



## *Uso de energia renovável de usinas fotovoltaicas (UFVs) no Brasil - aspectos técnicos e ambientais*

Recebido em: 30/01/2024

Aceito em: 04/02/2024

 10.46420/9786585756266cap2

Victória Alves Nogueira 

Stanley Schettino 

### INTRODUÇÃO

As energias renováveis estão ganhando popularidade com o objetivo principal de diminuir a dependência dos combustíveis fósseis e reduzir os efeitos da mudança climática. Nesse contexto, a energia solar fotovoltaica tem se destacado por ser uma via ambientalmente sustentável (Cunha et al., 2018). O princípio por trás do funcionamento dos sistemas de energia solar fotovoltaica é o efeito fotovoltaico. A conversão da luz solar em eletricidade ocorre quando a radiação eletromagnética do sol incide sobre uma célula formada por materiais semicondutores, com propriedades específicas, como o silício (Lima et al., 2019).

No Brasil, conforme a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), a utilização da luz solar para a produção de energia elétrica está em franca expansão. A fonte de energia solar fotovoltaica, no ano de 2023, foi a segunda maior em potência instalada, atrás somente das hidrelétricas (Aneel, 2024). A associação de fatores como os altos índices de radiação solar recebida e a liderança no mercado mundial na produção de silício, alavancam o uso de sistemas fotovoltaicos no País (América do Sol, 2024).

A produção de eletricidade a partir de luz solar por sistemas fotovoltaicos oferece inúmeros benefícios que colaboram com a redução das emissões de gases de efeito estufa e contribuem para a diminuição da dependência de fontes de energia não renováveis (Rüther et al., 2005). Apesar disso, é importante compreender que, embora em menor grau do que as fontes de energia tradicionais, os sistemas fotovoltaicos podem causar efeitos negativos ao meio ambiente, principalmente, ao final da vida útil dos materiais empregados, quando há a necessidade de substituição e descarte desse material.

É notório que atualmente no Brasil a tecnologia fotovoltaica vem sendo mais utilizada em sistemas híbridos de geração de energia conectados à rede convencional de energia e, principalmente, em combinação com a energia eólica. Apesar de ser uma fonte energética alternativa com uso bastante disseminado, ainda enfrenta grandes gargalos devido, principalmente, aos elevados custos para financiamento dos painéis solares (Oliveira & Araújo Filho, 2021).

A desvantagem é que as células fotovoltaicas necessitam de tecnologias sofisticadas para a sua fabricação, o custo do investimento, como citado, ainda é elevado e o rendimento real de conversão de

um módulo é reduzido, em relação ao custo de investimento (Naruto, 2017). Existem fatores externos que interferem na energia produzida associados ao índice de radiação, temperatura, quantidade de nuvens, dentre outros e um painel solar consome uma considerável quantidade de energia para ser fabricado, sendo que pode ser maior a energia para a fabricação de um painel solar, que a energia gerada por ele (Campos & Alcantara, 2016). Todavia, Magnus et al. (2016) já enfatizavam que a tendência é de redução dos custos dessa tecnologia e o cenário ser mais otimista que conservador.

A implantação da energia solar fotovoltaica dispõe de normas e regulações, sobretudo do desempenho dos serviços prestados, revisão e reajustes de tarifas, procedimentos para regulação e controle social, atendimento ao público, condições contratuais entre poder concedente (município) e empresas prestadora dos serviços que ainda estão em construção.

Para tanto, ainda são necessárias pesquisas sobre essa tecnologia e averiguar como ocorrem os efeitos desta com o ambiente: impactos ambientais devido à energia solar na manufatura de placas solares; impactos ambientais no descarte de equipamentos de energia solar; impactos ambientais da energia solar no processo operacional e impactos ambientais na manufatura de construção de usinas e sob aspectos bióticos e abióticos do meio ambiente.

Diante disso, o objeto deste trabalho foi avaliar o cenário no Brasil quanto às discussões sobre Energia Solar Fotovoltaica e seus impactos ambientais.

## **MATERIAIS E MÉTODOS**

O desenvolvimento deste trabalho baseou-se em pesquisas bibliográficas, aqui esclarecida como o ato ou efeito de compreender sobre determinado assunto ou tema através de referências já existentes em bases de dados nacionais. A revisão sistemática é uma forma de pesquisa que utiliza como fonte de dados a literatura sobre determinado tema, definindo seu método como: uma pergunta clara, a definição de uma estratégia de busca, o estabelecimento de critérios de inclusão e exclusão dos estudos e uma análise criteriosa da qualidade da literatura selecionada (Sampaio & Mancini, 2007).

### ***Procedimentos metodológicos***

O estudo foi baseado em uma revisão na literatura, compreendendo o período de 2015 a 2023, sobre a geração e uso da energia solar fotovoltaica no Brasil, com estudos de casos mais significativos para elucidar os impactos ambientais, e programas para o desenvolvimento das fontes renováveis existente no país, com destaque a algumas oportunidades, desafios, assim como sugestões de melhoria na legislação.

Dividiu-se a metodologia nas seguintes partes:

- i. avaliação das questões relacionadas à geração e uso da energia solar fotovoltaica no Brasil, comparando-se seus procedimentos, etapas e situação atual no Brasil;
- ii. análise dos impactos ambientais da implantação da energia fotovoltaica no Brasil e

- iii. descrição da evolução da energia renovável solar nas últimas décadas no Brasil e suas entraves.

### ***Coleta de dados***

Para realizar o estudo foram utilizadas pesquisas por artigos científicos em bases de dados como SCOPUS e SCIELO, a partir dos critérios de inclusão: publicações nacionais e internacionais na forma de artigos científicos originais e artigos publicados em periódicos avaliados por pares.

Para a busca assertiva foram utilizadas as seguintes palavras chaves: energia fotovoltaica (*photovoltaic energy*), sustentabilidade (*sustainability*), impacto ambiental (*environmental impact*), ciclo de vida do produto (*product life cycle*), inovações tecnológicas (*technological innovations*) e legislação ambiental (*environmental legislation*).

Foram analisadas as resoluções legislativas sobre a energia solar fotovoltaica, sites de empresas no setor e das agências e prestadoras de serviços. A coleta de dados foi realizada durante o período de junho a dezembro de 2023.

## **RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### ***Evolução da energia fotovoltaica nas últimas décadas no Brasil***

A descoberta da conversão de energia solar em energia elétrica ocorreu no século XIX. Em 1839 o cientista físico Edmond Becquerel observou pela primeira vez o efeito fotovoltaico de uma solução química envolvendo selênio no *Bell Telephone Laboratories*, situado nos Estados Unidos, que foi criada a primeira célula fotovoltaica capaz de gerar energia para operar equipamentos elétricos. As primeiras células solares a base de selênio sólido surgiu em 1877, com eficiência energética inferior a 1%. Foram somente 1953 que as células fotovoltaicas se tornaram viáveis, quando foram produzidas a partir do silício. Por ser um material abundante na natureza, com elevada eficiência fotovoltaica (Oliveira & Araújo Filho, 2021).

Em 1958, um painel solar de 1W (Watt) foi anexado ao satélite *Vanguard I*, enviado ao espaço, para alimentar seus rádios. Esta tecnologia entrou em uso pela primeira vez e a partir daquele ano, começaram a serem implantados os primeiros sistemas fotovoltaicos feitos para residências, estabelecimentos e meios de transporte, como navios, carros e aviões.

A capacidade de energia solar fotovoltaica, em 1983, era dominante 15 MWp e, em 1995 e 1997 já havia saltado para 579 MWp e 941 MWp, respectivamente, crescendo em ritmo acelerado e constante desde então, até atingir cerca de 38 GWp em 2010. Nessa ocasião ainda eram poucos sistemas fotovoltaicos no Brasil, com somente 7 MW em 2012, ano da publicação da resolução REN 482/2012 e início de uma expansão considerável dessa forma de energia no país (ABSOLAR, 2023).

Magnus et al. (2016) em seus estudos retratam o cenário da tecnologia da energia solar no Brasil e sua evolução do mercado dos sistemas fotovoltaicos frente a grandes avanços tecnológicos. Indicam

que as evidências apontam a importância da inclusão deste tipo de geração a curto e em longo prazo, o que propicia a evolução da matriz elétrica nacional de forma diversificada e sustentável.

Ademais, houve um elevado crescimento em relação à geração fotovoltaica nos últimos anos, mas foi de modo centralizado, com geração distribuída de apenas 190 MW (16%) ao fim de 2017 e 16,39 GW (68%) em 2022, contra geração centralizada de 968 MW (84%) ao fim de 2017 e 7,61 GW (32%) em 2022 (ABSOLAR, 2023). Embora, já tem mais 4,51 GW em construção e projetos de mais 73,08 GW, totalizando aproximadamente 87,00 GW (sic.) de potência outorgada.

Atualmente, no Brasil considerando a micro e minigeração distribuída de fonte solar fotovoltaica totaliza 98,5% da potência instalada, e 99,90% das conexões com potência de 16,39 GW e 1.576.940 sistemas solares fotovoltaicos conectados ao SIN (ABSOLAR, 2023).

Segundo o RAPEEL (Relatório de Acompanhamento de Empreendimentos de Geração de Energia Elétrica, emitido pela ANEEL), a partir do terceiro semestre de 2022 houve uma escala gradativa de geração centralizada, com número de usinas passando de 980 em maio 2022 com CEG (código de identificação do empreendimento de geração de energia elétrica necessário para usinas acima de 5 MW) para 1375 usinas em setembro de 2022 com CEG, um aumento de 395 usinas registradas.

### ***Os impactos ambientais associados a geração de energia fotovoltaica***

A energia solar por ser uma fonte de conversão direta da energia solar em energia elétrica pode ser considerada renovável, inesgotável, não poluente, silenciosa, eficiente e não prejudicial ao meio ambiente (Rüther et al., 2005), apresenta os menores impactos ambientais se comparado as fontes energéticas, sem emissão de poluentes na sua geração elétrica ou durante sua utilização.

Entretanto, cabe ressaltar que, embora mínimos, o processo produtivo da geração de energia solar ainda apresenta alguns impactos ao meio ambiente, tais como: impactos ambientais devido à energia solar na manufatura de placas solares; impactos ambientais no descarte de equipamentos de energia solar; impactos ambientais da energia solar no processo operacional e impactos ambientais na construção e manufatura de usinas.

Rosa e Gasparin (2016) ressaltam que embora a energia solar fotovoltaica seja tida como uma energia limpa, como qualquer outra atividade humana possui aspectos negativos relacionados aos impactos ambientais. Relatam que as emissões de produtos decorrentes do processo de preparação da matéria prima, principalmente a purificação do silício, além das emissões ligadas à produção de energia nos processos de fabricação, transporte, instalação, operação e manutenção dos sistemas fotovoltaicos.

Assim, esses mesmos autores mencionam a necessidade de ocupação de área para instalação dos sistemas que não possam ser instalados em estruturas já existentes como telhados. E ainda, a indigência do correto descarte de materiais, neste contexto é salutar cumprir as legislações pertinentes à área ambiental em cada etapa do processo, da fabricação dos componentes ao descarte após a vida útil do sistema.

No estudo de Barbosa Filho et al. (2015) ficam claros os impactos negativos da geração de energia fotovoltaica no meio ambiente, embora apontam que os sistemas fotovoltaicos não emitem poluentes durante sua operação e são muito promissores como uma alternativa energética sustentável, entretanto, geram impactos ambientais, e o mais significativo do sistema fotovoltaico para geração de eletricidade é provocado durante sua fabricação e montagem. Ressaltam que existem impactos relacionados ainda a questões da área de implantação. A maioria dos impactos negativos previstos para a fase de implantação do empreendimento tem efeito temporário e praticamente não ultrapassa as fronteiras do mesmo (Barbosa Filho et al., 2015). Todavia, afirmam os autores, os impactos positivos do uso da energia solar apresentam seus efeitos postergados após sua implantação.

Ruther et al. (2005) já diziam sobre as vantagens dos sistemas fotovoltaicos integradas às edificações urbanas e conectadas à rede, os quais oferecem diversas vantagens para o sistema elétrico de um país, muitas delas relacionadas à redução de custos e que ainda não são consideradas ou quantificadas, citando:

- redução de perdas por transmissão e distribuição de energia, já que a eletricidade é consumida onde é produzida;
- redução de investimentos em linhas de transmissão e distribuição;
- baixo impacto ambiental;
- fornecimento de maiores quantidades de eletricidade nos momentos de maior demanda (ex.: o uso de ar-condicionado é maior ao meio-dia no Brasil, quando há maior incidência solar e, conseqüentemente, maior geração elétrica solar);
- a não exigência de área física dedicada; e
- rápida instalação devido à sua grande modularidade e curtos prazos de instalação, aumentando assim a geração elétrica necessária em determinado ponto ou edificação.

Destaque também que esse tipo de sistema pode contribuir para refrear os impactos das mudanças climáticas e para maior controle de gastos de finanças pessoais reduzindo em até 95% na conta de luz, a economia proporcionada por essa tecnologia é suficiente não só para pagar sua aquisição e instalação, mas também para gerar rentabilidade por muito tempo, já que sua vida útil é de mais de 20 anos. Com a economia na fatura, o valor pago pelo sistema é compensado entre três e cinco anos após a instalação e a rentabilidade é gerada por mais de 15 anos (NEOENERGIA, 2023).

A Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (Absolar) estima que essa fonte de energia solar represente apenas 1,9% da matriz elétrica no Brasil, ainda da energia hídrica, principal fonte de energia utilizada no país, com 59,3%. Todavia, a energia solar já cria aproximadamente 357 mil empregos e gera investimentos em torno de R\$ 5 bilhões em 2022, no Brasil (ABSOLAR, 2023). Fato que promove benefícios diretos para as comunidades locais por levar recursos financeiros e emprego em regiões muito vulneráveis, como o aluguel das terras, a arrecadação de impostos em prefeituras locais e a utilização da

mão de obra local nos projetos. Assim, ajudam a melhorar as infraestruturas de transporte como estradas e pontes, além de incluir programas de responsabilidade social corporativa e compensação ambiental.

Pehl et al. (2017) em uma pesquisa da *Nature Energy* demonstram que a energia solar é a que menos gera impactos à natureza, fornece energia de baixo carbono e as implicações para as emissões futuras do ciclo de vida por unidade diferem substancialmente entre as tecnologias de energia via combustível fóssil. Para 2050, as projeções de emissões de ciclo de vida de usinas de captura e sequestro de carbono de combustível fóssil foram de 78–110 gCO<sub>2</sub>eq kWh<sup>-1</sup>, em comparação com 3,5-12 gCO<sub>2</sub>eq kWh<sup>-1</sup> para energia nuclear, eólica e solar.

As emissões de ciclo de energia hidrelétrica e bioenergia são substanciais (~100 gCO<sub>2</sub>eq kWh<sup>-1</sup>), mas altamente incertas. Esses autores relatam que as emissões cumulativas atribuíveis ao aumento da energia de baixo carbono, exceto a hidrelétrica, são pequenas em comparação com as emissões setoriais diretas de combustíveis fósseis e o orçamento total de carbono. Enquanto o carvão libera, em média, 109 gCO<sub>2</sub>e/kWh, o gás natural 78 gCO<sub>2</sub>e/kWh e a hidroelétrica 97 gCO<sub>2</sub>e/kWh, a solar, a eólica e a nuclear emitiriam cerca de 4 gCO<sub>2</sub>e/kWh (Pehl et al., 2017).

Uma das questões preocupantes dos líderes mundiais, instituições e organizações sociais são resguardar a meta limite do aquecimento global em até no máximo 1,5°C, seguindo o Acordo de Paris, firmado em 2015. Segundo a Agência Internacional de Energia Renovável (IRENA), a energia solar tem potencial para alcançar 21% das reduções de emissões de CO<sub>2</sub> até 2050, considerando a implantação acelerada dessa fonte no mundo e a eletrificação das atividades (Pehl et al., 2017).

### ***Os impactos ambientais associados a produção das placas fotovoltaicas***

A geração de energia solar, assim como qualquer empreendimento de produção de eletricidade, gera uma série de impactos ambientais ao longo de seu ciclo de vida. No entanto, uma análise ampla revela que, embora existam impactos negativos associados aos sistemas fotovoltaicos, eles tendem a ser mitigados quando comparados às vantagens desses sistemas, como observado por Turney e Fthenakis (2011).

Uma das vantagens dos painéis fotovoltaicos é que eles representam uma fonte de energia que não depende de combustíveis fósseis, o que é positivo na luta contra as mudanças climáticas. No entanto, a produção desses painéis não é isenta de desafios. Os materiais utilizados na fabricação, como silício e alumínio, são finitos e sua extração pode causar impactos sociais e ambientais significativos, como indicado por Anselmo (2019). Além disso, o processo de fabricação em si requer uma grande quantidade de energia e recursos, incluindo água, metais, plásticos e vidro. É relevante mencionar que a manufatura das placas solares, componentes essenciais dos sistemas fotovoltaicos, consome aproximadamente 85% da energia total no processo de fabricação da tecnologia fotovoltaica (Yu et al., 2022).

Os impactos ambientais associados à energia solar abrangem escalas que vão desde a regional até a global. Isso envolve considerações sobre o uso da terra, consumo de água e geração de resíduos.

Algumas etapas da produção de painéis solares também envolvem o uso de produtos químicos tóxicos, como ácidos e solventes, resultando em resíduos sólidos e líquidos prejudiciais ao ambiente. A má gestão dessas substâncias pode levar à contaminação do solo e da água, caso não sejam adequadamente tratadas.

Outra preocupação relevante é o transporte global de painéis solares e seus componentes, frequentemente associado a emissões significativas de gases de efeito estufa, especialmente quando os produtos são fabricados em um local e consumidos em outro distante (Anselmo, 2019).

No entanto, é importante destacar que, apesar desses impactos, a energia solar ainda se destaca como uma opção de geração de eletricidade com um impacto ambiental geralmente menor se comparado a fontes não renováveis, como o carvão, que emitem poluentes durante a produção de eletricidade (Yu et al., 2022). A análise dos impactos ambientais associados à energia solar é fundamental para desenvolver estratégias que minimizem seus efeitos adversos e promovam uma transição sustentável para fontes de energia mais limpas e renováveis.

### ***Os desafios ambientais do descarte das placas fotovoltaicas e outros materiais utilizados na produção de energia solar***

No término da vida útil dos equipamentos de energia solar, como as placas solares e inversores, é altamente recomendado que os produtores e consumidores considerem a possibilidade de reutilizá-los em vez de descartá-los. Infelizmente, muitas pessoas optam pelo descarte desses materiais, o que contribui para o aumento dos impactos ambientais. Quando o descarte se torna inevitável, é de suma importância obter informações sobre o método mais apropriado para realizá-lo, adaptado às regulamentações e disponibilidades locais, a fim de garantir a segurança da população e a preservação do meio ambiente. Além disso, é importante notar que existem resíduos, como os radioativos, para os quais ainda não existem métodos de descarte sem riscos devido à sua natureza contaminante (Yu et al., 2022).

Após o término da vida útil dos painéis solares, é crucial proceder ao seu descarte adequado. Nesse sentido, diversas alternativas estão disponíveis, como o tratamento como lixo eletrônico, incineração, reutilização de componentes, reciclagem ou encaminhamento para aterros. A escolha da melhor opção varia conforme vários fatores, incluindo a distância entre o local de utilização e o local de descarte, a infraestrutura disponível em cada cidade ou país para essas atividades, os custos associados, a complexidade técnica exigida para reciclar cada componente e a existência de mercados que possam reutilizar produtos usados (Lunardi et al., 2018).

O Brasil ainda enfrenta desafios no que diz respeito à reciclagem, ficando atrás de outros países nesse aspecto. Muitos resíduos são descartados inadequadamente, e não há uma exploração técnica nem financeira eficaz desses produtos. No entanto, o estudo enfatiza que os painéis de silício cristalino podem ser praticamente completamente reciclados, em vez de serem considerados lixo eletrônico, uma vez que essa tecnologia é relativamente recente e que a maioria dos painéis ainda está dentro de sua vida útil de

aproximadamente 25 anos, é de extrema importância promover ativamente a reciclagem desses produtos (Dias, 2015).

### ***Políticas públicas para expansão da energia renovável alternativa no Brasil***

Muitos autores na literatura evidenciam a falta de incentivo fiscal das autoridades brasileiras na ampliação do uso de energia fotovoltaica solar, que faz com que a alternativa pareça pouco acessível às famílias (Cardoso et al., 2021; Cunha et al., 2018; Magnus et al., 2016). Além disso, empresas do setor de energia que podem perder espaço no mercado pressionam o governo com a finalidade de dificultar o crescimento da geração de energia solar. Apesar disso, o custo dessa tecnologia está em constante queda, e já existem formas de financiar as aquisições.

Em discussão no Congresso Nacional, atualmente, se encontra o Projeto de Lei (PL) nº 5.829/2019, que garante segurança jurídica aos consumidores que possuem sistema de geração de energia própria. O propósito do projeto é fortalecer a diversificação da matriz elétrica brasileira e a segurança do suprimento elétrico em tempos de crise hídrica e bandeira vermelha decorrente do uso de termelétricas fósseis.

O PL nº 5.829/2019 cria o marco legal para a geração própria de energia dos brasileiros a partir de fontes renováveis. A iniciativa busca aliviar os problemas da crise hídrica no setor elétrico, ajudando a reduzir os gastos com a conta de luz. O acordo foi votado pela Câmara dos Deputados em agosto de 2021 e depois seguiu para o Senado Federal.

Cunha et al. (2018) citam que a produção de energia elétrica, oriunda de energia fotovoltaica solar no Brasil gerada, que não é consumida imediatamente, é revertida e novamente injetada a rede. Assim sendo, fica convertida em crédito de energia junto à distribuidora da mesma. Este crédito deverá ser utilizado pelo consumidor em até 60 meses e é tributado.

O consumidor possuidor de um sistema fotovoltaico de capacidade micro ou mini geração paga ICMS é devedor de uma energia que ele mesmo produziu e emprestou a rede. Isso reflete numa desmotivação da aquisição e implementação desse sistema, pois através desse ônus que está embutido, o valor referente à tarifa com o sistema fotovoltaico ainda corresponde entre 35 a 40% do valor que geralmente é pago, o que torna desinteressante o seu investimento (Rosa & Gasparin, 2016).

Segundo Severino e Oliveira (2010) a tarifa elétrica (R\$/kWh), atualmente, não é formada apenas pelo preço da energia, mas também por encargos e tributos, entre eles estão o PIS, CONFINS e ICMS, são tarifas exoneradas a conta de luz e faz com que ela, seja no mínimo 50% do valor do custo da energia consumida. Em alguns estados do Brasil há isenção do ICMS, busca-se esse incentivo para energia solar. O incentivo teve início no ano de 2015 através de uma ação da ABSOLAR com os representantes de governos estaduais do Brasil para isentar o ICMS da energia de micro ou mini geração (Absolar, 2021).

Minas Gerais vem sendo um estado referência na realização de ações que visa à desoneração da conta de energia. Tais medidas tiveram início por volta do ano de 2012, foi adotada a isenção com o

intuito de realizar um avanço nessa tecnologia. Em 2015 negociou-se junto ao Secretaria Estadual da Fazenda de todos os estados brasileiros para que haja uma adequação desses incentivos, e desse modo, ocorreram avanços nas medidas que incentivam a exploração da energia fotovoltaica. Esse convênio foi adotado pelos estados do Mato Grosso, Distrito Federal, Maranhão e pela Bahia, esse convênio do ICMS, de número 16/2005.

É necessário métodos e políticas a serem trabalhadas no Brasil para gerar o aumento da utilização e exploração do seu potencial solar para a produção de energia, como apontam Cunha et al. (2018):

- a) Como ocorrido no Japão deve ser realizado incentivos de natureza fiscal e uma desoneração monetária, para que se possa incentivar o investidor a cada vez mais optar por esse tipo de produto;
- b) Deve ser realizado um incentivo através de verbas e redução de custos fiscais cujo objetivo é promover a pesquisa do setor e deve ser feita uma inovação, quanto a tecnologia de aprimorar a produção nacional do Brasil;
- c) É papel do governo incentivar de todos os meios possíveis as indústrias responsáveis pela produção de células solares e de módulos fotovoltaicos;
- d) Promover um incentivo ao mercado de consumo como: taxas mais baixas e isenções fiscais, bem como informações das vantagens de se adotar esse tipo de processo.

A instalação de sistemas fotovoltaicos apresenta fundamentada na Lei Estadual 20.849, “Lei Solar”, de 08/08/2013, que incentiva e estimula o uso de energia solar fotovoltaica em áreas urbanas e rurais com o intuito de reduzir as demandas de energia elétrica de fontes convencionais nos horários de pico e diminuir a emissão de gases de efeito estufa na atmosfera (Governo do Estado de Minas Gerais, 2013).

Em contrapartida Cardoso et al. (2021) afirmam que as evidências sugerem cautela em mudanças do marco legal do segmento de energias fotovoltaicas solar que são ainda incipientes no país, mesmo que gera energia limpa e renovável, e com um enorme potencial de crescimento. Esses autores apresentaram os possíveis impactos das alterações dos cenários de preços e tarifas na atratividade do investimento na geração distribuída de energia solar fotovoltaica, podendo ser facilmente adaptado para avaliar projetos de plantas industriais de diferentes portes em regiões com distintos níveis de irradiação solar.

O incentivo que pode impulsionar o desenvolvimento da fonte solar no país, segundo Rosa e Gasparin (2016) é o Plano Decenal de Expansão de Energia – PDEE (2013 – 2023) que projeta a queda proporcional da geração de energia por fonte hidráulica, frente a um crescimento de outras fontes renováveis, com destaque para energia eólica. O PDEE projeta que a energia solar terá um aumento de capacidade instalada de 19 MWp (outorgados atualmente) para 3.500 MWp (548 MW médios) em 2023.

Estudos feitos pela Empresa de Pesquisa Energética - EPE, afirmam que somente consumidores com alto poder aquisitivo, com consumo médio de 400 a 1.000 kWh/mês possuirão condições financeiras para implantação de sistemas fotovoltaicos em um primeiro momento. Vislumbra ainda que no ano de 2023, 21 mil consumidores do segmento comercial e 140 mil do segmento residencial estarão utilizando

a geração fotovoltaica. Em percentual, ambos os segmentos representariam 0,33% de unidades consumidoras utilizando a fonte (EPE, 2012).

Rosa e Gasparin (2016) ressaltam a necessidade de incentivos fiscais principalmente no âmbito federal, como abatimento de uma parcela dos custos de implantação de sistemas fotovoltaicos no cálculo de imposto de renda devido para pessoas físicas e jurídicas. Outro incentivo seria uma atuação forte nos estados e municípios para estabelecerem um abatimento sobre o Imposto Sobre Serviço de Qualquer Natureza – ISSQN que possui incidência sobre as instalações de sistemas fotovoltaicos e também no Imposto Predial e Territorial Urbano – IPTU de imóveis que investirem na geração de fonte solar.

Destarte, mas ainda fundamental é a realização de campanhas para conscientização da sociedade brasileira no intuito de mostrar de forma clara e concisa os benefícios da geração distribuída e também da energia solar fotovoltaica, com ênfase para as questões ambientais, econômicas e também de planejamento energético.

## CONCLUSÕES

É possível concluir que a geração de energia solar fotovoltaica possui uma série de impactos ambientais a serem considerados. Embora seja uma fonte de energia renovável e ambientalmente amigável em comparação com fontes de energia não renovável, ainda apresenta desafios que devem ser enfrentados para tornar sua utilização mais sustentável.

Primeiramente, é importante reconhecer que a energia solar fotovoltaica tem vantagens significativas, como a redução das emissões de carbono, a diminuição da dependência de combustíveis fósseis e a capacidade de contribuir para a mitigação das mudanças climáticas. Além disso, ela promove a criação de empregos e investimentos nas comunidades locais, melhorando a infraestrutura e proporcionando benefícios econômicos.

No entanto, os impactos ambientais associados à produção das placas fotovoltaicas e outros componentes dos sistemas solares devem ser gerenciados. A extração de materiais como o silício e o alumínio, bem como o processo de fabricação, consomem uma quantidade significativa de recursos naturais e energia. O transporte global desses materiais também pode gerar emissões de gases de efeito estufa. Portanto, é fundamental buscar formas de minimizar esses impactos, como o desenvolvimento de técnicas de produção mais limpas e a redução das emissões no transporte.

Além disso, o descarte correto dos painéis solares e outros componentes no final de sua vida útil é crucial. Opções como reciclagem, reutilização e tratamento como lixo eletrônico podem ser adotadas para evitar a contaminação do meio ambiente e maximizar a vida útil desses materiais. É importante promover a conscientização sobre o descarte adequado e trabalhar para desenvolver políticas e regulamentações que incentivem práticas sustentáveis.

Em suma, a energia solar fotovoltaica oferece benefícios significativos em termos de redução de emissões e sustentabilidade, mas é importante reconhecer e abordar os impactos ambientais associados

a essa tecnologia. A abordagem aqui apresentada contribui para a compreensão desses desafios e oferece insights importantes sobre como avançar em direção a uma transição energética mais sustentável e responsável.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Absolar - Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (2021). Energia solar fotovoltaica: como funciona, vantagens, vantagens e principais desafios para o futuro. Disponível em: <https://cutt.ly/GwZm0W1k>. Acesso em: 13 de julho de 2023.
- Absolar - Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (2023). Panorama da energia solar fotovoltaica no Brasil e no mundo. Versão 01/2023. Disponível em: <https://www.absolar.org.br/mercado/infografico/>. Acesso em: 16 de agosto de 2023.
- ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica (2024). Relatórios e Indicadores. Disponível em: <https://www.gov.br/aneel/pt-br/centrais-de-conteudos/relatorios-e-indicadores>. Acesso em: 19 de janeiro de 2024.
- América do Sol. Benefícios e Custos da Energia Solar (2024). Disponível em: <https://americadosol.org/beneficios-e-custos-da-energia-solar/>. Acesso em 19 de janeiro de 2024.
- Anselmo, A. H. (2019). Reciclagem ou destinação final dos painéis fotovoltaicos aplicados em geração de energia ao final do ciclo de vida. Monografia (Pós-graduação em Energias Renováveis) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- Barbosa Filho, W.P., Ferreira, W.R., Azevedo, A.C.S., Costa, A.L., Pinheiro, R.B. (2015). Expansão da energia solar fotovoltaica no Brasil: impactos ambientais e políticas públicas. *Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental*, 4, 628-642. DOI: <https://doi.org/10.19177/rgsa.v4e02015628-642>
- Campos, M.S., Alcantara, L.D.S. (2016). Interpretação dos efeitos de tempo nublado e chuvoso sobre a radiação solar em Belém/PA para uso em sistemas fotovoltaicos. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 31(4), 570-579. DOI: <https://doi.org/10.1590/0102-7786312314b20150065>
- Cardoso, D.S., Locatelli, P.S., Ramalho, W., Asgary, N. (2021). Geração distribuída de energia solar fotovoltaica: impactos da nova proposta de Regulamento da Aneel na atratividade de investimentos. *Revista de Administração da UFSM*, 14, 423-442. DOI: <https://doi.org/10.5902/1983465961993>
- Cunha, D.C., Santos, P.H.F., Freitas, D.A.C. (2018). Energia solar fotovoltaica no Brasil. *Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento*, 5(11), 148-161.
- Dias, P. R. (2015). Caracterização e reciclagem de materiais de módulos fotovoltaicos (painéis solares). Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

- Epe - Empresa de Pesquisa Energética (2012). Análise da inserção da geração solar na matriz elétrica brasileira. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes>. Acesso em 14 de junho de 2023.
- Governo do Estado de Minas Gerais (2013). Lei Estadual N° 20.849, de 8 de agosto de 2013 - Institui a política estadual de incentivo ao uso da energia solar. Belo Horizonte: Imprensa Oficial do Estado de Minas Gerais, Publicado no DOE - MG em 9 ago 2013.
- Lima, A.A., Menezes, N.P., Santos, S., Amorim, B., Thomazi, F., Zanela, F., Heilmann, A., Burkarter, E., Dartora, C.A. (2019). Uma revisão dos princípios da conversão fotovoltaica de energia. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 42, e20190191. DOI: <https://doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2019-0191>
- Lunardi, M.M., Alvarez-Gaitan, J.P., Bilbao, J.I., Corkish, R. (2018). Comparative life cycle assessment of end-of-life silicon solar photovoltaic modules. *Applied Sciences*, 8(8), 1396. DOI: <https://doi.org/10.3390/app8081396>
- Magnus, D.M., Becker, D.P., Tavares, A.A. (2016). Estudo da inserção de usinas fotovoltaicas na matriz elétrica brasileira – 2015-2050. *Revista Vinci-Periódico Científico do UniSATC*, 1(1), 75-98.
- Naruto, D. T. (2017). Vantagens e desvantagens da geração distribuída e estudo de caso de um sistema solar fotovoltaico conectado à rede elétrica. 97 f. TCC (Graduação)-Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- Neoenergia. (2023) Energia Solar. Disponível em: <https://www.neoenergia.com/pt/energia-solar>. Acesso em: 13 de julho de 2023.
- Oliveira, E.A.F., Araújo Filho, J.G. (2021). Perspectivas da geração e aplicação da energia solar fotovoltaica no Brasil: uma revisão da literatura (2015-2019). *Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais*, 12, 5, 435-450.
- Pehl, M., Arvesen, A., Humpenöder, F., Popp, A., Hertwich, E G., Luderer, G. (2017). Understanding future emissions from low-carbon power systems by integration of life-cycle assessment and integrated energy modelling. *Nature Energy*, 2, 12, 939-945. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41560-017-0032-9>
- Rosa, A., Gasparin, F. P. (2016). Panorama da energia solar fotovoltaica no Brasil. *Revista Brasileira de Energia Solar*, 7(2), 140-147. DOI: <https://doi.org/10.59627/rbens.2016v7i2.157>
- Rüther, R., Knob, P., Dacoregio, M.M., Ricardo, R.V., Parecy, E., Reque, W., Jardim, C.S. (2005). Avaliação do impacto da geração distribuída utilizando sistemas solares fotovoltaicos integrados à rede de distribuição. 2005. Disponível em: <https://cutt.ly/ZwZm3NrW>. Acesso em: 14 de outubro de 2023.
- Sampaio, R., Mancini, M. (2007). Estudos de revisão sistemática: um guia para síntese criteriosa da evidência científica. *Brazilian Journal of Physical Therapy*, 11, 83-89. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1413-35552007000100013>

- Severino, M., Oliveira, M. (2010). Fontes e tecnologias de geração distribuída para atendimento a comunidades isoladas. *Energia, Economia, Rotas Tecnológicas: textos selecionados, Palmas, ano, 1*, 265-322.
- Turney, D., Fthenakis, V. (2011). Environmental impacts from the installation and operation of large-scale solar power plants. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(6), 3261-3270. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.04.023>
- Yu, H.F., Hasanuzzaman, M., Rahim, N.A., Amin, N., Nor Adzman, N. (2022). Global challenges and prospects of photovoltaic materials disposal and recycling: a comprehensive review. *Sustainability*, 14(14), 8567. DOI: <https://doi.org/10.3390/su14148567>