentar em até 6,3% a disponibilidade de água no reservatório, devido a essa característica esse tipo de projeto pode ter um alto impacto em locais que possuem baixa disponibilidade hídrica.

Mas é necessário ressaltar que a cobertura de módulos em grandes corpos de água não será impactante em termos de fração da área total, embora se tenha uma redução da evaporação, não é a solução para o problema em questão. Entretanto para os casos em que recobrem grande parte do reservatório, reduzindo a evaporação

de maneira significativa deverá ser estudados os possíveis impactos no microclima local (EPE, 2020).

A realização de um projeto de grande escala em um corpo de água pode causar diversos impactos na vida aquática, para se ter noção do impacto na fauna local deve-se considerar diversos aspectos. Uma primeira característica a ser considerada é o tamanho do projeto para implementação em pequena escala pois possui a tendência de resultar na alteração de forma positiva da fauna local. Tais alterações positivas são ocasionadas pelo aumento da biodiversidade local, possivelmente devido a criação de nichos ecológicos específicos (EPE, 2020).

Em 2019 o grupo banco mundial (WORLD BANK GROUP; SERIES; ESMAP, 2019), realizou um estudo que apresenta uma estimativa do potencial instalado em usina fotovoltaica flutuante em reservatórios e outra da geração de energia no continente (Tabela 3), esses estudos resultou que considerando 10% de utilização tem-se cerca de 4000 GW e 5200 TWh por ano.

Tabela 3 – Potencial de geração de energia de FVF em reservatórios

Continente	Área de superfície total disponível (km ²)	Número de corpos d'água avaliados	Potencial FVF (GWp)			Possível geração anual de energia (GWh/ano)		
			Porcentagem de área superficial usada			Porcentagem de área superficial usada		
			1%	5%	10%	1%	5%	10%
África	101.130	724	101	506	1.1011	167.165	835.824	1.671.648
Ásia e Oriente Médio	115.621	2.041	116	578	1.156	128.691	643.456	1.286.911
Europa	20.424	1.082	20	102	204	19.574	97.868	195.736
América do Norte	126.017	2.248	126	630	1.260	140.815	704.076	1.408.153
Austrália e Oceania	4.991	254	5	25	50	6.713	33.565	67.131
América do Sul	36.271	299	36	181	363	58.151	290.753	581.507
Total	404.454	6.648	404	2.022	4.044	521.109	2.605.542	5.211.086

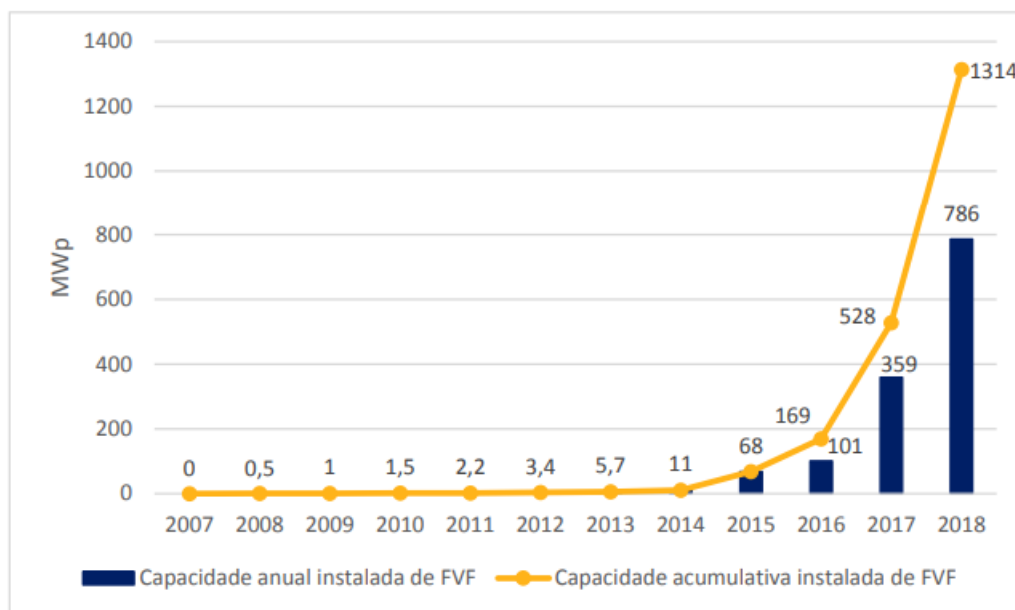
Fonte: WORLD BANK GROUP; SERIES; ESMAP (2019).

Os estudos realizados sobre esse tema apontam um potencial mundial de até 5700 GW e 8000 TWh por ano. Esses valores são referentes a uma cobertura de 25% dos reservatórios de água disponíveis (FARFAN e BREYER, 2018).

Esses tipos de usinas estão cada vez mais presentes na matriz energética mundial, no estudo apresentado pelo banco mundial, demonstra que a capacidade

instalada mundial saiu de 68 MWp no ano de 2015 para cerca de 786 MWp em 2018, e esse mesmo estudo aponta que até o ano de 2022 deve chegar a 1500 MWp. A evolução pode ser vista através da Figura 47 (WORLD BANK GROUP; SERIS; ESMAP, 2019).

Figura 47 – Capacidade instalada FVF no mundo e instalação anuais



Fonte: WORLD BANK GROUP; SERIS; ESMAP (2019).

No Brasil os sistemas fotovoltaicos em corpos de água surgem como uma alternativa com potenciais ganhos de eficiência. Os projetos pilotos mais recentes tem como característica serem associados a usinas hidroelétricas, sendo um complemento e uma segunda fonte, além de ajudar a reduzir a evaporação das barragens (EPE, 2020).

Quando se olha no potencial gerador no Brasil usando essa tecnologia, estudos apontam que utilizando somente os reservatórios das hidrelétricas pode-se obter algo em torno de 4443 TWh por ano de produção. Vale ressaltar que como trabalhando com os reservatórios de hidrelétrica o investimento necessário para as linhas de transmissão serão diminuídos (STRANGUETO, 2016).

No Brasil pode-se citar como um ponto de referência a usina fotovoltaica flutuante que se encontra no reservatório da UHE Sobradinho localizado no estado da Bahia, ele foi um projeto inaugurado em 2019 com um potencial de 1 MWp e que com

o tempo foi expandido até alcançar a capacidade de 2,5 MWp. Encontra-se imagens desse projeto na Figura 48 (EPE, 2020).

Figura 48 – Usina fotovoltaica flutuante no reservatório da UHE Sobradinho



Fonte: EPE (2020).

Vale ressaltar também o potencial de geração nos mares Brasileiros, segundo exercícios de quantificação do potencial gerador realizado pela EPE (EPE, 2020), o Brasil possui um enorme potencial de irradiação sobre o mar, entretanto devido à falta de estações offshore é difícil realizar a validação desses dados. Por isso há uma limitação dos modelos de estimativa o que leva a ter cautela na utilização desses dados (EPE, 2020).

Como explicado anteriormente, neste trabalho um fator que pode inviabilizar a implementação de novos projetos de usinas fotovoltaicas flutuantes é seu elevado custo de implementação, sendo esses mais altos que os projetos de plantas em solo (EPE, 2020).

O World Bank Group realizou um estudo em que são levantados os custos de investimento de uma usina fotovoltaica convencional (planta em solo), com uma fotovoltaica flutuante, esses dados estão disponíveis na Tabela 4. Devido a estrutura flutuante, sistema de ancoragem, sistema de fixação e o sistema de monitoramento o CAPEX (Capital investido no projeto) pode chegar a ser 18% maior que o de usinas fotovoltaicas convencionais (WORLD BANK GROUP; SERIES; ESMAP, 2019).

Tabela 4 – Comparação dos custos de investimento FVF x FV em solo

Componente	FVF 50 MWp (\$/Wp)	FV em solo 50 MWp (\$/Wp)
Módulos	0,25	0,25
Inversores	0,06	0,06
Sistema de montagem*	0,15	0,10
Balanço do sistema**	0,13	0,08
Projeto, construção, teste e comissionamento	0,14	0,13
Total CAPEX	0,73	0,62
*Para FVF, o sistema de montagem inclui a estrutura de flutuação, ancoragem e amarração. **Inclui monitoramento de sistema.		

Fonte: WORLD BANK GROUP; SERIES; ESMAP (2019).

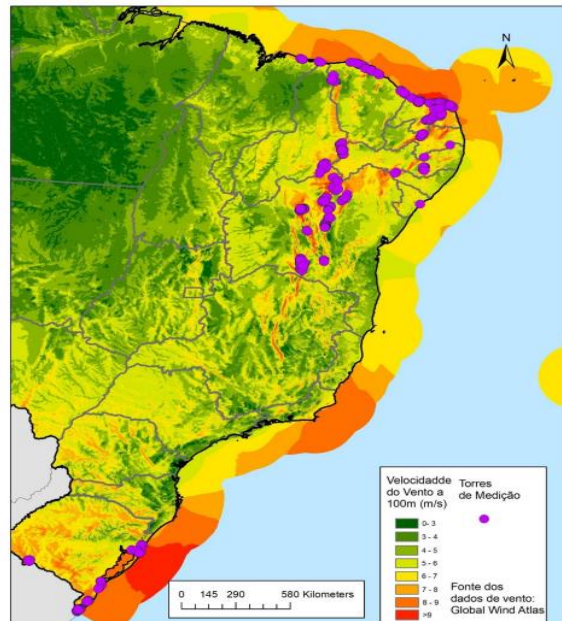
A maior diferença de custos ocorre principalmente no sistema de montagem e no balanço do sistema, isso se dá principalmente porque o sistema das FVF é muito mais complexo do que as convencionais, entretanto esse estudo não leva em conta os outros benefícios que a FVF possui.

3.5.2 Usinas Híbridas Solar - Eólica

Como observado, a geração fotovoltaica está muito relacionada a geração híbrida, que trata de um sistema formado por uma ou duas mais fontes de energias renováveis como por exemplo pode-se tomar a Figura 31, que é uma geração híbrida entre uma hidrelétrica e uma usina solar fotovoltaica.

Outro sistema de geração híbrida que começa a ter destaque em solo brasileiro é o formado pela junção da geração eólica e a energia solar. Essa junção está se tornando cada vez mais popular principalmente na região nordeste, pois lá tem-se condições favoráveis para esses dois tipos de geração. A EPE realizou levantamentos que identificam isso, podendo ser observados nas Figura 40 e Figura 49.

Figura 49 – Mapa com as estações de estudo

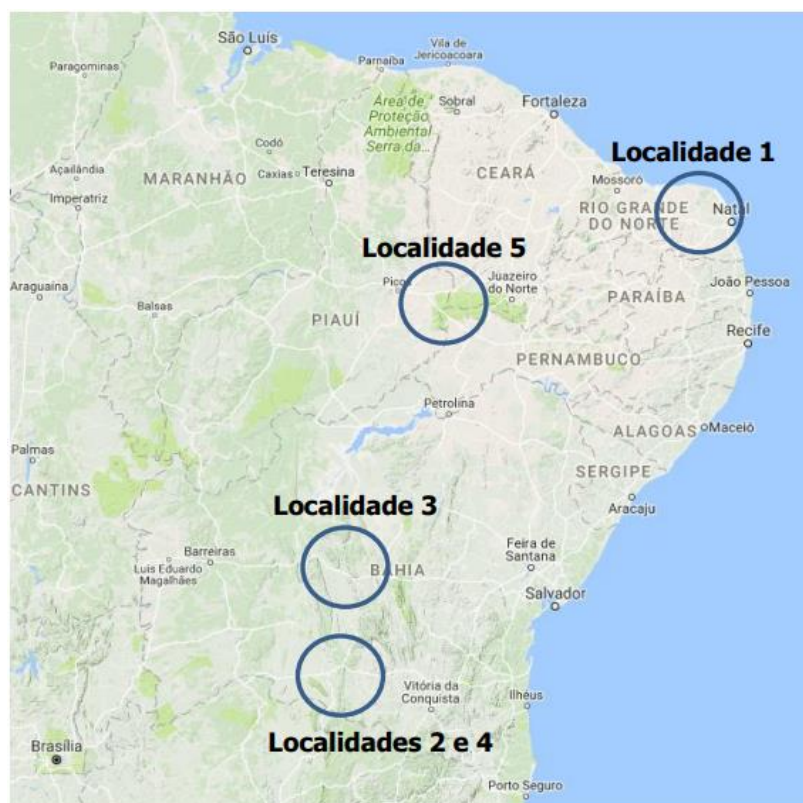


Fonte: EPE (2022).

Tendo em vista essa oportunidade, em 2017 a EPE realizou um estudo avaliativo da geração de usinas híbridas eólicas-fotovoltaicas. Nesse estudo foi montado com base em diversos locais e com diferentes configurações de usinas, como na época ainda existiam poucos projetos de geração híbrida foram levados em conta usinas fotovoltaicas e eólicas próximas entre si. Os pontos de estudos abrangem cinco regiões do nordeste que já possuíam pontos de geração eólica (EPE, 2017).

Como observado, os locais de estudo estão todos presentes na região nordeste, e vale também notar que se teve o cuidado de se utilizar as localidades com maior incidência solar obedecendo o mapa da radiação global horizontal que pode ser visualizada na Figura 50 (EPE, 2017).

Figura 50 – Localidades de estudo

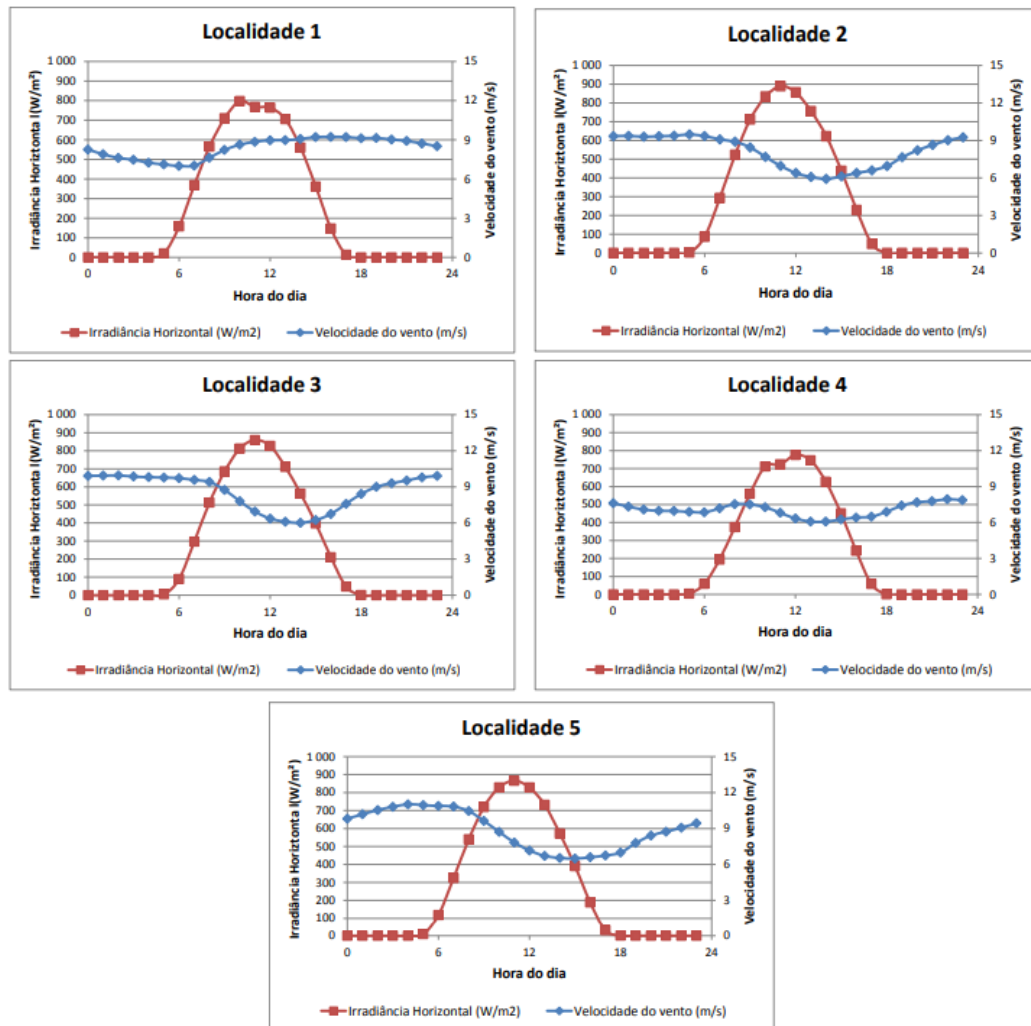


Fonte: EPE (2017).

Para se ter uma pesquisa com dados confiáveis a EPE desde 2009 vem construindo uma base de dados climatológicos e anemométricos denominada de AMA (Acompanhamento de Medições Anemométricas). Vale ressaltar que esse processo segue as normas e procedimentos internacionais destinados a garantir a qualidade das medições (EPE, 2017).

Todos esses dados foram compilados e transformados em um perfil de diário de medição que pode ser visualizado na Figura 51. Ao observar-se as 5 localidades nota-se que o perfil de irradiação global é de característica similar uns com os outros, enquanto o eólico possui um perfil de velocidade distinto (EPE, 2017).

Figura 51 – Médias horárias dos recursos eólicos e solar para os locais estudados



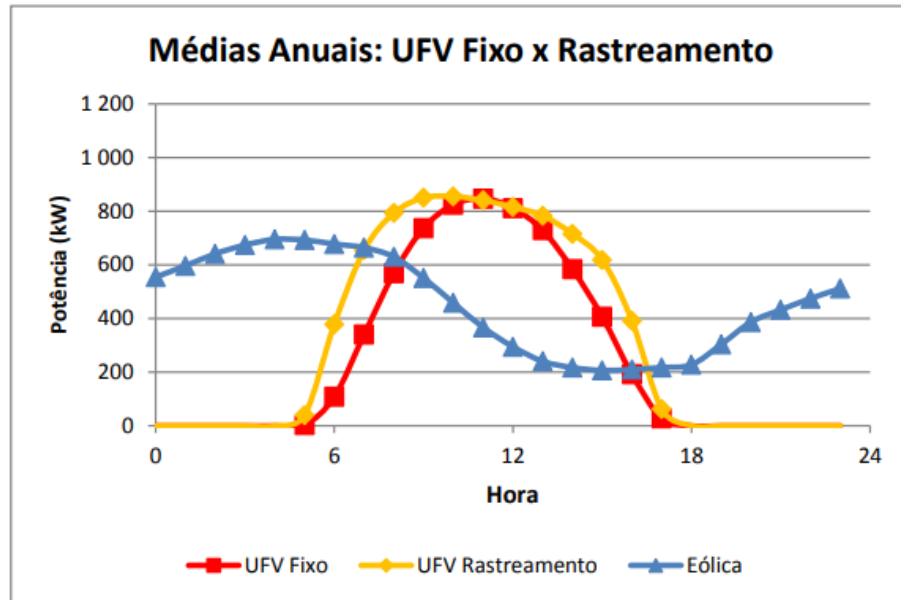
Fonte: EPE (2017).

Para avaliar os resultados de geração, foi estudada a produção eólica e fotovoltaica de maneira separada, sendo que a produção será de maneira independente e a produção total é obtida através da soma da produção individual. Ambas as usinas estariam conectadas a mesma subestação, e foi adotado que se a produção combinada da geração eólica e fotovoltaica ultrapassar a capacidade de escoamento o corte se dará na usina fotovoltaica (EPE, 2017).

Conforme explicado anteriormente foram utilizadas mais de um tipo de configuração, a partir da análise pode-se notar que as estruturas com rastreamento possuem maior aproveitamento da energia solar, especificamente no início da manhã e no final da tarde e caso ocorra altas velocidades de ventos nesses períodos, o corte de energia será mais acentuado. A Figura 52 mostra o perfil que foi traçado através

das médias dos 5 locais de estudo considerando a energia provinda das fontes eólica e solar sendo tanto fixa quanto por rastreamento (EPE, 2017).

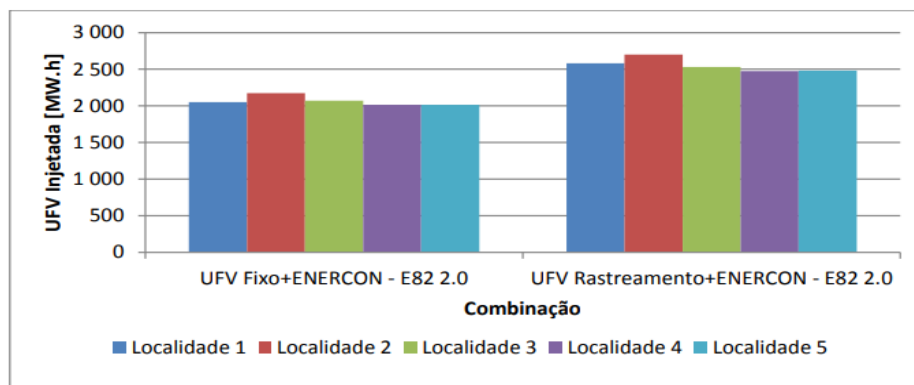
Figura 52 – Médias anuais para a localidade 5



Fonte: EPE (2017).

Mesmo o percentual de corte sendo maior em parques que possuem estruturas de rastreamento com eixo do que com estrutura fixa, quando observa-se a energia líquida injetada na rede nota-se que a estrutura com rastreamento possui um desempenho superior como pode ser observado na Figura 53. Quando quantificado, observa-se que trabalhando com rastreamento de um eixo, obtém-se algo em torno de 25% a mais do que quando utiliza a estrutura de rastreamento (EPE, 2017).

Figura 53 – Energia fotovoltaica injetada x estrutura de suporte

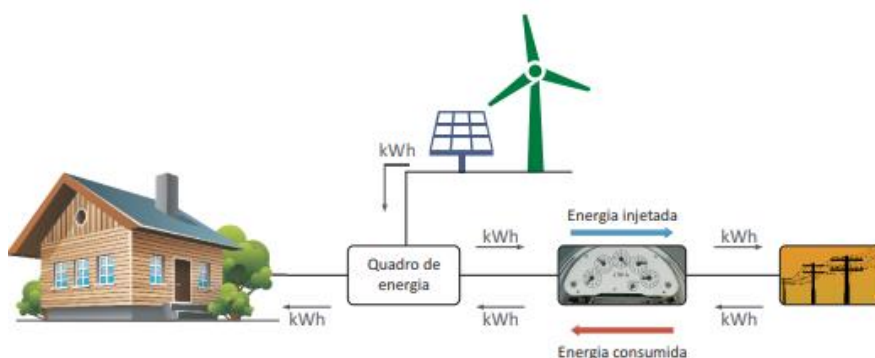


Fonte: EPE (2017).

Como pode ser analisado levando em conta esse estudo realizado pela EPE a complementaridade entre as fontes eólica e solar fotovoltaica depende de diversas variáveis, o que se faz necessário uma avaliação pautada em uma metodologia consistente. Essa metodologia deve levar em conta o perfil diário e sazonal dos ventos junto ao dimensionamento e característica de cada usina (EPE, 2017).

Por lei é permitido o uso de qualquer fonte renovável, entretanto a grande parte do potencial instalado nos próximos anos será através da geração fotovoltaica. É denominada microgeração distribuída a central geradora com potencial instalada com até 75 kW e menor ou igual a 3 MW, como demonstrado na Figura 54 (ANEEL, 2023).

Figura 54 – Esquemático do micro e mineração



Fonte: ANEEL (2023).

Ao observar a figura é possível notar a simplicidade de tal geração, onde se tem o quadro de energia que determina se a energia gerada irá ser consumida no local gerador ou vai ser injetada na rede de distribuição, por isso deve ter um medidor bidirecional.

3.5.3 Micro e minigeração Distribuída e Baterias

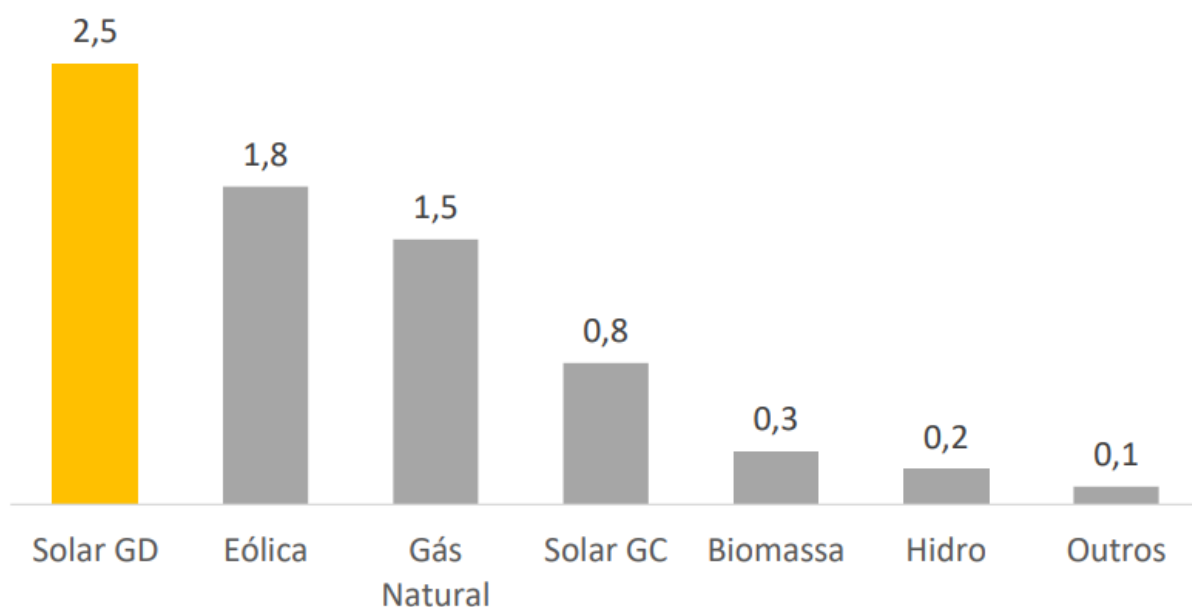
Como apresentado anteriormente, geração solar fotovoltaica têm grande predominância de projetos de micro e minigeração, e devido à presença de fluxos bidirecionais de energia a disseminação em larga escala impõe grandes desafios técnicos, econômicos e regulatórios do setor elétrico derivado.

A micro e minigeração distribuída é caracterizada por plantas com até 5 MW de potência, serem constituídas por fontes renováveis ou cogeração qualificada, estar

conectadas à rede de distribuição e participar do sistema de compensação de energia elétrica.

A micro e minigeração está se tornando cada vez mais protagonista na expansão da oferta de eletricidade no Brasil, desde o ano de 2020 a expansão vinda da fonte solar distribuída superou a expansão de todas as outras fontes centralizadas, a Figura 55 apresenta a oferta de geração de energia, os projetos caracterizados como MMGD entrando em operação neste ano gerou mais que 3 vezes da geração solar centralizada (EPE, 2021).

Figura 55 – Expansão da oferta de geração de energia elétrica em 2020 (GW)

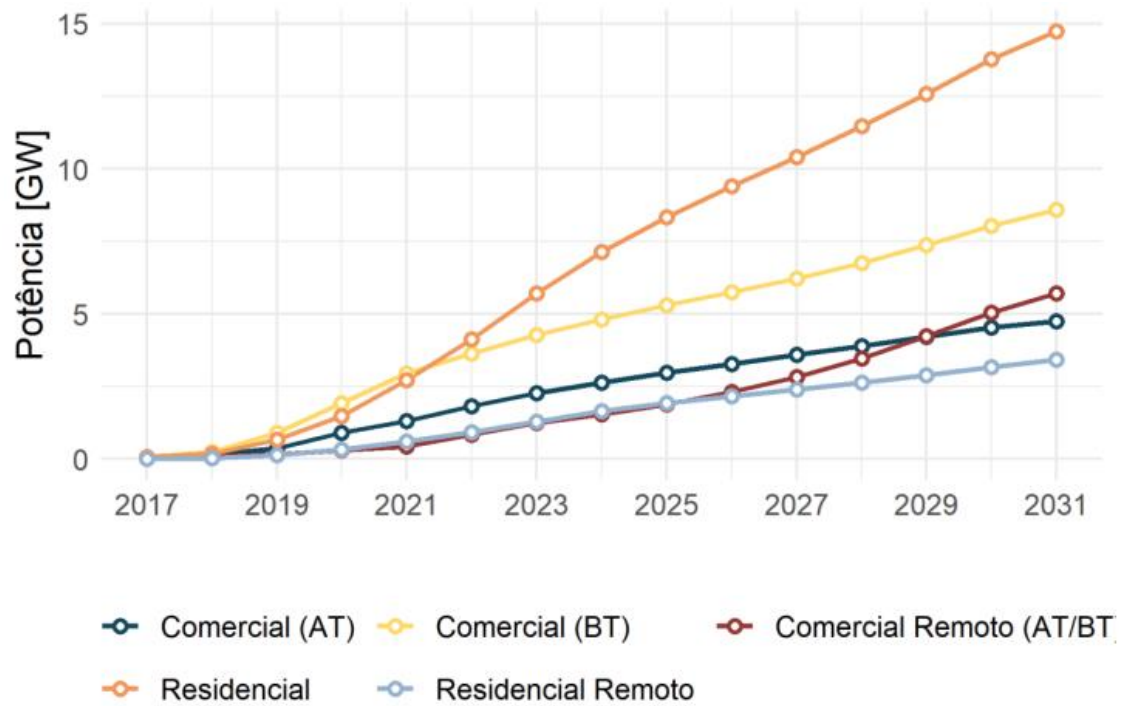


Fonte: EPE (2021).

O Brasil passou por uma mudança no marco legal da micro e minigeração, a partir disso o limite da minigeração distribuída fotovoltaica foi reduzido de 5 MW para 3 MW e foi estabelecido o conceito de fontes despacháveis sendo elas hidro, biomassa, cogeração e fotovoltaica mais baterias.

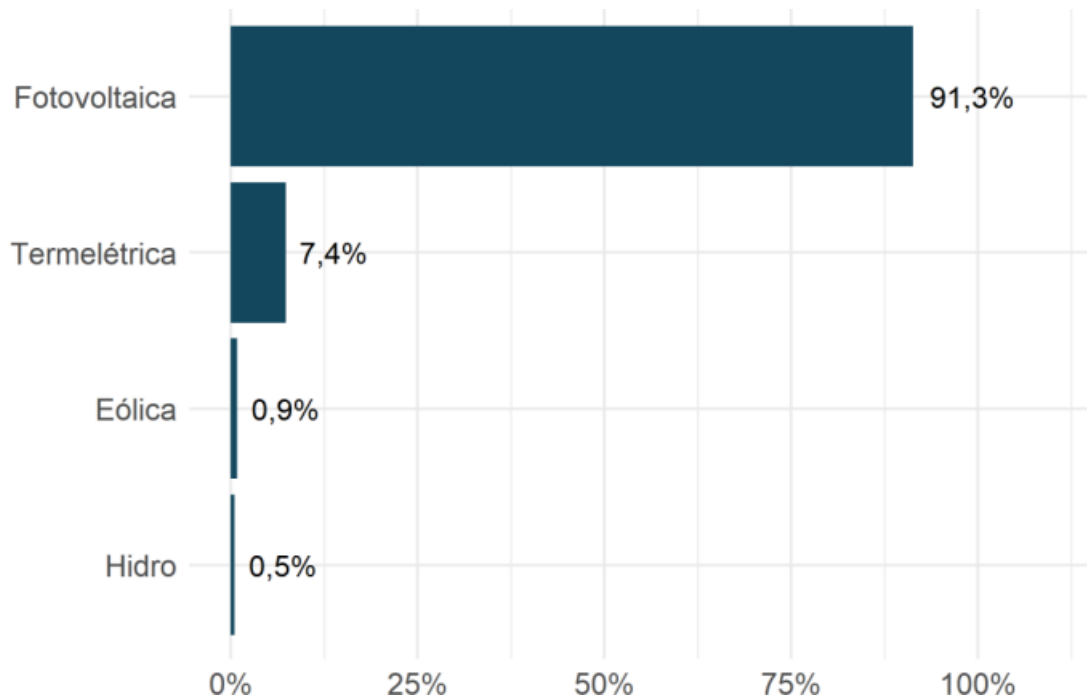
Essa mudança traz incertezas para a geração MMGD ao longo prazo, mesmo que a remuneração seja afetada apenas a partir de 2029 o ritmo dos investimentos deve ser alterado, a Figura 56 mostra uma projeção da capacidade instalada da MMGD até 2031, a Figura 57 mostra o percentual de contribuição por fonte no final da simulação (2031). A figura mostra como a MMGD é dominada pela geração fotovoltaica onde mais de 90% é vindo dessa fonte.

Figura 56 – Projeção da capacidade instalada de MMGD (GW)



Fonte: EPE (2021).

Figura 57 – Projeção da Participação por fonte em 2031



Fonte: EPE (2021).

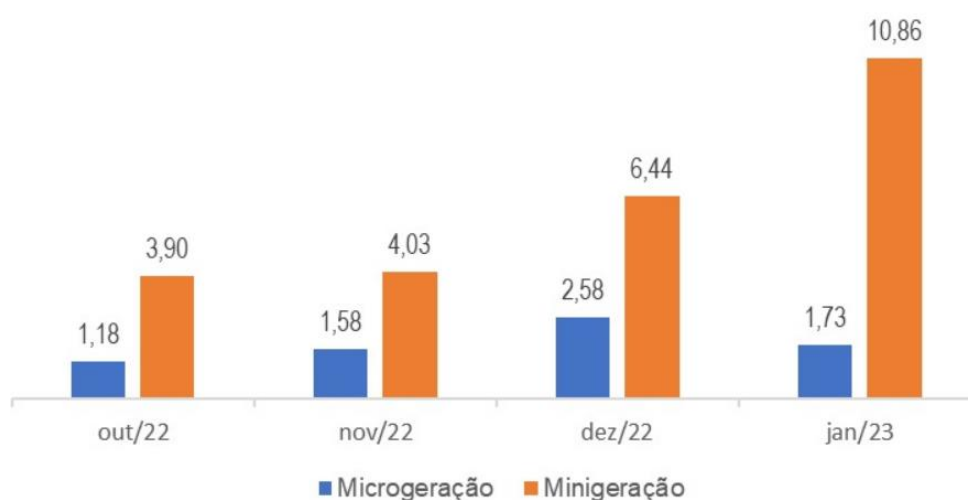
Como comentado anteriormente, um fator de grande importância para o crescimento do micro e minigeração e a sua regulamentação é a lei 14.300. Essa lei determina que as unidades já existentes e as que protocolaram a solicitação de acesso na distribuidora em 2022 vão ter mais 25 anos dos benefícios definidos pelo sistema de compensação de energia elétrica (Canal Solar, 2023).

Devido a aprovação dessa lei foi gerado uma demanda muito grande pois a regulamentação antiga dava muito mais benefícios a geração. Os pedidos de conexão para sistemas de energia solar depois que a lei foi aprovada representava um potencial de 32,3 GW de potência instalada (Canal Solar, 2023).

Segundo dados divulgados pela associação brasileira de distribuidores de energia elétrica, foram cerca de 486,5 mil pedidos de conexão, sendo que desses 460 mil de microgeração e 26,5 mil de minigeração (Canal Solar, 2023).

Quando se observa o potencial gerador dessa demanda tem-se que esses projetos forem concluídos com um acréscimo de 7,06 GW em microgeração enquanto ocorre um acréscimo de 25,23 GW em minigeração. Quando se compara isso com o atual cenário brasileiro tem-se que a potência instalada quase dobraram nesse setor visto que quando a lei foi aprovada a potência instalada brasileira era de 17 GW. É possível analisar pedidos de conexão de micro e minigeração na Figura 58 (Canal Solar, 2023).

Figura 58 – Pedidos de conexão de micro e minigeração



Fonte: Canal Solar (2023).

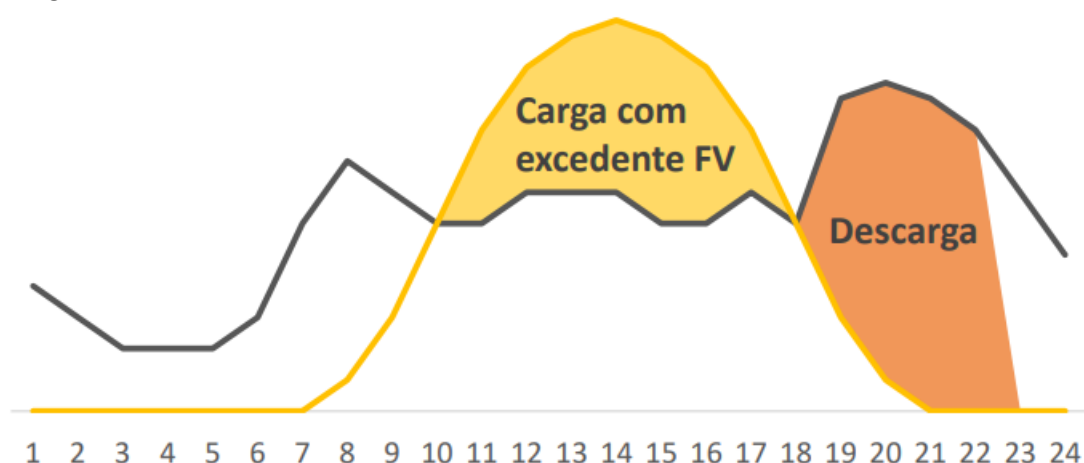
A figura mostra que a minigeração vem crescendo de maneira acelerada no país nos últimos meses, isso se deve principalmente ao marco da micro e minigeração aprovada nesse período, esse marco torna menos viável a implementação de novas usinas de geração desse porte.

A aplicação de baterias por consumidores residenciais e comerciais têm se popularizado cada vez mais no mundo, isso se deve a desenhos tarifários que incentivam o deslocamento do consumo ou armazenamento da geração distribuída excedente é outro fator que contribui é a expansão do mercado de baterias, sendo que o desenvolvimento tecnológico levou a uma redução de 89% nos valores das baterias de íon-lítio entre os anos de 2010 e 2020 (EPE, 2021).

No Brasil ainda há pouca difusão de baterias para o uso em unidades consumidoras, sendo usadas apenas em sistemas remotos, um fator que contribui para esse cenário é uma regularização que não favorece o armazenamento da geração MMGD (EPE, 2021)

A mudança no marco de geração MMGD torna menos atrativo a geração distribuída injetada na rede, e quanto menor o valor do crédito mais atrativo será o uso de baterias, pois as baterias podem ser usadas para evitar a injeção na rede armazenando o excedente da geração para o consumo posterior, tal comportamento é ilustrado pela Figura 59 (EPE, 2021)

Figura 59 – Funcionamento das baterias em uma residência com MMGD



Fonte: Canal Solar (2023).

As variações da geração e do consumo dificultam otimizar o uso da bateria, em alguns momentos, há muita geração e pouco consumo carregando a bateria

completamente e tendo que exportar o excedente para a rede, caso seja aumentada a capacidade da bateria aumenta-se o custo do sistema, e em muitos momentos a capacidade é subutilizada (EPE, 2021).

4 CONCLUSÃO

Na última década a geração fotovoltaica cresceu de maneira acentuada no Brasil, saindo de um percentual irrelevante na matriz energética brasileira para 5% atualmente, onde a geração por essa tecnologia atinge uma potência de 24 GW em seu pico.

Um dos fatores que mais contribui para esse crescimento acelerado foi a antiga legislação para micro e minigeração, nela o excedente gerado era enviado para a rede e o consumidor era compensado de maneira integral por essa geração. Entretanto, a partir da aprovação da Lei 14.300 os pedidos para criação de novas unidades de geração distribuída devem ceder parte do excedente gerado usado para compensar os custos de transmissão, diminuindo assim o custo-benefício da implementação de novos projetos desse tipo.

Devido a esse novo marco no micro e minigeração a previsão de como será o crescimento desse tipo de geração fotovoltaica se torna incerta. Isso se deve porque entre os anos de 2010 e 2020, onde 94% dos investimentos nessa área foram em projetos de geração fotovoltaica, mesmo após a lei ser sancionada a demanda teve um pico de aumento. Para se projetar nos próximos anos deve ser considerado um período maior.

Essa mudança na lei é fundamental pois em projeções realizadas a geração distribuída teria uma produção próxima a geração das grandes unidades geradores de fontes solar e eólica e com a recente implementação da nova lei torna-se complexo estimar a evolução da geração.

Um fator que irá influenciar no crescimento da geração fotovoltaica é a geração híbrida. Ao longo do trabalho foi citado dois tipos sendo a geração fotovoltaica-eólica e a usina fotovoltaica flutuante, essa modalidade terá grande impacto pois se reaproveita o sistema de transmissão já existente além de compensar falhas na intrínsecas em cada geração, como por exemplo na geração fotovoltaica-eólica, enquanto a geração eólica é vertical a geração fotovoltaica é horizontal, dessa maneira se obtém um melhor aproveitamento do espaço e nas usinas solares flutuantes as placas solares ajudar a diminuir a perda de volume da barragem por evaporação.

REFERÊNCIAS

ANEEL, Geração distribuída. Disponível em: https://www2.aneel.gov.br/scg/gd/GD_Fonte.asp /. Acesso em 15 novembro de 2023

ANEEL, Micro e minigeração distribuída. Disponível em: <https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/geracao-distribuida>. Acesso em 15 novembro de 2023

CANALSOLAR, Entrada da lei 14300 gerou mais de 32 gw em pedidos. Disponível em: <https://canalsolar.com.br/entrada-da-lei-14-300-gerou-mais-de-32-gw-em-pedidos-de-projetos>/Acesso em 15 novembro de 2023

CHOI, Y. K. A Study on Power Generation Analysis of Floating PV System Considering Environmental Impact. International Journal of Software Engineering and Its Applications, v. 8, n. 1, p. 75-84, 2014

CRESESB. Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito. Energia solar: princípios e aplicações. 2005. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/>. Acesso em: 15 abr. 2023.

CRESESB/CEPEL. Energia solar fotovoltaica. Disponível em: http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=com_content&lang=pt&cid=321. Acesso em: 15 novembro de 2023.

EPE, Caderno de tecnologias de geração 2023, Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-745/Caderno%20de%20Tecnologias%20de%20Gera%C3%A7%C3%A3o%202023.pdf>. EPE 2023. Acesso em 02/01/2024

EPE, Micro e minigeração distribuída e baterias. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/plano-decenal-de-expansao-de-energia-2031>. EPE 2021. Acesso em 26 de dezembro de 2023

EPEa, Expansão da geração: solar fotovoltaica flutuante. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-466/NT%20Solar%20Fotovoltaica%20Flutuante.pdf>. EPE 2020. Acesso em 15 novembro de 2023

EPEb, Estudos de planejamento da expansão da geração: Avaliação da geração de usinas híbridas eólico-fotovoltaicas. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-232/topico-214/Metodologia%20para%20avalia%C3%A7%C3%A3o%20de%20usinas%20h%C3%A>

[Dbidas%20e%C3%B3lico-fotovoltaicas.pdf](#). EPE, 2017. Acesso em 15 novembro de 2023

EPEc, Planejamento da geração: geração eólica e fotovoltaica. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-232/topico-214/Metodologia%20para%20avalia%C3%A7%C3%A3o%20de%20usinas%20h%C3%Adbidas%20e%C3%B3lico-fotovoltaicas.pdf> /. EPE 2022. Acesso em 15 novembro de 2023

EPE, Plano Decenal de Expansão de energia 2029. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Documents/PDE%202029.pdf>. EPE, 2019. Acesso em 15 novembro de 2023

EPE, Plano Decenal de expansão de energia 2032: Geração centralizada de energia elétrica. EPE 2022. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-689/topico-640/PDE2032_CadernoRequisitos_site_rev2.pdf. Acesso em 15 novembro de 2023

EPE, serie históricas de investimento em energia elétrica. EPE 2020. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-700/Ebook%202020.pdf>. Acesso em 15 novembro de 2023

FARFAN, J.; BREYER, C. Combining flotiang solar photovoltaic power plants and hydropower reservoirs: a virtual battery of great global potential. Energy Procedia, 2018. 403-411. 12th International Renewable Energy Storage Conference, IRES 2018.

FUNDAÇÃO JOAQUIM NABUCO, Preços dos painéis solares descem 90% desde 2010. Disponível em: antigo.fundaj.gov.br/index.php/a-questao-energetica/11800-precos-dos-paineis-solares-descem-90-desde-2010. Acesso em 15 novembro de 2023

HEPEL ENERGIA SOLARa, Painel solar fotovoltaico: monocristalino e policristalino, qual a diferença?. Disponível em: <https://hepel.com.br/painel-solar-fotovoltaico-monocristalino-e-policristalino-qual-a-diferenca>. Acesso em 26 de dezembro de 2023.

HEPEL ENERGIA SOLARb, Origem da energia solar: como surgiu a energia fotovoltaica. Disponível em: <https://hepel.com.br/origem-da-energia-solar-como-surgiu-a-energia-fotovoltaica>. Acesso em 15 novembro de 2023

IBERDROLA, O que é energia fotovoltaica. Disponível em: <https://www.iberdrola.com/sustentabilidade/que-e-energia-solar-fotovoltaica>. Acesso em 15 novembro de 2023

LUQUE, A.; HEGEDUS, S. Handbook of photovoltaic science and engineering. Reino Unido: John Wiley& Sons, 2011.

ONS, PEN: plano de operação energética 2023. Disponível em: <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrljoiYTk3NjUxZmQtYjJiMC00MDcyLWlyOWltM2YzOTZmNjJlM2M2liwidCI6IjNhZGVlbnZjLTkzM2UtNDkxMS1hZTFiLTljMmZlN2I4NDQ0OCIsImMiOjR9/>. Acesso em 15 novembro de 2023

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos. Rio de Janeiro: Brasil, 2014.

CAMARA DOS DEPUTADOS. Lei institui marco legal da micro e minigeração de energia. Disponível em: <https://www.camara.leg.br/noticias/843782-LEI-INSTITUI-MARCO-LEGAL-DA-MICRO-E-MINIGERACAO-DE-ENERGIA>. Acesso em 12 de dezembro de 2023.

PORTALSOLAR, Usina solar: o que é, tipos, como funciona, vantagens e desvantagens. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/usina-solar.html>. Acesso em 15 novembro de 2023

SALA DA ELETRICA. Como a automação pode auxiliar a energia solar fotovoltaica, . Disponível em: <https://www.saladaeletrica.com.br/como-a-automacao-pode-auxiliar-a-energia-solar-fotovoltaica/>. Acesso em: 15 novembro de 2023

SOLARENERGY, saiba como funciona a energia solar. Disponível em: <https://solarenergy.com.br/saiba-como-funciona-a-energia-solar/>. Acesso em 15 novembro de 2023

STRANGUETO, K. M. Estimativa do Potencial Brasileiro de Produção de Energia Elétrica através de Sistemas Fotovoltaicos Flutuantes em Reservatórios de Hidroelétricas. Universidade Estadual de Campinas. [S.I.]. 2016

UNICENTRO, Alexandre Edmond Becquerel o criador da energia solar. Disponível em: <https://www3.unicentro.br/petfisica/2021/12/17/alexandre-edmond-becquerel-1820-1891-o-criador-da-celula-solar/>. Acesso em 15 novembro de 2023

WORLD BANK GROUP; SERIS; ESMAP. Where Sun Meets Water: Floating Solar Market Report. [S.I.]. 2019.