

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS  
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS**

**ESTUDO DA AMPLIAÇÃO DA MATRIZ ENERGÉTICA SOLAR BRASILEIRA:  
Demandas, Potencialidades e Desafios**

**EVELYN HIDEKO IWAMOTO**

**SÃO CARLOS - SP**

**2023**

**ESTUDO DA AMPLIAÇÃO DA MATRIZ ENERGÉTICA SOLAR BRASILEIRA:  
Demandas, Potencialidades e Desafios**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia de Materiais da Universidade Federal de São Carlos, como requisito para obtenção do título de bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador: Professor Doutor Marco Aurelio Liuthevicene Cordeiro

SÃO CARLOS - SP

2023

Dedico este trabalho aos meus pais.

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente gostaria de agradecer ao meu orientador, pelo apoio e sugestões fornecidas ao trabalho e por sempre se mostrar tão acessível e compreensivo.

Também gostaria de deixar aqui registrado o agradecimento à minha família, principalmente aos meus pais, que sempre me apoiaram e incentivaram da forma que podiam durante todos esses anos de faculdade. O apoio deles foi um elemento essencial para que eu conseguisse finalizar esse ciclo. Sei que é tão importante para eles quanto para mim. Agradeço também aos meus irmãos, que eu vejo como exemplos.

Aos amigos que fiz durante a faculdade, que tornaram todos os momentos tão memoráveis quanto poderiam ser. Carregarei memórias e histórias muito queridas deste período. Por terem celebrado comigo as minhas pequenas grandes vitórias e também por terem me ajudado a suportar e passar por momentos difíceis, por estarem sempre dispostos a ouvir e por terem sido amigos incríveis.

Ao meu namorado, que antes de tudo é meu amigo, agradeço pelo companheirismo, paciência e compreensão que teve durante a realização deste trabalho, pelo cuidado e apoio mesmo que distante.

A faculdade, no fim, é sobre entre tantas coisas, os amigos que fazemos no caminho.

## RESUMO

O Brasil possui quase 45% de sua matriz energética provenientes de fontes renováveis, sendo a fonte hidrelétrica a grande responsável por essa participação. No entanto, isso leva a uma dependência neste tipo de fonte que está sujeita a variações pluviométricas e períodos de seca, como já aconteceu e irá acontecer devido às mudanças climáticas. Neste contexto, se faz importante diversificar a matriz para trazer uma maior segurança energética, o que pode ser obtido pelas fontes renováveis, como a energia solar, cujos índices de irradiação solar no país são altos e com valores suficientes para expansão da geração distribuída e centralizada de sistemas fotovoltaicos. Sendo assim, este trabalho tem como objetivo avaliar as potencialidades, demandas e desafios para a expansão da energia solar através da revisão bibliográfica a respeito destes aspectos. Os aspectos abordados são referentes à infraestrutura de transmissão, às regulamentações e aos impactos sociais, ambientais e econômicos destes sistemas. Foi observado que há diversas vantagens e desvantagens quando se trata de geração centralizada e distribuída e que é um assunto no qual há muito espaço para discussão entre órgãos governamentais, distribuidoras, consumidores e empresas, pois trata-se de um assunto recente no Brasil.

**Palavras-chave:** Energia Solar no Brasil. Geração distribuída e centralizada. Potenciais e desafios da energia solar.

## ABSTRACT

Brazil has almost 45% of its energy matrix originating from renewable sources, with the hydroelectric source being largely responsible for this share. However, this leads to a dependence on this type of source that is subject to rainfall variations and periods of drought, as has already happened and will happen due to climate change. In this context, it is important to diversify the matrix to bring greater energy security, which can be obtained by renewable sources, such as solar energy, whose solar irradiation rates in the country are high and with sufficient values for the expansion of distributed and centralized generation of photovoltaic systems. Thus, this work aims to evaluate the potentialities, demands and challenges for the expansion of solar energy through a literature review on these aspects. The aspects addressed are related to transmission infrastructure, regulations and the social, environmental and economic impacts of these systems. It was observed that there are several advantages and disadvantages when it comes to centralized and distributed generation and that it is a subject in which there is much room for discussion between government agencies, distributors, consumers and companies, as it is a recent subject in Brazil.

**Keywords:** Solar Energy in Brazil. Distributed and Centralized Generation. Solar Energy's Potentials and Challenges.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Comparação da matriz energética brasileira e mundial (Adaptado de MME, 2022) .....	13
Figura 2 - Matriz elétrica brasileira (Adaptado de MME, 2022).....	13
Figura 3 - Participação dos diversos setores na emissão de CO <sub>2-eq</sub> (Mt) no Brasil. (Adaptado de MME, 2022) .....	16
Figura 4 - Evolução do custo nivelado de energia para diferentes fontes de energia. (GLOBAL... c2022).....	23
Figura 5 - Quantidade de geração distribuída ao longo dos anos (Adaptado de ANEEL, c2023). .....	27
Figura 6 - Distribuição da potência instalada da GD de acordo com as regiões do país. (Adaptado de ANEEL, c2023).....	27
Figura 7 - Redes de distribuição cobertos pelo SIN (ONS, c2023).....	32
Figura 8 - Previsão da evolução da geração solar (ONS, 2022) .....	33
Figura 9 - Espectro eletromagnético (Anônimo, 2017) .....	34
Figura 10 - Evolução da eficiência de diversos tipos de células solares (NREL, 2023).....	36
Figura 11 - Eficiência do módulo fotovoltaico com relação ao custo de acordo com as gerações (SINKE, 2019). .....	38
Figura 12 - Representação dos principais componentes de um painel FV (SVARC, 2020)..	39
Figura 13 - Total diário de irradiação solar global horizontal no ano a partir das médias mensais (PEREIRA et al., 2017).....	41
Figura 14 - Total diário da irradiação global horizontal em dezembro e junho a partir das médias mensais (PEREIRA et al., 2017).....	42
Figura 15 - Evolução da potência instalada no país ao longo dos anos (Adaptado de ANEEL, 2022). .....	52

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características e exemplos de cada modalidade de geração distribuída.	25
Tabela 2 - Componentes principais de um painel fotovoltaico. ....	38
Tabela 3 - Níveis de irradiação solar para cada região. ....	42

## LISTA DE SIGLAS

ABSOLAR	Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica
AEC	Antes da Era Comum
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BEV	Veículos Elétricos a Bateria
CONFAZ	Conselho Nacional de Política Fazendária
COP	Conferência das Partes
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
FCEV	Veículos Elétricos a Célula de Combustível
FV	Fotovoltaico
GC	Geração Centralizada
GCP	Global Carbon Project
GD	Geração Distribuída
GEE	Gases de Efeito Estufa
HEV	Veículos Elétricos Híbridos
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICB	Índice de Custo-Benefício
ICMS	Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviço
IEA	Agência Internacional de Energia
IPCC	Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas
IRENA	Agência Internacional de Energia Renovável
LABREN	Laboratório de Modelagem e Estudos de Recursos Renováveis de Energia
LCOE	Custo Nivelado de Energia
MMGD	Micro e Minigeração Distribuída
NDC	Contribuições Nacionalmente Determinadas
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
PHEV	Veículos Elétricos Híbridos Plug in
PIB	Produto Interno Bruto
PNE	Plano Nacional de Energia
PUV	Veículos Puramente Elétricos
ProGD	Programa de Desenvolvimento de Geração Distribuída
RN	Resolução Normativa

SIN	Sistema Interligado Nacional
UNFCCC	Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima
VE	Veículos Elétricos

## LISTA DE SÍMBOLOS

CH <sub>4</sub>	Metano
N <sub>2</sub> O	Óxido nitroso
O <sub>3</sub>	Ozônio
CO <sub>2</sub>	Dióxido de carbono
°C	Graus Celsius
Mt	MegaTonelada
GW	GigaWatt
p-n	Junção produzida por um semiconductor tipo p e outro tipo n
CdS	Sulfeto de cádmio
GaAs	Arseneto de gálio
kW	QuiloWatt
MW	MegaWatt
eV	Elétron-Volts
$\lambda$	Comprimento de onda
h	Constante de Plank (6,626x10 <sup>-34</sup> J.s)
J.s	Joule segundo
c	Velocidade da luz no vácuo (2,998x10 <sup>8</sup> m/s)
m/s	Metros por segundo
$\mu$ m	Micrômetro
CdTe	Telureto de cádmio
c-Si	Silício cristalino
m-Si	Monocristalino
p-Si	Policristalino
a-Si	Silício amorfo
$\mu$ c-Si	Silício microcristalino
CIGS	Cobre-Índio-Gálio-Selênio
m <sup>2</sup>	Metro quadrado
CZTS	Sulfeto de cobre e zinco-estanho
Wh/m <sup>2</sup> .dia	Watt hora por metro quadrado dia
GWp	GigaWatt pico

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	12
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	15
2.1	MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA.....	15
2.2	DIVERSIFICAÇÃO DA MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA: NECESSIDADE E IMPORTÂNCIA .....	17
2.3	ENERGIA SOLAR NO MUNDO E NO BRASIL.....	20
2.3.1	Energia solar no mundo.....	20
2.3.2	Energia solar no Brasil.....	23
2.3.3	Geração distribuída e centralizada: definições e aspectos gerais .....	28
2.3.4	Redes de transmissão de energia .....	30
2.4	CÉLULAS FOTOVOLTAICAS .....	33
2.4.1	Radiação eletromagnética e espectro solar .....	33
2.4.2	As gerações de células solares .....	35
2.4.3	Irradiação solar no Brasil .....	40
<b>3</b>	<b>OBJETIVO</b> .....	44
<b>4</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	45
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	46
5.1	IMPACTOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NO CONTEXTO BRASILEIRO NO USO DE ENERGIA SOLAR .....	46
5.2	VANTAGENS E DESVANTAGENS DA IMPLEMENTAÇÃO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS.....	48
5.2.1	Aspectos ambientais e sociais.....	48
5.2.2	Aspecto técnico: infraestrutura dos sistemas de transmissão.....	51
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES</b> .....	55
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	57

## 1 INTRODUÇÃO

O aquecimento global causado pelo aumento da emissão de gases de efeito estufa (GEE), como metano (CH<sub>4</sub>), óxido nitroso (N<sub>2</sub>O), ozônio (O<sub>3</sub>) e, principalmente por dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), proveniente da queima de combustíveis fósseis e intensificado pelas atividades humanas, tem levado a mudanças climáticas sem precedentes na história recente. De acordo com o relatório do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), a temperatura global já apresentou um aumento de 1,1 °C acima do que era observado no final do século XX, causando impacto em diversos aspectos, como eventos climáticos extremos, recuo das geleiras, aumento do nível do mar e da temperatura dos oceanos, trazendo consequências para todos os ecossistemas e atividades humanas, além de afetar os setores econômicos, energético, alimentício, entre outros (IPCC, 2023). Ainda segundo este relatório, a perspectiva é que até o final do século XXI a temperatura global ultrapasse 1,5 °C.

Diante deste cenário, o que determinará se conseguiremos atingir o objetivo será a redução da emissão de GEE e emissões líquidas<sup>1</sup> de CO<sub>2</sub> próximas a zero. Isso requer medidas de mitigação que foquem na transição energética, expansão do uso de energias renováveis, como a solar e eólica, captura de carbono, compensação de carbono, além de outros caminhos (BOEHM; SCHUMER, 2023). Nesse contexto, conforme indicado pela Agência Internacional de Energia (IEA), a perspectiva é que a energia solar, juntamente com a energia eólica, serão elementos fundamentais no direcionamento a um sistema de energia net-zero (IEA, 2021). Para que esse caminho de mitigação seja trilhado é necessário investimento em pesquisa e desenvolvimento de tecnologias capazes de contribuir e construir alternativas em direção ao objetivo, além de políticas de incentivo governamentais e financiamentos privados para implementação dessas tecnologias em setores como: transporte, indústria, agricultura e residencial, através de sistemas de geração de energia distribuída e centralizada, redes inteligentes, veículos elétricos (VE), captura e armazenamento de carbono, e outros (CANTARERO, 2020).

Visto que uma ampliação na participação de fontes renováveis terá um papel

<sup>1</sup> Emissões líquidas de CO<sub>2</sub> é a diferença entre a quantidade de CO<sub>2</sub> gerada (e.g., produto da queima de combustíveis fósseis) e a quantidade removida da atmosfera (e.g., armazenado em forma durável em reservatórios geológicos, terrestres ou oceânicos, ou na transformação de outros produtos).

importante na conjuntura atual, a energia solar fotovoltaica (FV), em particular, tem apresentado crescimento em países emergentes, segundo estudo realizado por Vanegas (2020). O crescimento econômico de um país está diretamente relacionado ao aumento das emissões de CO<sub>2</sub> e, por isso, faz-se importante investir na diversificação da matriz energética e ampliar a utilização de fontes renováveis, pois ao adotar essa diretriz é possível reduzir as emissões de CO<sub>2</sub>, conforme levantamento de dados realizado por BASSO (2022). No gráfico da Figura 1, pode-se observar a parcela de contribuição em energias renováveis e não renováveis na matriz energética nacional em comparação com a média mundial, sendo possível verificar que o país apresenta uma contribuição maior que o observado mundialmente. Já na matriz elétrica, o Brasil se destaca ainda mais, sendo 78,1% proveniente de fontes renováveis, conforme mostra o gráfico da Figura 2.

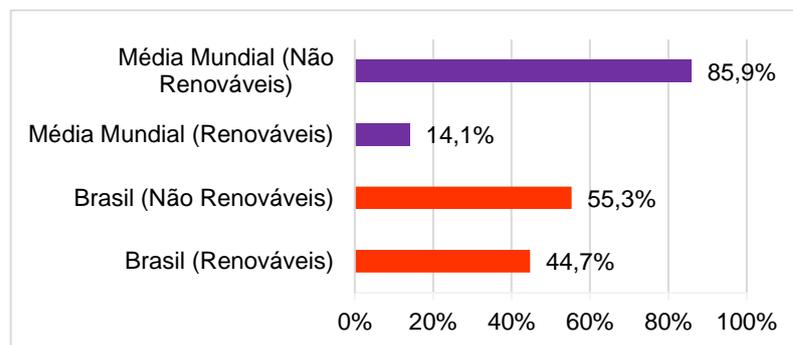


Figura 1 - Comparação da matriz energética brasileira e mundial (Adaptado de MME, 2022)

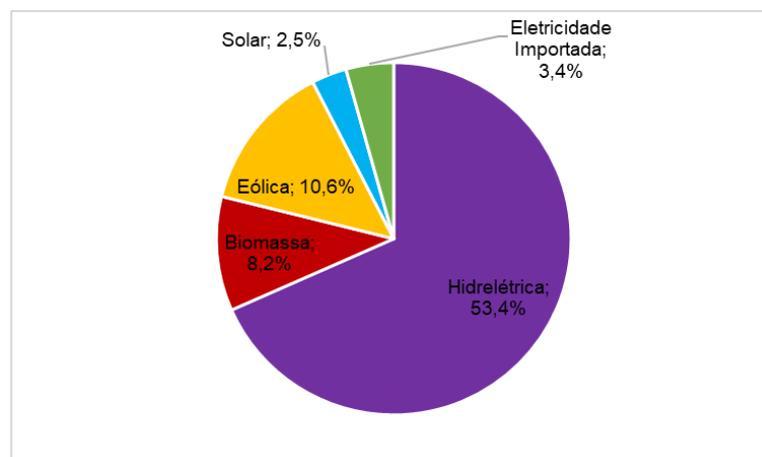


Figura 2 - Matriz elétrica brasileira (Adaptado de MME, 2022)

Diante deste cenário nacional, uma das fontes renováveis que se destaca é a solar, cujo clima e posição geográfica do Brasil fornece grande possibilidade de exploração. Considerando a motivação apresentada, o presente trabalho tem como pretensão fazer uma análise sobre ampliação da matriz energética solar brasileira abordando aspectos como o potencial do país, as demandas e os desafios que dificultam a ampliação.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste tópico serão apresentados a situação atual da matriz energética solar brasileira, a configuração do sistema de transmissão de energia, a necessidade da diversificação da matriz energética e ampliação do uso de fontes renováveis, além de fundamentos sobre o funcionamento de uma célula fotovoltaica, quais são as células disponíveis para uso e a irradiação solar incidente no Brasil.

### 2.1 MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA

Primeiramente, é válido destacar as diferenças entre matriz energética e matriz elétrica. A matriz energética refere-se a todos os tipos de energia que estão disponíveis para uso no cotidiano, como por exemplo, transporte, uso doméstico e industrial. Já a matriz elétrica compreende as fontes utilizadas somente na geração de energia elétrica (EPE, 2020). Nesse contexto, comparado com outros países, a matriz energética brasileira é considerada limpa, já que segundo os dados indicados no Relatório Síntese do Balanço Energético Nacional de 2022, o Brasil possui 44,7% da sua matriz energética proveniente de fontes renováveis, como biomassa da cana, hidráulica, entre outras fontes. Os outros 55,3% correspondem a fontes não renováveis, como petróleo, gás natural, carvão mineral, entre outros. À primeira vista, por representar menos de 50% do valor total, o valor pode parecer pouco, porém a matriz energética mundial possui apenas 14,1% proveniente de fontes renováveis, mostrando que o Brasil está bem-posicionado no que se refere ao uso de fontes renováveis em sua matriz energética. Tratando-se de matriz elétrica, os dados mostram que nessa categoria, a matriz é constituída ainda mais por fontes renováveis, representando uma participação de 78,1%, enquanto no mundo o uso de fontes renováveis apresenta apenas 26,6%. Essa grande participação de fontes renováveis é explicada pela forte predominância da fonte hídrica que corresponde 53,4% da matriz elétrica.

Notoriamente, entre 2020 e 2021 houve uma redução no uso de fontes renováveis no Brasil (de 83,8% para 78,1%), devido à escassez de chuva que levou a uma queda na oferta hidráulica, tornando claro a dependência dessas fontes às sazonalidades e atipicidades das chuvas. Em oposição, uma fonte de menor dependência sazonal do país, a energia solar, conta com uma participação de 2,6%

na matriz energética. Ou seja, quando se trata de produção de energia, a fonte solar fica atrás da hidráulica com 60,2% e da eólica com 11,4%, segundo este mesmo relatório disponibilizado pelo EPE.

No que diz respeito às emissões de CO<sub>2</sub>, em 2021 o Brasil emitiu 445,4 milhões de toneladas de dióxido de carbono equivalente (Mt CO<sub>2</sub> eq.), cuja maior parte foi gerada pelo setor de transportes, seguido por outros setores (i.e., agropecuária, serviços, energético, elétrico e emissões fugitivas), indústrias e residências (MME, 2022), conforme mostra o gráfico da Figura 3. No ranking mundial, o Brasil está em 12º lugar, sendo que os três primeiros são: China (11472 Mt CO<sub>2</sub>), Estados Unidos (5007 Mt CO<sub>2</sub>) e Índia (2710 Mt CO<sub>2</sub>) (GLOBAL..., 2023).

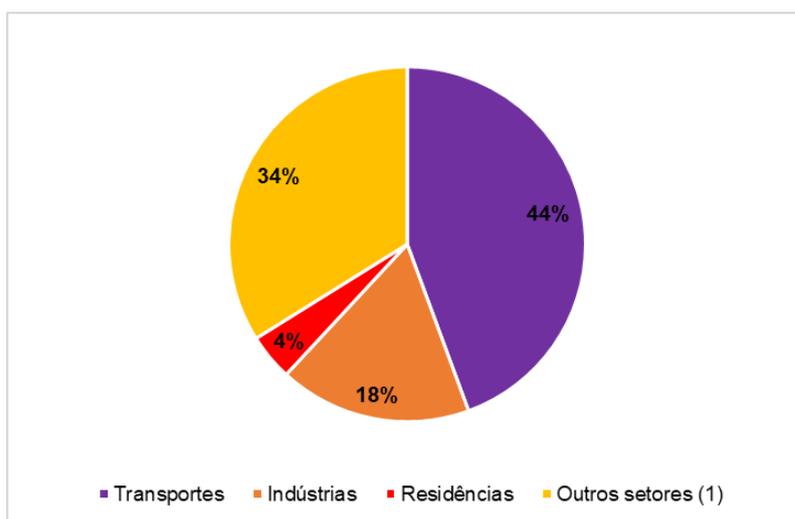


Figura 3 - Participação dos diversos setores na emissão de CO<sub>2</sub>-eq (Mt) no Brasil. (Adaptado de MME, 2022)

Em um outro relatório, baseado nos dados de 2022 que foram analisados e publicados pela Agência Internacional de Energia Renovável (IRENA), o Brasil entrou pela primeira vez no ranking mundial dos dez países que mais produzem energia solar, ficando em oitavo lugar. Esse relatório se baseia na soma da geração de energia solar de sistemas de pequeno, médio e grande porte instalados no país, ou seja, compreende os painéis instalados em telhados de casas e prédios, bem como as grandes usinas de energia solar. Ao atingir uma potência operacional de 24 gigawatts (GW), o Brasil foi colocado dentro do top 10 (IRENA, 2022).

Tais levantamentos realizados por vários grupos, mostram que o país apresenta potencial de crescimento quando se trata de energia solar. Além disso, a

matriz energética brasileira já tem grande participação de fontes renováveis devido principalmente às fontes hídricas. Apesar de demonstrar uma vantagem frente ao quadro mundial, essa participação também enfatiza a alta dependência nos recursos hídricos para geração de energia, trazendo riscos durante períodos de escassez, como exemplificado pelo racionamento compulsório ocorrido em 2011 e as crises hídricas de 2014 e 2021, evidenciando a necessidade de adotar um modelo de gestão de riscos e gestão de recursos (CUMPLIDO *et al.*, 2023).

## 2.2 DIVERSIFICAÇÃO DA MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA: NECESSIDADE E IMPORTÂNCIA

Por um lado, o intenso uso de combustíveis fósseis a partir da Revolução Industrial contribuiu para o avanço e desenvolvimento econômico de diversos países ao redor do mundo, tanto que, historicamente, os Estados Unidos e a União Europeia possuem os maiores níveis acumulados de emissão de CO<sub>2</sub> desde 1850 (GLOBAL...2022). Tais taxas de emissão de CO<sub>2</sub> são as grandes responsáveis pelas mudanças climáticas. Por outro lado, apesar da ligação entre índices econômicos e consumo energético, é possível que os países passem por uma transição energética ao mesmo tempo em que estes índices aumentam. Radmehr, Henneberry e Shayanmehr (2021) analisaram os países da União Europeia com dados de 1995-2014, e constataram que há uma relação entre o aumento do uso de energias renováveis e o aumento do Produto Interno Bruto (PIB), ou seja, uma evidência que é possível um país ter crescimento econômico ao adotar o uso mais amplo de fontes renováveis.

A possibilidade de crescimento econômico simultaneamente ao aumento da contribuição de fontes renováveis de energia é especialmente importante para o Brasil, já que se enquadra como um país emergente, que carece de crescimento de seu PIB e necessita se alinhar a compromissos ambientais estabelecidos. Tais compromissos são resultados de esforços internacionais para a mitigação.

A discussão a nível internacional sobre a necessidade de estabelecer acordos internacionais iniciou-se na Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC), com a reunião da Conferência das Partes (COP). Um dos primeiros resultados de maior proporção da COP foi o Protocolo de Quioto, que foi uma definição de metas somente entre os países desenvolvidos para redução de

emissões dos GEE (MME, 2023). O próximo acordo de maior impacto global, foi o Acordo de Paris, o qual estabelece um compromisso dos 195 países para reduzir as emissões dos GEE, onde cada país precisa elaborar e adotar estratégias próprias para atingir esse objetivo. Em 2016, através das Contribuições Nacionalmente Determinadas (NDC) o Brasil se comprometeu a reduzir em 37% suas emissões de GEE até 2025, quando comparado aos valores de 2005 e, adicionalmente, reduzir em 43% até 2030. Para atingir esse objetivo, uma das medidas é que as energias renováveis atinjam uma participação 45% da matriz energética, expandindo o uso de outras fontes renováveis, além da energia hídrica que já é bem presente (MMA, c2023). Essa expansão do uso de energias solar, eólica e biomassa se aplica também para o uso doméstico, como painéis instalados em telhados de casas e prédios (ADAPTA CLIMA, c2023). Sendo assim, a princípio, parece ser desafiador encontrar uma maneira de combinar crescimento econômico com redução das taxas de GEE. Porém, um estudo que analisou 42 países emergentes indicou que o consumo de energias renováveis traz um impacto positivo no PIB a longo prazo (ITO, 2017).

Há também um outro fator associado à necessidade da diversificação da matriz energética e que está relacionada ao setor de transportes no país. Segundo o Plano Nacional de Energia (PNE), este é o maior consumidor final de energia (seguido pelo setor industrial), sendo o maior responsável pelos níveis de emissão de CO<sub>2</sub> no país em 2021 (EPE, 2020). Haja vista que a alternativa mais apontada seja a substituição de veículos a combustão interna por veículos elétricos, haverá necessariamente uma maior demanda por fontes de energias alternativas. De maneira geral, há três tipos de veículos elétricos: os híbridos (HEV), os elétricos a célula de combustível (FCEV) e os puramente elétricos (PEV), este último também chamado de veículo elétrico a bateria (BEV). É válido mencionar que dentro da categoria de híbridos houve o desenvolvimento dos híbridos *plug in* (PHEV), substituindo a bateria do HEV por uma bateria recarregável (DING; PRASAD; LIE, 2017). O desenvolvimento desses veículos é impulsionado pela alta demanda: somente no ano de 2022, 10 milhões de VEs foram vendidos no mundo com a previsão de um aumento de 35% nas vendas no ano de 2023, atingindo a marca de 14 milhões. Grande parte dessas vendas estão concentradas em três mercados, China, Europa e Estados Unidos, primeiro, segundo e terceiro, respectivamente, com a China sendo responsável por 60% das vendas de 2022. A expectativa é que

até 2030 a ampla utilização de veículos elétricos resulte numa economia de mais de 790 bilhões de litros de óleo por dia (IEA, 2023).

No contexto brasileiro, em comparação aos mercados apresentados anteriormente, o país ainda está muito aquém quanto aos VEs. No trabalho de BARASSA (2015), foi evidenciado que o Brasil possui os elementos essenciais (empresas, órgãos do governo, pesquisa e mercado de automóveis consolidado), para um complexo automobilístico direcionado a veículos elétricos, mas que tais elementos não dialogam de maneira efetiva. Mesmo assim, há expectativas de que até 2040 a frota brasileira de veículos elétricos ultrapasse a marca de 35 milhões. Com a eletrificação veicular são esperadas fortes diminuições no consumo de combustíveis fósseis, mais especificamente uma redução de 8 bilhões de litros de gasolina e 6 bilhões de litros de diesel em 2030, já para 2040 a previsão é uma redução de 37 bilhões de litros de gasolina e 41 bilhões de litros de diesel (PwC Brasil, 2023). Em contrapartida, o consumo de eletricidade será cada vez maior, sendo que em 2040 os VEs devem representar 14% do consumo energético no Brasil, causando um aumento significativo na demanda por energia elétrica, que poderia ser facilmente coberta por fontes renováveis, como a energia fotovoltaica.

Sendo atualmente as fontes hídricas as responsáveis por grande parte da matriz energética do país, fica evidente a dependência nesse tipo de fonte, que por sua vez é dependente de regimes de chuva. As mudanças climáticas descritas anteriormente a partir do relatório do IPCC indicam que eventos climáticos extremos serão mais frequentes e, para o Brasil, períodos de seca são prováveis. Fato este exemplificado pelo período de 2012 a 2016, na qual a região Nordeste passou por um período severo de seca, no qual as usinas hidrelétricas somente forneciam 25% da sua capacidade a região (JONG, 2017); conseqüentemente, o acionamento de usinas termelétricas foi necessário, colaborando para o aumento na queima de combustíveis fósseis (BRASIL, 2015).

Adicionalmente, apesar da matriz energética brasileira ser considerada renovável pela expressiva participação das fontes hídricas, sua sustentabilidade é questionável devido aos diversos impactos sociais, econômicos e ambientais que a construção de grandes usinas hidrelétricas causa (GALBIATTI-SILVEIRA, 2018). O desmatamento, a perda de fauna e flora na região que se transforma num lago artificial, a alteração da qualidade da água, o deslocamento compulsório da população, juntamente com as atividades econômicas desenvolvidas por eles, além

de afetar comunidades e culturas locais, como quilombolas, ribeirinhas e indígenas, são alguns dos exemplos desses fatores (FAINGUELERNT, 2020; SANTOS; CUNHA; CUNHA, 2017; TERRIN; BLANCHET, 2019).

Além disso, há evidências que indicam que as barragens construídas para as usinas hidrelétricas emitem maiores taxas de GEE, como metano e CO<sub>2</sub>, quando comparado ao sistema natural (pré-inundação) (FEARNSIDE, 2015; RÄSÄNEN *et al.*, 2018; SCHERER; PFISTER, 2016). Um dos fatores para isso ocorrer é que a área inundada possui uma grande quantidade de matéria orgânica que ao ser decomposta, gera os gases (DEEMER *et al.*, 2016). Ademais, o próprio processo da passagem de água pelas turbinas e vertedouros libera os gases antes dissolvidos nessa água em direção a atmosfera (FEARNSIDE, 2019), contribuindo para o avanço do aquecimento global. De fato, Santos *et al.* (2006) realizou um estudo para comparar a emissão de GEE entre hidrelétricas e termelétricas, que indicou que algumas hidrelétricas apresentaram taxas maiores que as termelétricas. Regiões tropicais como a Amazônia, apresentam um potencial maior de geração de gases de efeito estufa devido às suas características climáticas, como alta temperatura e grande quantidade de matéria orgânica (DEMARTY; BASTIEN, 2011; FEARNSIDE, 2015); ainda assim estão previstas a construção de 351 barragens na bacia Amazônica (ALMEIDA *et al.*, 2019). Adicionalmente, numa análise feita para 2050, no cenário onde há restrições da expansão das usinas hidrelétricas (devido a questões legais de construção, mudanças climáticas e outros fatores), é apontada a energia solar fotovoltaica centralizada para justamente suprir a limitação das usinas hidrelétricas (EPE, 2020).

## 2.3 ENERGIA SOLAR NO MUNDO E NO BRASIL

Neste tópico será apresentada uma breve história do desenvolvimento do uso de energia solar no mundo e no Brasil, neste último passando pelos aspectos regulatórios e mercadológicos, e como eles impulsionaram o desenvolvimento e aplicação de dispositivos fotovoltaicos.

### 2.3.1 Energia solar no mundo

O uso da energia solar não é uma ideia recente: há registros arqueológicos de

6000 anos atrás que indicam construções de casas orientadas pelo sol localizadas na China. Posteriormente, outros avanços foram surgindo, como o gnômon<sup>2</sup>, que auxiliavam na construção de casas com maior aproveitamento da luz solar. De maneira similar, o aproveitamento da energia solar ocorreu na Grécia Antiga (século V AEC), onde além das casas orientadas ao Sol, havia o uso de espelhos queimadores em cerimônias e direcionamento da luz do sol para aquecer salas termais. Além da China e Grécia, registros históricos também indicam o uso equivalente da luz do sol na construção de casas dos Anasazi (nativos norte-americanos) (PERLIN, 2013).

No século XIII, Horace-Bénédict de Saussure (1740-1799) realizou experimentos com dispositivos que tinham um funcionamento parecido com o de uma estufa, levando ao que conhecemos hoje como coletores solares utilizados como aquecedores de água (JONES; BOUAMANE, 2012). Durante o século XIX, o cientista francês Alexandre-Edmond Becquerel (1820-1891) observou pela primeira vez o efeito fotovoltaico durante um de seus experimentos onde utilizava placas metálicas imersas em uma solução que quando expostas a luz do sol, geravam uma pequena corrente elétrica. Neste mesmo período (~1860), Augustin Mouchot construiu um equipamento que capturava a energia solar através de refletores e utilizava essa energia para movimentar as máquinas a vapor. Tal mecanismo é a base do uso da energia heliotérmica através de coletores solares (JONES; BOUAMANE, 2012; PERLIN, 2013).

A partir da descoberta de propriedades fotocondutoras do selênio por Willoughby Smith (1828-1891), foi possível confeccionar dispositivos a base deste material que gerava energia elétrica ao ser expostos ao Sol. Naquela época, a eficiência era de 0,5%, aumentando mais de dez vezes sua eficiência mais tarde (LAMEIRINHAS; TORRES; CUNHA, 2022; NIELSEN *et al.*, 2022; PERLIN, 2013). Entre os séculos XIX e XX outras descobertas importantes aconteceram, como a descoberta do efeito fotoelétrico por Heinrich Rudolf Hertz (1857-1894), explicado mais adiante por Albert Einstein; a descoberta da barreira de proteção em semicondutores (CYR, 1981), e desenvolvimento de um procedimento utilizado para crescimento de monocristais em semicondutores aplicados a células solares (UECKER, 2014).

<sup>2</sup> Pedaco de madeira ou pedra fixada a um ângulo de 90° do chão que conforme o Sol se movimentava, uma sombra era criada, permitindo o rastreamento do Sol durante as estações do ano.

Pode-se observar que até então o material utilizado nos dispositivos fotovoltaicos era o selênio, que embora tenha sido uma descoberta importante para a época, apresentava uma eficiência baixa - aproximadamente 1% -, juntamente com o óxido de cobre que também era um dos materiais utilizados nesse tipo de aplicação (BUBE, 1998; TOBIN *et al.*, 2011). Nesse contexto, fica evidente que a eficiência era um dos obstáculos que dificultava um maior aproveitamento e crescimento do uso de energia solar desses dispositivos. No entanto, a mudança neste cenário ocorreu em 1954 quando Chapin *et al* (1954) produziram uma célula solar de junção p-n de silício atingindo 6% de eficiência e Reynolds *et al.* (1954) preparam uma célula de sulfeto de cádmio (CdS) também com 6% de eficiência. Durante este período, as pesquisas eram impulsionadas pela indústria aeroespacial devido à situação política de Guerra Fria em que os Estados Unidos se encontravam. Com o avanço da área, maiores eficiências eram atingidas, chegando a atingir entre 20% e 30% em células solares constituídas por arseneto de gálio (GaAs), e novas maneiras de se compor uma célula solar eram apresentadas, visando aperfeiçoar a eficiência; como por exemplo a utilização de células solares de multijunção, onde são aplicadas duas ou mais células diferentes (BUBE, 1998).

Outro fator que promoveu a pesquisa e uso de fontes renováveis foi a crise do petróleo em 1973. Nesse caso, o obstáculo estava na comercialização do produto que possuía um alto custo de produção, devido às limitações do processo de fabricação deste dispositivo. Sabendo do potencial que essa energia apresentava, o objetivo dos estudos se voltou a superar esse desafio; nesse contexto, a produção de silício policristalino e silício amorfo passaram a ter maior impacto no mercado devido ao seu método de fabricação que apresentava maior custo-benefício (LAMEIRINHAS; TORRES; CUNHA, 2022). No gráfico da Figura 4, podemos observar a evolução do custo nivelado de energia (LCOE - *Levelized Cost of Energy*) para sistemas de energia solar, isto é, a relação entre todos os custos envolvidos no projeto e instalação de um sistema fotovoltaico e o quanto de energia ele poderá gerar em sua vida útil de operação (Sun Future, 2018). Nota-se que para os sistemas de energia solar houve uma queda acentuada desde 2010, sendo que para os fotovoltaicos a queda foi de 85% nesse período, enquanto para os concentradores solares a queda foi de 68% (GLOBAL..., c2022). Com o tempo, o uso de sistemas fotovoltaicos se tornou competitivo do ponto de vista econômico quando comparado a outras fontes.

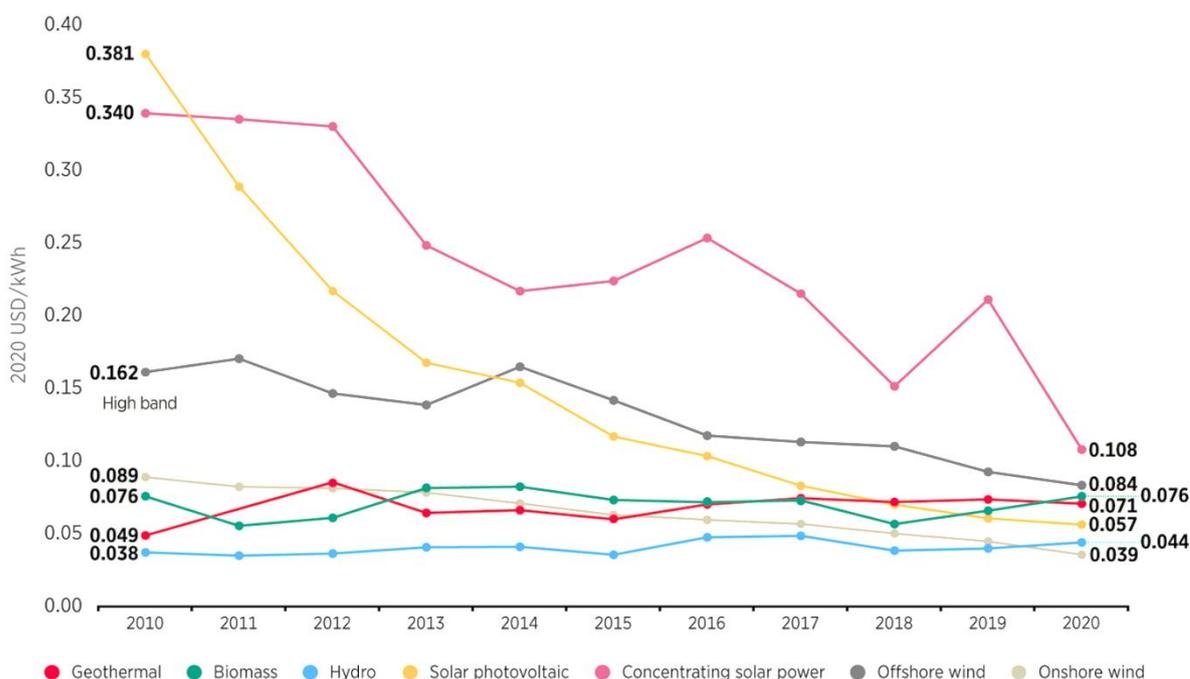


Figura 4 - Evolução do custo nivelado de energia para diferentes fontes de energia. (GLOBAL... c2022)

### 2.3.2 Energia solar no Brasil

A princípio, a energia solar era historicamente apresentada como uma maneira de fornecer energia às áreas mais isoladas do Brasil, além de diminuir a dependência em fontes fósseis, sendo impulsionado pela I Crise do Petróleo nos anos 1970. Como consequência, ao final desta década a primeira fábrica de módulos fotovoltaicos foi criada no Brasil e, posteriormente, as primeiras instalações de sistemas fotovoltaicos foram instaladas no país para suprir a demanda energética de áreas rurais. No entanto, devido ao término da I Crise do Petróleo, houve uma redução dos financiamentos direcionados ao tema de energia solar e energias renováveis no geral e, conseqüentemente, as atividades voltadas ao tema de energia solar foram desaceleradas até o ano de 1994 (SHIMOMAEBARA; PEYERL, 2021). Apenas a partir deste ano, esforços por parte de pesquisadores, empresas, entre outros diversos setores da sociedade foram consolidados para que os estudos e avanços na área não fossem totalmente descontinuados, sendo definidos diretrizes para o desenvolvimento das energias solar e eólica, juntamente com o

estabelecimento de estratégias para implementação das energias renováveis, o que incluiu a criação do Centro de Referência para as Energias Solar e Eólica. Os objetivos eram: coletar e difundir os conhecimentos acerca da energia renovável, identificar centros especializados nestes assuntos, interagir com as organizações responsáveis pelas normas e recomendações técnicas, estabelecer acordos de cooperação dentro e fora do país, apoiar a implementação tecnológica, entre outras funções. Estas estratégias foram compiladas em um documento, chamado de Declaração de Belo Horizonte, que visava colocar em prática as estratégias propostas no encontro. Além disso, foi estabelecido o Fórum Permanente de Energias Renováveis, apoiado pelo Ministério de Minas e Energia e Ministério de Ciência e Tecnologia da época (CRESESB, 2008).

Em 2010, foi aberta uma consulta pública nº 15/2010 pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) para receber opiniões e contribuições dos consumidores acerca de questões gerais sobre consumo e geração de energia, com o intuito de mapear as principais barreiras para a instalação da Geração Distribuída (GD) de pequeno porte a partir de fontes renováveis. De maneira geral, a geração distribuída é a geração de energia elétrica a partir de unidades menores de geração, perto ou próxima dos consumidores de energia, como por exemplo, cogeneradores, geradores de emergência, painéis fotovoltaicos e pequenas centrais hidrelétricas (INEE, c2023).

Na consulta pública realizada em 2010, distribuidoras, consumidores, associações, pesquisadores e geradoras fizeram suas contribuições e como resultado foram extraídas informações pertinentes a respeito de regulação, comercialização de energia, propostas, entre outras questões de interesse. A partir desta consulta, algumas das conclusões que foram pontuadas e que vale a pena ser mencionadas foi a necessidade de incentivos, como subsídios e reduções fiscais para que fosse possível haver um desenvolvimento sustentável da geração distribuída; a discrepância entre o que os consumidores e geradores desejavam, como contratos de longo prazo, com baixos riscos, preços acessíveis e regras mais claras para a geração distribuída. Além disso, foi constatada que a principal barreira no âmbito regulatório foi a falta de regulamentos específicos para a GD, no que tange conexões, medição, contratação de energia e garantia. (LOPES, 2011)

No ano de 2012, a ANEEL colocou em vigor a Resolução Normativa (RN) nº 482/2012, que é considerada um marco para a geração distribuída no país e foi o

início da transformação da energia solar como a principal fonte de energia da microgeração e minigeração distribuída do país (MMGD). A regulação teve como objetivo incentivar e facilitar o acesso dos consumidores às unidades menores geradoras de energia ( $\leq 1$  MW). Assim, o consumidor pôde gerar sua própria energia baseado em fontes renováveis, como energia solar, eólica, biomassa, hidráulica, ou cogeração qualificada, sendo o excedente podendo ser fornecido para a rede de distribuição local. Este fornecimento à rede poderia gerar créditos ao consumidor, reduzindo o valor nas faturas de energia, tendo um prazo de até 36 meses para utilização destes créditos (Luz Solar, 2018).

Em 2015, a ANEEL revisou a Resolução Normativa nº 482/2012 e colocou em vigor a Resolução Normativa nº 687/2015, que alterou alguns critérios estabelecidos na Resolução anterior. Entre eles a potência que define a microgeração e minigeração distribuída, as quais atualmente são: menor ou igual a 75 kW e entre 75 kW a 5 MW (este último foi dividido em duas categorias, de 75 kW a 3 MW para fontes hídricas e entre 75 kW e 5 MW para as demais fontes), respectivamente. Outra modificação foi com relação ao prazo de utilização dos créditos de compensação quando é gerado mais do que consumido, passando de 36 meses para 60 meses (Rio de Janeiro, 2015). Além disso, mais diretrizes foram estabelecidas, como o conceito de empreendimento com múltiplas unidades consumidoras, a geração compartilhada e o autoconsumo remoto, cujas características e exemplos se encontram na Tabela 1.

**Tabela 1 - Características e exemplos de cada modalidade de geração distribuída.**

<b>Tipos de Geração Distribuída</b>	<b>Características</b>	<b>Exemplo</b>
Múltiplas Unidades Consumidoras	Conjunto de consumidores individuais formando uma unidade consumidora cuja energia gerada é dividida entre os consumidores	Residentes de um condomínio se juntam e investem em painéis fotovoltaicos, cuja energia gerada é dividida entre os consumidores e direcionada à área comum do condomínio
Geração Compartilhada	Através de consórcios ou cooperativas, os consumidores que estão sob a mesma área da distribuidora dividem a energia ou transferem os créditos para outra propriedade	Comerciantes de uma mesma área se juntam para investir num sistema FV
Autoconsumo Remoto	MMGD de responsabilidade de uma mesma pessoa e dentro de uma mesma área da distribuidora, mas a energia é consumida em locais diferentes	Residir em um local em que a instalação de um sistema FV não é favorável, mas possuir um imóvel com condições propícias para instalação

Fonte: Adaptado de Sol Fácil (2022).

Ainda em 2015, o Conselho Nacional de Política Fazendária (CONFAZ) instituiu a isenção no Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviço (ICMS) nº 16/2015, que é caracterizada pela isenção de imposto sobre a energia elétrica gerada através de fontes renováveis, de acordo com a decisão de cada estado, estipulada pela RN nº 687/2012, cujo objetivo é incentivar os consumidores e empresas a aderirem a microgeração e minigeração de energia. Em consequência, após estas resoluções, foi observado um aumento no uso de sistemas de geração distribuída, como energia solar compartilhada, aluguéis de telhados para aplicação de painéis fotovoltaicos e condomínios solares que podem fornecer energia elétrica para vários imóveis (Urbanetz *et al.*, 2019).

Com a isenção de ICMS instituída pelo CONFAZ, cada estado pôde decidir a forma de aplicar essa isenção e dos 26 estados brasileiros mais o Distrito Federal, 23 estados e o Distrito Federal estabeleceram a isenção de ICMS para os sistemas de até 1 MW, em particular, os de autoconsumo local e remoto (Portal Solar, 2019). Enquanto isso, Minas Gerais possui uma lei estadual que estende a isenção de ICMS para potências de 5 MW e não há limitação na modalidade de GD, contribuindo para o destaque do estado em primeiro lugar em potência instalada (CASARIN, 2022).

A partir de dados retirados da ANEEL, pode-se observar pela Figura 5 a evolução da quantidade de geração distribuída ao longo dos anos. Segundo o Relatório Síntese do Balanço Energético Nacional de 2022, disponibilizado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE) e elaborado pelo Ministério de Minas e Energia (MME), a energia solar fotovoltaica representa 88,3% da micro e minigeração distribuída. Em comparação com outras fontes de energia que constituem a MMGD, a energia solar se destaca em primeiro lugar.

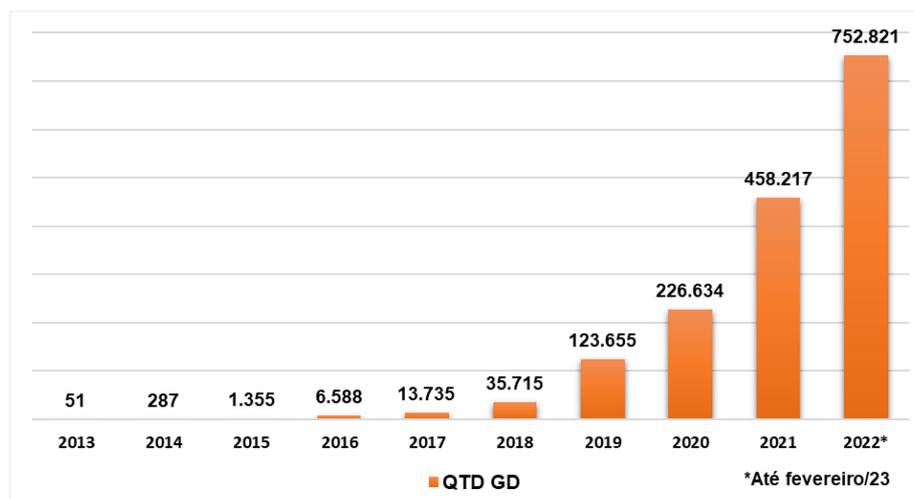


Figura 5 - Quantidade de geração distribuída ao longo dos anos (Adaptado de ANEEL, c2023).

Atualmente, o potencial instalado, 33% estão localizados na região Sudeste, seguido pela região Sul (26%) e Nordeste (20%), e por último estão a região Centro-Oeste (15%) e Norte (6%), conforme pode ser visto no gráfico da Figura 6. Atualmente, os cinco estados com maior potência instalada são: Minas Gerais, São Paulo, Rio Grande do Sul, Paraná e Santa Catarina.

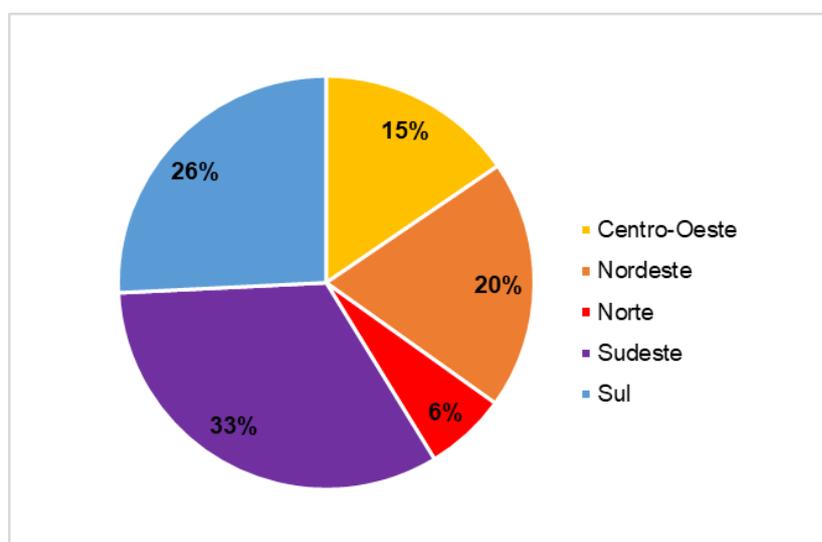


Figura 6 - Distribuição da potência instalada da GD de acordo com as regiões do país. (Adaptado de ANEEL, c2023).

Em 2022, foi regulamentado o Marco Legal da Geração Distribuída através da Lei 14.300/22. A principal alteração com relação ao que se tinha estabelecido foi na

questão do sistema de compensação de crédito de energia (Portal Solar, 2019). Conforme foi mostrado, a RN 482/2012 definiu as regras para que os consumidores que aderissem ao sistema de geração distribuída pudessem injetar na rede a energia excedente produzida por fontes renováveis, ganhando créditos que podiam ser utilizados para custear a conta de luz. Essa relação do quanto era gerado a mais e o quanto ganhava-se de crédito apresentava proporção 1:1, ou seja, para 1 kW injetado ganhava-se 1 kWh em crédito, mas a partir da Lei 14.300/22 essa relação foi modificada e os consumidores desse sistema agora pagam uma tarifa para as distribuidoras (a ser definida por estas), devido aos custos que esta tem com infraestrutura (Critéria Energia, 2023).

### **2.3.3 Geração distribuída e centralizada: definições e aspectos gerais**

A geração distribuída pode ser operada pelo sistema *on-grid*, *off-grid* ou híbrido. De acordo com Gazoli e Villalva (2012), o sistema *on-grid* é aquele no qual o sistema fotovoltaico está conectado à rede elétrica, como a micro e minigeração distribuída. Nesse caso, os painéis solares são instalados em telhados de casas, prédios, lojas ou indústrias, visando atender consumidores pequenos ou de médio porte (VILLALVA; GAZOLI, 2012).

Já os sistemas *off-grid*, ou sistemas isolados, tem a característica de não estar conectado à uma rede elétrica. Além dos módulos fotovoltaicos, este sistema é composto por um controlador de carga, por uma bateria (caso haja a necessidade de armazenar a energia excedente que é gerada) e um inversor de tensão. Por não estar conectado à rede elétrica tem como vantagem ser instalado em regiões distantes das linhas de transmissão, como para as populações rurais, ribeirinhas, indígenas, ou mesmo podendo ser utilizado para carregar baterias de veículos elétricos, sinalização pública, entre outros (VILLALVA; GAZOLI, 2012). Do ponto de vista econômico, a adoção de sistemas fotovoltaicos nesta situação é mais vantajosa que construir novas linhas de transmissão (CARSTENS; CUNHA, 2019).

Em áreas isoladas uma outra possibilidade é fazer uso do sistema fotovoltaico híbrido, no qual a energia solar é aproveitada em conjunto com outra fonte de energia, como eólica ou diesel, com componentes similares ao que foi descrito anteriormente (controlador de carga, bateria, inversores). Pelo fato de as fontes renováveis em questão serem intermitentes, o diesel atua para garantir o

fornecimento de energia nos períodos em que a energia solar ou eólica não está disponível (PINHO *et al.*, 2008).

Outros aspectos positivos acerca da GD estão relacionados ao consumidor que adere a esse sistema devido ao sistema de compensação que acumula créditos, podendo ser utilizado para abater parcialmente ou totalmente a conta de energia, e a redução dos preços de painéis fotovoltaicos ao longo dos anos, que atrai mais adeptos a esse sistema. Além disso possui menor impacto ambiental quando comparado a construção de usinas hidrelétricas, leva a geração de empregos, redução das perdas de energia, útil em períodos de pico de carga, principalmente no verão, além de contar com possibilidade de integração dos painéis fotovoltaicos às edificações (BRASIL, 2019; NARUTO, 2017; PEREIRA *et al.*, 2017; PINTO, 2014). No entanto, como qualquer outro cenário de análise há também os aspectos negativos: ainda é considerado um investimento alto pela maior parte da população; prejuízo financeiro às distribuidoras; impactos na conta de energia de consumidores; impactos operacionais no sistema de energia; adequação do SIN a evolução exponencial da adesão à GD (C MARA, 2017; NARUTO, 2017; EPE, 2022; SIMONE, 2019).

No caso da geração centralizada (GC), cujo sistema é tipo *on-grid*, são usinas solares de grande porte, também chamadas de parque solar, geralmente instalados no solo, mas que também podem ser alocados em lagos ou represas (modalidade híbrida), cuja energia gerada é transmitida pelas redes de transmissão até a distribuidora de energia (PEREIRA, 2019). Pode ser com sistema de rastreamento ou estrutura fixa, isto é, podem acompanhar o sol ou não. Até 2017, o sistema de estrutura fixa era majoritário nos projetos de parques solares, no entanto, no período de 2017 a 2020 (EPE, 2020), a quantidade de instalações de estruturas móveis aumentou significativamente, ultrapassando o número de projetos de instalações fixas, com um crescimento de 64% entre 2021 e 2022, com 264 usinas espalhadas pelo país (MARTONI, 2023). Assim como a GD, a GC também necessita de equipamentos que convertem a tensão para ser transmitida à rede de transmissão. Por ser necessário um espaço grande para montagem desses módulos, aspectos ambientais, sociais, jurídico e investimento devem ser avaliados (PEREIRA, 2019).

Ainda com relação a GC, a partir de 2013 a energia solar foi incluída nos leilões de energia para competir com outras fontes, como a eólica e térmica, participando da negociação de contratos entre as empresas geradoras de energia e

as distribuidoras. As empresas cadastram seus projetos e a distribuidora decide se compra ou não baseando-se no Índice de Custo-Benefício (ICB), isto é, a potência mínima a ser gerada em MWh para pagar os custos do investimento (R\$/MWh) (Blue Sol, 2021). Segundo a GREENER (c2023), foram outorgados 86 GW de potência em 2022, sendo que aproximadamente 85% ainda não iniciaram a construção, 6% estão em construção e 9% já estão em operação. Destaque para Minas Gerais que tem a maior potência acumulada destes projetos mencionados, seguido por Piauí e Bahia (Greener, c2023).

Sendo assim, destacam-se como aspectos positivos da GC: redução do custo por MW, tornando a energia solar competitiva em comparação com as outras fontes disponíveis; tempo de construção menor que as usinas hidrelétricas e eólica; não é necessário construir novas linhas de transmissão (MARTONI, 2023; PEREIRA *et al.*, 2017). No entanto, há pontos negativos como qualquer outro sistema, notoriamente: por ser tratar de uma usina de grande porte, sua construção gera um impacto durante as fases de planejamento, instalação e operação, cujo licenciamento ambiental ainda não está muito claro com relação a estes pontos; ocorre perda de energia nas linhas de transmissão devido a distância até o consumidor final; gerenciamento de resíduos após a vida útil do painel fotovoltaico (25 anos) (BARBOSA FILHO *et al.*, 2015; EPE, 2020; SÁ, 2020).

### **2.3.4 Redes de transmissão de energia**

A infraestrutura dos sistemas de transmissão de energia elétrica do Brasil é constituída por um sistema de grande porte composto por fontes hidro-termo-eólico, chamado de Sistema Interligado Nacional (SIN). A capacidade é sustentada principalmente pelas usinas hidrelétricas, atualmente com 16 em operação. As usinas termelétricas atuam de forma estratégica no SIN, sendo acionadas em função da situação dos reservatórios, trazendo segurança na oferta de energia (ONS, c2023).

A cobertura das redes de transmissão do SIN é extensa, sendo que quase todo o país é coberto por ele, conforme mostra o mapa da Figura 7. De acordo com o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), Boa Vista, capital de Roraima, é a única capital ainda isolada, cuja demanda é suprida por um sistema isolado. Este tipo de sistema também é encontrado em outras 211 localidades (majoritariamente

na região Norte, algumas no Nordeste e Centro-Oeste) e a fonte é proveniente do diesel e termelétricas.

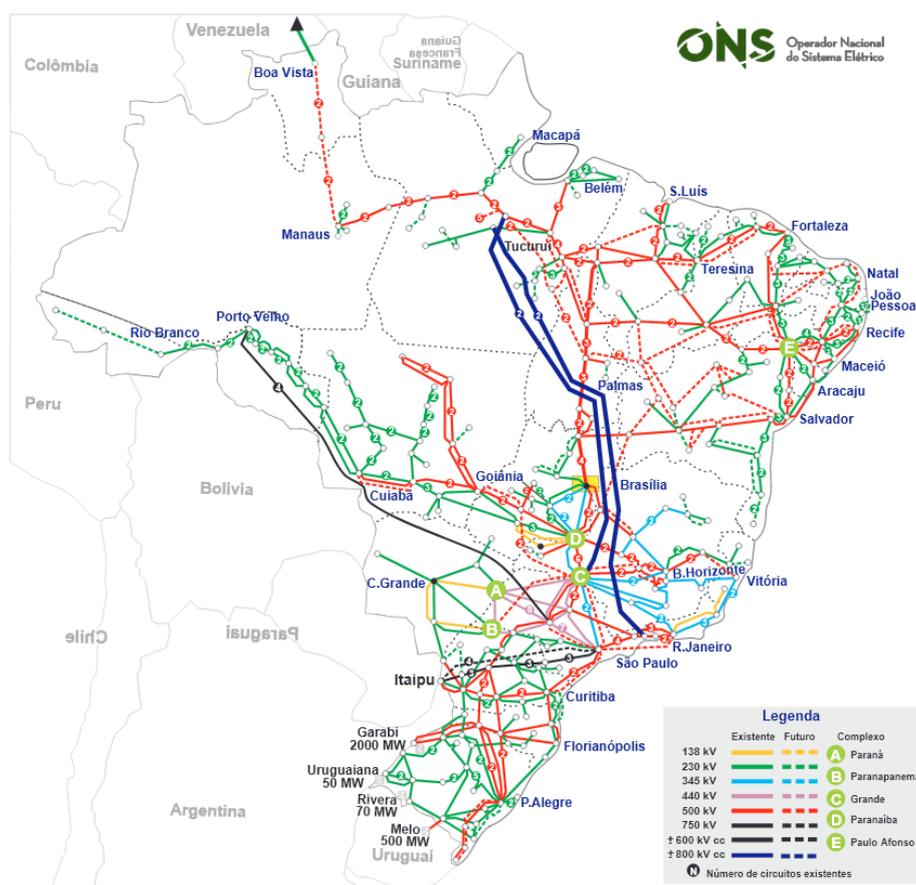


Figura 7 - Redes de distribuição cobertos pelo SIN (ONS, c2023)

Apesar do SIN possuir centenas de milhares de quilômetros de linhas de transmissão e fornecer energia para a grande maioria da população, segundo dados de 2022 levantados pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), cerca de 145 mil domicílios ainda não têm acesso à energia elétrica (IBGE, 2022). Ademais, regiões isoladas não fazem parte destas estimativas, como na Amazônia, onde há aproximadamente 990 mil pessoas que não possuem acesso à energia, os quais vivem em terras indígenas, regiões rurais e unidades de conservação. (IEMA, 2019).

Em particular, para a geração solar fotovoltaica, a previsão para 2022 a 2026 é de crescimento da potência instalada, mostrado na Figura 8.

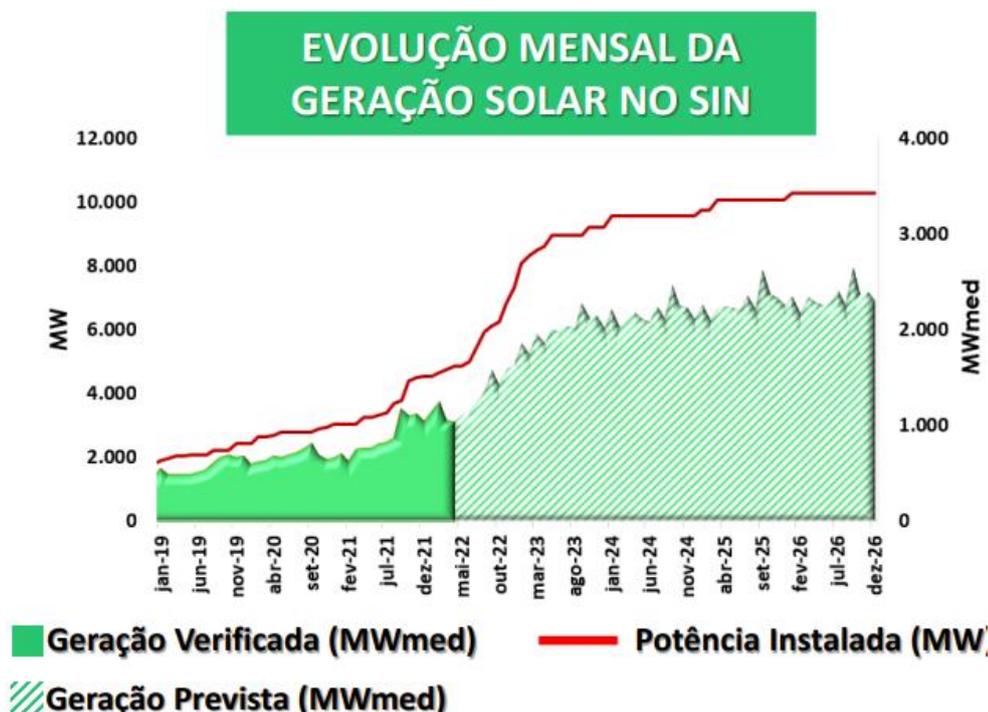


Figura 8 - Previsão da evolução da geração solar (ONS, 2022)

Sendo assim, com a expectativa de aumento da participação da energia solar, o sistema de transmissão precisa estabelecer estratégias para lidar com a inserção deste tipo de geração. Um desafio nesse cenário, por exemplo, é que com o crescimento das instalações de MMGD, o SIN precisa compensar o efeito da rápida redução de potência quando a luz do sol não está mais presente para gerar energia (ONS, c2023).

## 2.4 CÉLULAS FOTOVOLTAICAS

Neste tópico serão discutidos alguns conceitos importantes relacionados ao funcionamento de uma célula fotovoltaica, tais como a correlação entre a energia de um fóton com o comprimento de onda, os componentes da radiação solar, e quais os tipos de células solares.

### 2.4.1 Radiação eletromagnética e espectro solar

A radiação eletromagnética consiste em ondas do campo eletromagnético que se propagam no espaço e carregam momento e energia radiante eletromagnética,

cuja energia associada pode ser expressa como:

$$E = hc/\lambda \quad (1)$$

onde  $\lambda$  é o comprimento de onda,  $h$  é a constante de Planck ( $6,626 \times 10^{-34}$  J.s) e  $c$  é a velocidade da luz no vácuo ( $2,998 \times 10^8$  m/s). Pela correlação entre os termos desta equação, pode-se observar que quanto menor o comprimento de onda, maior será a energia associada ao fóton, consequentemente, quanto maior o comprimento de onda, menor será a energia. Dentro do espectro eletromagnético há diversos intervalos de comprimento de onda que representam um tipo de energia, como as ondas de rádio, micro-ondas, infravermelho, luz visível, ultravioleta, raios-X e raios gama, os quais estão representados na Figura 9. Destacado nesta figura está o espectro da luz visível, o qual juntamente com as faixas de comprimento de onda associados ao ultravioleta e ao infravermelho, configura o que conhecemos como espectro solar.

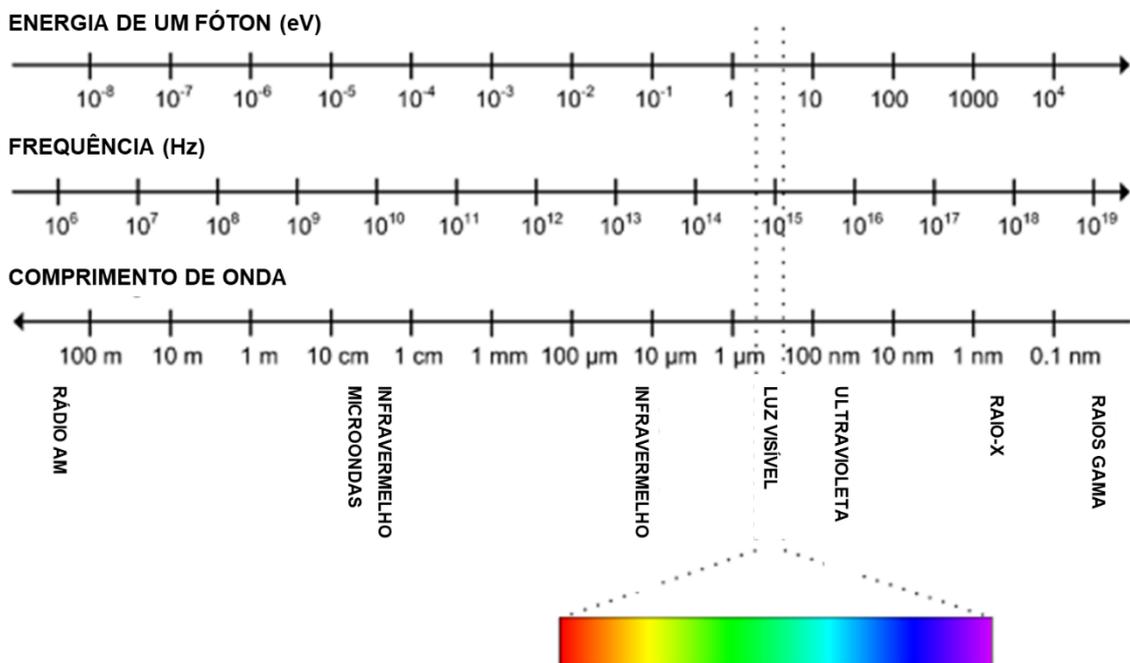


Figura 9 - Espectro eletromagnético (Anônimo, 2017)

A luz solar ao chegar na atmosfera da Terra sofre algumas alterações no direcionamento das suas ondas, devido a interação do feixe de luz com os elementos presentes na atmosfera terrestre. Pinho e Galdino (2014) definem os

seguintes componentes da radiação solar: irradiação direta, irradiação difusa, irradiação refletida (albedo) e irradiação global. A irradiação direta é aquela que não sofre alteração ao atingir a superfície (superfície terrestre ou mesmo da célula fotovoltaica); irradiação difusa é o que chega à superfície terrestre após sofrer espalhamento pela atmosfera; o albedo refere-se à radiação solar que o ambiente ao redor reflete, e a irradiação global é a somatória das irradiações anteriores. As irradiações descritas referem-se à incidência da luz solar durante um determinado período de tempo e é possível associá-las a uma taxa de energia, chamada de irradiância, que considera a energia que incide sob uma unidade de área. Há, portanto, as irradiâncias direta normal, direta horizontal, difusa horizontal, global horizontal e irradiância no plano inclinado. Pereira *et al.* (2017) descrevem estes componentes da seguinte forma: a irradiância direta normal é a taxa de energia por unidade de área cuja luz do sol incide a  $90^\circ$  graus a superfície, enquanto a irradiância direta horizontal incide na superfície horizontalmente. Já a irradiância difusa horizontal está associada à taxa de energia do componente que sofre espalhamento atmosférico. Por fim, a irradiância global horizontal, como o nome sugere, é a taxa de energia total (soma das irradiâncias difusas e diretas) no plano horizontal. Do ponto de vista das células fotovoltaicas, o parâmetro de importância para análise do aproveitamento da energia solar é a irradiância global horizontal, pois conforme descrito acima, compreende tanto as irradiâncias diretas quanto as difusas.

Sendo assim, a incidência de luz do espectro solar traz consigo uma energia associada que é capaz de promover elétrons entre as bandas eletrônicas. Essa movimentação é essencial para a condutividade elétrica do semicondutor. É válido ressaltar que a radiação solar não é um valor constante, sendo dependente de diversos fatores, como presença de nuvens, poluição, entre outros, que alteram e/ou influenciam a quantidade de energia emitida pelo sol que passa pela interface espaço-Terra e chega à superfície terrestre.

#### **2.4.2 As gerações de células solares**

Antes de apresentar os tipos de células solares, é válido apresentar o conceito de limite de Shockley-Queisser. Este é o limite teórico máximo de eficiência de uma célula fotovoltaica de junção p-n. O resultado obtido foi de uma eficiência

máxima de cerca de 30% para uma energia de band gap de 1,1 eV (SHOCKLEY; QUEISSER, 1961). Posteriormente, este valor de limite teórico de eficiência foi atualizado, sendo agora considerado de aproximadamente 33% para uma célula feita de silício cristalino e 28% para silício amorfo (ZANATTA, 2022).

### Best Research-Cell Efficiencies

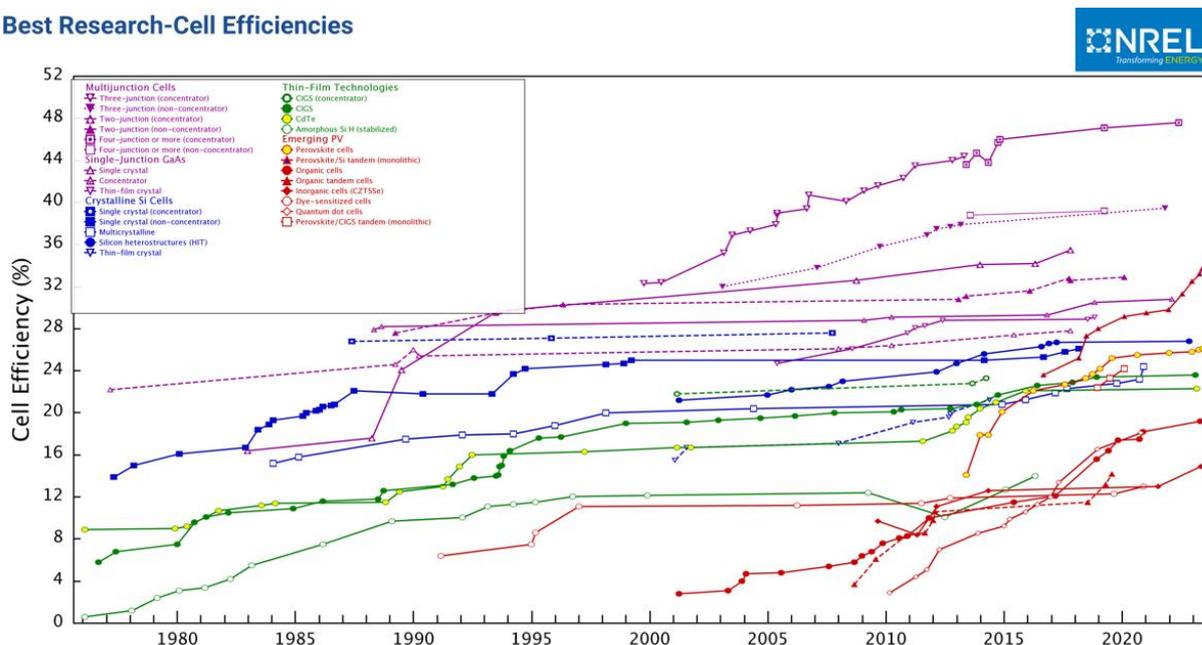


Figura 10 - Evolução da eficiência de diversos tipos de células solares (NREL, 2023)

Proposto por Martin Green no ano de 2000, as células fotovoltaicas podem ser divididas em três gerações. Essa classificação foi criada com o propósito de trazer uma melhor visualização sobre os materiais utilizados, a eficiência dos fotovoltaicos e o método utilizado para a fabricação, dentro de um contexto que é alterado rapidamente. Sendo assim, a categorização entre os tipos de geração de fotovoltaicos auxilia na orientação de políticas, no direcionamento do mercado e na escolha dos investidores (SINKE, 2019).

A primeira geração é caracterizada pelos fotovoltaicos constituídos por células de silício cristalino (c-Si), podendo ser monocristalino (m-Si), policristalino (p-Si) e de junção única, apresentando uma eficiência de no máximo 20% (GREEN, 2001). A espessura da camada de silício é na ordem de 100-200  $\mu\text{m}$ , o que eleva o custo de fabricação, conforme pode ser observado na Figura 11. Apesar dessa particularidade, de acordo com o relatório disponibilizado pelo *Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems*, as células solares da primeira geração representam mais

de 95% da produção do mercado quando comparada a outras células solares (ISE, 2023). Esta característica decorre dos esforços adicionais/paralelos da indústria de circuito integrado, *i.e.*, o *know-how* acumulado propiciou um avanço maior para estes materiais.

Já a segunda geração é atribuída às células de filmes finos, constituídas por telureto de cádmio (CdTe), silício amorfo (a-Si), silício microcristalino ( $\mu$ c-Si) ou cobre-índio-gálio-selênio (CIGS) aplicado a um substrato que pode ser vidro, polímero ou uma fina camada de metal. A menor espessura da camada de absorção, entre 1-10  $\mu$ m, contribuiu para a redução no custo por  $m^2$ . Se por um lado essa redução da espessura diminuiu o custo, pois era necessário menos material, por outro lado essa espessura mais fina resultou numa menor eficiência (entre 5% e 10%). A princípio, a eficiência das células da segunda geração não chegava à eficiência da primeira, no entanto, essa não é mais a realidade. Atualmente, a maior eficiência alcançada é 23,6% (NREL, c2023).

A terceira geração pode ser representada pelas células solares de filmes finos avançados, como as células de multijunção, quantum dots, sensibilizada por corante, perovskita, células orgânicas, CZTS (sulfeto de cobre e zinco-estanho). Os tipos de células incluídas nessa geração visam reduzir o custo ainda mais, ao mesmo tempo em que aumenta a eficiência, visto que se o material apresenta maior eficiência, é necessário utilizar menor área de material, o que por sua vez, diminui o custo. Nesse caso, a ideia para atingir tal eficiência é ultrapassar o limite de Shockley-Queisser (CONIBEER, 2007).

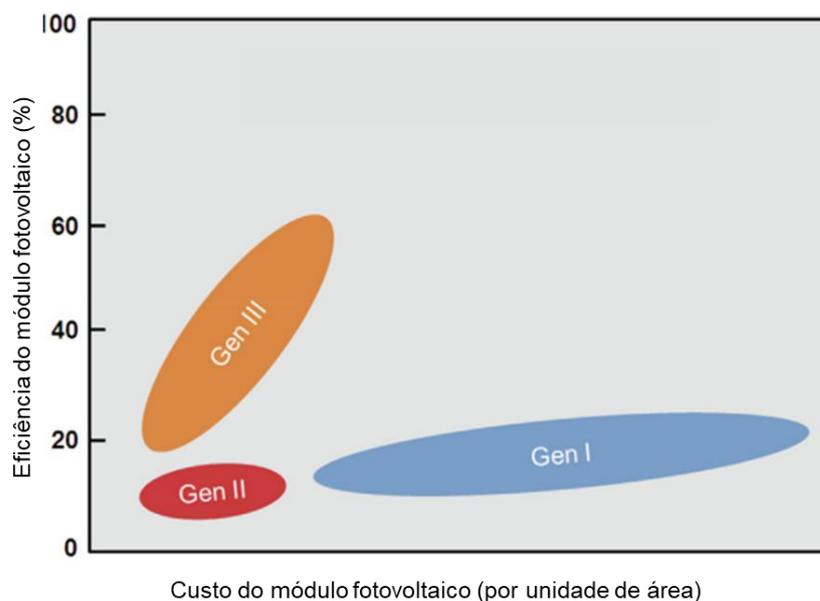


Figura 11 - Eficiência do módulo fotovoltaico com relação ao custo de acordo com as gerações (SINKE, 2019).

Ainda que as células solares de silício cristalino sejam as mais extensamente utilizadas e bem consolidadas no mercado, não deixaram de serem estudadas e desenvolvidas ao longo do tempo. O custo de produção reduziu em 80% desde 2008 e a expectativa é que sua utilização continue amplamente difundida, mas pesquisas nos outros tipos de células, como as de telureto de cádmio e perovskita, por exemplo, trazem boas perspectivas para 2050, no qual sua utilização poderá ter maior participação no mercado (IEA, 2022).

Com relação aos componentes de um painel fotovoltaico comercialmente mais comumente utilizado, são considerados seis componentes principais descritos na Tabela 2 e Figura 12 (SVARC, 2020):

**Tabela 2 - Componentes principais de um painel fotovoltaico.**

Item	Componente	Função
1	Moldura de alumínio	Proteção das bordas laminadas e estrutura de montagem e sustentação
2	Vidro temperado	Atua como proteção contra chuvas, granizo e outros detritos
3	Filmes de EVA	Serve para encapsular as células FV, auxilia na fixação e proteção contra sujeira e umidade
4	Células solares	Converter a energia solar em energia elétrica
5	Backsheet	Proteção contra umidade, atua como isolamento elétrico e proteção mecânica
6	Caixas de junção	Conexão de toda a parte elétrica

Fonte: SVARC (2020)

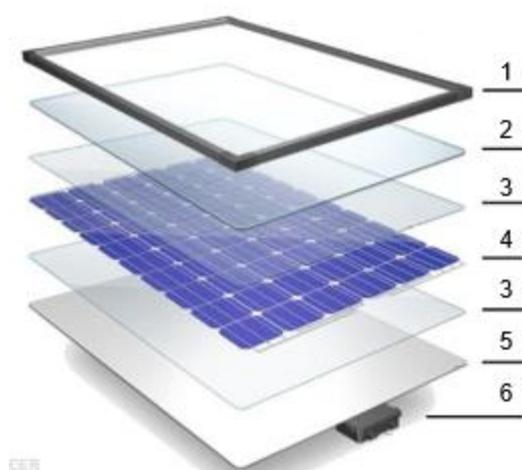


Figura 12 - Representação dos principais componentes de um painel FV (SVARC, 2020)

De maneira geral, os painéis fotovoltaicos quando instalados serão expostos a diversas condições ambientais. Sendo assim, é utilizado o vidro temperado por apresentar elevada resistência mecânica e alta transmissão, que permite que ele resista a granizo, chuva e também permita a passagem do máximo do espectro solar; a moldura de alumínio que apresenta uma baixa densidade e alta resistência mecânica para suportar as tensões externas, atuando como proteção e estrutura de montagem. Também para proteção os filmes de EVA são utilizados e de última barreira de proteção há o *backsheet*, que fica na parte de trás do módulo, sendo

empregado algum polímero. E por fim, a caixa de junção que possui as conexões elétricas e também é onde fica o diodo *bypass*, responsável por garantir o funcionamento seguro do módulo e também por permitir a interconexão entre os painéis (SVARC, 2020).

No que se refere ao custo de aderir aos painéis solares, é preciso avaliar o valor do equipamento e o valor da instalação. Os valores dependem de fatores como região do Brasil, dimensões, o quão complexo é o projeto, padrão de consumo, entre outros. Normalmente, o valor pode variar de R\$20.000,00 a R\$35.000,00, com retorno do investimento de quatro a sete anos dependendo da região do Brasil (EXAME, 2022)

### **2.4.3 Irradiação solar no Brasil**

O Brasil recebe elevada radiação solar e, apesar da sua extensão territorial que leva a características climáticas diferentes distribuídas em seu território, a incidência solar não apresenta bruscas variações ao longo do ano (PEREIRA; MARTINS, 2018), sendo um fator importante a ser considerado quando se trata da ampliação do uso de energia solar. No mapa da Figura 13, publicado no Atlas Brasileiro de Energia Solar, elaborado pelo Laboratório de Modelagem e Estudos de Recursos Renováveis de Energia (LABREN), que reúne mais de 17 anos de dados coletados por meio de sondas espalhadas pelo país, é possível observar o total diário da irradiação global horizontal recebida no Brasil, contemplando a média desses valores ao longo do ano. A partir deste mapa, pode-se observar que nas localidades onde a taxa de irradiação é mais alta, como em regiões do Centro-Oeste, Nordeste e Sudeste brasileiro, a irradiação pode atingir uma potência de 6250 Wh/m<sup>2</sup>.dia. Se fizermos um recorte e observamos mensalmente a irradiação que o país recebe (Figura 14), temos que o mês de dezembro representa o período de maior irradiância solar, chegando a 7289 Wh/m<sup>2</sup>.dia, enquanto que a menor taxa de irradiação se encontra no mês de junho, apontando um valor de 2117 Wh/m<sup>2</sup>.dia. Tais valores vão de encontro com o esperado, já que ambos os meses se referem ao verão e inverno, respectivamente.

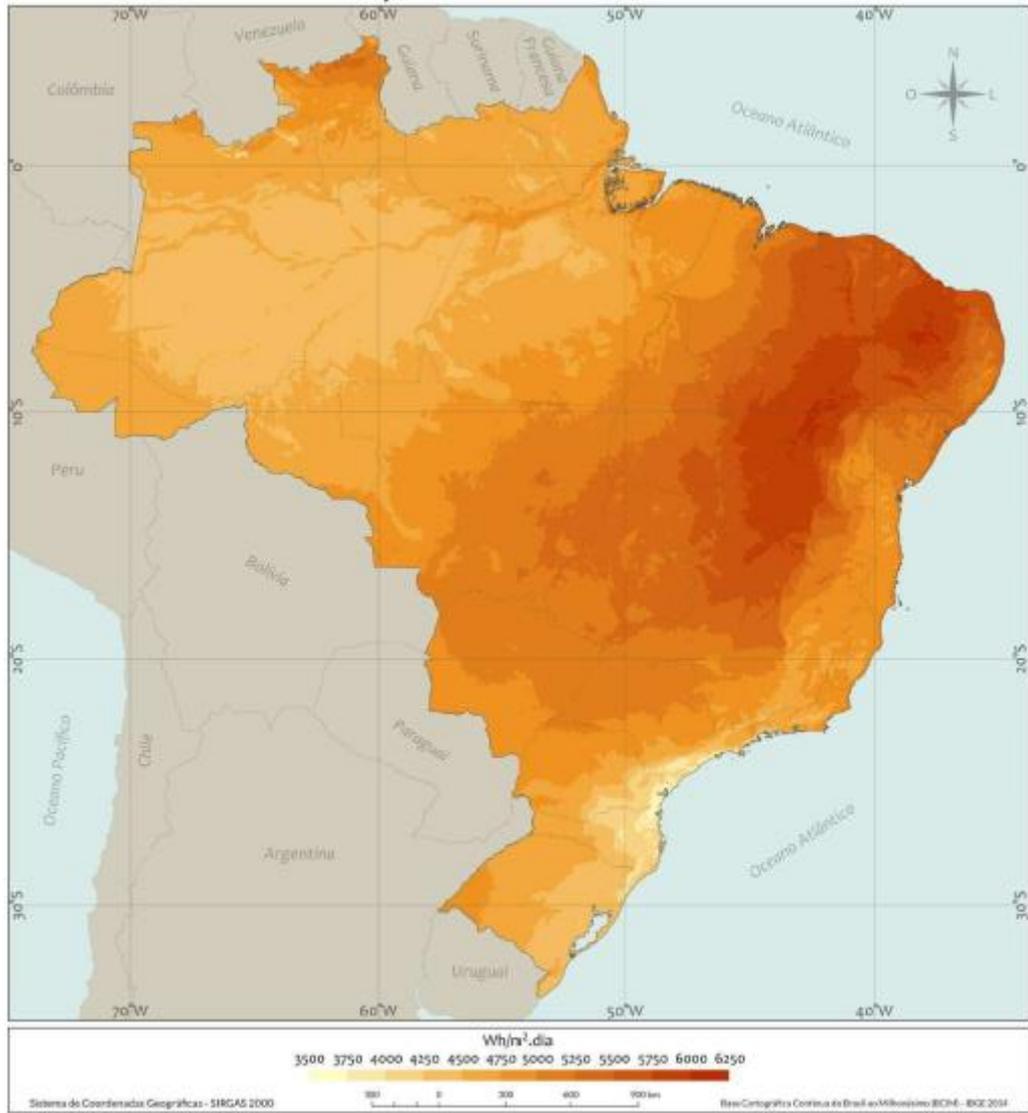


Figura 13 - Total diário de irradiação solar global horizontal no ano a partir das médias mensais (PEREIRA *et al.*, 2017)

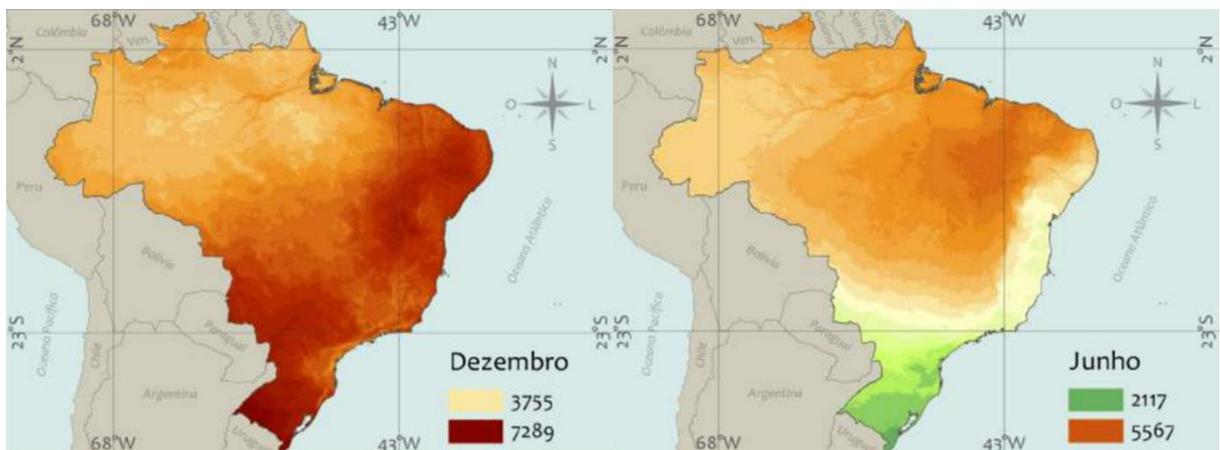


Figura 14 - Total diário da irradiação global horizontal em dezembro e junho a partir das médias mensais (PEREIRA *et al.*, 2017)

Considerando essa alta taxa de irradiação, o país tem oportunidades para crescimento no uso de energia solar fotovoltaica e, segundo o Atlas Brasileiro de Energia Solar, “no local menos ensolarado do Brasil, é possível gerar mais eletricidade do que no local mais ensolarado da Alemanha” (Pereira *et al.*, 2017, p. 57). Como comparação, é válido mencionar que a Alemanha está em quarto lugar no ranking mundial de geração de energia solar fotovoltaica, com uma potência instalada de 66,5 GW, de acordo com dados do IRENA (GLOBAL..., c2022). Segundo os autores, dentre as regiões do país, o Nordeste se destaca como a região de maior irradiação solar, apresentando uma média de irradiação global horizontal de 5,49 kWh/m<sup>2</sup>.dia, seguida pela região Sudeste e Centro-Oeste com valores de 5,06 kWh/m<sup>2</sup>.dia e 5,07 kWh/m<sup>2</sup>.dia, respectivamente. Em particular, certas áreas da Paraíba, Ceará e Bahia podem atingir uma média diária de 6 kWh/m<sup>2</sup>. Já a região Norte e Sul apresentaram valores mais baixos, na medida em que os padrões climáticos da região Norte são caracterizados por maior nebulosidade, enquanto na região Sul o aspecto climático de uma região localizada em latitudes mais altas resulta numa irradiação solar com maior variabilidade. No entanto, verifica-se, por exemplo, regiões de Minas Gerais onde a média diária pode chegar a 5,5 kWh/m<sup>2</sup>. Na Tabela 3 pode-se observar a média anual para cada região do país.

**Tabela 3 - Níveis de irradiação solar para cada região.**

<b>Regiões</b>	<b>Irradiação Global Horizontal [kWh/m<sup>2</sup>.ano]</b>	<b>Irradiação no Plano Inclinado [kWh/m<sup>2</sup>.ano]</b>	<b>Irradiação Direta Normal [kWh/m<sup>2</sup>.ano]</b>
Nordeste	2003	2015	1844
Norte	1693	1701	1191
Centro-Oeste	1849	1900	1652
Sudeste	1846	1918	1733
Sul	1654	1743	1532

Fonte: Adaptado de Pereira *et al.* (2017)

Fica evidente, portanto, que o Nordeste tem seu destaque ao ser comparado com as outras regiões do país com uma média anual da irradiação global horizontal de 2003 kWh/m<sup>2</sup>. No ano de 2022, a região possuía quase 7 GW de capacidade

operacional considerando a geração distribuída e a centralizada e, além disso, dentre toda a potência gerada pelas grandes usinas solares no país, o Nordeste respondia por dois terços dela (HEIN, 2022).

Tendo em vista esse cenário, o PNE para 2050 prevê que o potencial poderá ser de 307 GWp se for considerado uma média diária maior que 6 kWh/m<sup>2</sup> em áreas que não são de vegetação nativa, terras indígenas, unidades de conservação, entre outros (EPE, 2020).

### **3 OBJETIVO**

O objetivo deste trabalho busca avaliar de maneira qualitativa as possibilidades de ampliação do uso de energia solar na matriz energética brasileira, incorporando elementos como obstáculos para essa expansão, regiões onde o potencial se mostra relevante, a importância da diversificação da matriz, os impactos das mudanças climáticas nesse cenário e como isso impulsiona uma maior participação da energia solar. Através dessa coleta de dados, pode-se ter uma visão geral de como cada elemento influencia neste tema.

## **4 MATERIAIS E MÉTODOS**

Para o presente trabalho a metodologia utilizada foi a revisão bibliográfica de caráter descritivo e exploratório buscando estudos acerca do tema da expansão da matriz energética solar brasileira, considerando os elementos de potencialidades, demandas e desafios. Primeiramente, foi feita uma análise sobre a atual configuração da matriz energética brasileira para que fosse possível obter uma melhor orientação do caminho a ser focado. Foram utilizadas palavras-chave como “Energia solar Brasil”, “Energia solar fotovoltaica”, “Mudanças climáticas e fontes renováveis”, tanto em inglês quanto em português, nos bancos de dados Google Acadêmico e Periódico CAPES. Os artigos e dissertações cujos títulos não estavam de acordo com o que o este trabalho aborda foram desconsiderados. Além disso, outros estudos foram elencados a partir de referências dos próprios autores dos artigos que eram analisados.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1 IMPACTOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NO CONTEXTO BRASILEIRO NO USO DE ENERGIA SOLAR

Tendo em vista o potencial do país na geração de energia solar, principalmente da região Nordeste, é válido levar em consideração a discussão de como as mudanças climáticas poderão impactar a incidência de radiação solar no Brasil. Baseando-se no PNE-2050, o qual projeta cenários energéticos do Brasil, foi apontado que o sistema fotovoltaico centralizado poderia alcançar valores entre 27 a 90 GW de capacidade instalada, gerando em média de 8 a 26 GW de energia (EPE, 2020), mas sem considerar o sistema distribuído. No estudo de Costa *et al.* (2020) foram projetados dois cenários: um pessimista e outro intermediário com relação aos níveis de emissão (*i.e.*, altas e médias emissões de CO<sub>2</sub>) em três períodos distintos (2006-2040, 2040-2070 e 2070-2088). Durante os meses com maior intensidade de irradiação solar, como nos períodos de primavera e verão, no cenário intermediário foi observada uma redução de até 10% de irradiação em regiões como Norte e Nordeste, enquanto no cenário pessimista houve um aumento na incidência nestas mesmas regiões, com o detalhe para um aumento de até 10% em regiões do Sudeste (COSTA *et al.*, 2020). Tais resultados foram elencados aqui de acordo com o período baseado no PNE-2050, dessa forma, podemos fazer uma comparação e observar que as regiões onde o Plano considera como áreas em potencial de instalação centralizada podem ser impactadas pelas mudanças climáticas e evidencia-se a importância de fazer um planejamento estratégico de instalação de sistemas fotovoltaicos, tanto no médio quanto longo prazo. A longo prazo, a tendência é um aumento nos índices de irradiação, o que foi mostrado também por outros autores, cuja média de irradiação pode aumentar 1,7% até 2050 e 3,6% até 2070 no Nordeste, considerando o cenário pessimista (JONG *et al.*, 2019). Consequentemente, as projeções corroboram para colocar o Nordeste em destaque como potencial de expansão de energia solar.

Além dos motivos mencionados, há também o fato de que as mudanças climáticas trarão impacto na precipitação anual dessa região, podendo ter uma redução de 47% até 2050, e redução de 80% no fluxo na bacia do Rio São Francisco no mesmo período (JONG, 2017). Importante ressaltar que a bacia do Rio

São Francisco é de extrema importância para a região, pois é de uso múltiplo, atuando como fonte de geração de energia elétrica, abastecimento da região, irrigação e transporte. Com o período de seca enfrentado pela região Nordeste em anos anteriores e com uma previsão mais intensa deste fenômeno, é interessante avaliar, além da instalação de usinas fotovoltaicas, a implementação de modelos híbridos de geração de energia. Um estudo avaliando este cenário apontou a possibilidade de se aumentar a segurança energética durante os períodos de seca na região abastecida pela usina hidrelétrica de Sobradinho, que está localizada no Rio São Francisco. Nesse caso, a instalação de plantas flutuantes de 250-1000 MW no reservatório seriam suficientes para garantir o nível do reservatório acima de 40% (CAMPOS *et al.*, 2021). A segurança hídrica e energética é assegurada nesta situação, pois como o reservatório é de uso múltiplo, quando a seca atinge a região, a prioridade é a geração de energia, enquanto os outros usos são prejudicados, mas com o modelo híbrido haveria água disponível para suprir estas demandas.

As mudanças climáticas, ao impulsionar o aumento do uso de energias renováveis para reduzir as emissões de GEE, associado ao cenário de crescimento econômico, tem levado órgãos governamentais a estudarem um maior aproveitamento hidrelétrico. Segundo o PNE-2050, a maior parte do potencial hidrelétrico está localizado na Amazônia, com 77% do potencial inventariado em áreas protegidas, como por exemplo, unidades de conservação, terras indígenas ou terras quilombolas (EPE, 2020). Conforme mostrado por Pereira *et al.* (2017), a região Norte não apresenta altos índices de irradiação solar e, apesar de Costa *et al.* (2020) e Jong *et al.* (2019) mostrarem em seus trabalhos um aumento na irradiação solar devido às mudanças climáticas, não há indício competitivo quanto a regiões (JONG *et al.*, 2019). No entanto, ainda trazem vantagens à população da região quando se trata de GD (Portal Solar, 2019), sendo válido a expansão de geração distribuída para esta região.

Portanto, embora as usinas hidrelétricas ainda sejam colocadas como um elemento para desacelerar as mudanças climáticas, baseando-se no argumento que estudar reservatórios isolados não é a forma mais válida de se analisar as emissões de GEE (MULLER, 2019), evidências apontam que essas emissões podem ser equivalentes ou maiores que as emissões de fontes de combustíveis fósseis, a depender do caso analisado (DEMARTY; BASTIEN, 2011; FEARNSIDE, 2015; RÄSÄNEN *et al.*, 2018; SCHERER; PFISTER, 2016). Além disso, não devemos

esquecer dos diversos impactos socioambientais e econômicos que a construção de barragens e usinas hidrelétricas causam à população e à região. Conseqüentemente, é notório a necessidade de expandir a matriz energética solar do país.

## 5.2 VANTAGENS E DESVANTAGENS DA IMPLEMENTAÇÃO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

Neste tópico serão discutidos as vantagens e desvantagens da implementação de sistemas fotovoltaicos e como eles se relacionam com a potencialidade, demanda e desafios da expansão da energia solar na matriz energética. A discussão está dividida por aspectos ambientais, sociais e técnicos.

### 5.2.1 Aspectos ambientais e sociais

Uma das vantagens dos sistemas fotovoltaicos é a possibilidade de levar energia elétrica às populações que vivem em regiões isoladas do país. Apesar do Governo possuir um programa desde 2003 específico para tal fim, chamado “Luz para Todos”, ainda há aproximadamente 1 milhão de pessoas que não possuem acesso à energia, sendo que a maioria está localizada em regiões rurais, terras indígenas e unidades de conservação da Amazônia. O atendimento a essas localidades poderia ser suprido pela implementação da geração distribuída, que é mais vantajoso do que construir novas linhas de transmissão. Adicionalmente, o uso de sistemas fotovoltaicos também reduziria o impacto ambiental que essa construção de linhas de transmissão traria, e possíveis impactos sociais referentes a população local que teriam que ser remanejadas para dar espaço a construção das novas linhas. Além disso, existem também as regiões que são consideradas isoladas do SIN, cuja fonte de energia vem do diesel e termelétricas. Numa análise entre diferentes tipos de energia (solar, eólica e biomassa) que poderiam ser utilizadas para prover energia em uma das cidades de Roraima, obteve-se como melhor resultado a energia solar nos diversos cenários rodados, porém é válido mencionar que tal método possui uma subjetividade intrínseca na definição de critérios devido à utilização do método multicritério, cujos pesos nas variáveis depende de quem estará analisando o cenário, o que influencia no resultado final

(TAIRA *et al.*, 2022).

Observa-se, portanto, que para prover energia elétrica em locais de difícil acesso, a geração distribuída se mostra uma alternativa apropriada. Embora as áreas isoladas estejam localizadas na região Norte do país, a qual apresenta maior nebulosidade e elevada precipitação média anual quando comparada a outras regiões, influenciando na irradiação global horizontal, ainda assim os índices são favoráveis ao uso de painéis fotovoltaicos. Como a energia solar é uma fonte intermitente e dada as condições climáticas desta região, a eficiência dos painéis pode ser comprometida, mas há também a possibilidade de tornar o sistema num modelo híbrido, no qual uma outra fonte garantiria energia nos períodos em que a energia solar não fosse o suficiente.

Um outro aspecto positivo da GD está associado ao sistema de compensação que acumula créditos ao consumidor, conforme indicado anteriormente, se mostrando como um forte atrativo para adoção de sistemas fotovoltaicos em residências, prédios, condomínios e pequenos estabelecimentos comerciais. De acordo com um levantamento feito pela Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (ABSOLAR), é possível reduzir em até 95% a conta de energia utilizando esse sistema. No entanto, com a aprovação da Lei 14.300/22, diversas discussões entre as empresas do ramo, consumidores e outras entidades surgiram e por ser muito recente, ainda não há muitas informações a respeito dos impactos a longo prazo.

A geração de empregos também é um ponto positivo quando se trata do tópico de sistemas fotovoltaicos, pois de acordo com o Programa de Desenvolvimento de Geração Distribuída (ProGD), “estima-se que a cada megawatt instalado por ano, sejam criados aproximadamente 30 empregos diretos e 90 indiretos” (BRASIL, 2019, p.18), tanto para o caso de sistemas de geração distribuída, quanto para geração centralizada, o que traz benefícios à população e ao país como um todo, pois contribui para o desenvolvimento econômico.

Com relação à geração centralizada, a instalação de parques solares traz consigo impactos ambientais associados às etapas de planejamento, instalação e operação. A instalação de uma usina solar leva a degradação da paisagem local, afugentamento dos animais, entre outras alterações na flora. No entanto, o impacto geral é menor quando comparado à construção de barragens para usinas hidrelétricas (BARBOSA FILHO *et al.*, 2015). Entretanto, embora os fatores

negativos sejam menores quando comparados a outras fontes de energia, não devemos ignorá-los e devem ser levados em consideração na discussão da implantação, procurando locais onde tais impactos sejam bem menores e procurar maneiras de mitigar os efeitos no meio durante o processo de instalação de uma usina solar fotovoltaica.

Um ponto que ainda traz insegurança ao tema ambiental é a falta de uma norma específica para licenciamento ambiental de usinas solares fotovoltaicas, alertado por Barbosa Filho *et al.* (2015). Enquanto estes autores mostraram que não há uma definição clara do que é considerado um pequeno potencial de impacto ambiental, Sá (2020) aponta diversos elementos que dificultam a elaboração de protocolos para licenciamento ambiental de usinas fotovoltaicas. Destaca-se como principal a falta de uma normativa a nível federal específica para o licenciamento deste tipo de usina. Como consequência da ausência de critérios claros de como deve ser analisado, a definição destes critérios fica por conta de questões técnicas, legislativas e judiciárias locais. Outro ponto importante deste estudo é que o atual sistema de controle ambiental brasileiro é insatisfatório no que tange o acompanhamento das atividades após a concessão da licença, ou seja, a prioridade está em concedê-las, porém o mesmo nível de importância não é dado ao acompanhamento e verificação se as medidas foram adotadas por parte de quem adquiriu a licença.

Portanto, por mais que se considere que a implantação de parques solares possui um impacto ambiental menor quando comparado a outros empreendimentos de energia, como usinas hidrelétricas e termelétricas, tanto no planejamento, instalação e operação, a avaliação de impacto ambiental dentro do âmbito de licenciamento ambiental de usinas fotovoltaicas ainda não está totalmente estabelecida. A ausência de uma norma a nível federal que instrua claramente quais os parâmetros que devem ser avaliados no momento do estudo dos impactos ambientais levam a uma avaliação não padronizada da atividade técnica. Este obstáculo corrobora, juntamente com outros fatores já mencionados, como um dos desafios da expansão da energia solar.

Outro aspecto relacionado a GC, é que, por ter custos operacionais menores ao ser comparado com usinas termelétricas, torna-se uma opção vantajosa. Na comparação dos custos entre usinas, termelétrica e solares, tem-se uma pequena vantagem inicial no investimento, porém o índice de custo benefício é maior para as

usinas solares, ou seja, do ponto de vista de custo total é mais vantajoso investir em usinas solares, pois apresentam menor custo de operação e manutenção (NUNES NETO *et al.*, 2020). Tal estudo foi realizado comparando apenas duas usinas de potências similares, porém é um indício da vantagem econômica.

Ainda sob o ponto de vista econômico, as usinas solares têm apresentado queda no custo por MW, tornando a fonte solar competitiva nos leilões de energia. Juntando com o fato de que o tempo de construção é menor quando comparado a usinas hidrelétricas e eólicas, e por não ser necessário a construção de novas linhas de transmissão, a vantagem econômica torna-se ainda mais clara e atrativa aos investidores. A geração centralizada apresenta grande potencial de crescimento no Brasil e já estão presentes em todas as regiões do país, porém as regiões Sul e Sudeste têm perspectivas de destaque nesse cenário por três motivos: “as distâncias aos grandes centros são menores; a grande concentração de carga do SIN ocorre nestas regiões e há maior disponibilidade de pontos de conexão à rede” (PEREIRA *et al.*, 2017, p. 58), isto é, quanto menor a distância entre a unidade geradora e a unidade consumidora, menores são as perdas de energia durante a transmissão e a sobrecarga no SIN pode ser aliviada pelas usinas solares que recebem maiores índices de irradiação justamente durante os momentos de sobrecarga.

### **5.2.2 Aspecto técnico: infraestrutura dos sistemas de transmissão**

O SIN é predominantemente fundamentado na geração de energia proveniente das usinas hidrelétricas, fazendo com que a sua infraestrutura seja projetada para transmitir e distribuir a energia gerada dessas usinas para os consumidores através das linhas de transmissão. Durante esse percurso há perdas de energia, sejam elas térmicas, dielétricas, erros de medição, entre outros (VIEIRA, 2016). A inserção de painéis fotovoltaicos na geração distribuída atuaria contrapondo a este aspecto negativo de perdas de energia, já que pelo fato de a produção de energia estar próximo de onde o consumo acontece, essa perda pode ser reduzida (PINTO, 2014; SOCCOL *et al.*, 2016). No entanto, a incorporação de GD na rede desfavorece o sistema de controle das operadoras de energia, pois estas perdem a capacidade de controlar o fornecimento de acordo com a demanda, conforme dados levantados por Pereira (2019) e Soccol *et al.* (2016). Isto ocorre

pois haveria um fluxo de potência reverso, isto é, quando a energia gerada pelo painel fotovoltaico for maior que o consumo daquele período, o fluxo que antes era unidirecional, torna-se invertido entre o painel e a rede elétrica (PALUDO, 2014).

Conforme visto na seção 2.3.2., a geração distribuída teve seu marco com a RN 482/12 que impulsionou a sua implementação, somando-se posteriormente a RN 687/15, que serviu de um incentivo ainda maior para a adoção do sistema distribuído. No gráfico da Figura 15, obtido a partir de dados da ANEEL, observa-se o aumento exponencial da potência instalada, evidenciando a importância e os impactos das RN, sendo que a partir de 2015 quando ocorreu a implementação da isenção no ICMS, a quantidade de geração distribuída passou a aumentar de maneira mais significativa. Os dados evidenciam que as ações governamentais de incentivo fiscal são fatores que impulsionam a adoção desse tipo de sistema.

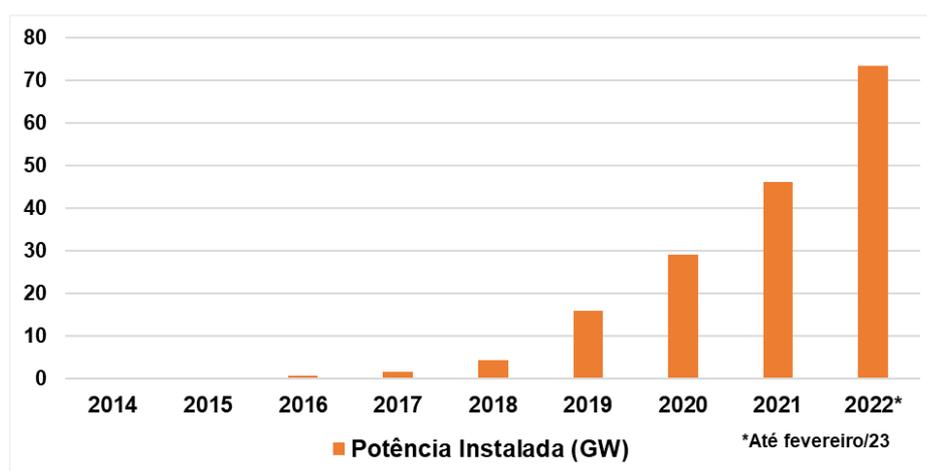


Figura 15 - Evolução da potência instalada no país ao longo dos anos (Adaptado de ANEEL, 2022).

No entanto, a evolução exponencial de adeptos a geração distribuída leva a instabilidades no sistema de redes de transmissão que desde o princípio foi projetado para atender o fornecimento de energia provenientes de grandes usinas hidrelétricas e termelétricas. Nesse cenário, o aumento significativo que a GD tem apresentado nos últimos anos resulta em consequências nas usinas geradoras de energia e distribuidoras, cuja infraestrutura não consegue acompanhar a rápida evolução, levando a custos operacionais relacionados a procedimentos e manutenção e diminuição do faturamento devido ao fato de que parte da demanda de energia ser suprido pelos painéis solares (NARUTO, 2017). Tais custos são

repassados aos consumidores por meio das revisões tarifárias, conforme acrescenta Simone (2019), isto é, o consumidor acaba pagando mais caro pelo serviço ofertado.

Ainda nesse cenário, um estudo da GREENER (2023) mostrou que a redução de preços dos painéis solares é um fator que incentiva a instalação desse sistema de geração. Por exemplo, no primeiro semestre de 2022, houve uma queda de 4,3% no custo quando comparado ao custo do começo deste mesmo ano em questão, apresentando uma redução menor para sistemas fotovoltaicos instalados em residências e estabelecimentos comerciais de pequeno porte do que para sistemas de grande porte (5,9% e 3,4%, respectivamente). O destaque do crescimento da GD é devido, principalmente, ao setor residencial, representando 57% da potência acumulada e 82% das instalações de FV em 2022 (Greener, 2023). Sendo assim, é criado o seguinte ciclo: consumidores aderem ao sistema de GD, as distribuidoras têm seu faturamento reduzido e aumentam as tarifas, que por sua vez, incentivam o consumidor a optar pela GD (SIMONE, 2019), o qual se depara com a redução dos preços dos painéis. O aumento das tarifas energéticas (sobre tudo para parte da população de média e baixa renda) em decorrência das implementações de sistemas fotovoltaicos de menor potência é um problema a ser enfrentado pelas políticas públicas) (CÂMARA, 2017).

Diante deste quadro, nota-se que políticas de incentivo são elementos que fazem parte do desafio que órgãos governamentais precisam avaliar quando se trata de ampliação do uso de energia solar, e faz-se necessário o aprimoramento da alocação de custos tarifários para os consumidores e distribuidoras, visando encontrar alternativas onde as distribuidoras não sejam impactadas pela inserção da GD, mas que ao mesmo tempo não torne a instalação de painéis fotovoltaicos menos atraente aos consumidores. A Lei 14.300/22 abre caminhos para melhorar esta situação, já que uma das mudanças foi a tarifação da injeção do excedente na rede e a tarifação binômica, que representa um custo fixo para a distribuidora e outro proporcional ao consumo de energia, as quais foram também propostas no trabalho de SIMONE (2019). No entanto, esta Lei foi adotada há pouco tempo, abrindo espaço para estudos a respeito dos impactos que terá a curto e longo prazo.

Sendo assim, se por um lado os sistemas de GD auxiliam no quesito de reduzir as perdas por transmissão, por outro lado trazem instabilidades ao sistema que foi projetado e está consolidado na geração centralizada. Esta é uma barreira do ponto de vista técnico que a ONS, ANEEL e o governo terão que analisar, avaliando

modelos e procedimentos para melhor lidar com a inserção dos sistemas de GD, garantindo a transmissão e distribuição de energia de qualidade.

## 6 CONCLUSÕES

O Brasil é um país que apresenta quase 45% da matriz energética e 78% da matriz elétrica proveniente de fontes renováveis, devido principalmente às fontes hidrelétricas. Tal participação coloca o país em destaque quando comparado aos outros países, porém não há diversificação nestas matrizes. O fato de ser altamente dependente das usinas hidrelétricas resulta numa dependência deste tipo de fonte, que por sua vez, está sujeita aos índices pluviométricos dos locais onde as usinas estão construídas, além dos diversos impactos negativos que a construção pode trazer. Considerando que o país já passou por períodos de seca que impactaram na oferta de energia, sendo necessário acionar termelétricas para suprir a demanda energética, e sabendo que as mudanças climáticas trarão mais períodos de estiagem, o uso de energia solar se mostra favorável e adequado a situação do país, contribuindo assim com o cumprimento dos acordos internacionais e diversificação na matriz.

Neste trabalho, pretendeu-se avaliar o cenário do uso de energia solar no país a partir de uma revisão bibliográfica a respeito dos potenciais, demandas e desafios. Foi possível observar que o uso de energia solar no país é algo relativamente recente, sendo que o crescimento exponencial do uso de sistemas fotovoltaicos na geração distribuída ocorreu há menos de 10 anos. Desde então diversos aspectos positivos e negativos vêm sendo apontados por pesquisadores, empresas, distribuidoras, entre outras entidades que trabalham com a energia solar.

Os altos índices de irradiação solar que o Brasil recebe é um aspecto muito favorável à expansão da energia solar, sendo que todas as regiões apresentam índices suficientes para o emprego de geração distribuída ou geração centralizada, a depender da situação. No que se refere aos potenciais e demandas, pode-se apontar que a construção de parques solares em regiões como Sudeste e Sul terão papel importante nos próximos anos, devido à proximidade com as regiões consumidoras e que tem maior carregamento nas linhas de transmissão. Com relação ao Nordeste, sistemas híbridos são interessantes pois auxiliam na segurança energética da região. Já no Norte e partes do Centro-Oeste, a geração distribuída é uma alternativa para levar energia elétrica para as populações que vivem em regiões remotas e de difícil acesso a outras fontes de energia e onde a construção de novas linhas poderiam trazer impactos ambientais e sociais. O

emprego de geração distribuída pode ser benéfico para todas as regiões do país, mas assim como a geração centralizada, é importante ponderar as vantagens e desvantagens. Com relação aos desafios, as discussões giram em torno de aspectos regulamentadores de um sistema que ainda é recente e não muito consolidado, além do aspecto de infraestrutura do SIN, o qual é bastante complexo e foi projetado para transmissão de energia a partir de grandes usinas. Questões relacionadas aos impactos ambientais e como incluir e avaliar as instabilidades no sistema de transmissão são pontos a serem avaliados pelos órgãos governamentais em conjunto com outras organizações.

Por fim, espera-se que este trabalho tenha contribuído para a visualização a respeito da situação atual do país no que se refere aos obstáculos para a expansão da energia solar na matriz energética e quais são as perspectivas de uso. Como propostas para trabalhos futuros, recomenda-se avaliar com profundidade a questão da reciclabilidade dos módulos fotovoltaicos, como este tópico é abordado na Lei e como as fabricantes atuam neste assunto. Além disso, é importante também avaliar a questão de sujidades depositadas nos módulos fotovoltaicos e como isso é influenciado a depender da localidade em que será instalado.

## REFERÊNCIAS

ACORDOS internacionais e políticas públicas. **Adapta Clima**, [S. l.], c2023. Disponível em: <http://adaptaclima.mma.gov.br/acordos-internacionais-e-politicas-publicas>. Acesso em: 15 jul. 2023.

ALMEIDA, R. M. *et al.* Reducing greenhouse gas emissions of Amazon hydropower with strategic dam planning. **Nature Communications**, [S. l.], v. 10, n. 1, p. 4281, 19 set. 2019.

ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Geração Distribuída, [S. l.], c2023. Disponível em: <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrljoiY2VmMmUwN2QtYWFiOS00ZDE3LWI3NDMtZDk0NGI4MGU2NTkxliwidCI6IjQwZDZmOWI4LWVjYTctNDZhMi05MmQ0LWVhNGU5YzAxNzBIMSIsImMiOjR9>. Acesso em: 12 mai. 2023.

AR6 Synthesis Report. Headline Statements. **IPCC**, [S. l.], c2023. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/resources/spm-headline-statements>. Acesso em: 12 jul. 2023.

BARASSA, E. **Trajetória tecnológica do veículo elétrico**. 2015. Dissertação (Mestrado em Política Científica e Tecnológica) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 30 abr. 2015.

BARBOSA FILHO, W. P. *et al.* Expansão da Energia Solar Fotovoltaica no Brasil: Impactos Ambientais e Políticas Públicas. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, [S. l.], v. 4, p. 628, 7 dez. 2015.

BASSO, C. G. **A emissão de CO<sub>2</sub>, o consumo de energia renovável e o crescimento econômico: uma análise para o Brasil, 1990 - 2018**. 2022. 98 f. Dissertação (Mestrado em Economia) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Toledo, 2022.

BEST research-cell efficiency chart. **NREL**, [S. l.], c2023. Disponível em: <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>. Acesso em: 4 jun. 2023.

BOEHM, S.; SCHUMER, C. 10 conclusões do Relatório do IPCC sobre Mudanças Climáticas de 2023. **WRI Brasil**, São Paulo, 24 mar. 2023. Disponível em: <https://www.wribrasil.org.br/noticias/10-conclusoes-do-relatorio-do-ipcc-sobre-mudancas-climaticas-de-2023>. Acesso em: 30 jul. 2023.

BRASIL se torna o oitavo maior país do mundo em capacidade instalada para geração de energia solar. **Ministério de Minas e Energia**, Brasília, DF, 23 mar. 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/brasil-se-torna-o-oitavo-maior-pais-do-mundo-em-capacidade-instalada-para-geracao-de-energia-solar>. Acesso em: 2 jul. 2023.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Secretaria de Política Agrícola. **Informativo sobre a Estiagem no Nordeste nº 81, 15 de maio de 2015**.

Brasília, DF, 15 maio 2015. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/politica-agricola/combate-a-seca-1/arquivos-combate-a-seca/81.pdf>. Acesso em: 19 jul. 2023.

BUBE, R. H. Photovoltaic materials. London: River Edge, N.J: Imperial College Press; Distributed by World Scientific, 1998.

CÂMARA, L. S. C. **O Impacto da Difusão da Geração Distribuída Sobre o Equilíbrio Econômico-Financeiro das Distribuidoras de Energia Elétrica nos Casos da Califórnia e da Itália**. 2017. Dissertação (Mestrado em Políticas Públicas, Estratégias e Desenvolvimento) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.

CAMPOS, É. F. *et al.* Hybrid power generation for increasing water and energy securities during drought: Exploring local and regional effects in a semi-arid basin. **Journal of Environmental Management**, [S. l.], v. 294, p. 112989, set. 2021.

CANTARERO, M. M. V. Of renewable energy, energy democracy, and sustainable development: A roadmap to accelerate the energy transition in developing countries. **Energy Research & Social Science**, [S. l.], v. 70, p. 101716, dez. 2020.

CARBON Emissions. **Global Carbon Atlas**, [S. l.], c2023. Disponível em: <https://globalcarbonatlas.org/emissions/carbon-emissions/>. Acesso em: 14 jul. 2023.

CARROS elétricos representarão 14% da demanda energética do Brasil em 2040. **PwC Brasil**, São Paulo, 02 mar. 2023. Disponível em: <https://www.pwc.com.br/pt/sala-de-imprensa/release/carros-eletricos-representarao-14-da-demanda-energetica-do-brasil-em-2040.html>. Acesso em: 20 jul. 2023.

CARSTENS, D. D. S.; CUNHA, S. K. Challenges and opportunities for the growth of solar photovoltaic energy in Brazil. **Energy Policy**, [S. l.], v. 125, p. 396–404, 1 fev. 2019.

CASARIN, R. Saiba o que muda na isenção de ICMS de energia solar em Minas Gerais. **Portal Solar**, São Paulo, 25 nov. 2022. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/noticias/mercado/geracao-distribuida/saiba-o-que-muda-na-isencao-de-icms-de-energia-solar-em-minas-gerais>. Acesso em: 25 jul. 2023.

CONIBEER, G. Third-generation photovoltaics. **Materials Today**, [S. l.], v. 10, n. 11, p. 42–50, nov. 2007.

COSTA, R. S. *et al.* Impactos das mudanças climáticas na disponibilidade do recurso energético solar. **Revista Brasileira de Energia**, [S. l.], v. 26, n. 4, 16 dez. 2020.

CRISE hídrica evidenciou dependência de hidrelétricas no Brasil: diversificar é fundamental. **O Globo**, [S. l.], 29 maio 2022. Disponível em: <https://oglobo.globo.com/um-so-planeta/noticia/2022/05/crise-hidrica-evidenciou-dependencia-de-hidreletricas-no-brasil-diversificar-e-fundamental.ghtml>. Acesso em: 13 jul. 2023.

CENTRO DE REFERÊNCIA PARA AS ENERGIAS SOLAR E EÓLICA SÉRGIO DE S. BRITO - CRESESB. **O CRESESB**, Rio de Janeiro, 11 jun. 2008. Disponível em: [http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=com\\_content&cid=o\\_cresesb](http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=com_content&cid=o_cresesb). Acesso em: 9 maio. 2023.

CUMPLIDO, M. A. *et al.* Secas e crises hídricas no Sudeste do Brasil: um histórico comparativo entre os eventos de 2001, 2014 e 2021 com enfoque na bacia do rio Paraná. **Revista Brasileira de Climatologia**, [S. l.], v. 32, p. 129–153, 10 jan. 2023.

CYR, K. J. **The development and utilization of solar photovoltaic cells**: An assessment of the potential for a new energy technology. National Aeronautics and Space Administration, Lyndon B. Johnson Space Center, 1981.

DEEMER, B. R. *et al.* Greenhouse Gas Emissions from Reservoir Water Surfaces: A New Global Synthesis. **BioScience**, [S. l.], v. 66, n. 11, p. 949–964, 1 nov. 2016.

DEMAND for electric cars is booming, with sales expected to leap 35% this year after a record-breaking 2022. **IEA**, [S. l.], 26 abr. 2023. Disponível em: <https://www.iea.org/news/demand-for-electric-cars-is-booming-with-sales-expected-to-leap-35-this-year-after-a-record-breaking-2022>. Acesso em: 20 jul. 2023.

DEMARTY, M.; BASTIEN, J. GHG emissions from hydroelectric reservoirs in tropical and equatorial regions: Review of 20 years of CH<sub>4</sub> emission measurements. **Energy Policy**, [S. l.], Special Section: Renewable energy policy and development. v. 39, n. 7, p. 4197–4206, 1 jul. 2011.

DING, N.; PRASAD, K.; LIE, T. T. The electric vehicle: a review. **International Journal of Electric and Hybrid Vehicles**, [S. l.], v. 9, n. 1, p. 49, 2017.

ESTUDO estratégico – Geração distribuída 2022. **Greener**, [S. l.], c2023. Disponível em: <https://www.greener.com.br/estudo/estudo-estrategico-geracao-distribuida-2022-mercado-fotovoltaico-1-semester/>. Acesso em: 24 jul. 2023.

FAINGUELERNT, M. B. Impactos da Usina Hidrelétrica de Belo Monte: uma análise da visão das populações ribeirinhas das reservas extrativistas da Terra do Meio. **Civitas - Revista de Ciências Sociais**, [S. l.], v. 20, p. 43–52, 24 jul. 2020.

FEARNSIDE, P. M. **Hidrelétricas na Amazônia**: impactos ambientais e sociais na tomada de decisões sobre grandes obras. v. 2. Manaus: Editora INPA, 2015.

FEARNSIDE, P. M. Impactos das hidrelétricas na Amazônia e a tomada de decisão. **Novos Cadernos NAEA**, [S. l.], v. 22, n. 3, 19 dez. 2019.

FONTE solar é alternativa de abastecimento energético no Norte do Brasil. **Portal Solar**, [S. l.], 20 fev. 2019. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/noticias/mercado/projetos/fonte-solar-e-alternativa-de-abastecimento-energetico-no-norte-do-brasil>. Acesso em: 24 jul. 2023.

FRAUNHOFER INSTITUTE FOR SOLAR ENERGY SYSTEMS – ISE. **Photovoltaics Report**. Disponível em:

<[https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/P\\_hotovoltaics-Report.pdf](https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/P_hotovoltaics-Report.pdf)>. Acesso em: 4 jun. 2023.

GALBIATTI-SILVEIRA, P. Energia e mudanças climáticas: impactos socioambientais das hidrelétricas e diversificação da matriz energética brasileira. **Opinião Jurídica**, [S. l.], v. 17, n. 33, p. 123–147, jun. 2018.

GERAÇÃO Solar Centralizada: Evolução e Desafios. **Greener**, [S. l.], 26 abr. 2023. Disponível em: <<https://www.greener.com.br/geracao-solar-centralizada-evolucao-e-desafios/>>. Acesso em: 30 jul. 2023.

GLOBAL CARBON PROJECT. **Global Carbon Budget**. 2022. *Earth Syst. Sci. Data*, 14, 4811–4900, 11 nov. 2022. DOI: 10.5194/essd-14-4811-2022. Disponível em: <https://www.globalcarbonproject.org/carbonbudget/22/presentation.htm>. Acesso em: 18 jul. 2023.

GREEN, M. A. Third generation photovoltaics: Ultra-high conversion efficiency at low cost. **Progress in Photovoltaics: Research and Applications**, [S. l.], v. 9, n. 2, p. 123–135, mar. 2001.

HEIN, H. Nordeste é a única região com 7 GW de capacidade operacional solar. **Canal Solar**, 7 out. 2022. Disponível em: <https://canalsolar.com.br/nordeste-e-a-unica-regiao-com-7-gw-de-capacidade-operacional-solar/>. Acesso em: 19 jul. 2023.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios Contínua anual. Tabela 6737 - Domicílios e Moradores com energia elétrica, por situação do domicílio e fonte de energia elétrica. **IBGE**, 2022. Disponível em: <<https://sidra.ibge.gov.br/tabela/6737>>. Acesso em: 29 jul. 2023.

IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **World Energy Outlook 2022**. [S. l.], nov. 2022. Disponível em: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/830fe099-5530-48f2-a7c1-11f35d510983/WorldEnergyOutlook2022.pdf>. Acesso em: 30 jul. 2023.

IEA – INTERNACIONAL ENERGY AGENCY. **Global energy outlook 2021: Pathways from Paris**. *Resources for the Future*, [S. l.], v. 8, 2021. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2021/executive-summary>. Acesso em: 30 jul. 2023.

IRENA – INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY. **Country Rankings**. [S. l.], 2022. Disponível em: <https://www.irena.org/Data/View-data-by-topic/Capacity-and-Generation/Country-Rankings>. Acesso em: 4 jul. 2023.

IRENA – INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY. **Global Trends**, [S. l.], c2022. Disponível em: <https://www.irena.org/Data/View-data-by-topic/Costs/Global-Trends>. Acesso em: 17 jul. 2023.

ITO, K. CO2 emissions, renewable and non-renewable energy consumption, and economic growth: Evidence from panel data for developing countries. **International Economics**, v. 151, p. 1–6, 1 out. 2017.

JONES, G.; BOUAMANE, L. Power from Sunshine: A Business History of Solar Energy. Harvard Business School Working Paper Series, 2012.

JONG, P. *et al.* Estimating the impact of climate change on wind and solar energy in Brazil using a South American regional climate model. **Renewable Energy**, [S. l.], v. 141, p. 390–401, 1 out. 2019.

JONG, P. **Forecasting, integration, and storage of renewable energy generation in the Northeast of Brazil**. 2017. Tese (Doutorado em Engenharia Industrial) - Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2017.

LAMEIRINHAS, R. A. M.; TORRES, J. P. N.; CUNHA, J. P. M. A Photovoltaic Technology Review: History, Fundamentals and Applications. **Energies**, [S. l.], v. 15, n. 5, p. 1823, jan. 2022.

LEI 14.300: as coisas que mudaram para melhor na energia solar. **Crítéria Energia Solar**, Chapada, 27 jan. 2023. Disponível em: <https://criteriaenergia.com.br/lei-14300-energia-solar/>. Acesso em: 25 jul. 2023.

LEILÃO de Energia Solar: Informações e o Histórico Completo das Edições no Brasil. **Blue Sol**, [S. l.], 26 maio 2021. Disponível em: <https://blog.bluesol.com.br/leilao-de-energia-solar/>. Acesso em: 30 jul. 2023.

LOPES, P. H. S. **O Papel da ANEEL na Regulação da Geração Distribuída**. São Paulo, 30 mar. 2011. Disponível em: <http://www.tec.abinee.org.br/2011/arquivos/s410.pdf>. Acesso em: 09 mai. 2023.

MARTONI, L. Usinas de geração solar ganham espaço e fazem Brasil acordar para potencial. **Gazeta do Povo**, São Paulo, 4 mar. 2023. Disponível em: <https://www.gazetadopovo.com.br/parana/brasil-expande-geracao-energia-solar-acorda-potencial/>. Acesso em: 28 jul. 2023

MMA – MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Acordo de Paris**. Brasília, DF, c2023. Disponível em: <http://antigo.mma.gov.br/clima/convencao-das-nacoes-unidas/acordo-de-paris.html>. Acesso em: 15 jul. 2023.

MME – MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. Balanço Energético Nacional. **Relatório Síntese 2022 (Ano base 2021)**. Brasília, DF, 2022. Disponível em: [https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-675/topico-631/BEN\\_S%C3%ADntese\\_2022\\_PT.pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-675/topico-631/BEN_S%C3%ADntese_2022_PT.pdf). Acesso em: 17 jun. 2023.

MME – MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. Secretaria de Energia Elétrica. **Relatório do Programa de Desenvolvimento da Geração Distribuída de Energia Elétrica**. Brasília, DF, 2019. Disponível em: <http://antigo.mme.gov.br/documents/20182/6dac9bf7-78c7-ff43-1f03-8a7322476a08>. Acesso em: 29 jul. 2023.

MULLER, M. Hydropower dams can help mitigate the global warming impact of wetlands. **Nature**, [S. l.], v. 566, n. 7744, p. 315–317, fev. 2019.

NARUTO, D. T. **Vantagens e Desvantagens da Geração Distribuída e Estudo de Caso de um Sistema Solar Fotovoltaico Conectado à Rede Elétrica**. 2017. Projeto de Graduação — Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Rio de Janeiro, 2017.

NIELSEN, R. et al. Origin of photovoltaic losses in selenium solar cells with open-circuit voltages approaching 1 V. **Journal of Materials Chemistry A**, v. 10, n. 45, p. 24199–24207, 22 nov. 2022.

NUNES NETO, R. DA S. *et al.* Análise Comparativa Entre a Implantação, Operação e Comercialização de Energia Elétrica de Empreendimentos Solares e Térmicos. *In*: Congresso Brasileiro de Energia Solar, 8., Ceará, 2020. **Anais [...]**, CBENS, Fortaleza, 26-30 out. 2020.

O SISTEMA INTERLIGADO NACIONAL – ONS. **O que é o SIN** [S. l.], c2023. Disponível em: <http://www.ons.org.br:80/paginas/sobre-o-sin/o-que-e-o-sin>. Acesso em: 26 jul. 2023.

PALUDO, J. A. **Avaliação dos impactos de elevados níveis de penetração da geração fotovoltaica no desempenho de sistemas de distribuição de energia elétrica em regime permanente**. 2014. Dissertação (Mestrado em Sistemas Elétricos de Potência) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 14 fev. 2014.

PEREIRA, E. B.; MARTINS, F. R. Energia solar - O potencial brasileiro. O Setor Elétrico, **Fascículo Renováveis**, n. 145, p. 42-49, 2018.

PEREIRA, E. *et al.* **Atlas brasileiro de energia solar**. 2. ed. Universidade Federal de São Paulo, 2017.

PEREIRA, N. X. **Desafios e Perspectivas da Energia Solar Fotovoltaica no Brasil: Geração Distribuída vs Geração Centralizada**. 2019. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) - Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Sorocaba, 2019.

PERLIN, J. **Let It Shine: The 6,000-Year Story of Solar Energy**. [S. l.]: New World Library, 2013.

PINHO, J. T. *et al.* **Sistemas Híbridos: Soluções Energéticas para a Amazônia**. 1. ed. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2008.

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. Rio de Janeiro: Grupo de Trabalho de Energia Solar (GTES), 2014.

PINTO, M. O. **Energia elétrica: Geração, Transmissão e Sistemas interligados**. 1. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2014.

PLANO Nacional de Energia - 2050. **Empresa de Pesquisa Energética (EPE)**, [S. l.], 16 dez. 2020. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Plano-Nacional-de-Energia-2050>. Acesso em: 20 jul. 2023.

MME – Ministério do Meio Ambiente. **Protocolo de Quioto**. Brasília, DF. c2023. Disponível em: <http://antigo.mma.gov.br/clima/convencao-das-nacoes-unidas/protocolo-de-quioto.html>. Acesso em: 18 jul. 2023.

QUANTO custa instalar energia solar? **Exame**, São Paulo, 14 nov. 2022. Disponível em: <https://exame.com/negocios/custa-instalar-energia-solar/>. Acesso em: 29 jul. 2023.

RADMEHR, R.; HENNEBERRY, S. R.; SHAYANMEHR, S. Renewable Energy Consumption, CO2 Emissions, and Economic Growth Nexus: A Simultaneity Spatial Modeling Analysis of EU Countries. **Structural Change and Economic Dynamics**, [S. l.], v. 57, p. 13–27, 1 jun. 2021.

RÄSÄNEN, T. A. *et al.* Greenhouse gas emissions of hydropower in the Mekong River Basin. **Environmental Research Letters**, [S. l.], v. 13, n. 3, p. 034030, mar. 2018.

RESOLUÇÃO Normativa 482 Aneel. **Luz Solar**, Florianópolis, 20 mar. 2018. Disponível em: <https://luzsolar.com.br/resolucao-normativa-482-aneel/>. Acesso em: 25 fev. 2023

RIO DE JANEIRO. **Resolução Normativa nº 687**, de 24 de novembro de 2015. Agência Nacional de Energia Elétrica. Altera a Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012, e os Módulos 1 e 3 dos Procedimentos de Distribuição – PRODIST. Disponível em: [https://www.camara.leg.br/proposicoesWeb/prop\\_mostrarintegra?codteor=1962672](https://www.camara.leg.br/proposicoesWeb/prop_mostrarintegra?codteor=1962672). Acesso em: 10 mai. 2023.

SÁ, T. R. D. **O processo de licenciamento ambiental de usinas solares fotovoltaicas no Brasil**. Dissertação (Mestrado em Tecnologia da Energia) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 10 dez. 2020.

SANTOS, E. S.; CUNHA, A. C.; CUNHA, H. F. A. Usina hidrelétrica na Amazônia e impactos socioeconômicos sobre os pescadores do município de Ferreira Gomes-Amapá. **Ambiente & Sociedade**, [S. l.], v. 20, p. 191-208, 2017.

SANTOS, M. A. *et al.* Gross greenhouse gas fluxes from hydro-power reservoir compared to thermo-power plants. **Energy Policy**, [S. l.], v. 34, n. 4, p. 481–488, 1 mar. 2006.

SCHERER, L.; PFISTER, S. Hydropower's Biogenic Carbon Footprint. **PLOS ONE**, [S. l.], v. 11, n. 9, p. e0161947, 14 set. 2016.

SHIMOMAEBARA, L. A.; PEYERL, D. Energia Solar no Brasil: histórico e planejamento energético. **Revista de Políticas Públicas**, [S. l.], v. 25, n. 2, p. 854–869, 2021.

SHOCKLEY, W.; QUEISSER, H. J. Detailed Balance Limit of Efficiency of *p-n* Junction Solar Cells. **Journal of Applied Physics**, [S. l.], v. 32, n. 3, p. 510–519, mar. 1961.

SIMONE, L. F. C. **Inserção da micro e minigeração distribuída solar fotovoltaica: impactos na receita das distribuidoras e nas tarifas dos consumidores.** Dissertação (Mestrado em Sistemas de Potência) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 12 ago. 2019.

SINKE, W. C. Development of photovoltaic technologies for global impact. **Renewable Energy**, [S. l.], v. 138, p. 911–914, ago. 2019.

SOBRE GD e cogeração. **Instituto Nacional de Eficiência Energética (INEE)**, Rio de Janeiro, c2023. Disponível em: [http://www.inee.org.br/forum\\_sobre\\_gd\\_cg.asp?Cat=gd](http://www.inee.org.br/forum_sobre_gd_cg.asp?Cat=gd). Acesso em: 9 maio. 2023.

SOCOL, F. J. *et al.* Desafios Para Implementação da Geração Distribuída de Energia no Brasil: Uma Revisão Integrativa da Literatura. **Brazilian Journal of Production Engineering**, [S. l.], v. 2, n. 3, p. 31–43, 23 dez. 2016.

SVARC, J. Solar Panel Construction. **Clean Energy Reviews**, [S. l.], 20 mar. 2020. Disponível em: <https://www.cleanenergyreviews.info/blog/solar-panel-components-construction>. Acesso em: 27 jul. 2023.

TAIRA, D. *et al.* Análise multicritério para seleção de alternativas renováveis para geração de energia elétrica em Roraima (Brasil). **Sustentabilidade: Diálogos Interdisciplinares**, [S. l.], v. 3, p. 1–16, 18 nov. 2022.

TARIFA De Energia Versus Custo Nivelado De Um SFV. **Sun Future**, [S. l.], 2018. Disponível em: <https://www.sunfuture.com.br/tarifa-de-energia-versus-custo-nivelado-de-um-sfv/>. Acesso em: 17 jul. 2023.

TERRIN, K. A. P.; BLANCHET, L. A. Direito de energia e sustentabilidade: uma análise dos impactos negativos das usinas hidrelétricas no Brasil. **Revista Videre**, [S. l.], v. 11, n. 22, p. 47–63, 3 dez. 2019.

TOBIN, L. L. *et al.* Characterising dye-sensitised solar cells. **Optik**, [S. l.], v. 122, n. 14, p. 1225–1230, 1 jul. 2011.

UECKER, R. The historical development of the Czochralski method. **Journal of Crystal Growth**, [S. l.], v. 401, p. 7–24, 1 set. 2014.

UM MILHÃO estão sem energia elétrica na Amazônia, mostra IEMA. **Instituto de Energia e Meio Ambiente (IEMA)**, 25 nov. 2019. Disponível em: <https://energiaeambiente.org.br/um-milhao-estao-sem-energia-eletrica-na-amazonia-20191125>. Acesso em: 29 jul. 2023.

URBANETZ, I. *et al.* Current Panorama and 2025 Scenario of Photovoltaic Solar Energy in Brazil. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, v. 62, 1 jan. 2019.

VIEIRA, D. **Método para determinação do tipo de incentivo regulatório à geração distribuída solar fotovoltaica que potencializa seus benefícios**

**técnicos na rede**. 2016. 186p. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Universidade de Brasília, Brasília, DF, 17 nov. 2016.

VILLALVA, M. G.; GAZOLI, J. R. **Energia Solar Fotovoltaica - Conceitos e Aplicações**. 2. ed. São Paulo: Érica Ltda, 2012.

ZANATTA, A. R. The Shockley–Queisser limit and the conversion efficiency of silicon-based solar cells. **Results in Optics**, [S. l.], v. 9, p. 100320, dez. 2022.